



HAL
open science

Conception et contrôle automatique d'un ombilical instrumenté pour robots sous-marins

Ornella Tortorici

► **To cite this version:**

Ornella Tortorici. Conception et contrôle automatique d'un ombilical instrumenté pour robots sous-marins. Automatique / Robotique. Université de Toulon, 2021. Français. NNT : 2021TOUL0024 . tel-04691916v2

HAL Id: tel-04691916

<https://theses.hal.science/tel-04691916v2>

Submitted on 9 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE / UNIVERSITÉ DE TOULON
pour le grade de **DOCTEUR en Automatique, signal,
productique, robotique**

École doctorale 548 Mer et Science

présentée par

Ornella TORTORICI

préparée au laboratoire COSMER – EA 7398
COncception de Systèmes Mécaniques et Robotiques

Conception et contrôle automatique d'un ombilical instrumenté pour robots sous-marins.

**Thèse soutenue à Toulon
le 13 décembre 2021**

devant le jury composé de :

Benoit CLEMENT

Professeur des Universités, l'ENSTA Bretagne / *Rapporteur*

Vincent CREUZE

MCf-HDR, Université de Montpellier / *Rapporteur*

Gérard POISSON

Professeur des Universités, IUT de Bourges / *Examineur*

Vincent HUGEL

Professeur des Universités, Université de Toulon /
Directeur de thèse

Hervé BARTHELEMY

Professeur des Universités, Université de Toulon /
Codirecteur de thèse

Cédric ANTHIERENS

MCf-HDR, Université de Toulon / *Co-encadrant de thèse*

Elisabeth MURISASCO

Professeur des Universités, Université de Toulon / *Invitée*

Il n'est désir plus naturel que le désir de connaissance. Nous essayons tous les moyens qui nous y peuvent mener. Quand la raison nous manque, nous y employons l'expérience qui est un moyen plus faible et moins digne ; mais la vérité est chose si grande, que nous ne devons dédaigner aucune entremise qui nous y conduise.

Le gain de notre étude, c'est en être devenu meilleur et plus sage.

Michel de Montaigne - Les essais (1580)

Toutes nos connaissances ont leurs origines dans nos perceptions.

Léonard de Vinci

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadrants de thèse, Vincent Hugel et Hervé Barthelemy, co-directeurs, et Cédric Anthierens, encadrant, sans qui celle-ci n'aurait tout simplement pas été possible. Plus particulièrement, je remercie Vincent pour son suivi, sa bienveillance et en particulier pour son aide sur le contrôle du BR2 et sous ROS. Et Cédric pour avoir su me pousser à donner le meilleur de moi même, pour son aide précieuse sur la conception mécatronique et pour son amitié. Je remercie aussi Lionel Lapierre, maître de conférences-HDR à l'université de Montpellier, et Benjamin Ostre, maître de conférence au laboratoire COSMER, pour leurs conseils avisés lors de mes comités de suivi de thèse. Je souhaite aussi remercier les membres de mon jury, Benoit Clement, professeur à l'ENSTA Bretagne, Vincent Creuze, maître de conférences-HDR à l'université de Montpellier, et Gérard Poisson, professeur à l'IUT de Bourges, pour l'évaluation de mon travail et leurs retours riches, d'abord sur mon manuscrit, puis lors de ma soutenance. Merci aussi pour les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir en amont de ma présentation.

Mes remerciements vont aussi à la région Sud - Provinces Alpes Côtes d'Azur, pour le co-financement de ma thèse, avec l'université de Toulon, et à l'entreprise partenaire Subsea Tech. Je remercie plus particulièrement Kanstantsin Rabushka, responsable technique à Subsea Tech, pour le temps qu'il m'a accordé et les informations qu'il m'a partagées sur leurs drones, leurs ombilicaux et leurs systèmes de gestion.

Durant ces quatre années, j'ai eu la chance de côtoyer de remarquables collègues qui ont toujours su m'apporter l'aide nécessaire. Un merci tout particulier à Sabine Seillier, pour son aide technique sur l'assemblage des BR2, les montages électroniques et l'impression 3D, mais encore plus pour sa gentillesse et sa disponibilité. Merci aussi à Claire Dune pour son énorme implication pour les expériences en bassin et grâce à qui j'ai pu utiliser le système Qualisys. Pour lequel je remercie aussi Eric Watelain pour son aide dans l'utilisation de ce système. Merci aussi à Mathieu Richier pour son aide lors des expériences et pour avoir pris le temps de partager avec moi des informations sur les paramètres hydrodynamiques des ROV. Je tiens aussi à remercier Elisabeth Muriasco, qui a été bien plus qu'une directrice d'école doctorale mais qui s'est comportée comme une mère auprès de tous les doctorants et qui a su nous accompagner au travers de nombreux évènements tels que le concours MT180 et les doctoriades. Je suis honorée que ma thèse ait été la dernière à laquelle vous avez participé en tant que directrice de l'ED548. A tous les autres, Myriam Orquera, Lucette Archer, Ingrid Descarega, Odile Mardi,... qui m'ont marquée par leur gentillesse.

Au cours de ma thèse, j'ai aussi pu voir passer plusieurs générations de doctorants. D'abord les anciens du COSMER, Matheus et Nicolas, qui ont su nous guider au début de ce parcours complexe, avec une implication toute particulière de Nicolas au sein du conseil de l'école doctorale mais aussi pour nous pousser à se détendre de temps en temps (14!). Puis les doctorants de ma génération : Jean-Baptiste, Hoang-Anh et Manon avec

qui nous avons pu tout partager, à mi-cheval entre nos réussites et nos échecs et avec qui on a appris que la pression, on ne la subit pas mais on la boit ! Aux nouveaux enfin, dont j'ai pu apprécier la compagnie entre deux confinements : Youssef, Juliette, Bilal, Aurélien et Clémentin, je vous souhaite bon courage pour la suite, avec des remerciements tout particuliers à Juliette pour son aide lors des expériences sur le BR2 et son câble, pour ne pas que ça craque (!), et pour sa super compagnie lors des manip à Girona.

Je veux aussi remercier du fond de mon cœur ma famille, et en premier mes parents, sans qui je n'en serais pas là aujourd'hui. Ils ont toujours su me soutenir et m'ont en plus concrètement aidée pour ma thèse, ma mère sur les aspects théoriques et mon père sur les aspects pratiques. J'ai bien conscience du privilège que j'ai eu de grandir dans une famille où j'ai été si bien accompagnée tout au long de mes études. Je tiens aussi à remercier mes grands-parents, Michèle et Jean, et en particulier mon papy, qui non seulement a transmis la fibre scientifique à ses enfants et petits-enfants, mais qui encore aujourd'hui garde un esprit éveillé sur la recherche et le partage de connaissances et qui m'a aidée pour la résolution des équations de la chaînette. Je suis fière d'être la première de tes petits enfants à te suivre sur le parcours de docteur, suivie de près par Tanguy. Je remercie aussi infiniment mon fiancé, Jonas, qui m'a supportée au quotidien, a su écouter tous mes problèmes et mes petites victoires, et qui m'a aidée pour LaTeX et des questions d'automatique. Sans toi, ces deux dernières années auraient été bien plus difficiles. Je remercie aussi André, pour ses conseils avisés et la relecture de mon article et de ma thèse. Merci aussi à mes cousines, de m'avoir soutenue tout au long de ma thèse et d'avoir été présentes pour ma soutenance. Je remercie aussi tous les membres de ma famille que je n'ai pas cités, tout simplement pour leur soutien, de près ou de loin.

Finalement, je tiens à remercier mes amis, aussi bien ceux qui ont pu m'apporter une aide technique pour la thèse que ceux qui m'ont tout simplement soutenue moralement ou changé les idées lorsque j'en avais besoin. En particulier Romain et David pour leur aide sous Linux et ROS. Merci aussi à Julia, pour sa magnifique illustration du chien robot pour le concours MT180. Merci enfin à tous les autres, Marianne, Laurène, Heirani, Maxime, Mathias, et à ceux que j'oublie...

Table des matières

| | |
|--|------------|
| Table des matières | VI |
| Glossaire | VII |
| Acronymes | VII |
| Lexique | IX |
| Introduction générale | 1 |
| Contexte scientifique et industriel | 3 |
| Organisation et contributions de ce mémoire | 5 |
| I Etat de l'art sur les robots et câbles sous-marins | 7 |
| I.1 Environnement et missions des robots sous-marins | 8 |
| I.2 Les robots marins et sous-marins | 12 |
| I.3 Communications sous-marines | 27 |
| I.4 Utilisation du câble en environnement sous-marin | 29 |
| I.5 Inconvénients des câbles | 32 |
| I.6 Solutions existantes de gestion des câbles | 36 |
| I.7 Axes de recherche | 40 |
| II Modélisation mécanique du câble | 41 |
| II.1 Modélisation du câble | 43 |
| II.2 Paramètres physiques du câble | 51 |
| II.3 Simulateurs | 63 |
| II.4 Étude de l'influence des paramètres du câble | 73 |
| II.5 Conclusion du chapitre | 79 |
| III Conception mécatronique d'une solution de gestion du câble | 81 |
| III.1 Solutions existantes d'instrumentation et de contrôle du câble | 83 |
| III.2 Présentation du concept proposé | 89 |
| III.3 Instrumentation du câble en vue de la détection de sa configuration et de son contrôle | 91 |
| III.4 Conception d'un système de contrôle de longueur de câble | 105 |
| III.5 Conclusion du chapitre | 113 |
| IV Commande du système | 115 |
| IV.1 Modes de commande standard de l'enrouleur | 118 |
| IV.2 Commande de l'enrouleur à partir du système compliant | 127 |

| | |
|---|------------|
| IV.3 Conclusion du chapitre | 134 |
| V Résultats des simulations et expériences | 137 |
| V.1 Description du système utilisé | 138 |
| V.2 Expérimentations en bassin | 140 |
| V.3 Simulations de missions sous Vortex | 165 |
| V.4 Conclusion du chapitre | 179 |
| Conclusion générale | 181 |
| Annexes | 185 |
| A Modélisation du câble | 187 |
| A.1 Script Matlab de calcul de la chaînette | 187 |
| A.2 Script Matlab associé au modèle Simulink du câble | 189 |
| B Mesure expérimentale de la raideur en torsion | 191 |
| B.1 Détails calculs raideur en torsion | 191 |
| B.2 Calcul incertitude et pondération | 193 |
| B.3 Résultats expérimentaux | 195 |
| C Simulation et contrôle du BR2 Heavy sous Vortex | 203 |
| C.1 Modèle physique du BR2 Heavy | 203 |
| C.2 Modélisation sous Vortex | 207 |
| C.3 Asservissement du Remotely Operated Vehicle (ROV) sous Vortex | 209 |
| D Système amorti | 219 |
| D.1 Dimensionnement du pont diviseur de tension pour le capteur de courbure | 219 |
| D.2 Programme Arduino d'acquisition bas niveau du capteur de courbure . . . | 220 |
| D.3 Programme ROS d'interprétation des données capteur | 223 |
| E Enrouleur | 227 |
| E.1 Partie mécanique de l'enrouleur | 227 |
| E.2 Programme Arduino de contrôle bas niveau de l'enrouleur | 229 |
| E.3 Programme de commande de l'enrouleur | 236 |
| F Valorisation scientifique : publications, présentations et dissémination | 243 |
| Bibliographie | 244 |
| Table des figures | 251 |

Glossaire

Acronymes

| | |
|----------------|--|
| AUV | Autonomous Underwater Vehicle Robot sous-marin autonome. |
| BR2 | BlueROV2 ROV développé par BlueRobotics. |
| COLLADA | COLLABorative Design Activity Format de fichier 3D dont l'extension est généralement .dae (digital asset exchange). |
| COSMER | COncEption de Systèmes Mécaniques et Robotiques Laboratoire qui dépend de l'Université de Toulon et se situe sur le campus de La Garde, EA 7398. |
| DDL | Degré de liberté |
| 2D | Deux dimensions |
| GPS | Global Positioning System Géo-positionnement par satellite. |
| HROV | Hybrid Remotely Operated Vehicle Robot sous-marins hybride pouvant être téléopéré ou autonome. |
| IM2NP | Institut Matériaux Micro-électronique Nano Sciences de Provence Laboratoire sous triple tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), d'Aix-Marseille Université (AMU) et de l'Université de Toulon (UTLN), implanté sur Marseille et Toulon, unité mixte de recherche (UMR 7334). |
| PD | Proportionnel-Dérivé |

Type de contrôleur basé sur un terme proportionnel à l'erreur et un terme fonction de la dérivée de l'erreur.

PI Proportionnel-Intégral

Type de contrôleur basé sur un terme proportionnel à l'erreur et un terme proportionnel à la somme des erreurs.

PID Proportionnel-Intégral-Dérivé

Type de contrôleur basé sur un terme proportionnel à l'erreur, un terme proportionnel à la somme des erreurs et un terme fonction de la dérivée de l'erreur.

PACA Provence Alpes Côte d'Azur

PWM Pulse Width Modulation

En français : modulation de largeur d'impulsions (MLI) méthode de pilotage de moteurs qui permet de générer un signal pseudo analogique à partir d'un circuit à états discrets.

QTM Qualisys Track Manager

Logiciel de suivi de mouvements par caméras Qualisys.

ROV Remotely Operated Vehicle

Robot sous-marin téléopéré.

ROS Robot Operating System

Plateforme de développement appliquée à la robotique qui gère un ensemble d'outils et de bibliothèques et la transmission des messages entre les différents processus.

LARS Système de lancement et rattrapage pour ROV

De l'anglais : Launch and Recovery System.

TMS Tether Management System

RPM Tours par minute

De l'anglais : Revolutions Per Minute.

3D Trois dimensions

UTLN Université de Toulon

USV Unmanned Surface Vehicle

Robot de surface.

UUV Unmanned Underwater Vehicle

Véhicule sous-marin non habité.

Lexique

- Crawler** Robot sous-marin capable de rouler sur le fond marin et à l'intérieur de canalisations en eau
- Lacet** Rotation autour de l'axe vertical d'un véhicule marin. En anglais : *yaw*
- Planeur** Robot sous-marin autonome de type planeur ayant une forme hydrodynamique qui lui permet de sillonner les océans durant plusieurs mois. En anglais : *glider*
- Roulis** Rotation autour de l'axe longitudinal d'un véhicule marin. En anglais : *roll*
- Tangage** Rotation autour de l'axe transversal d'un véhicule marin. En anglais : *pitch*

Introduction générale

L'eau recouvre plus de 70 % de la surface du globe terrestre et abrite 80 % de sa biodiversité. L'océan, indispensable à l'équilibre de la planète et à la vie, est à protéger. Si sa surface a été amplement explorée, ses profondeurs restent encore méconnues par l'homme. Pourtant l'homme a un impact fort sur l'océan. Pour protéger cet environnement, l'homme doit apprendre à mieux le connaître. **L'exploration sous-marine** est porteuse d'intérêt, notamment pour l'observation de la faune et de la flore, la cartographie marine, ou encore l'analyse des courants marins et de la qualité de l'eau. Plus particulièrement, elle est utile pour la recherche d'épaves ou de boîtes noires dans les grandes profondeurs ou l'observation des phénomènes d'érosion de reliefs sous-marins dans les zones côtières.

Cependant, cet environnement inhospitalier n'est pas facilement observable par l'homme. En effet, les actions sous l'eau des plongeurs restent limitées. En terme de complexité, la recherche océanographique est même comparée à la recherche spatiale. C'est pourquoi l'homme a fait appel à des **engins sous-marins**, d'abord habités, comme le Turtle, inventé par David Bushnell en 1775 ou le Plongeur, premier sous-marin se passant de propulsion humaine, conçu dans les années 1860 par le commandant Bourgeois et l'ingénieur Charles Brun. Le fait d'embarquer des hommes à bord de véhicules sous-marins contraint fortement les systèmes, sans être toujours nécessaire. En effet, les perceptions et actions humaines à bord de ces engins restent très limitées. C'est pourquoi, les **robots sous-marins** ont vu le jour. Dans le même temps, les robots marins, Unmanned Surface Vehicle (USV), ont aussi fait leur apparition. Ces systèmes n'étant pas contraints par les paliers de décompression comme les humains, ils se rendent plus rapidement à la profondeur souhaitée et y restent plus longtemps. Ils sont aussi plus compacts que les engins habités, sont beaucoup moins risqués pour les hommes et effectuent des actions plus répétables que ces derniers.

Les robots sous-marins sont soit autonomes, il s'agit des Autonomous Underwater Vehicle (AUV), soit **téléopérés** dans le cas des Remotely Operated Vehicle (ROV). Ces derniers nécessitent donc de **communiquer avec un poste de commande**. Celui-ci peut être à bord d'une station intermédiaire en profondeur ou à la surface. Il peut être contrôlé par un autre robot, tel qu'un USV, ou par un homme, situé à bord d'un bateau ou sur la côte. Bien que les communications sans fil ne soient pas impossibles dans l'eau, elles restent très contraignantes. En effet, les ondes électromagnétiques sont inutilisables et les ondes acoustiques, en plus d'être fortement perturbées par l'environnement marin, ont une portée très limitée (pour les hautes fréquences) et un débit très faible (pour les basses fréquences). De plus, elles perturbent la faune marine. **L'usage d'engins téléopérés implique donc généralement la présence d'un ombilical*** qui relie le ROV à son

*. Dans ce mémoire, nous utiliserons indifféremment le terme *câble* et le terme *ombilical*.

poste de commande. Ce câble* transmet des données en temps réel dans les deux sens, c'est-à-dire des ordres (de haut en bas) et des mesures (de bas en haut). Ce lien physique confère aussi une sécurité au système pour mieux affronter les aléas du milieu aquatique.

Cependant, ce lien s'avère être un frein à la mobilité du ROV, sur lequel il engendre des **actions mécaniques indésirables** dues, entre autres, à sa traînée, à son inertie et à sa sensibilité aux courants. Il risque aussi de s'emmêler, voire de s'accrocher à des obstacles sous-marins. L'utilisation d'un ombilical passif a ses limites. En effet, il contraint la distance maximale du robot au poste de commande et, lorsque la distance diminue, les **risques** sont augmentés par le mou du câble. Le câble doit donc être ni tendu, ni trop lâche, comme imagé sur l'illustration 1. Toutes ces **contraintes** sont d'autant plus importantes lorsque le ROV est plus compact et moins puissant.

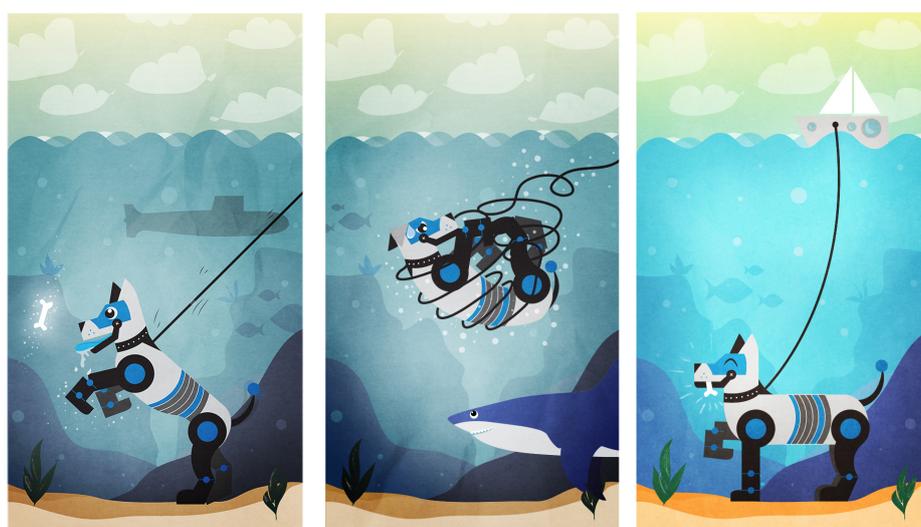


Figure 1 – Illustration de la problématique du câble trop tendu ou trop lâche, imagée par une laisse de chien - présentée au concours MT180 - Graphisme : Ark. Us. - Julia Bénard

L'un des grands défis de la robotique marine consiste à rendre les robots suffisamment autonomes pour qu'ils se déplacent et remplissent des missions avec le minimum d'intervention humaine. Ceci suppose qu'ils soient dotés d'une certaine autonomie de navigation. Pourtant, aujourd'hui, la plupart des câbles de ROV évoluant en eaux peu profondes sont gérés manuellement. Afin de **tirer profit de l'ombilical** reliant des engins opérant en milieu aquatique, il convient de disposer d'une longueur de câble variable, que ce soit entre plusieurs robots interconnectés ou entre un robot et un navire de surface. La gestion de la longueur de câble depuis un robot sous-marin ou un robot de surface ouvre des perspectives de recherche très prometteuses en matière d'adaptation à la mission et de réduction des inconvénients énoncés ci-dessus.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est de **contribuer à la gestion des câbles des engins marins et sous-marins** en concevant un système limitant les effets indésirables de l'ombilical sur la navigation du ROV, et **permettant de nouvelles stratégies de pilotage.**

Contexte scientifique et industriel

Ce projet a été porté par le pôle INP (Information, Numérique, Prévention). Il implique une coopération de recherche entre deux laboratoires de l'université : le laboratoire COncEption de Systèmes Mécaniques et Robotiques (COSMER), et le laboratoire Institut Matériaux Micro-électronique Nano Sciences de Provence (IM2NP). Cette thèse bénéficie d'un co-financement de la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA) et de l'Université de Toulon (UTLN), avec le soutien du partenaire socioéconomique Subsea Tech. Ce sujet a été labellisé par le Pôle Mer Méditerranée.

Ce projet de recherche s'inscrit dans le domaine des activités de robotique sous-marine de la région. La partie expérimentale des travaux de recherches sera consacrée à des tests en bassin destinés à évaluer en conditions réelles la faisabilité de la solution mécatronique retenue et les stratégies de gestion active d'ombilicaux développées en simulation. Le transfert technologique au partenaire industriel permettra un rayonnement au niveau régional des innovations en matière de robotique sous-marine à base d'ombilicaux. Ce domaine fait actuellement l'objet d'études de R&D dans plusieurs entreprises de la région.

Le partenaire socioéconomique associé au projet est l'entreprise Subsea Tech avec laquelle le laboratoire COSMER a commencé une coopération en 2016. Cette coopération s'est concrétisée, entre autres, par un projet DGA-RAPID, baptisé Surfbot, qui a démarré en septembre 2016 sur le développement d'une plateforme sous-marine instrumentée et suractionnée capable d'opérer en zone côtière perturbée. Subsea Tech est une PME en ingénierie créée en 2005 à Marseille et spécialisée dans la conception d'USV et de ROV. Son activité principale est la production et la vente de robots sous-marins mais 30% de ses ressources sont dédiées aux travaux de recherche et développement dans le domaine de la robotique et de la vision sous-marine, dont une large part pour des clients industriels. Subsea Tech est membre des pôles Mer Méditerranée et Optitec.

Le laboratoire COSMER a démarré une nouvelle activité en robotique marine et sous-marine en 2016 et travaille, entre autres, sur des cordées de robots où les modules actionnées sont répartis le long d'un même ombilical. Ainsi le rayon d'action depuis la base est étendu et les effets de trainée excessive dus à une grande longueur de câble sont contrés. La communication entre robots de la cordée via le câble ouvre les portes vers des comportements intelligents du groupe (positionnement relatif) pour satisfaire les besoins de nouvelles missions (exploration acoustique 3D). La problématique de la gestion de l'ombilical étant globale dans le milieu de la robotique sous-marine, il a été reconnu par l'HCERES (Haut Conseil de l'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur), que ce thème était très porteur et prometteur.

Une première étude menée sur ce thème au laboratoire, dans le cadre de la thèse de Matheus Laranjeira Moreira, soutenue en 2019, traite d'une cordée de robots reliés par un ombilical de longueur fixe et contrôlée par asservissement visuel (Moreira 2019). Elle a été cofinancée par la région PACA et l'entreprise Subsea Tech.

La simulation des interactions dynamiques entre un ROV et l'eau qui l'entoure a été étudiée au sein du laboratoire dans le cadre de la thèse de Nicolas Gartner, soutenue en 2020 (Gartner 2020). Cette étude a conduit à l'adaptation d'un simulateur basé sur la technique Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH), qui modélise le fluide comme un

ensemble de particules sans maillage.

Dans un autre registre, la thèse de Hoang-Anh Pham, soutenue en 2021 (Pham et al. 2020), a étudié des algorithmes de coordination de ROV, basés sur des réseaux de neurones, et en particulier pour la mise en formation d'un essaim, l'évitement de collisions entre les ROV et le contournement d'obstacle d'un groupe de ROV. Ce travail a également conduit à la conversion d'un ROV, téléopéré, en un hybride ROV-AUV, autonome.

Le sujet de recherche proposé dans ce mémoire se veut complémentaire des activités de recherche initiées au COSMER, et a pour objectif une progression significative dans le domaine des ombilicaux actifs reliant robots marins et sous-marins.

Organisation et contributions de ce mémoire

Cette thèse se focalise sur la gestion active des systèmes reliés par câble en robotique sous-marine. L'approche développée dans ce mémoire consiste en la conception et le pilotage d'un système constitué d'un USV et d'un ROV reliés par un ombilical instrumenté et contrôlé par un enrouleur. Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

Chapitre I

Ce chapitre introduit les types de missions et les contraintes dues à l'environnement sous-marin et présente un **état de l'art** préliminaire sur les robots et l'utilisation de câbles dans le domaine de la robotique sous-marine. Les **avantages et inconvénients de l'utilisation d'ombilicaux** connectés à ces systèmes sont discutés. Puis, les différentes solutions déjà existantes de gestion des câbles sont exposées. Ce chapitre montre la nécessité d'améliorer la gestion de ces systèmes et permet d'introduire nos travaux de recherche.

Chapitre II

Afin d'estimer l'influence du câble sur le système pour envisager son contrôle autonome, il est nécessaire de pouvoir le modéliser. Ainsi, la première partie de ce chapitre décrit les modèles classiques de câbles et, en particulier, celui de la chaînette pour le cas d'un câble pesant. Une **modélisation** plus adaptée au milieu sous-marin est alors proposée pour tous types de câbles. Celle-ci repose sur une méthode de **caractérisation du câble**, en déterminant ses paramètres mécaniques. **L'influence du câble sur le ROV est alors étudiée** en simulation en fonction de ces paramètres. Cette modélisation met en évidence **l'intérêt du contrôle de la juste longueur du câble** afin de minimiser les risques dus à celui-ci.

Chapitre III

Ce chapitre détaille la **conception mécatronique d'un système ombilical original instrumenté et actionné** en vue du contrôle de la juste longueur de câble. Celui-ci comporte un système de **compliance passive** qui rend son comportement plus souple et limite son impact sur le ROV. Un **capteur** fournit des informations proprioceptives sur sa configuration. L'ombilical est **actionné par un enrouleur** qui gère sa longueur déroulée afin d'améliorer la manœuvrabilité du système global.

Chapitre IV

Ce chapitre développe différents **modes de contrôle du câble** basés sur le système mécatronique présenté dans la partie précédente.

Chapitre V

Ce chapitre vise à **valider ces stratégies, en simulation et de façon expérimentale**, en comparant les différents modes de contrôle du système proposés. Ces simulations et expérimentations sont conduites dans un bassin avec le système composé d'un ROV relié à un câble actionné et instrumenté par le système proposé dans ce mémoire.

Conclusion

L'ensemble de ces développements démontre l'intérêt et la faisabilité de la gestion active et intelligente du lien entre le ROV et la surface en passant par un système instrumenté et actionné. Plusieurs perspectives sur les travaux futurs sont également présentées.

Chapitre I

Etat de l'art sur les robots et câbles sous-marins

| | | |
|------------|---|-----------|
| I.1 | Environnement et missions des robots sous-marins | 8 |
| I.2 | Les robots marins et sous-marins | 12 |
| I.2.1 | Notations | 12 |
| I.2.2 | Les robots de surface | 12 |
| I.2.3 | Les véhicules sous-marins | 15 |
| I.3 | Communications sous-marines | 27 |
| I.3.1 | Communications non filaires | 27 |
| I.4 | Utilisation du câble en environnement sous-marin | 29 |
| I.4.1 | Câbles pour les ROV | 29 |
| I.4.2 | Autres systèmes avec câbles | 30 |
| I.5 | Inconvénients des câbles | 32 |
| I.5.1 | Problématique de la liaison par câble des ROV | 34 |
| I.6 | Solutions existantes de gestion des câbles | 36 |
| I.7 | Axes de recherche | 40 |

I.1 Environnement et missions des robots sous-marins

Les robots sous-marins sont utilisés pour de multiples applications, allant de la surveillance à la manipulation, aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire. On différencie ces applications par leur zone d'action, allant des grandes profondeurs aux zones côtières de faibles profondeurs.

Missions de recherche scientifique

L'une des premières missions des robots sous-marins concerne l'océanographie, recherche scientifique consacrée à l'étude des mers et des océans. Ces missions consistent généralement en des mesures de l'environnement, éventuellement avec prélèvements d'échantillons (eau, sédiments, faune, flore,...). L'océanographie se décompose en cinq branches principales :

- La géologie : étude de la structure du fond des océans
- La biologie marine : étude de la flore, de la faune et de l'écologie marines
- L'océanographie physique : dynamique des fluides comprenant l'étude des vagues, courants et marées.
- L'océanographie chimique
- La météorologie

L'exploration géologique est un axe de recherche important, avec par exemple la bathymétrie, la cartographie, la numérisation de modèles de terrain, et l'hydrographie. Le sondage des fonds marins est d'ailleurs le type de mesure le plus ancien, avec une application évidente pour la navigation maritime. En 1521, Magellan a mesuré la profondeur des océans autour du monde grâce à des lignes plombées de 800 mètres. Ces mesures, très peu précises et irrégulières, ont été remplacées par les sondeurs ultrasonores (sonars), mis au point seulement 400 ans plus tard par Paul Langevin. L'observation des phénomènes d'érosion des reliefs sous-marins a aujourd'hui un grand intérêt écologique.

La première campagne océanographique mondiale a eu lieu à bord du *Challenger* entre 1872 et 1876. Malgré ses moyens limités (sondages, dragages, chalutages, mesures de température, mesures de masse volumique et relevés de salinité), plus de 4000 espèces animales inconnues furent cataloguées jusqu'à une profondeur de 5000 m, la composition de l'eau de mer fut étudiée et une carte des sédiments marins établie. Cependant, ces prélèvements étaient menés à l'aveugle et la nécessité de se rendre en profondeur pour avoir une vue sous-marine d'ensemble est apparue évidente.

Des organismes vivants, dont un poisson abyssal, ont été observés en 1960 dans la fosse des Mariannes par deux hommes à bord d'un bathyscaphe, à une époque où l'on n'imaginait pas encore la vie possible à de telles profondeurs. Peu après, les sources hydrothermales ont été découvertes dans les années 1970, lors d'explorations des fonds marins à bord des submersibles habités Cyana en 1974 et Alvin en 1977 (figure I.1a). Là encore, une profusion de vie a été découverte contre toute attente. Depuis, les robots sous-marins ont été largement utilisés pour l'étude de la biodiversité et en particulier des poissons (Sward, Monk et Barrett 2019). Une étude avec le robot *Autosub-2*, parcourant plus de 210 km sous la glace, jusqu'à 30 km de sa bordure, a mis en évidence la présence importante de petits crustacés d'eaux froides dans cette zone, donnant une idée de l'impact de la fonte

des glaces sur la biodiversité (Brierley et al. 2002). En 2002, le robot *ABE* a participé à prouver la disparition de la source hydrothermale *Rose Garden* et son remplacement par une nouvelle source, *Rose Bud* (Clarke 2003).

L'étude *Autonomous Ocean Sampling Network* (Ramp et al. 2009) a étudié des courants marins et des remontées d'eau dans la baie de Monterey. Ce phénomène consiste en une remontée des eaux des fonds qui entraînent avec elles une quantité importante de nutriments (figure I.1b). La flotte de robots déployés pour cette étude est restée en activité pendant presque 10 ans dans le but de réaliser des modèles climatologiques mis en concordance avec différents événements climatiques (Rudnick et al. 2017). Lors d'une autre étude, le robot Autosub-2 a mesuré la fonte des glaces grâce à des capteurs acoustiques doppler, un sonar et des échantillons d'eau, en naviguant sous le glacier de l'île du Pin en Antarctique (Clarke 2003) (figure I.1c).

Par ailleurs, des millions de sites archéologiques dans le monde se situent à des profondeurs non accessibles aux plongeurs (Khatib et al. 2016). Leur exploration revêt un intérêt écologique et biologique et ils nécessitent une protection, entre autres vis à vis du chalutage (pêche avec filet raclant les fonds marins).

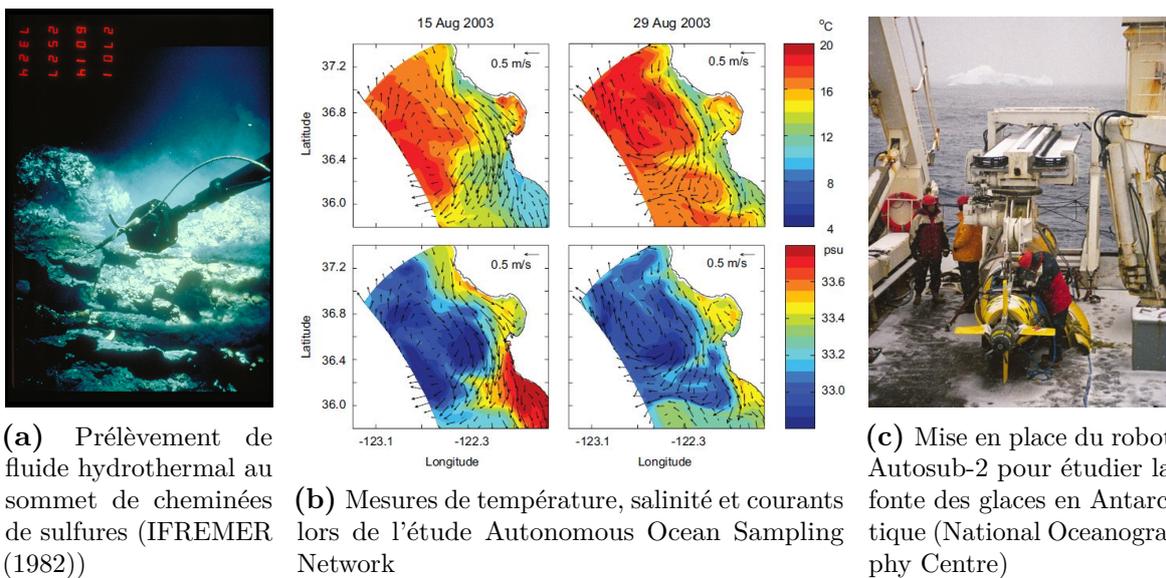


Figure I.1 – Exemples de missions océanographiques

Missions civiles

Dans le domaine civil, les missions portent en général sur la prévention des risques maritimes pour la sûreté des biens et des personnes et sur la surveillance de la qualité de l'eau, de zones ou de structures artificielles, telles que les zones de surf, les zones portuaires, les canaux d'évacuation, les carènes, les ancrages, etc. Des capteurs et observatoires sont disposés en profondeur afin de prévenir les événements sismiques et raz de marées. Par exemple, le projet ANR *SEAFOOD* (SEA-bottom Fiber-Optic Observatory for distributed Deformation measurements) en cours vise à développer une mesure distribuée sur des câbles de fibre optique pour étudier et prévenir les séismes et érosions (Yann 2021 ; Sladen

et al. 2019). Cette méthode a déjà fait ses preuves lors d'essais sur les côtes de l'aéroport de Nice et des moyens de déploiement de la fibre enfouie dans les sédiments sont en cours.

En plus de la simple surveillance, des interventions peuvent être nécessaires, telles que le nettoyage des coques de bateaux ou des déchets en mer.

Les missions d'assistance en zone dangereuse, de sauvetage ou de recherche d'objets, tels que les épaves ou boîtes noires, sont aussi courantes. On peut citer le sauvetage d'un sous-marin, coincé en profondeur dans l'océan Pacifique en août 2005, ainsi que la récupération de la boîte noire du vol Air France 447 suite à son accident en mai 2009, par des robots sous-marins. L'épave du Titanic (figure I.2a) a aussi été explorée grâce au mini robot *Robin*, opéré depuis le sous-marin habité *Nautilus* en 1987. Ces deux robots ont ensuite été utilisés pour repérer puis colmater les fuites du pétrolier *Prestige* abîmé en 2002 au large des côtes espagnoles à 3500 m de profondeur.

Dans le domaine mercantile, les fonds marins ont un grand intérêt, en particulier pour l'exploitation pétrolière et des métaux. Celle-ci nécessite des moyens importants pour rechercher les ressources minières, installer les *pipelines* puis les inspecter régulièrement.

Ces dernières années, les applications dans le domaine du loisir sont devenues courantes, avec la possibilité de filmer sous l'eau ou d'accompagner les plongeurs lors de leurs excursions (figure I.2c). Quelques sous-marins touristiques existent aussi de manière anecdotique (figure I.2b).



(a) Epave du Titanic, vue du ROV Hercule en 2004



(b) Le sous-marin de tourisme Atlantis IV en plongée



(c) Robot iBubble de Notilo plus avec un plongeur

Figure I.2 – Exemples de missions sous-marines civiles

Missions de défense et militaires

Dans le domaine de la défense maritime, les applications vont de la sécurisation de chenaux à la surveillance de ports.

Les missions sous-marines sont aussi très répandues dans le domaine militaire, que ce soit pour l'avantage de la discrétion des véhicules sous-marins ou pour la guerre des mines : détection et neutralisation des mines perdues après les guerres, dont certaines sont proches du littoral (figure I.3).

L'utilisation des sous-marins militaires remonte aux années 1770 avec l'invention du *Turtle*, destiné à attacher des charges explosives à des bateaux ancrés. Aujourd'hui ils sont largement utilisés pour la dissuasion nucléaire, l'escorte de groupes de combats et la lutte marine et sous-marine.



Figure I.3 – Plongeur démineur de l’US Navy en exercice (gauche) - Mines échouées sur le littoral de Naissaar en Estonie (droite)

Contraintes des missions

Les différents exemples de missions détaillés dans cette partie montrent le grand intérêt des missions sous-marines qui se révèlent toutefois complexes et contraignantes.

Les missions de recherche nécessitent de parcourir des distances importantes, de rester sur place durant une longue période, ou d’être capable de retourner à un lieu d’intérêt régulièrement et avec précision. Les missions d’exploration impliquent de naviguer dans des zones inconnues où les risques se trouvent plus élevés. Les manipulations quant à elles nécessitent parfois des forces très importantes (interactions avec des objets lourds) ou une précision élevée (manipulation d’éléments fragiles tels que les coraux ou les objets archéologiques). Les missions d’intervention et de sauvetage sont urgentes et doivent être réalisées rapidement dans des conditions qui ne sont pas toujours optimales.

Les systèmes sous-marins font face à des risques spécifiques à leur environnement. En effet, l’eau est un milieu très différent de l’air, la pression augmente rapidement avec la profondeur, ce qui contraint les systèmes mécaniques d’une part et fait varier la flottabilité des éléments déformables d’autre part. Les systèmes électriques constituant les robots sont aussi très sensibles à l’eau. Le travail sous la surface de l’eau entraîne des difficultés au niveau des systèmes de capteurs qui font face à un environnement bruyé et imprédictible. Sous l’eau, les véhicules doivent se déplacer en trois dimensions, opération plus complexe que les déplacements en deux dimensions à la surface de la terre. La vision sous l’eau est très réduite, d’une part par la diminution de lumière en profondeur et d’autre part par la turbidité de l’eau en zone littorale. En mer, la houle et les courants influent sur tous les corps plongés dans l’eau, d’autant plus s’ils sont légers. Les eaux peu profondes sont souvent turbulentes, en particulier dans la zone de surf, à cause du fond de la mer irrégulier.

I.2 Les robots marins et sous-marins

Afin d'effectuer des missions dans ces milieux inhospitaliers, des engins marins et sous-marins sont utilisés. Ceux-ci permettent, entre autres, d'atteindre des zones difficilement accessibles pour l'homme, d'embarquer des charges plus importantes (équipements de mesures et de manipulations) et d'effectuer des missions plus longues.

I.2.1 Notations

Avant de présenter les robots marins et sous-marins existants et de détailler leurs caractéristiques principales, il convient de définir quelques termes concernant les véhicules se déplaçant dans un espace de travail à trois dimensions.

La norme en robotique marine et sous-marine, introduite par la *Society of Naval Architects and Marine Engineers* (SNAME), définit le référentiel standard ayant pour origine le centre de gravité du véhicule, avec l'axe longitudinal vers l'avant du véhicule, l'axe vertical dirigé vers le bas et l'axe transversal orienté vers sa droite, formant un référentiel direct comme sur la figure I.4.

Les mouvements de rotation autour des axes longitudinal, latéral et vertical se nomment respectivement roulis, tangage et lacet (plus couramment en anglais *roll*, *pitch* et *yaw*). Ces notations sont récapitulées dans le tableau I.1. Ces mouvements de translations et de rotations constituent les six degrés de liberté (DDL), contrôlés ou non, des véhicules marins et sous-marins.

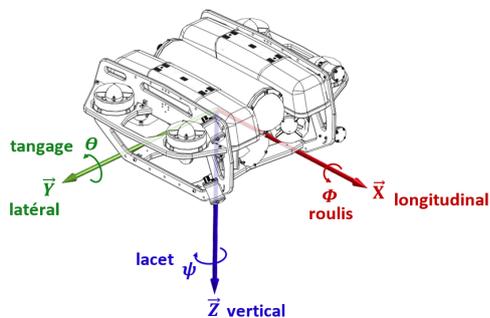


Figure I.4 – Référentiel lié aux robots sous-marins

| Axes | Translations | Rotations |
|--------------------------------|---------------|-----------|
| x : vers l'avant du véhicule | Longitudinale | Roulis |
| y : vers la droite du véhicule | Latérale | Tangage |
| z : vers le bas du véhicule | Verticale | Lacet |

Tableau I.1 – Notations pour les mouvements des robots marins et sous-marins

I.2.2 Les robots de surface

Les Unmanned Surface Vehicle (USV), ou drones de surface, sont des robots marins naviguant à la surface de l'eau, équipés de charges utiles à des fins de prélèvements, bathymétrie et cartographie. Plusieurs solutions de drones de surface existent d'ores et déjà en laboratoire ou à la vente. Ils ont la forme de bateaux, souvent de type catamaran (plus stable) ou mono-coque (plus efficace mais moins stable) et ont en général deux propulseurs. Les qualités intrinsèques de ces engins diffèrent notamment au niveau de leur autonomie décisionnelle et énergétique comme on peut le voir dans le tableau I.2.

| Modèle Prix | Masse Contrôle | Charge utile Vitesse Autonomie | Informations complémentaires |
|----------------------------------|---|--|--|
| Multiboat Escadrone 6900 € | 2,8 kg à vide 2 propulseurs dif- férentiels | 5 kg 1,5 m/s 1,5 h | Plastique gonflable. Radiocommandé ou navigation automatique avec points de pas- sage. Utilisation sur lacs et rivières. Logiciels et électronique open- source. |
| Droneo R&Drone 43 200 € | 30 kg à vide Moteur élec- trique propulsion à hélices | 40 kg 2 m/s 10 h | Missions d'inspection et d'ana- lyse environnementale en lacs, rivières, bassins,... |
| Wave Glider Liquid Robotics | 155 kg (surface : 71 kg + partie submergée et câble : 84 kg) Exploitation de la force de la houle grâce à un système en deux parties. | 59 kg + traction 500 kg 0,7 m/s 1 an pour ins- pection | Forme de planche de surf en sur- face relié en profondeur à des palettes à ressort qui utilisent l'énergie des vagues pour se dé- placer. Panneaux solaires. |
| Cat-Surveyor Subsea Tech | 270 kg 2 moteurs hors- bord | 80 kg 2,6 m/s 12 h | Communication wifi (portée 5 km + radio en secours. Acquisition de données, sur- veillance sous-marine. |
| C-Enduro ASV | 350 kg 2 propulseurs | 100 kg 3,3 m/s 3 mois | Communication radio/satellite. Panneaux solaires et éolienne. |
| C-Sweep ASV | 9000 kg 2 propulseurs die- sel | 2500 kg 12,8 m/s | Déminage. Déploiement, suivi et récupéra- tion de robots sous-marins. Téledétection et surveillance. |

Tableau I.2 – Caractéristiques principales de différents USV

Par exemple, le *Multiboat* d'Escadrone (figure I.5) est l'un des drones de surface les plus petits et transportables sur le marché avec ses flotteurs gonflables et sa structure démontable. Il a été conçu pour effectuer des prélèvements d'eau sur les rivières et lacs de manière autonome, pour lesquels sa batterie embarquée lui confère une autonomie d'1h30.



Figure I.5 – USV Multiboat d'Escadrone



Figure I.6 – USV Droneo de Robotics Industry



Figure I.7 – USV Cat-surveyor de Subsea Tech

Dans les modèles un peu plus grands mais toujours facilement déployables, le *Droneo* (figure I.6) a été développé par *Robotics Industry* (anciennement *R&Drone*) à des fins d'inspections et d'analyses environnementales. Le *Cat-surveyor* (figure I.7) de *Subsea Tech* est aussi un catamaran, conçu pour l'acquisition de données et la surveillance sous-marine, avec de meilleures performances que le *Multiboat* et le *Droneo*.

Le *Wave glider* de *Liquid Robotics* (I.8) utilise la force des vagues comme moyen de propulsion par l'intermédiaire d'une planche qui flotte à la surface et d'ailerons en profondeur, ces deux systèmes étant reliés par un câble de 8 m.

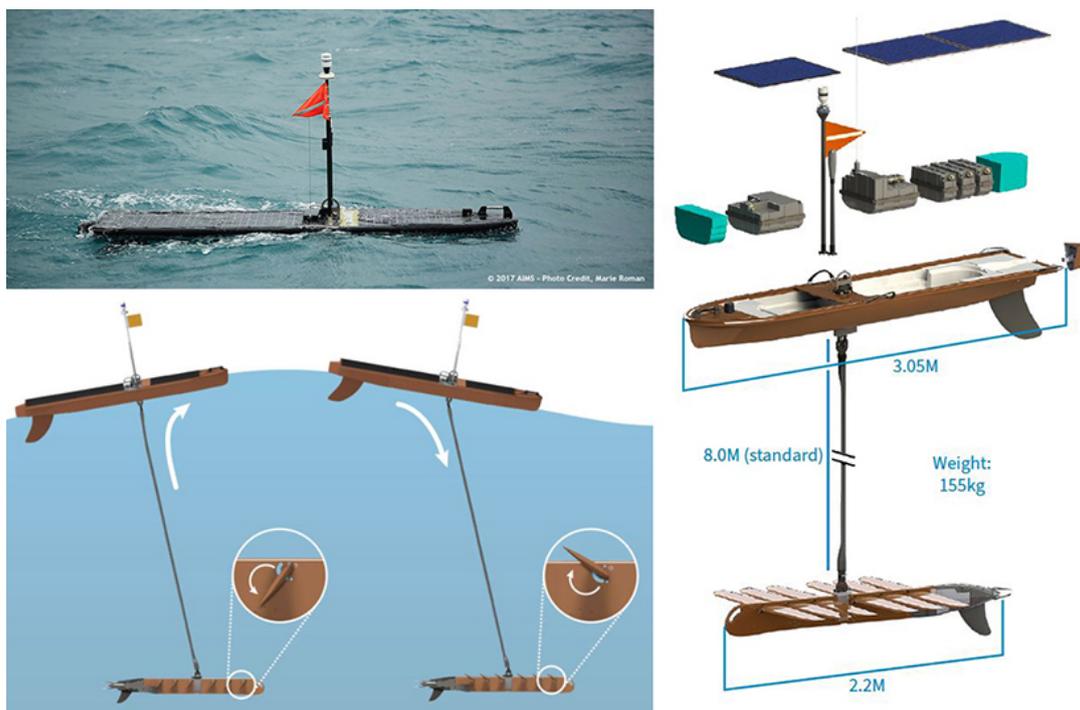


Figure I.8 – Wave glider de Liquid Robotics : photo en mission [Leigh Martin] (en haut à gauche) et schémas de description du fonctionnement (bas et droite)

Le *C-Enduro* (figure I.9) d'ASV est aussi prévu pour des missions de longue durée (jusqu'à 3 mois) grâce à des panneaux solaires et une éolienne venant en support à une génératrice diesel alimentant ses deux propulseurs. Il navigue en autonomie grâce à des algorithmes de gestion de trajectoires (Niu et al. 2016).



Figure I.9 – USV C-Enduro d'ASV



Figure I.10 – USV C-Sweep d'ASV

Les solutions existantes proposent le plus souvent des mesures de surface ou de faible profondeur (quelques centimètres sous l'eau) ce qui oblige de prévoir des instruments à longue portée pour obtenir une image des fonds marins. Ceci explique que ces engins ont fréquemment une capacité d'emport importante rendant le drone assez massif, détectable, mais aussi potentiellement dangereux en cas de collision, et onéreux. Les systèmes les plus performants sont donc généralement reliés à un autre robot qui effectue les mesures sous-marines. Par exemple, le *C-Sweep* d'ASV est équipé d'un système de déploiement de robots sous-marins pour des opérations de déminage. Le *cat-surveyor* propose aussi le déploiement du robot d'inspection *Observer* par l'intermédiaire d'un treuil monté à l'avant du drone de surface.

Qu'ils soient mus par la force du vent, des vagues, de l'effet de planeur ou par propulseurs électriques, l'ensemble de ces solutions met en avant l'aptitude à suivre une trajectoire programmée en sachant se repérer de façon absolue grâce à un signal GPS.

I.2.3 Les véhicules sous-marins

Pour répondre aux besoins d'observation, de mesures et de manipulations sous-marines, qui ne sont pas assez précises depuis les engins de surface, l'homme a cherché à se rendre sous l'eau. Limité par ses capacités physiques qui limitent les plongées techniques à une profondeur de 100 mètres, il a développé des engins submersibles. Ceux-ci sont aussi plus protégés des autres navires et des vagues lorsqu'ils sont en profondeur. Les véhicules sous-marins peuvent être classés dans deux catégories : les véhicules habités et les véhicules non habités.

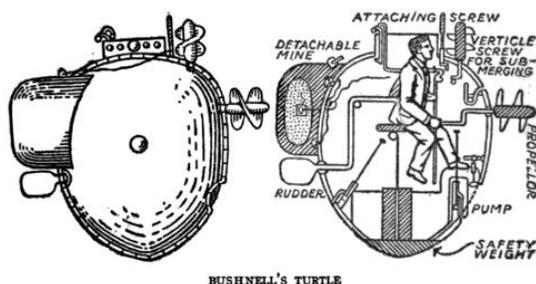
Les engins sous-marins habités

Les engins sous-marins sont des submersibles habités capables de se déplacer sous l'eau. On distingue les sous-marins à proprement parler, capables de se déplacer à la surface et sous l'eau, des engins se déplaçant uniquement verticalement, de façon passive ou active, tels que les bathysphères ou bathyscaphes. Ces engins sont généralement composés d'une structure métallique très épaisse pour résister aux fortes pressions et se basent sur le principe d'Archimède pour gérer leur flottaison.

Le premier sous-marin, le *Turtle*, a été inventé en 1775 par David Bushnell (figure I.11a). Il est propulsé par des hélices manuelles verticales et horizontales à une vitesse

d'environ 5 km/h. Sa descente se fait par l'introduction de l'eau dans un réservoir et sa remontée par l'expulsion de cette eau à l'aide d'une pompe manuelle. Sa durée d'utilisation était limitée à une demi-heure par l'air disponible à l'intérieur de l'habitacle.

Par la suite, leur forme a évolué pour être plus hydrodynamique et les systèmes de propulsion ainsi que les pompes permettant de remplir et de vider les ballasts ont été motorisés. L'un des premiers sous-marins à moteur est le *Gymnote*, mis en service en 1888. Il a une longueur de 17,8 m pour une vitesse en plongée de 4,3 noeuds et embarque 5 hommes. La propulsion par moteurs diesel-électriques (alimentés par batterie) a ensuite été remplacée par la propulsion nucléaire dans les années 1950. Leur autonomie en plongée n'est alors limitée que par la capacité de l'équipage à rester sous l'eau. Les sous-marins modernes militaires ont une immersion maximale de quelques centaines de mètres, principalement limitée par l'épaisseur de leur coque. Ils sont équipés de mâts munis de périscopes, d'antennes et d'un tube d'air afin de récupérer régulièrement des informations de la surface de façon relativement discrète et de renouveler l'air. Aujourd'hui, les sous-marins militaires français ont une longueur d'une centaine de mètres, une immersion d'environ 400 m, une vitesse de l'ordre de 50 km/h et accueillent des équipages d'une centaine d'hommes (figure I.11b).



(a) Schéma du Turtle, premier sous-marin, inventé par David Bushnell en 1775



(b) Le Téméraire : sous-marin nucléaire de la marine nationale

Figure I.11 – Exemples de sous-marins

Ces sous-marins répondent bien aux besoins militaires de déplacements en toute discrétion sur de longues distances mais ne visent pas des profondeurs très élevées. Pour l'observation des eaux profondes, les bathysphères (figure I.12), submersibles passifs sphériques (forme la plus résistante à la pression), ont alors fait leur apparition. Ceux-ci descendent par gravité et sont remontés par le câble auquel ils sont constamment reliés. En 1934, la profondeur de 908 m est atteinte pour la première fois par un engin habité. Lors de différentes plongées à bord de bathysphères, des espèces abyssales ont été observées au travers d'un hublot d'une vingtaine de centimètres de diamètre, éclairées par une lampe située sur un autre hublot.

Ces systèmes ont ouvert la voie pour l'observation des grands fonds mais ne pouvaient pas s'y déplacer. Auguste Piccard a alors repris leur principe en inventant le bathyscaphe, sorte de dirigeable sous-marin (figure I.13), dans les années 1930. Celui-ci est composé d'une cabine sphérique en acier d'une dizaine de centimètres d'épaisseur et d'un flotteur rempli d'essence (plus léger que l'eau et moins compressible que les gaz). Il descend par gravité, manœuvre au fond sur de petites distances à l'aide d'hélices, puis remonte à la surface

en lâchant du lest. Il accueille généralement deux ou trois passagers qui observent les fonds grâce à un minuscule hublot. Ils ont été opérés entre 1948 et 1983 et ont rapidement atteint les plus grandes profondeurs connues (1380 m en 1948 avec le FNRS 2, 3150 m en 1953 puis 10 916 m en 1960 avec le Trieste).



Figure I.12 – Bathysphère exposée au musée National Geographic de Washington DC



Figure I.13 – Bathyscaphe Trieste (1958-1963)

Les bathyscaphes ont été abandonnées après les années 1980 à cause de leur faible manœuvrabilité et leur poids et volume trop importants. Les sous-marins légers (figure I.14), leur ont alors succédé en 1964 avec *Alvin*. Ceux-ci sont composés d'une enceinte résistant parfaitement à la pression pour accueillir l'équipage, d'une structure embarquant tout le reste des équipements, des ballasts et des lests pour faire varier la flottabilité et d'une coque apportant un certain hydrodynamisme. *Alvin* peut accueillir 3 personnes, pèse 17 tonnes et a une immersion maximale de 4500 m. Parmi la vingtaine de sous-marins légers qui ont été mis en service, on peut citer le *Cyana* (1970) et le *Nautile* (1984). Le *Cyana* est plus léger (8 tonnes) et a une plus faible immersion (3000 m) qu'*Alvin*, à l'inverse du *Nautile* qui pèse 18 tonnes et atteint une profondeur de 6000 m. Tous deux ont un équipage de 3 personnes. Le *Nautile* est toujours en service à l'Ifremer, rendant accessible 97% de la superficie des fonds marins (Ifremer 2021). Il est propulsé par un moteur électrique orientable muni d'une hélice, de deux moteurs transversaux, un à l'avant et l'autre à l'arrière, et de propulseurs verticaux dans le but d'avoir une manœuvrabilité précise au centimètre. Sa plongée et remontée s'effectuent grâce aux ballasts. Il a deux bras télémanipulateurs et se localise grâce à des sondeurs, manomètres, loch à effet Doppler et gyrocompas évaluant sa distance au fond, profondeur et vitesse. Tous ses systèmes sont alimentés par batterie pour une autonomie de 8 h.

Le principal inconvénient des véhicules sous-marins habités est leur coût important et les risques que le travail dans un tel environnement engendre. Par exemple, en 2005, le sous-marin russe AS-28 est resté coincé à une profondeur de 200 m avec son équipage de sept hommes avant d'être secouru par le robot sous-marin *Scorpio* qui a coupé les câbles du radar dans lesquels il était coincé. Leur autonomie est aussi limitée par les capacités humaines, en particulier les approvisionnements et par le volume d'air respiré.



Figure I.14 – Exemples de sous-marins légers

Aujourd'hui, ils gardent une place importante dans le domaine militaire, où l'intervention décisionnelle de l'homme en temps réel est indispensable mais sont délaissés dans le cadre de la recherche scientifique. En effet, du point de vue de l'observation, la taille des hublots (une quinzaine de centimètres de diamètre) limite grandement l'apport de l'embarcation de scientifiques à bord. Les sous-marins légers sont aussi très inconfortables avec un volume habitable fortement limité.

Les robots sous-marins autonomes

Les robots sous-marins non habités, Unmanned Underwater Vehicle (UUV) sont prévus pour les tâches trop dangereuses pour les sous-marins habités. Les UUV peuvent être autonomes ou téléopérés. La définition des niveaux d'autonomie diffère dans la littérature (Antonelli 2018). On considèrera dans ce mémoire que les robots autonomes sont ceux qui ne nécessitent pas de communication synchrone avec un opérateur afin de mener à bien leurs missions.

Les Autonomous Underwater Vehicle (AUV), robots sous-marins autonomes, sont utilisés pour des missions chronophages et répétitives ou dans des zones non accessibles aux bateaux. Ils sont donc principalement utilisés pour des missions d'exploration. Ils sont en général programmés pour effectuer des manœuvres pré-définies, mais certains sont dotés d'une plus grande autonomie décisionnelle. Des techniques telles que l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones ou la logique floue sont utilisées à cet effet. Ils peuvent se déplacer pendant des mois ou même être laissés sur place en attente d'un événement particulier, tels qu'une éruption volcanique (Clarke 2003).

Ils ont des caractéristiques très variées, allant des formes de torpilles aux formes biomimétiques, avec des tailles des plus petites (transportables par un homme) aux plus grandes (plusieurs centaines de kilos). Ils se déplacent en général grâce à des propulseurs et des surfaces de contrôle (comme des ailerons). Ils sont souvent configurables en embarquant des charges utiles adaptées aux missions souhaitées. L'*Autonomous Undersea Vehicle Applications Center* référence en effet plus de 240 configurations pour plus de 130 véhicules. On résume ici les propriétés de certains de ces véhicules dans le tableau I.3.

Par exemple, l'*Autonomous Benthic Explorer (ABE)* (figure I.15a), premier AUV utilisé par la société scientifique américaine en 1996, a une structure qui relie deux flotteurs en haut à un compartiment pour les équipements en dessous. Il était généralement utilisé

| Modèle | Masse Contrôle | Immersion Vitesse Couverture | Autonomie | Informations complémentaires |
|--------------|--|---|-----------|--|
| Remus 100 | 35 kg 3 DDL contrôlés | 100 m 2,6 m/s | 22 h | Forme de torpille. |
| Girona 500 | 200 kg 3 à 8 propulseurs (configuration standard : 2 verticaux + 2 horizontaux) 3 à 6 DDL contrôlés | 500 m | 8 h | 3 coques en forme de torpille (en haut : 2 flotteurs avec l'électronique, en bas : batteries et charges utiles). |
| Aries | 225 kg 6 propulseurs et gouvernails 5 DDL contrôlés | 30 m 1,8 m/s | 8 h | Corps rectangulaire |
| Dorado MBARI | 476 kg 1 propulseur orientable | 6000 m 1,5 m/s | 20 h | Forme de torpille. |
| ABE | 550 kg 5 propulseurs 6 DDL contrôlés | 4500 m 0,7 m/s horizontale 0,4 m/s verticale 40 km | 15 h | 2 flotteurs en hauteur + un compartiment pour les équipements en dessous. |

Tableau I.3 – Caractéristiques principales de différents AUV

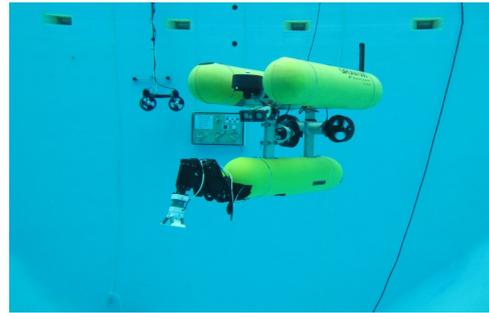
pour des missions de bathymétrie en profondeur avant d'être perdu en mer en 2010 après plus de 200 missions. Le *Girona 500* (figure I.15b) est commercialisé par la société IQUA Robotics (Robotics 2021) issue des développements à l'Université de Girona. Il reprend cette configuration, composée de 3 torpilles, qui confère une grande stabilité. Sa charge utile est configurable en fonction des missions.

Afin de tirer parti des propriétés variées des différents systèmes, ils sont parfois utilisés en flottes de robots, comme cela a été le cas lors de l'étude *Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN)* (Ramp et al. 2009) qui a eu lieu dans des zones étendues pendant plus d'un mois. Cette étude a fait intervenir des AUV : *REMUS 100* (mesures de température et de la bioluminescence de nuit), *Dorado MBARI* et *Aries* (mesures acoustiques) et des planeurs : *Slocums* et *Spray* (mesure de la température, la salinité et la clarté de l'eau ainsi que de la vitesse moyenne des courants).

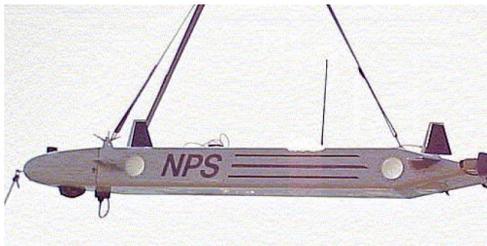
La plateforme *REMUS 100* (Remote Environmental Monitoring Units) (figure I.15d) développée par le *WHOI* (Woods Hole Oceanographic Institution) est l'un des plus petits AUV existants et a une forme de torpille. Le *Dorado MBARI* (Monterey Bay Aquarium Research Institute) a aussi une forme de torpille mais son immersion maximale est beaucoup plus importante que celle du *Remus 100* (6000 m contre 100 m) pour une autonomie équivalente. Il peut recueillir des échantillons d'eau de 1,8 L grâce à ses dimensions plus



(a) AUV ABE



(b) AUV Girona 500



(c) AUV Aries (Marco et Healey 2000)



(d) AUV REMUS 100

Figure I.15 – Exemples d'AUV

importantes. Le robot *Aries* (figure I.15c), quant à lui, a une forme rectangulaire allongée et des gouvernails en plus de ses propulseurs (Marco et Healey 2000).

Les planeurs (en anglais *gliders*) sont une sous-catégorie d'AUV qui se déplacent en dents de scie, sans propulseurs, tels des planeurs, en tirant parti de leur forme hydrodynamique (torpille), de leur flottabilité variable et en faisant varier la position d'éléments pesants au sein de leur corps (généralement leur batterie) : ils avancent en coulant naturellement puis, lorsqu'ils atteignent une profondeur déterminée, ils modifient leur flottabilité à l'aide d'une pompe pour remonter à la surface (figure I.16). Ils peuvent alors se localiser, en utilisant le Global Positioning System (GPS), avant de couler à nouveau. Ce cycle peut être répété pendant des jours grâce à leur très faible consommation en énergie (Clarke 2003). Ils communiquent en général par satellite (Iridium), radio et modems acoustiques. Ils sont en général assez lents mais peuvent rester déployés plusieurs mois d'affilée.

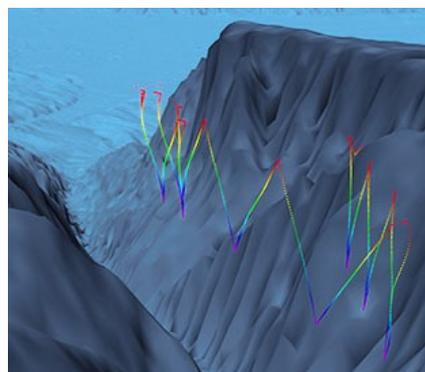


Figure I.16 – Illustration des profils en dents de scie effectués par les planeurs

Ils ont des dimensions comparables et se différencient donc sur leurs performances (voir tableau I.4 et figure I.17 pour quelques exemples). Par exemple, le *Slocum* a démontré une autonomie d'environ deux semaines alors que le *Sea Explorer* et le *Spray* (Sherman et al. 2001) affichent une autonomie de 5 à 6 mois. Les planeurs *Spray* ne nécessitent pas d'intervention extérieure au cours de leur mission alors que les planeurs *Sea Explorer* ont besoin de recevoir de nouvelles consignes à chaque remontée, envoyées par un opérateur.

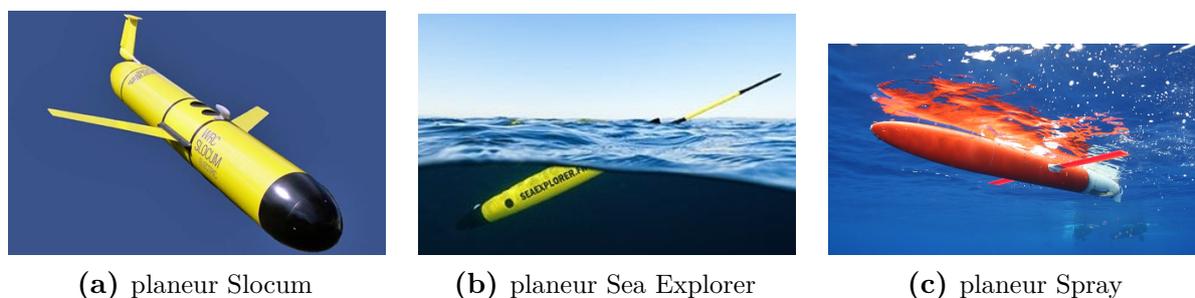


Figure I.17 – Exemples de planeurs

| Modèle Masse | Immersion Vitesse Couverture | Autonomie | Particularités |
|-----------------------------------|--|------------|--|
| Slocum 52 kg | 4 à 150 m ou 40 à 1000 m 0,5 m/s horizontale | 2 semaines | Ailerons. |
| Sea Explorer Alseamar 59 kg | 1000 m 0,5 m/s 3200 km | 5 mois | Antenne rétractable. Envoi manuel de nouvelles consignes à chaque remontée. Logiciel open-source |
| Spray 50 kg | 1000 m 0,25 m/s horizontale 0,1 m/s verticale 6000 km | 6 mois | |

Tableau I.4 – Caractéristiques principales de différents planeurs

Enfin, on peut aussi mentionner les robots biomimétiques qui s'inspirent des mouvements des animaux marins d'une part pour optimiser les mouvements des robots et d'autre part pour ne pas effrayer les animaux lors d'explorations. Une équipe de l'université de Zhejiang a développé un robot souple bio-inspiré par un poisson abyssal (Li et al. 2021). Ce robot (figure I.18) de petite taille (28 cm) et autonome est capable d'explorer des profondeurs allant jusqu'à 10 900 m grâce à son corps en silicone et ses nageoires.

Les robots autonomes doivent embarquer leur propre énergie. Leur consommation doit donc être optimisée, soit en limitant le temps des missions, soit en limitant leurs performances. L'intérêt de l'utilisation de robots autonomes étant de ne pas nécessiter d'interventions humaines durant les missions, il ne serait pas pertinent de réduire drastiquement la durée de celles-ci pour économiser de l'énergie, les robots autonomes sont donc en général assez lents et embarquent peu d'équipements. Leur fiabilité est aussi limitée, il

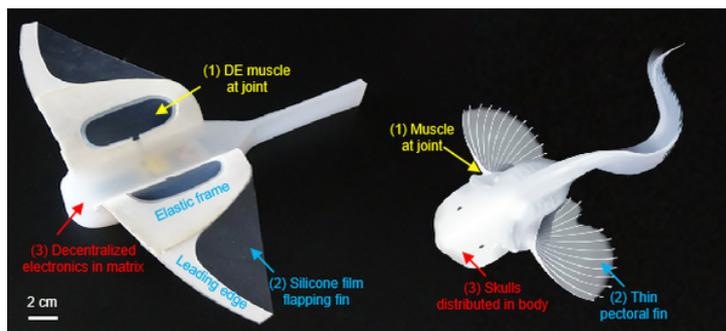


Figure I.18 – Robot biomimétique développé à l’université de Zhejiang (Li et al. 2021)

est donc rare qu’ils soient munis de manipulateurs et leur utilisation se limite généralement aux missions d’études et de cartographie.

Les robots sous-marins téléopérés

Les Remotely Operated Vehicle (ROV), robots sous-marins téléopérés, se déplacent dans l’eau grâce à des propulseurs et ont souvent une forme grossièrement cubique. Leur cadre est en général assez ouvert afin de laisser passer les flux d’eau le long des multiples propulseurs. Des flotteurs (mousses rigides) garantissent leur flottabilité neutre (pour faciliter leur navigation) ou positive (pour une remontée naturelle à la surface en cas de problème). Cette forme diminue leur vitesse avec leur hydrodynamisme mais leur permet d’être plus stables et manœuvrables suivant tous les axes. Ils sont souvent utilisés pour des missions nécessitant des manipulations, grâce à leur meilleure fiabilité que les AUV.

Leur taille varie avec leurs applications (Christ et Wernli 2014). Typiquement, les ROV d’observation vont des petites tailles, transportables à la main, aux robots d’une centaine de kilos. Ils ont généralement des moteurs électriques alimentés par batterie et sont limités à des profondeurs de 300 m. Les ROV de plus grande taille peuvent aller jusqu’à plusieurs tonnes et atteindre des profondeurs de 10 000 m. Ils ont des moteurs électriques et/ou hydrauliques et sont alimentés par des câbles électriques directement depuis la surface. Ils nécessitent un système de lancement et rattrapage pour ROV (LARS) pour les mettre à l’eau et les récupérer après chaque mission. Quelques exemples de ROV sont présentés sur la figure I.19 et leurs caractéristiques principales sont récapitulées dans le tableau I.5.

Parmi les ROV de petite taille, on peut citer le *2.8 Mini* d’OpenROV et le *BlueROV2* de Blue Robotics, tous deux conçus dans un esprit *open-source* à vocation scientifique et éducative et vendus en kit à monter. Le *BlueROV2* est cependant plus manœuvrable avec ses 6 à 8 propulseurs contre 3 pour le *2.8 Mini*. L’*Hydroview* d’Aquabotix, conçu pour accompagner et filmer des plongeurs pour le loisir, a le même nombre de propulseurs que le *2.8 Mini* mais une forme plus hydrodynamique. Le *Tortuga* de Subsea Tech reste transportable par l’homme sans nécessiter de moyens spécifiques pour la mise à l’eau. Il a été conçu pour l’observation et ses quatre propulseurs horizontaux orientables (en plus de ses deux verticaux) augmentent sa manœuvrabilité tout en optimisant sa consommation.

Parmi les ROV de grande taille, le *Victor 6000*, conçu en partenariat entre l’Ifremer et Eca Group, est l’un des plus célèbres. Il a été développé pour des missions d’exploration

et de manipulations dans les fonds marins jusque 6000 m. Déployé en 1997, il continue de participer à plusieurs missions par an.



(a) 2.8 Mini OpenROV



(b) HydroView Aquabotix



(c) BlueROV2 Heavy Blue Robotics



(d) Tortuga Subsea Tech



(e) Victor 6000 Ifremer



(f) ROV hybride Ariane développé par l'Ifremer

Figure I.19 – Exemples de ROV

Ocean One (figure I.20) est un ROV original, premier robot humanoïde plongeur, qui a la forme d'un buste muni de deux bras manipulateurs et de propulseurs pour se déplacer (Khatib et al. 2016 ; Brantner et Khatib 2021). Il a été développé pour effectuer des fouilles archéologiques sous-marines tout en transmettant les sensations tactiles de celles-ci à son opérateur. Il a aussi une caisse pour y déposer des prélèvements à remonter à la surface. Relié par un câble pour son alimentation électrique, le pilotage et le retour sensoriel (vidéo et haptique), il a été inauguré en mer en 2016 lors de la visite d'une épave à 100 m de profondeur.

On remarque que les petits ROV destinés au grand public ont en général trois propulseurs, ils ne sont donc pas actionnés suivant leurs six DDL, alors que les ROV professionnels et de recherche sont équipés d'un minimum de six propulseurs qui leur permettent de se déplacer dans toutes les directions. La présence de plus de six propulseurs conduit à des systèmes redondants, ce qui facilite le contrôle du robot, permet de mieux résister aux perturbations extérieures et de conserver une bonne manœuvrabilité en cas de défaut d'un propulseur.

D'autres catégories de ROV, aux utilisations spécifiques, existent (Capocci et al. 2017). Par exemple, les crawlers sont actionnés par des chenilles pour rouler sur des surfaces, contrairement aux ROV classiques qui utilisent des propulseurs pour nager librement. Ils peuvent rouler sur les fonds marins pour déposer ou enterrer des tuyaux ou des câbles de communication tout en étant lourdement lestés et éventuellement remorqués (Christ et Wernli 2014). Ils peuvent aussi inspecter des structures, par exemple en roulant à

| Modèle Prix | Masse Contrôle | Immersion Vitesse | Communication Energie | Informations complémentaires |
|---|---|----------------------|---|--|
| 2.8 Mini - OpenROV 739 € | 2,6 kg 3 propulseurs | 100 m 1 m/s | Câble Batterie 3,5 h | Open-source |
| HydroView - Aquabotix 4500 € | 4,3 kg 3 propulseurs | 45 m 1,5 m/s | Câble Batterie 3 h | |
| BlueROV2 Heavy - Blue Robo- tics 3628 € | 10,5 kg 8 propulseurs (4 h. + 4 v.) Flottabilité ajustable ma- nuellement | 100 m 1,5 m/s | Câble Batterie | Open-source |
| Tortuga - Subsea Tech | 40 kg 6 propulseurs (4 h. orientables + 2 v.) | 500 m 2,6 m/s | Câble CPL (Cou- rant Porteur en Ligne) | |
| Ocean One - Stanford Ro- botics Labo- ratory | 240 kg 8 propulseurs (4 h. + 4 v.) Légèrement flot- tant | 1000 m | Câble pour com- munication et alimentation Option batterie 40 min | Humanoïde Retour sensoriel Vision stéréosco- pique Pour les manipu- lations archéolo- giques |
| Ariane - Ifre- mer | 1800 kg 6 propulseurs (2 orientables + 2 h. + 2 v.) Flottabilité ajustée par ballasts | 2500 m 1,1 m/s | Fibre optique câble (décou- plable) + batterie 4 h à 10 h | ROV hybride 2 bras manipula- teurs (7 axes et 5 axes) |
| Victor 6000 - Eca / Ifre- mer | 4600 kg 6 propulseurs | 6000 m 0,5 m/s | Câble fibre optique et puissance | Capacité d'emport de 150 kg |

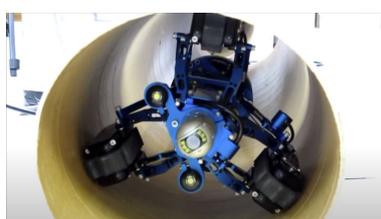
Tableau I.5 – Caractéristiques principales de différents ROV. Le nombre de propulseurs verticaux et horizontaux est indiqué par les notations h. et v.

l'intérieur des pipelines, tel que le *VT100* d'Inuktun (figure I.21a) ou sur les coques de bateaux (Ferreira et al. 2014). ECA Group développe aussi des ROV pour le nettoyage des coques de bateaux comme le *ROVINGBAT* (figure I.21b) ou pour l'inspection extérieure de câbles ou de *pipelines* comme le *RIS 2000* (figure I.21c).

On a pu voir dans cette section que les robots sous marins existants ont des capacités et des applications très variées. En particulier, les profondeurs atteintes par les AUV et les ROV sont sensiblement les mêmes alors que les AUV ont tendance à couvrir des



Figure I.20 – ROV Ocean One en méditerranée en interaction avec un plongeur (Khatib et al. 2016) - Crédit photo : Frederic Osada et Teddy Seguin, DRASSM/Stanford University, avec l'aimable autorisation du DRASSM



(a) Crawler pour inspection de pipeline : VT100 d'Inuktun



(b) Crawler pour inspection de coques et de structures immergées : ROVINBAT d'Eca Group



(c) ROV pour inspection de câbles et pipelines : RIS 2000 d'Eca Group

Figure I.21 – Exemples de ROV d'inspection

distances horizontales et des vitesses plus importantes. Les planeurs couvrent des distances plus importantes à des profondeurs moins grandes. Les USV effectuent leurs mesures uniquement depuis la surface mais peuvent optimiser leur énergie en utilisant moins de propulseurs et en tirant parti de l'énergie solaire par exemple. Les ROV ont l'avantage d'être manœuvrables, leur contrôle par l'opérateur autorise les prises de décisions immédiates pour s'adapter aux situations sur le terrain. Leur utilisation est cependant coûteuse avec le déploiement d'équipes importantes.

Pour tirer parti des avantages à la fois des ROV et des AUV, des ROV hybrides, les Hybrid Remotely Operated Vehicle (HROV), ont vu le jour avec *Nereus* (WHOI) avec l'objectif d'accéder à des zones aux conditions extrêmes. *Nereus*, a été le troisième engin à atteindre le fond de la fosse des Mariannes à 10 900 m en 2009 (Whitcomb et al. 2010). Les HROV sont pilotés en temps réel par l'intermédiaire d'une fibre optique et sont alimentés par batterie, ils peuvent donc être découplés de l'opérateur pour continuer leur mission en autonomie. Ce découplage se fait généralement en coupant la fibre optique qui est alors perdue.

Le HROV *Ariane* a été développé par l'Ifremer pour des applications côtières jusqu'à 2500 m de profondeur (Brignone et al. 2015 ; Raugel et al. 2019). La descente et la remontée

d'*Ariane* s'effectuent par traction du câble principal afin de préserver les batteries de l'engin. Pour *Ariane*, le mode découplé est jusqu'alors utilisé uniquement en mode de secours en cas de défaillance si la fibre optique se casse ou se coince (elle est alors coupée). Grâce à ses propulseurs orientables, il peut opérer avec précision dans des zones accidentées telles que les falaises.

I.3 Communications sous-marines

En tant que véhicules opérés à distance, les ROV nécessitent de communiquer de manière instantanée avec leur station de contrôle. La communication permet de transmettre les données dans les deux directions : du haut vers le bas pour le contrôle et du bas vers le haut pour les mesures. Les données de contrôle doivent en général être transmises en continu (véhicules téléopérés) ou de temps en temps dans le cas des véhicules semi-autonomes recevant de nouvelles instructions. Les données transmises par le véhicule vers le poste de commande peuvent correspondre à des mesures extéroceptives ou proprioceptives, à des flux vidéos ou à des retours sensoriels similaires à ceux que l'opérateur pourrait avoir s'il était à l'intérieur ou à la place du véhicule (Christ et Wernli 2014, p. 74).

Les flux de données varient en fonction du type de messages transmis. Par exemple, une vidéo en 720p a un flux de données typiquement compris entre 4 Mbit/s et 100 Mbit/s (en fonction de sa compression), l'enregistrement de toutes les informations transmises par un BlueROV2 (BR2), dont la vidéo, est de l'ordre de 1 Mbit/s alors qu'un simple message de commande en vitesse sur ses 6 axes est de l'ordre de 4 kbit/s.

I.3.1 Communications non filaires

Différents types de communications existent, filaires ou non filaires. Les communications non filaires sont de type électromagnétiques, acoustiques ou optiques.

Les acoustiques sont les plus répandues pour les communications sous-marines (Ali et al. 2020). Elles se propagent plus vite dans l'eau que dans l'air et bénéficient d'une grande portée (jusque 20 km). Cependant elles sont assez lentes et sensibles à la pression, la température et la salinité (Lichte 1919 ; Christ et Wernli 2014, p. 388) et sujettes à une absorption importante qui limite leur bande passante. Elles ne sont pas adaptées aux eaux peu profondes et perturbent la faune marine (Palmeiro et al. 2011). De plus, les systèmes émetteur-récepteurs sont coûteux, encombrants et consomment beaucoup d'énergie. Cette technologie est donc généralement utilisée pour envoyer de simples signaux d'état. Cela a été le cas pour *Nereus* en mode AUV, transmettant l'état du véhicule toutes les 30 à 45 secondes (Whitcomb et al. 2010).

Les ondes électromagnétiques employées pour les communications sous-marines correspondent aux fréquences de la lumière visible ou aux fréquences radio (RF). Les transmissions RF apportent des fréquences élevées sur des distances courtes, de l'ordre de la dizaine de mètres. Les distances plus importantes sont atteintes en très basses fréquences, au détriment du débit (Christ et Wernli 2014, p. 43-44, 77). Elles sont moins efficaces que les communications acoustiques mais sont aussi moins dépendantes de l'environnement (Palmeiro et al. 2011). Elles ne sont pas affectées par la turbidité de l'eau ni par sa pression et peuvent fonctionner dans les eaux peu profondes (Ali et al. 2020). Elles ont aussi l'avantage de traverser les différents milieux (eau, air, glace). Cependant les systèmes émetteur-récepteurs sont coûteux, encombrants et consomment beaucoup d'énergie. Elles sont aussi très sensibles à la conductivité de l'eau et donc à sa température et salinité (Kaushal et Kaddoum 2016).

Les communications optiques sont rapides dans l'eau et offrent une grande bande

passante. Cependant, les rayons transmis sans support (à l'inverse des fibres optiques), sont sensibles à la différence de densité et de température entre les couches d'eau et aux particules en suspension qui entraînent des réflexions, réfractions et dispersions. Par exemple, il a été montré que pour un flux de données de 1 Gbit/s, la portée passe de 30 m en eaux profondes à 10 m en zone littorale (Kaushal et Kaddoum 2016). Elles ne peuvent pas traverser la surface de l'eau et nécessitent que l'émetteur et le récepteur soient alignés. La turbidité de l'eau a un impact positif sur ce dernier point en diffusant les rayons optiques (Kaushal et Kaddoum 2016). A l'inverse des technologies optiques et radio, leur système émetteur-récepteur est peu encombrant et peu coûteux (Ali et al. 2020).

Toutes ces méthodes sont fortement influencées par les propriétés du milieu aquatique telles que la salinité, la pression, la température, la turbidité et les courants (Ali et al. 2020). Ces propriétés varient selon les lieux et profondeurs, ce qui ne permet pas à ces systèmes de fonctionner de la même façon partout.

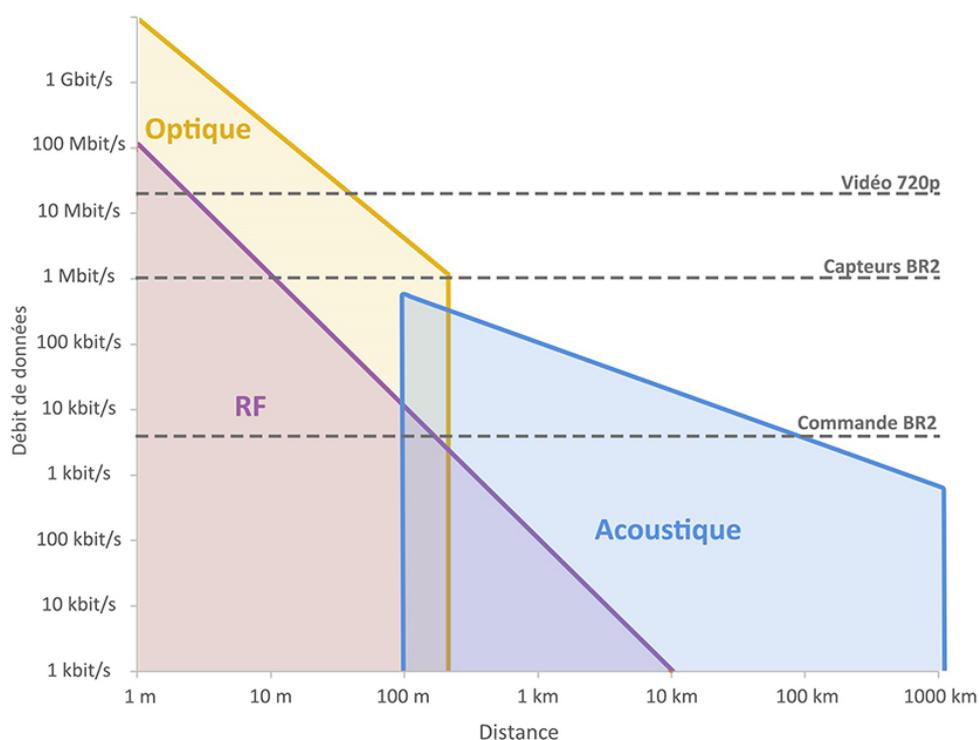


Figure I.22 – Comparaison des débits en fonction de la portée pour différents types de communications sans fil dans l'eau

Le graphique en figure I.22, réalisé à partir des données disponibles dans la littérature, récapitule les débits possibles en fonction de la distance pour différents types de communications sans fil. A titre de comparaison, les débits classiques de différents types de données y sont présentés. Par exemple, dans les meilleures conditions avec une communication radio, un BR2 ne pourrait être correctement contrôlé qu'à 10 m maximum. Ces performances dépendent aussi des fréquences des ondes utilisées (Caiti, Calabrò et Munafò 2012).

Au vu des contraintes et performances des transmissions non filaires détaillées ci-dessus, les communications sous-marines se font la plupart du temps par l'intermédiaire de câbles.

I.4 Utilisation du câble en environnement sous-marin

Les câbles entourent notre quotidien : du simple câble pour transmettre les données de notre téléphone aux câbles de structures de ponts dans le génie civil. Ceux-ci remplissent en général l'une ou plusieurs des trois fonctions principales que sont l'alimentation électrique, la transmission de données ou la structure mécanique d'un ensemble. Bien que notre étude porte sur les câbles reliés aux robots sous-marins, il est intéressant d'ouvrir le champ de recherche aux domaines connexes, en particulier vis-à-vis de l'étude des modélisations et comportements mécaniques de ceux-ci.

I.4.1 Câbles pour les ROV

Les ROV sont habituellement reliés par des câbles sous-marins pour communiquer avec leur unité de contrôle. La littérature définit d'ailleurs régulièrement les ROV comme les robots sous-marins reliés par un câble à la surface (Christ et Wernli 2014, p. 15). En anglais, la différence est faite entre les termes *umbilical* (ombilical) et *tether* (longe ou laisse), qui définissent respectivement le câble reliant le système en profondeur à la surface et le câble reliant deux systèmes en profondeur (Christ et Wernli 2014, p. 205). Ce dernier est généralement moins raide et a une flottabilité positive. Dans ce mémoire les termes d'ombilical et de câble sont utilisés indifféremment.

Différents types de câbles existent pour la communication des ROV. Les paires torsadées, comme les câbles Ethernet, sont utilisées pour réduire le bruit entre les brins et peuvent être blindées pour réduire encore plus le bruit (Capocci et al. 2017). Les câbles Ethernet de catégorie 5 ont par exemple un débit de l'ordre de 1 Gbit/s et sont limités à des longueurs de 300 m avec une réduction des performances dès 100 m (Capocci et al. 2017).

Le câble est aussi utilisé pour transmettre l'énergie au robot sous-marin, pour augmenter son autonomie par rapport à l'utilisation de batteries (Ajwad et Iqbal 2014). Généralement, le courant est transmis sous forme continue (DC) pour les ROV de petite et moyenne tailles et sous forme de courant alternatif (AC), avec un convertisseur embarqué par le ROV pour les systèmes plus imposants (Capocci et al. 2017). Afin de contrer les pertes électriques dans les longs câbles, des tensions plus grandes sont envoyées à des fréquences élevées (exemple 6,6 kV à une fréquence de 460 Hz pour le câble de 6000 m du ROV ROSUB 6000).

Le câble a aussi l'avantage de constituer un lien physique relié au ROV en cas de problèmes. Il peut par exemple éviter que des robots soient perdus en mer, comme cela a été le cas pour le robot autonome ABE.

Ces câbles sont en général assez légers et ont une flottabilité proche de la neutralité. Par exemple, l'ISE Hysub ATP40 a été relié à un bateau par un câble de 450 m de long et de 2,3 cm de diamètre pour son alimentation énergétique et la transmission des signaux de contrôle alors qu'il descendait à une profondeur de 370 m. Des bouées ont été placées le long de ce câble pour le rendre neutre.

Le HROV *Ariane* a la particularité d'être relié à deux câbles en série. Le premier, qui relie le bateau à un système en profondeur transmet le courant et les données et sert à tracter le véhicule alors que le second est une simple fibre optique qui ne transmet que les

données.

Le tableau I.6 regroupe les propriétés principales de quelques câbles reliés à des ROV. Il est à noter que le diamètre des câbles dépend plus de sa capacité à transmettre de l'énergie ou non que des dimensions du ROV auquel il est relié. Cette particularité est mise en évidence sur la figure I.23.

| ROV Modèle câble | Communication | Energie | Traction | Dimensions | Caractéristiques |
|---|---------------|---------|----------|---------------------|--|
| Subzero II (7 kg) | ✓ | | | ∅ 2,5 mm | Flottabilité neutre. |
| BlueROV2 (10,5 kg) Fathom ROV Tether | ✓ | | | ∅ 7,6 mm 300 m | Flottabilité neutre. Charge maximale : 0,3 kN |
| BlueROV2 (10,5 kg) Fathom ROV Tether slim | ✓ | | | ∅ 4 mm 200 m | Flottabilité neutre. Charge maximale : 0,3 kN |
| Tortuga (43 kg) | ✓ | ✓ | | ∅ 9,5 mm 500 m | Flottabilité neutre. Charge maximale : 1,2 kN |
| Ocean One (240 kg) | ✓ | ✓ | | 150 m | Flottabilité neutre. Communication par Ethernet. Transmission de courant AC converti en DC dans le robot. |
| ISE Hysub ATP40 (1800 kg) | ✓ | ✓ | | ∅ 23 mm 450 m | Flottabilité neutre avec bouées intermédiaires. |
| Ariane (1800 kg) Câble porteur | ✓ | ✓ | ✓ | 2500 m | Charge maximale : 10 kN |
| Ariane (1800 kg) Fibre optique renforcée | ✓ | | | ∅ 2,6 mm 450 m | Rupture à 1 kN |
| Victor 6000 (4600 kg) Câble porteur | ✓ | ✓ | ✓ | ∅ 20,6 mm 8500 m | Triphasé : 21 kW, 400 Hz, 1150 V 7 Fibres optiques (1 utilisée). Double armature en acier. Charge de rupture : 200 kN |
| Victor 6000 (4600 kg) Laisse | ✓ | ✓ | | 300 m | Armature en kevlar pour être quasi flottant. |

Tableau I.6 – Caractéristiques principales de différents câbles

I.4.2 Autres systèmes avec câbles

Avant même l'apparition des ROV, les bathysphères étaient déjà reliées par un câble en acier qui permettait de remonter la sphère à la surface. Des câbles électriques et

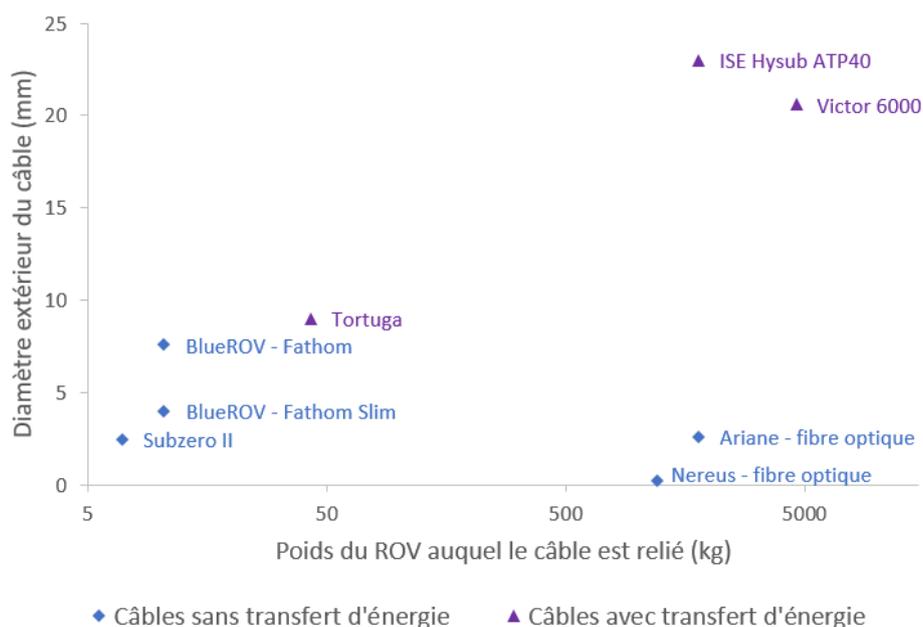


Figure I.23 – Comparaison du diamètre de différents câbles en fonction du poids du ROV auxquels ils sont reliés

téléphoniques scellés dans un tuyau en caoutchouc assuraient l'alimentation d'une lampe et une communication entre l'équipage et la surface par une ligne téléphonique. En 1932, William Beebe a même réalisé une émission de radio en direct du fond, à une profondeur de 670 m.

Les câbles sont aussi utilisés pour tracter les véhicules sous-marins, tels que ceux qui déposent les *pipelines* au fond de la mer. Dans ce cas ils doivent être beaucoup plus résistants et donc en général plus gros que les câbles utilisés pour la communication.

Les USV ont beau ne pas être reliés par câble à leur station de contrôle, ils embarquent des charges utiles à des profondeurs variables (caméras, sondes, capteurs,...) et celles-ci sont généralement reliées par un câble au drone de surface.

Des câbles téléphoniques et fibres optiques traversent les océans pour faciliter les communications entre les continents. Des éléments similaires aux câbles sont utilisés dans les plateformes pétrolières, tels que les amarres (cordes ou câbles) et les tuyaux (Gay Neto et Arruda Martins 2013). Ces éléments sont en général simplement suspendus ou reposent sur le sol.

I.5 Inconvénients des câbles

Bien qu'utiles, les câbles présentent tout de même des inconvénients en impactant significativement le système (McLain et Rock 1992). En effet, les câbles sous-marins subissent une force de traînée lorsqu'ils se déplacent, ce qui ralentit les mouvements du ROV, même en cas de faibles courants marins (Bevilacqua, Kleczka et Kreuzer 1991).

L'un des phénomènes les plus rapportés par rapport à l'utilisation de robots sous-marins reliés par câbles est la transmission du mouvement de pilonnement du bateau de surface au câble, entraînant des contraintes oscillatoires (McLain et Rock 1992). Déjà en 1932, le phénomène avait été observé avec une bathysphère reliée par un câble à un bateau. Ce dernier étant soumis à la houle en surface, non présente en profondeur, a transmis son mouvement le long du câble, entraînant la bathysphère telle un pendule.

Lorsque le ROV est stationnaire, le câble génère des forces et des moments au niveau de son point d'attache, ce qui déséquilibre le ROV et perturbe ses manipulateurs. Soyly, B. J. Buckham et Podhorodeski (2010) ont montré en simulation que la déviation verticale de la position d'un ROV supposé stationnaire à 1000 m de profondeur est de 10 m pour un câble de 1000 m avec un courant de 0,5 noeuds. De plus, le point d'attache du câble sur les ROV ne se situe jamais en son centre de gravité, plus il en est déporté, plus les déviations engendrées sur la trajectoire du ROV sont importantes.

D'autres simulations (Fang, Hou et Luo 2007), ont montré que, pour un ROV de petite taille (1 m de long), son câble, de longueur variable (100 m à l'état initial), avait une influence sur ses mouvements, quelles que soient les commandes qui lui sont envoyées. En effet, des déplacements verticaux ou horizontaux indésirables ont lieu lorsqu'il tente d'avancer ou de monter. Son orientation et sa vitesse sont aussi modifiées par la présence du câble et certaines vitesses présentent des oscillations. Cette étude a aussi montré que les influences sur le ROV du courant marin et du câble sont couplées. Feng et Allen (2004) ont aussi montré de façon numérique que le câble (déroulé par la traction du véhicule) a tendance à ralentir le véhicule lorsqu'il avance et le pousse légèrement vers le haut. Cette étude a aussi montré que la tension au point d'attache est proportionnelle à la longueur de câble immergée.

Les premières expériences de mesure de la tension d'un câble léger relié à un ROV (McLain et Rock 1992), menées en 1992, ont montré que la force du câble peut atteindre des valeurs proches de celles de la poussée maximale du ROV utilisé (31 kN). Il a été remarqué que lors de la descente du ROV, les contraintes sur le câble sont de plus en plus grandes à mesure que la profondeur augmente (respectivement 900 N et 1400 N à 70 m et 230 m de profondeur). Lorsque le ROV est statique, les efforts dans le câble sont principalement dus aux courants et sont plus stables et inférieurs (environ 440 N à une profondeur de 340 m) aux efforts dans le câble lié à un ROV en mouvement.

Les courants empêchent aussi le câble de former une ligne droite entre ses deux points d'attache, il peut donc se retrouver en tension lorsque sa longueur est proche de la distance entre les véhicules qu'il relie.

Pour tenter de limiter ces efforts parasites, les câbles de ROV sont en général maintenus dans une configuration relâchée avec beaucoup de mou (Soyly, B. J. Buckham et Podhorodeski 2010) ce qui, combiné à une force de torsion appliquée sur le câble, peut former des

boucles (Gay Neto et Arruda Martins 2013) (figure I.24). Ces boucles formées peuvent conduire à une détérioration du câble si un pli apparaît. Une expression analytique du mou maximal accepté pour éviter les boucles est proposée dans (Coyne 1990).

D'autre part, des défauts de fabrication dans les câbles génèrent des efforts internes qui entraînent des torsions à certains endroits (Gay Neto et Arruda Martins 2013). Ces torsions peuvent elles aussi créer des boucles dans le câble, ou, si elles sont restreintes, transmettre ces contraintes au véhicule en l'entraînant en rotation. Au delà des défauts de fabrication, les câbles ont tendance à conserver leur forme lorsqu'ils restent longtemps dans une position, comme on peut le voir sur la figure I.25 avec un câble Fathom slim qui a conservé ses boucles après être resté sur une bobine plusieurs mois.



Figure I.24 – Boucle formée à la surface de l'eau par le câble d'un BlueROV

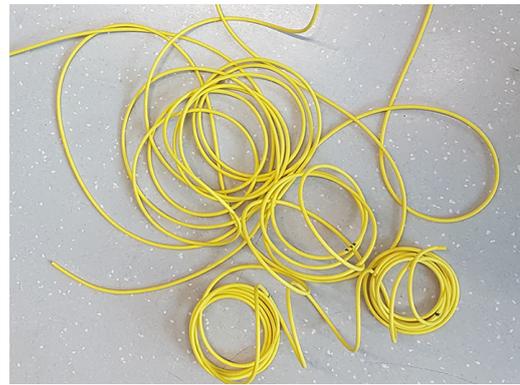


Figure I.25 – Boucles conservées par un câble Fathom slim resté sur une bobine plusieurs mois

Pour garantir un bon espace de travail au ROV, une grande longueur de câble est nécessaire, ce qui devient lourd à gérer. Plus le ROV est compact et moins il est puissant, plus il est impacté par les contraintes qu'il subit. D'autant plus que, comme on le voit sur la figure I.23, le diamètre du câble n'est pas proportionnel aux dimensions du ROV auquel il est relié.

D'autre part, lorsque le ROV se déplace près de reliefs (figure I.26) ou à l'intérieur de structures, le câble peut s'accrocher, ce qui peut coincer le robot et dégrader le système ainsi que son environnement. On peut malheureusement citer des exemples de véhicules sous-marins bloqués par des câbles, tels que le *Johnson Sea Link*, pris dans le gréement d'une épave entraînant la mort de deux sous-marinières en 1973 ou le sous-marin russe AS-28 coincé dans des câbles de radar en 2005, heureusement secouru à temps. Ces exemples portent sur des câbles indépendants du véhicule coincé, mais il est tout à fait possible qu'un véhicule s'emmêle dans son propre câble, ou, plus probable encore qu'il soit pris dans le câble d'un autre robot lors de missions avec une flotte de robots. Dans le cas des véhicules puissants, le câble risque même d'être aspiré par les propulseurs s'il est trop lâche (Brignone et al. 2015). Ce problème a été constaté avec un robot *Seasam* qui a aspiré dans un de ses propulseurs une cordelette le reliant à un autre robot (figure I.27).



Figure I.26 – Câble d'un OpenROV Trident proches d'obstacles naturels

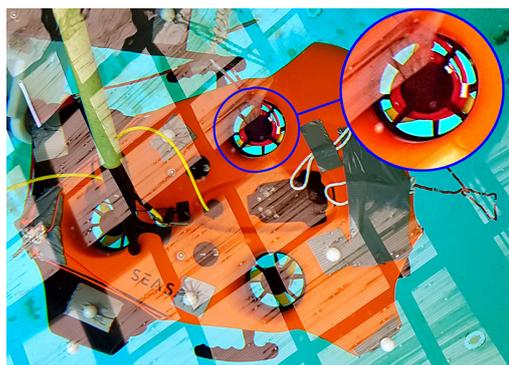


Figure I.27 – Cordelette aspirée par un propulseur du robot Seasam lors d'essais de cordées de robots

Des exemples de trajectoires pour les études des poissons sont présentées dans (Sward, Monk et Barrett 2019) (figure I.28). En particulier, la trajectoire *cloverleaf* a été utilisée par un petit ROV en eau peu profonde. Au vu de ces trajectoires, on comprend bien que le risque que le câble s'emmêle est élevé.

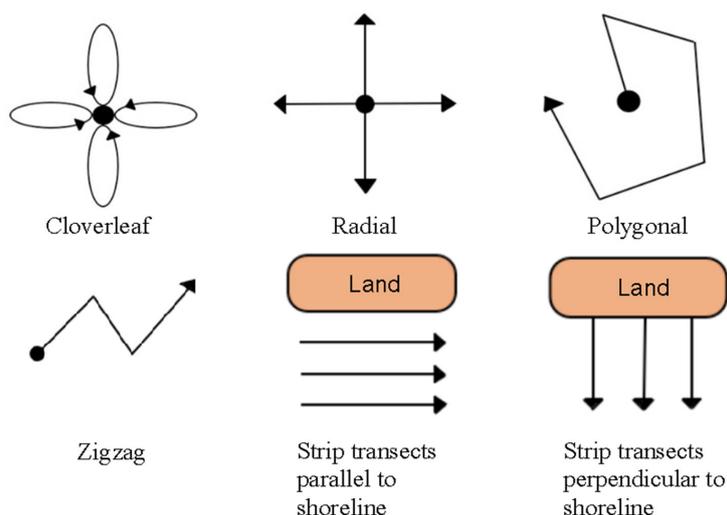


Figure I.28 – Exemples de trajectoires de ROV pour l'étude visuelle de poissons (Sward, Monk et Barrett 2019)

Les simples frottements d'un câble traînant au fond de la mer entraînent son usure prématurée (Drumond et al. 2018) et peuvent générer des nuages de sédiments qui gêneraient la vision du ROV et dérangeraient l'environnement naturel.

I.5.1 Problématique de la liaison par câble des ROV

Aujourd'hui, l'utilisation de robots sous-marins de type ROV dans le cadre de l'exploration des eaux de faible profondeur est en plein essor. Ces robots téléopérés nécessitent l'utilisation d'un câble qui peut diminuer la manœuvrabilité du système, entraîner une surconsommation de celui-ci et qui peut venir en interaction avec l'environnement. L'exploration en eaux peu profondes implique l'utilisation de robots de petite taille qui sont

d'autant plus sensibles aux perturbations dues à l'ombilical et à l'état de la mer en surface (vagues, houle et courants). Bien que les ROV soient téléopérés, il reste intéressant d'automatiser certains aspects de la gestion de tels systèmes et, en particulier, de la gestion de l'ombilical qui les relie au poste de commande. Les problématiques soulevées par l'utilisation de câbles sous-marins et par l'exploration en eaux peu profondes ont conduit à déterminer les objectifs suivants :

- **Réduire les impacts négatifs du câble sur le système et les risques** liés à l'utilisation de celui-ci au cours des missions, afin d'augmenter sa **manœuvrabilité** et de **minimiser sa consommation énergétique**.
- **Gérer le câble de façon automatique en temps réel** en respectant les contraintes précédentes.

I.6 Solutions existantes de gestion des câbles

Les sections précédentes ont montré la nécessité de l'utilisation de câbles en robotique sous-marine et les inconvénients liés à leur utilisation. Il apparaît donc nécessaire de les gérer afin d'améliorer le fonctionnement global des systèmes. Cette section propose un état de l'art des solutions existantes de gestion des câbles reliés aux robots sous-marins.

La plupart des ROV de petite taille sur le marché ne proposent aucun système de gestion du câble, à part éventuellement un simple enrouleur manuel, comme c'est le cas pour le BR2 (figure I.29). Celui-ci est équipé d'un collecteur tournant pour connecter le câble au poste de contrôle et d'un frein réglable pour contrôler la résistance à la rotation. Il est facilement transportable (3 kg) mais assez cher (500 € pour 300 m d'enroulement).



Figure I.29 – Enrouleur proposé par BlueRobotics

Les types d'enrouleurs varient, des plus simples, tels que celui du BR2, aux plus performants. Ces derniers sont actionnés par un moteur dont le contrôle est plus ou moins complexe. Les plus simples se comportent comme un simple ressort de rappel en maintenant un couple constant et donc une tension donnée (qui dépend du rayon d'enroulement). Les plus complexes compensent la houle et les différentes contraintes extérieures. Les enrouleurs sont généralement embarqués sur le véhicule de surface ou, dans certains cas, directement par le robot, comme c'est le cas pour celui de *Nereus* (Whitcomb et al. 2010). Lorsque l'enrouleur sert à tracter le véhicule, on parle de treuil.

Lorsque le câble utilisé n'a pas la flottabilité souhaitée, il est possible d'y attacher des bouées pour le rendre neutre ou flottant. Par exemple, dans l'étude de (McLain et Rock 1992) des bouées espacées d'une quinzaine de mètres sont placées tout au long du câble. Celui-ci est aussi muni de bouées plus grosses à la surface qui permettent de compenser en partie les mouvements de pilonnement du bateau en surface. Cette solution est très courante en robotique sous-marine avec des flotteurs placés à faible distance derrière le ROV afin d'éviter que le câble ne s'emmêle.

Le moyen le plus utilisé aujourd'hui pour la gestion des câbles des ROV travaillant en grande profondeur est le Tether Management System (TMS). Il s'agit d'un système intermédiaire entre la surface et le ROV qui gère la partie du câble reliée au ROV (voir élément b de la figure I.30a) (Christ et Wernli 2014, p. 233). Celui-ci est généralement intégré à un lest dépresseur ou à une cage permettant de protéger le ROV lors de son déploiement.

Par exemple, l'Ifremer utilise un TMS pour la gestion de la fibre optique de son HROV

Ariane (Brignone et al. 2015 ; Raugel et al. 2019 ; Drogou, Rigaud et Artzner 2012). Le système complet est présenté en figure I.30. Un ombilical optoporteur de 2500 m (Fig. I.30a.a), intégrant une fibre optique et un câble électrique, est déployé depuis le navire à l'aide d'un treuil. Il est relié à un lest dépresseur (Fig. I.30a.b) qui gère le découplage entre le navire et l'engin sous-marin. Celui-ci est par ailleurs relié à un câble de traction de 30 m (Fig. I.30a.c) muni d'un poids de 4 kg (Fig. I.30a.d) et d'un flotteur à son autre extrémité (Fig. I.30a.e). Le couple "poids-flotteur" force une courbure du câble qui a pour rôle d'amortir la transmission au véhicule du pilonnement du lest dépresseur. Finalement, ce flotteur est relié à une fibre optique (Fig. I.30a.f) fine de 400 m qui est enroulée et déroulée par le TMS intégré au véhicule. Lorsque la fibre optique est entièrement enroulée, le flotteur se couple au TMS pour tracter l'engin et faciliter son déploiement. Le TMS enroule et déroule activement la fibre optique pour garder sa tension constante grâce à un système de mesure afin de s'adapter aux mouvements du bateau et de l'engin.

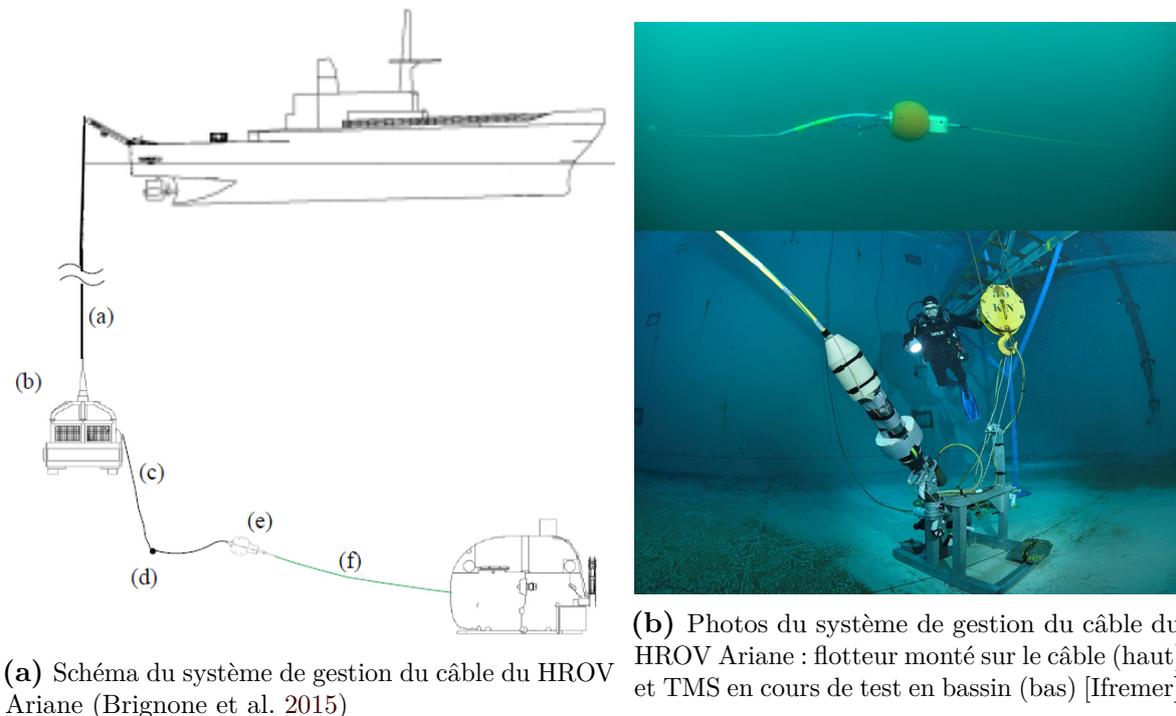


Figure I.30 – Système de gestion du câble du HROV Ariane

Un second ROV peut aussi être utilisé en guise de TMS, comme cela a été le cas pour *Ocean One* relié à *Leonard* par un câble Ethernet de 3 m de long lors de son exploration sur l'épave de la *Lune* (Khatib et al. 2016). *Leonard* était lui-même relié à la surface par un câble Ethernet de 150 m de long. Les effets des courants et de la tension du câble étaient compensés par le contrôle à distance par les opérateurs de ces deux ROV. Cette solution, bien qu'efficace pour limiter l'effet du câble sur le robot manipulateur nécessite un contrôle manuel et rajoute un risque de collision entre les deux ROV, maintenus très proches l'un de l'autre. L'équipe de recherche qui travaille sur ce robot a d'ailleurs pour ambition de remplacer le câble par une communication optique sans fil entre les deux ROV dans le but de déployer plusieurs *Ocean One* ensemble (Brantner et Khatib 2021). L'utilisation de plusieurs ROV reliés les uns aux autres, dits *cordée de robots* constitue une solution

intéressante de gestion du câble. En effet, la propulsion des différents robots est couplée et diminue l'impact de la traînée et des courants sur le câble du robot principal.

En l'absence d'un tel système, le comportement des deux véhicules (en surface et en profondeur) peut être adapté afin de maintenir une configuration de câble désirée. Cette configuration peut être maintenue avec le véhicule de surface (bateau ou USV) qui copie les mouvements du ROV afin de maintenir une distance constante entre les deux véhicules. Cette solution est sensible aux déviations et en particulier à celles du ROV entraîné par les courants. La connaissance exacte de l'état du ROV ou du câble est nécessaire.

Il est donc intéressant de connaître l'état du câble en temps réel. Cette information peut être obtenue par instrumentation du câble ou par vision. Les moyens existants d'instrumentation du câble en vue de mesurer son état seront présentés en section III.1.1. Le contrôle par vision a été développé par Laranjeira, Dune et Hugel (2020), qui proposent un asservissement visuel du câble au sein d'une cordée de robots (figure I.31). Cette solution peu coûteuse s'applique aux mini-ROV, tels que les BR2, en se basant uniquement sur leurs capteurs embarqués, sans instrumenter le câble. L'asservissement s'effectue par le contrôle du robot suiveur. Cependant, cette solution se base sur l'hypothèse d'une forme de chaînette du câble, qui n'est atteinte qu'avec les câbles pesants, alors que les câbles reliant les ROV sont majoritairement neutres ou flottants.

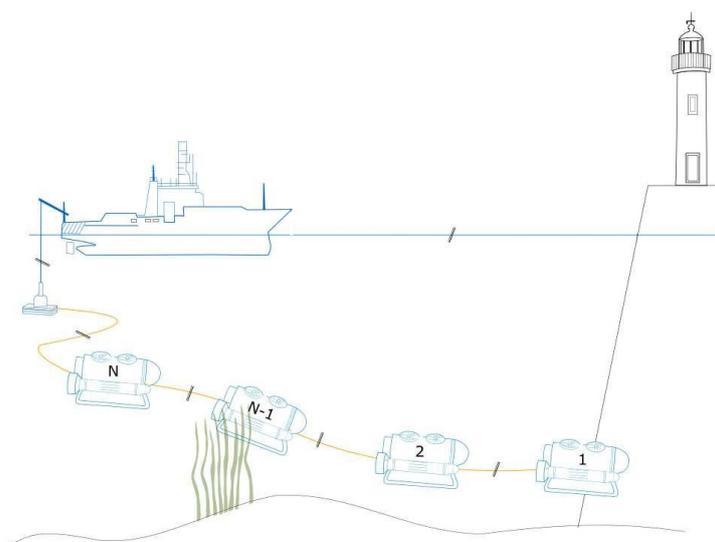


Figure I.31 – Illustration d'une cordée de robots (Moreira 2019)

Les USV et bateaux sont généralement moins manœuvrables que les ROV, la duplication du mouvement du ROV est par conséquent complexe. Il est donc intéressant de contrôler la longueur de câble entre ces deux éléments afin de limiter les mouvements du véhicule de surface. Ce contrôle s'effectue à partir des informations d'état du câble ou d'odométrie des véhicules.

Le tableau I.7 présente les avantages et inconvénients des différentes solutions existantes de gestion des câbles.

| Solution | Contexte | Problèmes traités | | | | | | Performances et inconvénients |
|--|--|-------------------|---------|-------------|--------|----------|---------|--|
| | | Accroches | Traînée | Pilonnement | Amorti | Stockage | Docking | |
| Enrouleur manuel | | | | | | ✓ | | Contrôle manuel. Rapport utilité-prix faible. |
| Bouées intermédiaires (McLain et Rock 1992) | | ✓ | ✓ | | | | | Gênent l'enroulement du câble. |
| Lest dépresseur | | | | ✓ | | | | Découple le ROV du pilonnement du véhicule de surface. Système encombrant. |
| TMS | Utilisé en eaux profondes. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Second ROV (Khatib et al. 2016) | Exemple : Leonard relié à Ocean One par un câble de 3 m lors d'une opération sur site à 100 m de profondeur. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | Contrôle manuel à distance du système. Risque de collision entre les deux ROV. |
| Duplication des mouvements du ROV par le véhicule de surface | | ✓ | ✓ | | | | | Nécessite une grande manœuvrabilité du véhicule de surface. Consommation importante du système. |
| Contrôle de la configuration du câble | Asservissement visuel ou instrumentation du câble. | ✓ | ✓ | | | | | Vision limitée aux très courtes distances. |

Tableau I.7 – Récapitulatif des différentes solutions existantes de gestion de câbles

I.7 Axes de recherche

Parmi les différentes applications de robotique sous-marine présentées dans ce chapitre, cette thèse s'intéresse à l'utilisation de ROV de faibles dimensions naviguant en eaux peu profondes. La littérature, présentée en section I.6, montre qu'il y a encore peu de solutions de gestion automatique du câble adaptées à ce type d'applications.

Pour élargir le champ d'action des petits ROV, qui ne peuvent pas tracter un ombilical très long, il est fréquent de leur adjoindre un USV en tant que base mobile qui les suit en surface. L'étude présentée dans ce mémoire se focalise donc sur le cas d'un système composé d'un ombilical reliant un USV et un BR2, tel que celui présenté sur la figure I.32. Cependant, l'application potentielle de ces travaux ne se limite pas seulement à ce contexte spécifique et peut être transposée à d'autres types de missions.

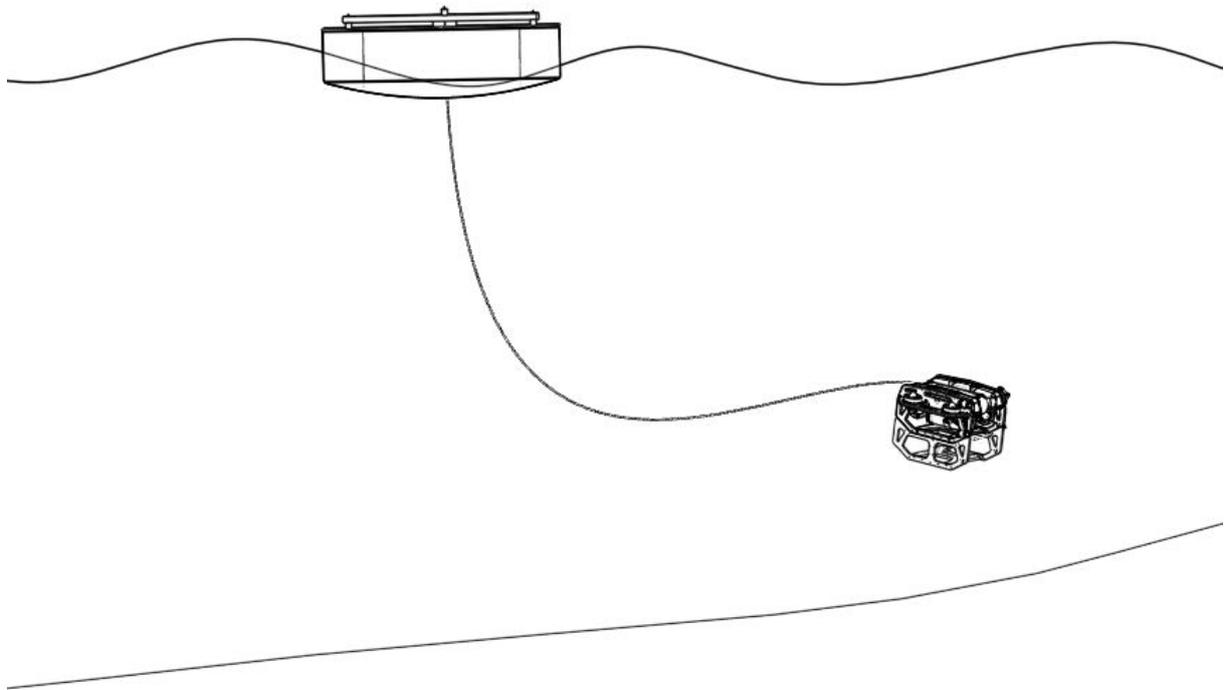


Figure I.32 – Illustration d'un ombilical reliant un ROV à un USV représentant le cas d'étude

La gestion de l'ombilical proposée dans cette étude se base sur la conception d'un système mécatronique et le développement des algorithmes associés en prenant en compte les problématiques décrites dans ce chapitre. Afin de mieux comprendre les impacts du câble sur le système en vue de cette conception, le chapitre qui suit propose de modéliser mécaniquement le câble.

Chapitre II

Modélisation mécanique du câble

| | | |
|-------------|---|-----------|
| II.1 | Modélisation du câble | 43 |
| II.1.1 | Chaînette | 43 |
| II.1.2 | Autres modèles | 48 |
| II.2 | Paramètres physiques du câble | 51 |
| II.2.1 | Trainée | 52 |
| II.2.2 | Raideur axiale | 54 |
| II.2.3 | Raideur en flexion du câble | 56 |
| II.2.4 | Raideur en torsion du câble | 59 |
| II.2.5 | Autres paramètres | 61 |
| II.2.6 | Valeurs des paramètres pour deux câbles réels | 62 |
| II.3 | Simulateurs | 63 |
| II.3.1 | Simulateurs existants | 63 |
| II.3.2 | Modèle sous Simulink | 63 |
| II.3.3 | Modèle sous Vortex | 67 |
| II.4 | Étude de l'influence des paramètres du câble | 73 |
| II.4.1 | Influence de la longueur pour une chaînette | 73 |
| II.4.2 | Influence de la raideur du câble | 74 |
| II.4.3 | Influence de la distance entre les deux extrémités | 76 |
| II.4.4 | Influence de la densité du câble | 77 |
| II.5 | Conclusion du chapitre | 79 |

La connaissance du comportement du câble est nécessaire pour la conception et le contrôle des véhicules et des systèmes de déploiement de câble pour obtenir un bon rejet de perturbations (McLain et Rock 1992). Afin de connaître son comportement, il est nécessaire de le modéliser. Les objectifs principaux de la modélisation du câble sont la détermination des efforts appliqués au Remotely Operated Vehicle (ROV), pour gérer au

mieux l'influence du câble sur son comportement, la détection des nœuds et des accroches (Gay Neto et Arruda Martins 2013) et, en perspective, l'utilisation de la forme du câble pour la localisation du ROV.

II.1 Modélisation du câble

II.1.1 Chaînette

L'approche la plus classique consiste à modéliser le câble sous forme de chaînette. Ce modèle mathématique, dit aussi vélaire, permet de connaître la forme du câble et sa tension à partir de la position de ses deux extrémités, de sa longueur et de sa masse linéique (Irvine 1981). La chaînette a pour propriété d'avoir une tension horizontale constante tout du long.

Ce modèle se base sur les hypothèses suivantes :

- Le câble est statique.
- Il est suspendu entre deux points.
- Il est homogène.
- Il est soumis uniquement à son propre poids de manière uniforme (sa raideur et son élongation sont nulles)
- Il se situe donc dans un plan vertical.

Equations générales

L'équation de la chaînette dans le plan (\vec{X}, \vec{Y}) est la suivante :

$$y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right), \quad (\text{II.1})$$

avec a le seul paramètre de l'équation de la chaînette, qui a la dimension d'une longueur. Cette courbe, représentée sur la figure II.1, est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées et son point le plus bas a pour coordonnées $(0, a)$.

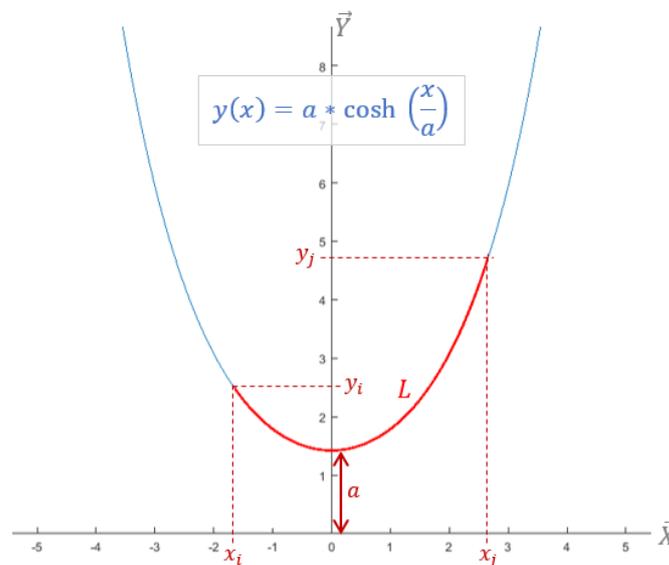


Figure II.1 – Courbe d'une chaînette de paramètre $a = 1,42$ m

La longueur d'une portion de chaînette entre deux points quelconques de coordonnées respectives (x_i, y_i) et (x_j, y_j) est obtenue, à partir de l'expression de la longueur d'une courbe définie par une fonction, comme suit :

$$L = \int_{x_i}^{x_j} \sqrt{1 + y'(x)^2} dx = \left[a \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right]_{x_i}^{x_j} = a \cdot \sinh\left(\frac{x_j}{a}\right) - a \cdot \sinh\left(\frac{x_i}{a}\right) \quad (\text{II.2})$$

La modélisation du câble par une chaînette présentée dans cette section a pour données d'entrée les positions respectives des extrémités du câble, au niveau de l'Unmanned Surface Vehicle (USV) et du ROV et la longueur de câble disponible. La masse linéique du câble, μ , est nécessaire pour déterminer sa tension. La paramètre a , qui définit la forme de la chaînette, dépend uniquement de la longueur de câble L et de la position des extrémités, nommées A et B . Dans un cas quelconque, le repère de base associé à la chaînette (\vec{X}, \vec{Y}) n'est, *a priori*, pas connu. Afin de simuler cette courbe pour des positions quelconques, un autre repère, (\vec{X}^*, \vec{Y}^*) , est alors défini par une translation de vecteur (x_0, y_0) du repère initial, de façon à avoir pour origine le point A . On note (l, h) les coordonnées du point B dans ce nouveau repère. La figure II.2 représente une chaînette dans le repère (\vec{X}^*, \vec{Y}^*) qui a pour origine l'extrémité A du câble.

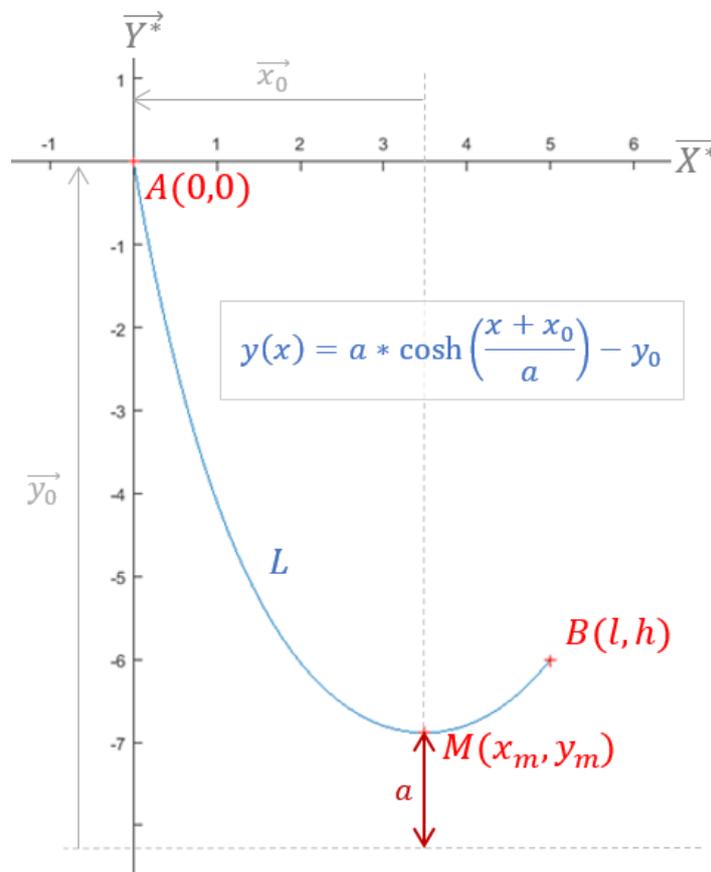


Figure II.2 – Courbe de la chaînette dans un repère associé au câble avec pour paramètre $a = 1,42$ m

L'équation de la chaînette dans ce nouveau repère est alors :

$$y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x + x_0}{a}\right) - y_0 \quad (\text{II.3})$$

Avec ce changement de repère, en notant (x_m, y_m) les coordonnées du point le plus bas de la chaînette, on a :

$$\begin{cases} x_0 &= -x_m \\ y_0 &= a - y_m \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

La forme de l'équation de la chaînette généralisée à des points quelconques est alors :

$$y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x - x_m}{a}\right) + y_m - a \quad (\text{II.5})$$

En appliquant le changement de variable $x^* = x - x_m$ à l'équation II.2, l'expression de la longueur de câble entre les points $A(0,0)$ et $B(l,h)$ est :

$$L = a \cdot \sinh\left(\frac{l - x_m}{a}\right) - a \cdot \sinh\left(\frac{-x_m}{a}\right) \quad (\text{II.6})$$

Le paramètre, h , de distance verticale entre les deux extrémités du câble est inclus dans le paramètre a .

La tension le long de la chaînette est connue grâce au principe fondamental de la dynamique et définie par :

$$\begin{cases} T_h &= a \cdot \mu \cdot g \\ T_v(x) &= T_h \cdot \sinh\left(\frac{x - x_m}{a}\right), \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

avec T_h sa tension horizontale, qui dépend uniquement du paramètre a de la chaînette et de sa masse linéique μ , et T_v sa tension verticale.

La résolution de ces équations pour déterminer la forme de la chaînette est présentée dans les paragraphes qui suivent pour différentes configurations (représentées sur la figure II.3).

Cas particulier des deux extrémités à la même hauteur

Dans le cas particulier où les points $A(0,0)$ et $B(l, h = 0)$ sont à la même hauteur (figure II.3a), l'abscisse du point le plus bas se situe au milieu de ces deux points, d'où $x_0 = -x_m = -\frac{l}{2}$. L'expression $y_0 = h - a \cdot \cosh\left(\frac{l}{2 \cdot a}\right)$ est obtenue à partir de l'équation au point B . A partir des équations II.3 et II.6, le système suivant est obtenu :

$$\begin{cases} y(x) &= a \cdot \cosh\left(\frac{2 \cdot x - l}{2 \cdot a}\right) - a \cdot \cosh\left(\frac{l}{2 \cdot a}\right) \\ L &= 2 \cdot a \cdot \sinh\left(\frac{l}{2 \cdot a}\right) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Lorsque les points A et B sont situés à la même hauteur, le paramètre a de la chaînette est directement déterminé à partir de l'équation sur la longueur. La fonction représentant la forme du câble, $y(x)$, est alors totalement déterminée.

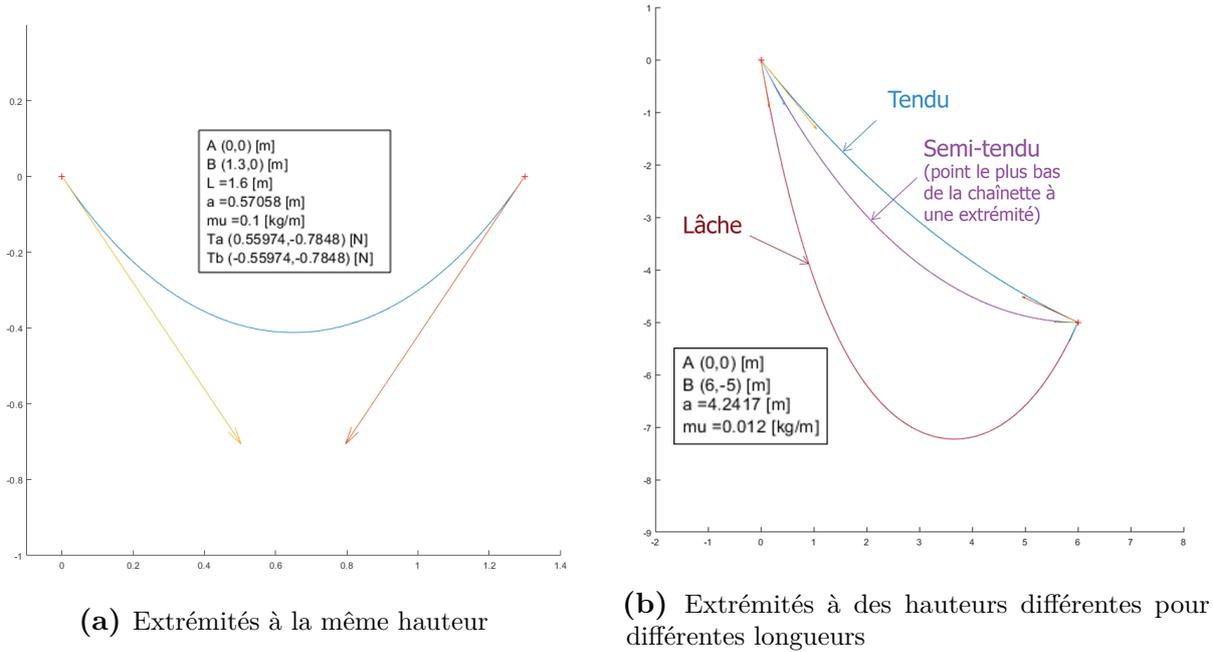


Figure II.3 – Exemples de chaînettes pour différents paramètres

Cas particulier du point le plus bas à une extrémité

Pour le système étudié, le ROV est situé plus bas que l'USV, qui reste à la surface. Les extrémités de la chaînette ne sont donc pas à la même hauteur. Le cas particulier où la chaînette a une tangente horizontale au niveau du point B (courbe du milieu de la figure II.3b) est étudié. L'intérêt d'une telle configuration, dite semi-tendue, sera présenté dans la section II.4. Dans ce cas, le point le plus bas, M , est confondu avec le point $B(l, h)$, ce qui donne directement $x_m = l$ et $y_m = h$.

Cette configuration apporte une contrainte supplémentaire au système d'équations, l'un des paramètres d'entrée utilisés précédemment est donc inutile. Pour cet exemple, seules les positions des points A et B sont connues, la longueur L de câble n'est pas connue. Pour la déterminer, le paramètre a est d'abord obtenu à partir de la valeur de l'équation II.5 au point A . La valeur de L est alors calculée directement à partir de l'équation II.6 :

$$\begin{cases} 0 &= a \cdot \cosh\left(\frac{-l}{a}\right) + h - a \\ L &= a \cdot \sinh\left(\frac{l}{a}\right) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Configuration quelconque avec extrémités à des hauteurs différentes

Dans une configuration quelconque, comme pour les courbes du haut et du bas de la figure II.3b, les positions des extrémités ainsi que la longueur de la chaînette sont nécessaires pour déterminer sa forme et sa tension. La position du point le plus bas n'est pas connue au départ. La détermination du paramètre a est moins aisée dans ce cas général que dans les deux cas particuliers précédemment décrits. En appliquant des formules de

trigonométrie hyperbolique aux équations II.5 et II.6, le système d'équations suivant est obtenu :

$$\begin{cases} h^2 &= 4 \cdot a^2 \cdot \sinh^2 \left(\frac{l - 2 \cdot x_m}{2 \cdot a} \right) \cdot \sinh^2 \left(\frac{-l}{2 \cdot a} \right) \\ L^2 &= 4 \cdot a^2 \cdot \cosh^2 \left(\frac{l - 2 \cdot x_m}{2 \cdot a} \right) \cdot \sinh^2 \left(\frac{l}{2 \cdot a} \right) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$$\implies L^2 - h^2 = 4 \cdot a^2 \cdot \sinh^2 \left(\frac{-l}{2 \cdot a} \right)$$

Cette équation n'ayant pas de solution analytique, elle est résolue par une méthode numérique afin d'obtenir le paramètre a .

D'autre part, on a aussi :

$$\frac{-h}{L} = \tanh \left(\frac{2 \cdot x_m - l}{2 \cdot a} \right) \quad (\text{II.11})$$

Le paramètre x_m en est alors déduit, ainsi que y_m , à partir de l'équation II.5 appliquée au point A :

$$\begin{cases} x_m &= a \cdot \operatorname{arctanh} \left(\frac{-h}{L} \right) + \frac{l}{2} \\ y_m &= a - a \cdot \cosh \left(\frac{-x_m}{a} \right) \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

La chaînette est donc entièrement déterminée.

Exemples d'applications numériques pour différentes chaînettes

Ces équations ont été codées dans un script Matlab (disponible en annexe A.1) afin de calculer la tension dans le câble et de tracer la forme de la chaînette, en fonction de différents paramètres d'entrée, comme présenté sur la figure II.3. Les valeurs des paramètres d'entrées et variables de sorties de ces simulations sont disponibles dans le tableau II.1, reprenant les différents cas présentés sur la figure II.3.

| Cas | Même hauteur | Tendu | Semi-tendu | Lâche |
|--------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| A (m) | (0;0) | (0;0) | (0;0) | (0;0) |
| B (m) | (1,3;0) | (6;-5) | (6;-5) | (6;-5) |
| L (m) | 1,6 | 7,88 | 8,2108 | 12 |
| a (m) | 0,57058 | 9,9939 | 4,2417 | 1,4964 |
| μ (kg/m) | 0,1 | 0,012 | 0,012 | 0,012 |
| T_a (N) | (0,5597;-0,7848) | (1,1765;-1,4735) | (0,4993;-0,9666) | (0,1762;-1,0115) |
| T_b (N) | (-0,5597;-0,7848) | (-1,1765;0,5459) | (-0,4993;0) | (-0,1762;-0,4012) |

Tableau II.1 – Valeurs des paramètres pour différents exemples de chaînettes

Limitations du modèle de la chaînette

Cette modélisation n'est valide que si le câble est pesant et ne possède pas de raideur interne, ce qui est rarement le cas avec les câbles utilisés en robotique sous-marine. De plus, le modèle de la chaînette se base sur la connaissance de la position relative entre les deux extrémités du câble. Or, lorsque le ROV est sous l'eau, sa localisation devient incertaine. Cette donnée n'est donc pas toujours accessible de manière fiable. L'équation de la chaînette peut être utilisée en tant que première approximation du comportement d'un câble pesant, bénéficiant de temps de calculs réduits par rapport à la simulation d'un câble multi-corps.

II.1.2 Autres modèles

Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle plus proche de la réalité dans le contexte de notre étude. La dynamique du câble étant régie par des équations aux dérivées partielles non linéaires, sa modélisation nécessite la linéarisation de ces équations ou le recours à des modèles numériques approximant ces équations (Bradley J Buckham 1997, p. 7-8). L'approximation de ces modèles passe par la discrétisation spatiale du câble. Les modèles discrets présentent des résultats précis en nécessitant des moyens numériques nettement inférieurs aux modèles continus (Dreyer et Van Vuuren 1999 ; Paifelman 2017). Dans la littérature, on retrouve deux principales méthodes pour modéliser les câbles : par systèmes "masses-ressorts" ou par solides finis (Blintsov 2017). Les modèles traitent généralement soit du problème statique, soit du problème dynamique et diffèrent grandement par les paramètres pris en compte ou ignorés, tels que la raideur, l'élongation, les courants, etc. Le tableau II.2 résume les propriétés principales de différents modèles présents dans la littérature et décrits ci-dessous.

La méthode par **masses ponctuelles** a été introduite en 1960 par Walton et Polachek. Celle-ci modélise le câble par une série de segments inextensibles sans masse reliés par des liaisons pivot parfaites (en deux dimensions (2D)) constituant des masses ponctuelles, comme illustré sur la figure II.4. Les raideurs en flexion et en torsion ne sont donc pas prises en compte. Les forces hydrodynamiques, gravitationnelles et de poussée s'appliquent au niveau des points de liaison. Ce modèle prend en compte une force de courant uniforme horizontale. Un système d'équations non-linéaires est obtenu par l'application de contraintes géométriques et de la seconde loi de Newton au niveau des points de liaison. Cette méthode a été largement utilisée dans la littérature pour résoudre des problèmes quasi-statiques et a été étendue aux problèmes trois dimensions (3D) (Bradley J Buckham 1997, p. 8-12).

La méthode par **masses-ressorts** modélise le câble par des masses ponctuelles reliées par des éléments élastiques sans masse. Les masses ponctuelles définissent des liaisons sphériques. Les forces sont déterminées au niveau des masses ponctuelles et décrites par des équations différentielles. Cette approche est très utile pour les câbles élastiques mais nécessite des ressources numériques importantes. Des amortisseurs sont généralement associés à ces ressorts, pour prendre en compte l'amortissement en plus de la raideur, comme illustré sur la figure II.5.

Cette méthode a été étendue par Bradley J Buckham (1997) pour prendre en compte la raideur en flexion et en torsion pour des câbles non tendus. Pour cela, des termes

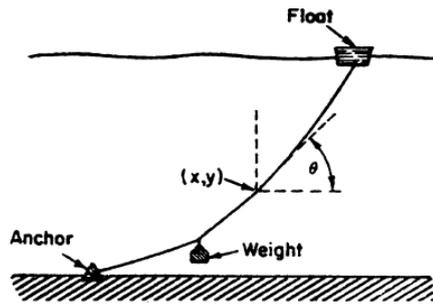


FIG. 1. —Mooring line.

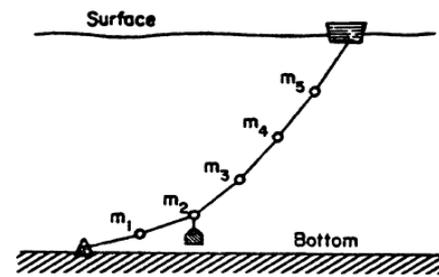


FIG. 2. —Discrete representation.

Figure II.4 – Illustration de la modélisation d'un câble par masses ponctuelles (Walton et Polachek 1960)

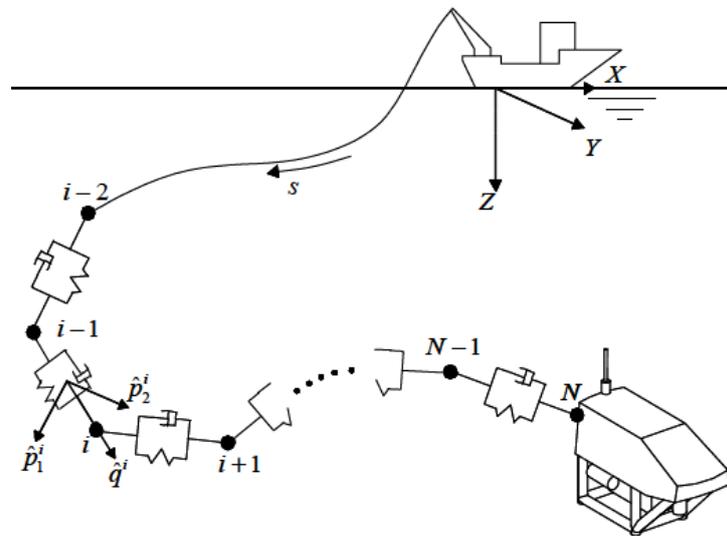


Figure II.5 – Illustration de la modélisation du câble par masses-ressorts-amortisseurs (Bradley J Buckham 1997)

supplémentaires ont été intégrés dans les équations en fonction de la courbure et de la torsion au niveau de ces nœuds. L'inertie de rotation est négligée afin d'obtenir la raideur en flexion à partir de la courbure du câble en chaque point et une approximation de la forme est faite par splines cubiques torsadées (Soylu, B. J. Buckham et Podhorodeski 2010).

La méthode par **solides finis** (ou **segments finis** dans le cas des câbles) se base sur le découpage du câble en portions rigides de longueur finie connectées par des liaisons paramétrées (nombre de degrés de liberté (DDL), raideur et amortissement) et résout les équations différentielles entre ces éléments. Elle se rapproche de la méthode par masses ponctuelles à la différence que la masse est répartie uniformément le long des segments, et non de façon ponctuelle. Cette distribution de la masse autorise la prise en compte des termes d'inertie en rotation.

Bevilacqua, Kleczka et Kreuzer (1991) proposent la modélisation dynamique du câble par **solides finis** en découpant celui-ci en 20 sections rigides de tailles différentes reliées par des liaisons parfaites. Ce modèle prend en compte les efforts hydrodynamiques sur le câble, ainsi que son inertie et les masses ajoutées, mais ignore sa torsion et sa raideur

en flexion. La taille des portions est adaptée localement à la dynamique du câble afin d'apporter plus de précision aux zones les plus excitées. Les équations du mouvement du câble sont résolues de façon algébrique. Une extension de la méthode par solides finis consiste à remplacer les segments rigides du câble par des segments visco-élastiques.

Tempel (2019) propose la modélisation de câbles de robots parallèles (dans l'air) par un système ressort-amortisseur. Ce modèle ne prend pas en compte la flexion ni la torsion du câble, en effet, pour ces applications, les câbles sont généralement tendus. Seule leur raideur axiale est donc considérée. Plusieurs modèles ressort-amortisseur sont considérés, en fonction de l'agencement en parallèle ou en série des masses et ressorts, comme présenté sur la figure II.6. Le modèle de Burgers est celui qui correspond le mieux aux expériences.

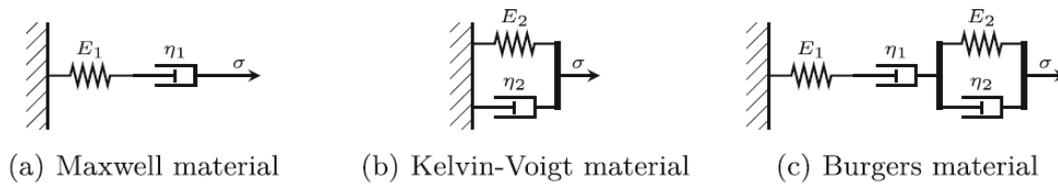


Figure II.6 – Différents modèles de systèmes ressorts-amortisseurs (Tempel 2019)

Feng et Allen (2004) proposent une solution numérique pour modéliser un câble de longueur variable et son effet sur la dynamique d'un véhicule sous-marin. Les équations dynamiques du câble sont résolues par la méthode des différences finies, qui se base sur la discrétisation par domaines en définissant des conditions aux limites. La variation de longueur est modélisée par une augmentation du nombre de nœuds définissant le câble. La solution proposée par Feng et Allen (2004) se base sur la connaissance de l'état du véhicule (orientation, vitesse linéaire et vitesse angulaire) pour définir ces conditions aux limites. Cette méthode est rarement utilisée pour modéliser les câbles sous-marins car elle est moins précise et les conditions aux limites ne sont généralement pas connues.

La **méthode par éléments finis** est moins courante car bien que précise, elle nécessite des moyens de calculs très importants. Un modèle basé sur cette méthode est présenté par Quan et al. (2015) pour analyser le comportement statique et dynamique d'un câble de ROV en 3D, en prenant en compte sa raideur axiale, en flexion et en torsion. Les équations obtenues sont résolues à l'aide d'un algorithme de type implicite α -généralisé adapté au cas présenté dans l'étude.

Dans la suite de cette étude, les modèles du câble seront basés sur la méthode par solides finis. La difficulté de ces méthodes réside dans le choix des paramètres et la sélection du nombre et de la taille des segments rigides, pour lesquels un compromis est nécessaire entre le temps de calcul et la précision du modèle (Wnuk et al. 2017).

| Modèle | Modes | | | | Paramètres considérés | | | | | | | | | Type Particularités |
|---|----------|-----------|----|----|-----------------------|-----------------|------------|---------|---------|---------------|------------|----------|-------------|--|
| | Statique | Dynamique | 2D | 3D | Raideur flexion | Raideur torsion | Elongation | Trainée | Inertie | Amortissement | L variable | Courants | Pilonnement | |
| (Walton et Polachek 1960) | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | Masses ponctuelles |
| (Bevilacqua, Kleczka et Kreuzer 1991) | | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | Solides finis Câble neutre. $L = 512 \text{ m}; d = 3 \text{ cm}$ |
| (Bradley J Buckingham 1997) (Soylu, B. J. Buckingham et Podhordski 2010) | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | Masses-ressorts |
| (Feng et Allen 2004) | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | Méthode différences finies |
| (Tempel 2019) | | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | | ✓ | | | | Ressorts-amortisseurs Dans l'air |
| (Quan et al. 2015) | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | Par éléments finis |

Tableau II.2 – Récapitulatif des différents modèles de câbles dans la littérature

II.2 Paramètres physiques du câble

Les modèles de câbles s'appuient sur leurs paramètres physiques. Pour avoir un modèle proche de la réalité, il est nécessaire de renseigner les paramètres réels du câble utilisé et donc de les déterminer. Pour cela, nous recherchons les paramètres qui entrent en compte dans les forces qui régissent le comportement du câble.

En dynamique, le câble est soumis à des forces externes et internes. Ces forces et paramètres sont récapitulés dans les tableaux II.3 et II.4. Les forces externes au câble sont dues à son interaction avec l'eau (poussée, courants, trainée, pression) et à son interaction avec son environnement (réaction de l'USV et du ROV à ses extrémités, poids, inertie). Les forces internes sont dues à sa raideur, à son amortissement et à son élasticité (Blintsov 2017). Il faut en plus tenir compte des forces d'inertie. Celle-ci comprend la force d'inertie d'entraînement et la force d'inertie de Coriolis, dont l'expression est assez complexe (Creuze 2014). Celles-ci sont exprimées par le produit matriciel $\vec{F}_i = C_{RB}(\nu) \cdot \nu$, avec $C_{RB} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$

la matrice dite de "Coriolis-centripète" incluant la masse du câble, les effets d'entraînement de Coriolis et les masses ajoutées. Ces dernières représentent des effets hydrodynamiques de l'eau sur le câble dus à son accélération.

La raideur agit comme une conservation de l'énergie, résistant aux déplacements qui s'éloignent de la position d'équilibre, alors que l'amortissement dissipe l'énergie et freine donc les déplacements. Pour le câble, la raideur se décompose en trois parties : la raideur en flexion, pour les déformations autour d'un axe perpendiculaire à celui du câble, la raideur en torsion, pour les déformations autour de son axe, et la raideur axiale, pour les déformations le long de son axe. Chacune de ces raideurs étant associée à un amortissement.

La combinaison du poids et de la poussée d'Archimède appliqués au câble déterminent sa flottabilité. Le câble est dit neutre, pesant (coulant) ou flottant suivant que la somme de ces deux forces soit respectivement nulle, positive ou négative (en considérant un référentiel orienté vers le bas). La pression de l'eau sur le câble augmente avec la profondeur et a pour effet de comprimer le câble. Elle a donc un impact important pour les câbles utilisés en grandes profondeurs mais cet effet est raisonnablement négligé pour les faibles profondeurs.

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide. Elle comprend la traînée de forme (ou de pression) et la traînée de frottement du corps en mouvement et de sa masse ajoutée et dépend de la vitesse relative du fluide par rapport au corps. La force de traînée s'exprime par le produit de la pression dynamique, de la surface de référence (sa surface projetée dans le plan normal à la vitesse), S_r et du coefficient de traînée C_x :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \cdot \nu^2 \cdot S_r \cdot C_x, \quad (\text{II.13})$$

avec ν la vitesse relative du fluide par rapport au corps. La force des courants est intégrée à la traînée par la prise en compte de cette vitesse relative.

Les interactions du câble avec les éléments auxquels il est attaché sont prises en compte dans les efforts de tension à ses extrémités.

Certains des paramètres entrant en compte dans le calcul des forces appliquées au câble sont constants et directement renseignés par les fabricants de câbles ou faciles à mesurer directement. D'autres sont plus compliqués à déterminer, nécessitant parfois des moyens importants. En effet, le câble est un objet complexe, non homogène, constitué de plusieurs brins, souvent torsadés, et de différentes couches de revêtement, comme on peut le voir sur la figure II.7 de la vue en coupe du câble Fathom de Blue Robotics. Ces paramètres sont alors estimés plus ou moins grossièrement, déterminés par des abaques, ou négligés. Par ailleurs, certains de ces paramètres sont variables. La suite de ce chapitre développe les différents moyens d'obtention de ces paramètres et leurs propriétés. Ces informations sont récapitulées dans le tableau II.6.

II.2.1 Trainée

Les paramètres hydrodynamiques du câble, dont son coefficient de traînée, sont difficiles à mesurer ou à estimer de façon précise (Soylu, B. J. Buckham et Podhorodeski 2010). En effet, il n'est pas constant et ne dépend pas uniquement des propriétés intrinsèques du câble, mais aussi du nombre de Reynolds, qui est fonction de la viscosité du fluide, d'une

| Force | | Paramètres | | Relations |
|-------------------------|----------------------------|---|---|--|
| Poussée | \vec{B} | Volume Masse volumique eau | V ρ_{eau} | $B = \rho_{eau} \cdot V \cdot g$ |
| Poids | \vec{W} | Masse Masse volumique câble Volume | m $\rho_{câble}$ V | $W = m \cdot g$ $m = \rho_{câble} \cdot V$ |
| Trainée + courant | \vec{F}_x | Masse volumique eau Vitesse relative Surface de référence Coefficient de trainée | ρ_{eau} ν_r S_r C_x | $F_x = \frac{1}{2} \rho_{eau} \cdot \nu_r^2 \cdot S_r \cdot C_x$ |
| Inertie | \vec{F}_i | Matrice de Coriolis-Centripète Vecteur des vitesses linéaires et angulaires | C_{RB} ν | $F_i = C_{RB}(\nu) \cdot \nu$ |
| Tensions aux extrémités | \vec{T}_a \vec{T}_b | | | |

Tableau II.3 – Récapitulatif des forces externes s’appliquant sur le câble avec leurs paramètres associés

longueur caractéristique et de sa vitesse relative. Le coefficient de trainée peut être obtenu à partir d’abaques empiriques, tel que celui représenté sur la figure II.8. Dans le cadre de notre étude, le nombre de Reynolds d’un câble est globalement compris entre 400 (câble de 4 mm de diamètre à une vitesse de 0,1 m/s) et $1,43 \times 10^4$ (câble de 9,5 mm de diamètre à une vitesse de 1,5 m/s).

Typiquement, le coefficient de trainée d’un cylindre infini est d’environ 1,2. Lorsque le câble est susceptible d’osciller dans l’eau, il a été constaté que le choix empirique d’un coefficient compris entre 1,8 et 2 est pertinent (Bourget et Marichal 1990). Une valeur de 1,25 a été estimée expérimentalement par Bradley J Buckham (1997, p. 98) à partir de vidéos d’oscillations d’un câble de 1,36 cm de diamètre, 3,70 m de long et 1643 kg/m^3 de

| Force | | Paramètres | |
|------------|-------|---|------------------------|
| Flexion | F_f | Raideur en flexion Rayon de courbure | K_f $\frac{D}{2}$ |
| Torsion | F_t | Raideur en torsion Angle de torsion | K_t θ |
| Elasticité | F_e | Raideur axiale Élongation | K_a l_e |

Tableau II.4 – Récapitulatif des forces internes au câble avec leurs paramètres associés

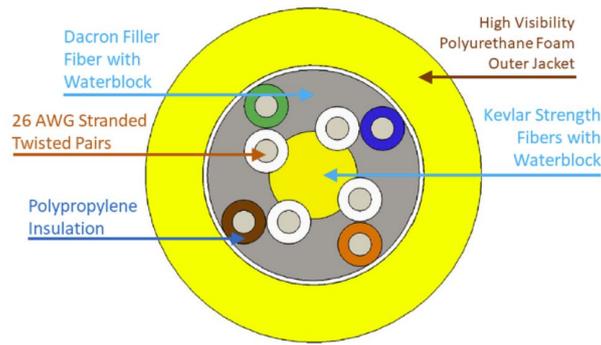


Figure II.7 – Schéma de la section du câble Fathom de Blue Robotics

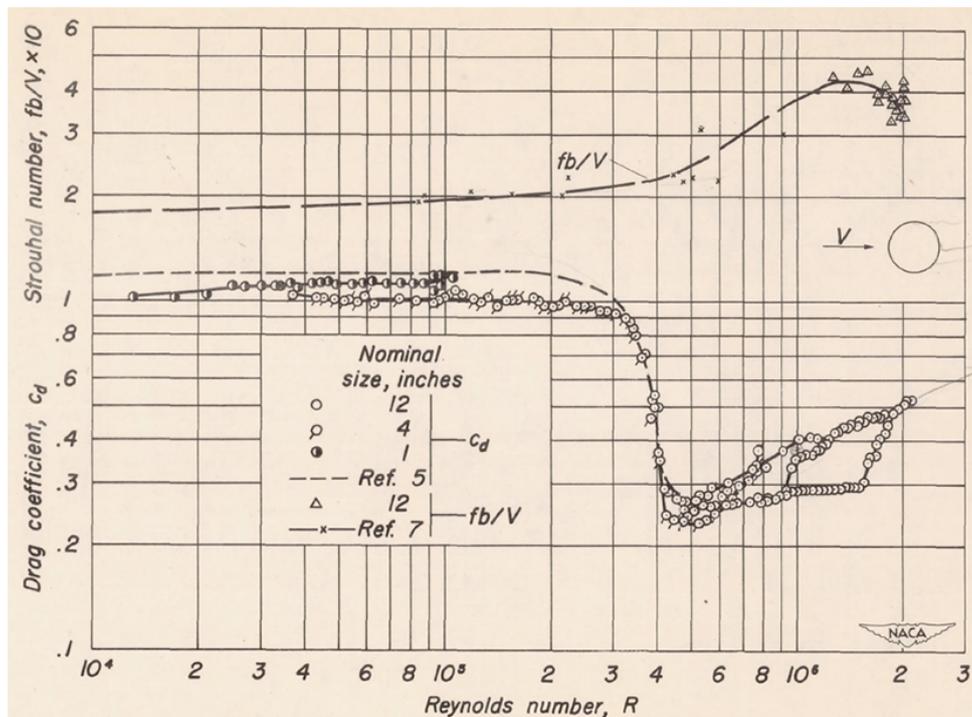


Figure II.8 – Exemple d'abaque du coefficient de traînée pour un cylindre (Delany et Sorensen 1953)

densité. Cependant il a été constaté qu'une variation de ce coefficient entre 1,0 et 2,0 avait un faible impact sur les résultats de simulations. On prendra donc un coefficient de 1,8 pour les simulations présentées dans la suite de cette étude.

II.2.2 Raideur axiale

La raideur axiale correspond au rapport entre l'élongation relative du câble et la valeur de la charge ayant provoqué cette élongation.

Une identification expérimentale de la raideur axiale d'un câble est proposée par Tempel, Trautwein et Pott (2019). Le protocole expérimental, schématisé sur la figure II.9, consiste à fixer les deux extrémités du câble, d'une part à un tambour motorisé et d'autre part à un capteur d'effort par l'intermédiaire d'un levier. Une tension est appliquée au

câble par la rotation du tambour, l'élongation associée à cette contrainte est mesurée par l'angle de rotation du moteur. Les paramètres définissant la raideur du câble en accord avec le modèle de Burgers (présenté en section II.1.2 sur la figure II.6) sont alors identifiés à partir de la caractéristique de l'élongation en fonction de la tension. Ces expériences montrent que la raideur du câble est différente en statique et en dynamique.

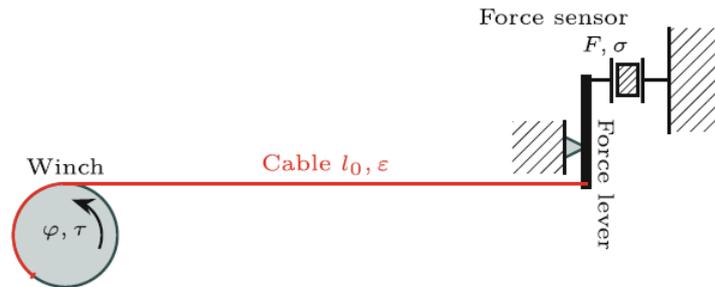


Figure II.9 – Schéma d'un montage expérimental pour la mesure de la raideur axiale d'un câble (Tempel, Trautwein et Pott 2019)

Un autre banc d'essai, illustré sur la figure II.10, a été utilisé dans Vaz et al. (1998) pour déterminer la raideur axiale, en torsion et en flexion de câbles sous-marins. Le câble est fixé entre deux extrémités, l'une actionnée et l'autre équipée d'un capteur d'efforts, les modes de fixation pouvant libérer un DDL (rotation ou translation) à chaque extrémité du câble suivant les besoins. Des jauges de déformation étaient aussi fixées au câble. L'identification de la raideur en torsion a été effectuée en générant une tension augmentant, puis diminuant, progressivement jusqu'à 300 kN. Un essai a été effectué en fixant fermement les deux extrémités et un autre essai en libérant la rotation de l'une des extrémités. La relation entre la tension mesurée et la déformation axiale (élongation) a alors été tracée. Ces courbes sont légèrement convexes, illustrant la non linéarité de la raideur axiale. Un hystérésis a été constaté entre la charge et la décharge du câble et la raideur axiale est légèrement plus importante lorsque la rotation du câble est verrouillée, ce qui illustre la relation entre la raideur axiale et la raideur en torsion du câble. Une expérience similaire a été réalisée par Bradley J Buckham (1997, p. 97), qui a mesuré une raideur de 23,5 kN pour un câble de ROV de 1,36 cm de diamètre.

Un autre protocole expérimental est proposé par Bradley J Buckham (1997, p. 203-211). Il consiste à suspendre le câble par une extrémité, en attachant une masse à son autre extrémité, et à observer le comportement du système, soumis à des oscillations. Le modèle de Voigt (déjà illustré sur la figure II.6) est alors utilisé pour identifier les coefficients associés. Une raideur axiale de 217 kN associée à un amortissement de 437 N s ont été déterminés pour un câble de traction de 1,9 cm de diamètre. Cette raideur est dix fois plus grande que celle du câble de ROV déterminée dans cette même étude.

Dans le cas d'étude présenté dans ce mémoire, la longueur maximale de câble est de 50 m et le câble n'est pas soumis à de grandes tensions. Il est donc raisonnable de négliger l'élongation du câble.

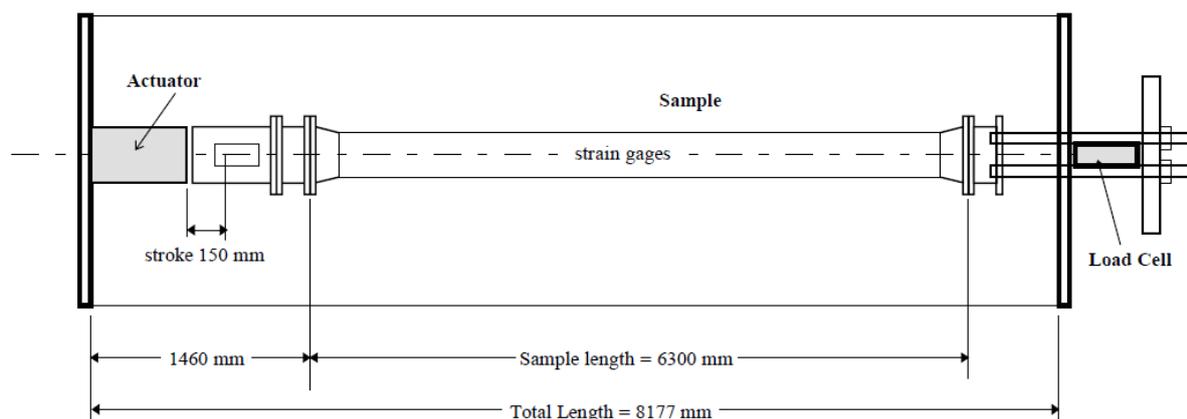


Figure II.10 – Banc d'essai utilisé pour la raideur axiale, en torsion et en flexion de câbles sous-marins (Vaz et al. 1998)

II.2.3 Raideur en flexion du câble

La raideur en flexion représente la résistance du câble aux déformations de courbure. Les constructeurs de câbles donnent parfois une information de rayon minimal de courbure du câble. Cette information est utile pour comparer les câbles entre eux mais il n'est pas possible d'en déduire directement une valeur de raideur exploitable pour les modèles.

Une mesure de la raideur en courbure d'un câble utilisé dans l'industrie *offshore* est proposée par Vaz et al. (1998). La procédure consiste à relier les deux extrémités du câble avec un fil dont la tension est mesurée par un capteur d'effort, comme illustré sur la figure II.11. Le fil est progressivement raccourci, générant un moment aux extrémités du câble, entraînant la courbure de ce dernier. La courbure est déterminée à partir de la mesure de la déflexion du câble en plusieurs points. La raideur est alors déduite de la relation entre le moment et la courbure. Il a été constaté que le câble est initialement plus raide, puis les brins qui constituent ses différentes couches glissent les uns par rapport aux autres, ce qui a pour effet de diminuer la raideur. Cette expérience a montré des résultats cohérents avec la littérature, avec un câble blindé, et donc très raide. Cependant, on peut imaginer que les efforts seraient beaucoup plus faibles avec un câble moins raide, diminuant la précision de mesure.

Une expérience, basée sur une poutre cantilever (suspendue en porte-à-faux), pour mesurer le module d'Young (auquel la raideur en flexion est liée) a été menée sur quatre câbles différents par Hiroyuki Suzuki et al. 2018. Cette expérience a été réalisée avec une machine de test spécialisée.

Bradley J Buckham (1997, p. 97) propose l'évaluation d'un coefficient de raideur en flexion modifié, prenant en compte la charge axiale appliquée au câble (telle que représentée sur la figure II.12), afin d'en déduire le coefficient de raideur en flexion. Un coefficient de $0,1241 \text{ N m}^2$ a été obtenu pour un câble de 1,36 cm de diamètre à l'aide d'un banc d'essai industriel.

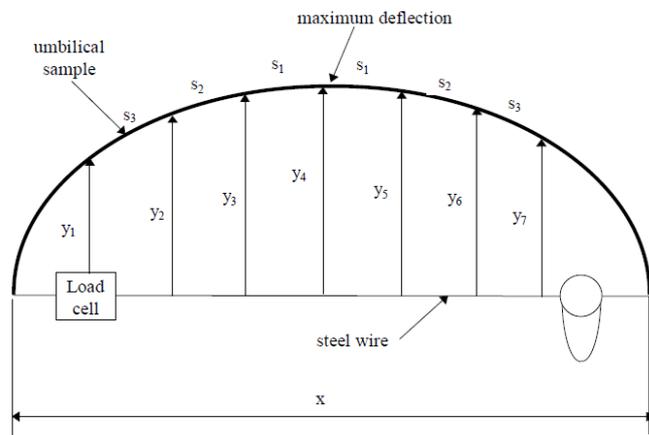


Figure II.11 – Illustration d’une expérience de mesure expérimentale de la raideur en courbure d’un câble (Vaz et al. 1998)

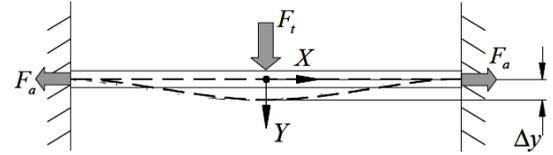


Figure II.12 – Illustration de l’évaluation de la raideur en flexion d’un câble proposée par Bradley J Buckham (1997)

Protocole simplifié proposé pour la mesure de la raideur en flexion

L’accès à de telles machines étant complexe, un protocole expérimental simplifié est proposé ici pour déterminer la raideur à l’enroulement de câbles réels. Pour cela, le câble est suspendu par une de ses extrémités, puis une boucle est formée et l’autre extrémité est attachée à une masse connue, M (figure II.13).

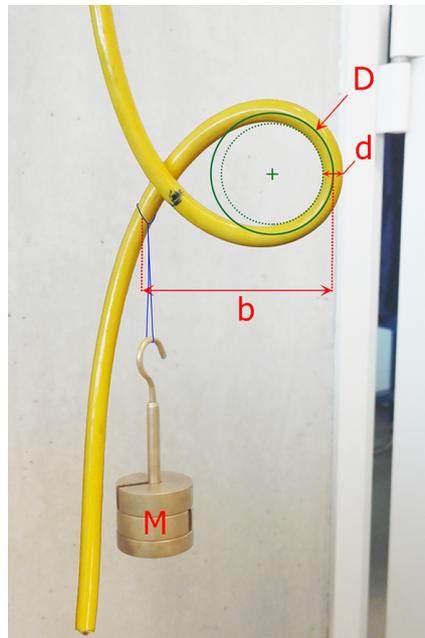


Figure II.13 – Mise en place de la mesure expérimentale de raideur en flexion du câble du Tortuga

Cette masse génère une force exprimée par l’équation :

$$F = M \cdot g \cdot b, \quad (\text{II.14})$$

avec g l'accélération de la pesanteur standard et b la distance entre le point d'attache de la masse sur le câble et le point du câble ayant la plus grande courbure. Le rayon de courbure $\frac{D}{2}$ au niveau de la fibre neutre est mesuré par l'intermédiaire du rayon de courbure interne et du diamètre du câble d , comme représenté sur la figure II.13. Il est supérieur au rayon de courbure recommandé par le constructeur. On note K_f^l la raideur en flexion de la portion de longueur l du câble. Celle-ci est définie par le rapport entre la force F nécessaire à déformer le câble et son angle de déformation, α :

$$K_f^l = \frac{M \cdot g \cdot b}{\alpha} \quad (\text{II.15})$$

Par ailleurs, la raideur d'un élément est inversement proportionnelle à sa longueur. En notant K_f la raideur linéique en flexion du câble, on a donc :

$$\begin{aligned} K_f &= K_f^l \cdot l \\ &= \frac{M \cdot g \cdot b}{\alpha} \cdot l \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

On prend pour hypothèse que le câble est déformé de façon uniforme tout le long du diamètre D . L'angle de déformation est donc $\alpha = 2 \cdot \pi$ et la longueur déformée $l = D \cdot \pi$. D'où, la raideur en flexion K_f , exprimée pour un mètre de câble et considérée constante dans le temps et tout le long du câble est obtenue par l'équation (II.17) :

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{M \cdot g \cdot b}{2\pi} \cdot \pi \cdot D \\ &= \frac{M \cdot g \cdot b \cdot D}{2} (\text{N m}^2/\text{rad}) \\ &= \frac{M \cdot g \cdot b \cdot D \cdot \pi}{360} (\text{N m}^2/\text{deg}) \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Discussion sur le protocole expérimental proposé

Pour cette expérience, la torsion du câble est négligée. Cependant, la boucle formée par le câble n'est pas parfaitement plane, une légère torsion du câble est induite, ce qui entraîne un biais des résultats. Un autre biais est introduit par le frottement du câble sur lui-même, impactant sa position d'équilibre dans cette configuration. De plus, les paramètres extérieurs, tels que la température, ne sont pas pris en compte. Cependant, les résultats obtenus en statique sont assez proches de la réalité et suffisants pour la précision nécessaire à cette étude, comme on peut le voir sur les résultats expérimentaux de validation du modèle du câble sur la figure II.18 en section II.3.2. En effet, la détermination de ces coefficients intervient dans le processus de simulation du câble en vue de l'évaluation de la solution proposée pour son contrôle. Ce câble étant relié à un ROV de petite dimension, il ne sera pas soumis à des contraintes dynamiques trop importantes. Une méthode de validation de la raideur en flexion obtenue est présentée en section II.3.2 (illustrée plus bas par la figure II.18). Elle consiste à superposer une image du câble réel à un modèle de câble basé sur les paramètres calculés.

Les câbles les plus souples ne maintiennent généralement pas cette position, rendant ce protocole inexploitable. Une autre solution pour éviter ce problème serait de forcer le

câble à épouser la forme d'un cylindre de diamètre connu sur un demi-cercle. Par ailleurs, la méthode de vérification des valeurs des paramètres de raideur présentée en section II.3.2 peut aussi être directement utilisée pour déterminer les paramètres, en observant quelle valeur de paramètre se rapproche le plus du câble réel.

Il est à noter que les câbles ont une certaine mémoire de forme. Celle-ci est due à des déformations internes provenant de glissements des éléments les uns par rapport aux autres (fils et revêtements) et de déformations de la matière. Ces déformations internes interviennent lorsque les câbles restent longtemps dans une même position ou lorsqu'ils subissent une importante déformation externe. Cela a pour effet de modifier la position d'équilibre du câble. Cette mémoire de forme a été mise en évidence lors des expériences présentées par Hiroyoshi Suzuki et al. (2017), qui montrent que la raideur du câble est différente suivant la direction de courbure et n'est pas linéaire.

II.2.4 Raideur en torsion du câble

L'impact des torsions du câble, entraînant la formation de boucles et perturbant les mouvements du ROV a été introduit en section I.5. La raideur en torsion des câbles, souvent bien plus grande que celle en flexion, est donc à prendre en compte.

Une méthode de mesure expérimentale de cette raideur est proposée dans Vaz et al. (1998) et utilise le même banc de test que pour la raideur axiale (figure II.10). La procédure consiste à appliquer un moment à une extrémité du câble et à mesurer l'angle de torsion par mètre de câble, soit en libérant ou non la translation d'une extrémité du câble. Les résultats, présentés dans le tableau II.5, montrent que la raideur en torsion est plus importante lorsque les deux extrémités sont bloquées en translation que lorsque l'une des deux fixations autorise l'élongation du câble. La raideur en torsion est aussi plus importante lorsque le câble est pré-contraint en tension. De plus, la raideur est différente suivant le sens de rotation en raison des blindages hélicoïdaux composant le câble présenté dans cette étude.

| Raideur en torsion (N m ² /rad) | Sans pré-tension | | Avec pré-tension | |
|---|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | Horaire | Anti-horaire | Horaire | Anti-horaire |
| Extrémité fixée | 23 646 | 11 075 | 41 822 | 24 396 |
| Extrémité libre | 23 187 | 11 940 | 47 323 | 30 696 |

Tableau II.5 – Valeurs de la raideur en torsion pour un câble blindé de 0,93 cm de diamètre déterminée par Vaz et al. (1998)

Une autre méthode, destinée à des fils de cuivre de très faible diamètre, propose de suspendre le fil à la verticale au lieu de l'horizontale afin de s'affranchir des problèmes de mesure liés à son possible mauvais alignement et à sa déflexion (Song et Lu 2015). L'extrémité supérieure du fil est fixée à un support dont la rotation est contrôlée et qui autorise la translation verticale (voir figure II.14). L'extrémité inférieure est fixée à une petite plaque dont les deux côtés sont en contact avec des capteurs d'efforts afin de mesurer le moment induit par la torsion du fil. Un moment et un angle de rotation normalisés par rapport à la longueur et au rayon du fil sont pris en compte. La caractéristique du moment

normalisé en fonction de l'angle normalisé présente une portion linéaire, correspondant à la déformation élastique suivie d'une portion concave. Cette mesure repose sur des équipements de haute précision.

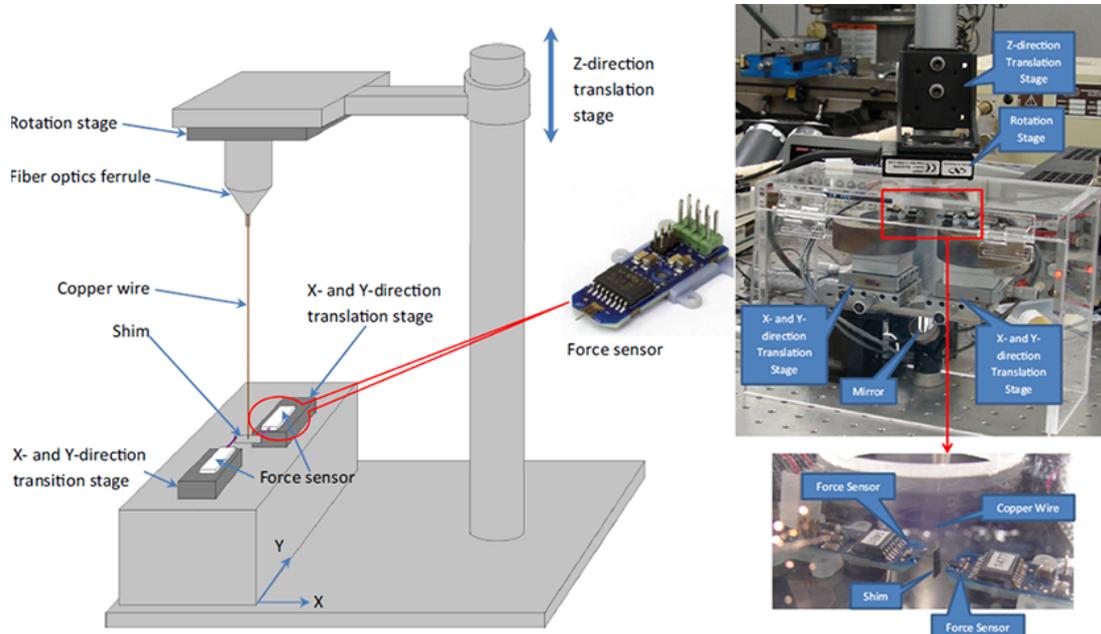


Figure II.14 – Illustration de la méthode de mesure expérimentale de la raideur en torsion d'un fil proposée par Song et Lu (2015)

Protocole simplifié proposé pour la mesure de la raideur en torsion

Un protocole expérimental simplifié est proposé ici pour déterminer la raideur en torsion de câbles réels sans équipement complexe. Pour cela, une portion de câble est tendue à l'horizontale entre deux points d'attache. Une petite plaque, de demi-longueur b , est fixée en perpendiculaire du câble de façon à être à l'horizontale à l'équilibre (figure II.15). Une masse m est suspendue à la plaque, ce qui génère une torsion du câble, d'angle θ , liée au moment qui est exprimé par $m \cdot g \cdot b \cdot \cos \theta$.

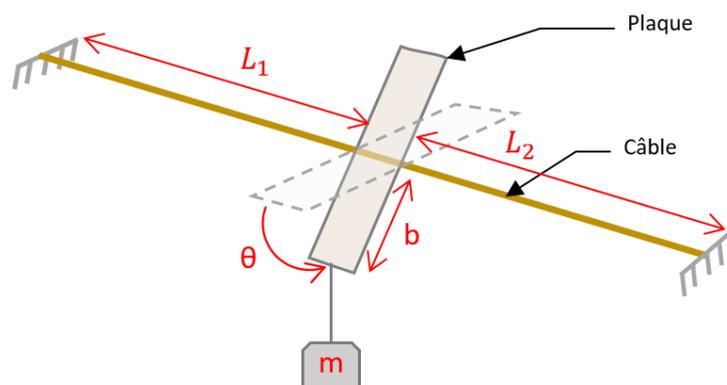


Figure II.15 – Schéma de la détermination expérimentale de la raideur en torsion d'un câble

La raideur en torsion d'un élément est définie par le rapport entre le moment nécessaire pour tordre cet élément et l'angle de torsion. Ce moment est inversement proportionnel à la longueur déformée. Lorsque les deux extrémités du câble sont fixées, le moment au niveau de la plaque correspond à la somme du moment nécessaire à tordre la partie gauche et du moment nécessaire à tordre la partie droite. La raideur en torsion K_t par unité de longueur est alors définie par l'équation II.18.

$$K_t = \frac{m \cdot g \cdot b \cdot \cos \theta}{\theta} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}, \quad (\text{II.18})$$

avec L_1 et L_2 les distances entre le point d'attache du câble et la plaque, respectivement à gauche et à droite de la plaque. Dans le cas particulier où la plaque est située au centre, $L_1 = L_2$, l'équation devient :

$$K_t = \frac{m \cdot g \cdot b \cdot \cos \theta \cdot L_1}{2 \cdot \theta} \quad (\text{II.19})$$

Le coefficient K_t est obtenu en mesurant l'angle θ pour différentes masses et longueurs. Il est considéré comme constant dans le temps et tout le long du câble, pour des petits déplacements par unité de longueur, pour lesquels il reste dans le domaine élastique. L'incertitude de mesure étant fortement liée aux valeurs des paramètres de masse et de longueurs, la précision de chaque mesure est utilisée pour calculer la moyenne pondérée des coefficients de raideurs en torsion mesurés, comme expliqué en annexe B.2.

Cette méthode a l'avantage de fournir un ordre de grandeur de la raideur en torsion d'un câble de façon rapide et sans nécessiter de moyens importants. Cependant, elle est assez peu précise. En effet, les erreurs de mesure sur chacun des paramètres se cumulent pour atteindre une incertitude globale de l'ordre de 10 %. Cette méthode néglige la flexion du câble lors de ces expériences et ne met pas en évidence le lien entre la tension du câble et sa raideur en torsion. De plus, une déformation plastique apparaît progressivement et rapidement sous l'action du moment de la force. La plaque ne revient pas spontanément à sa position d'équilibre horizontal après retrait de la masse mais cet équilibre est retrouvé après une torsion inverse.

II.2.5 Autres paramètres

Le diamètre du câble est fourni par les constructeurs et mesuré directement, par exemple à l'aide d'un pied à coulisse. La surface et le volume du câble sont déduits de cette valeur. Pour les ROV évoluant en eaux peu profondes (comme c'est le cas pour le système présenté dans cette étude), la variation de pression de l'eau appliquée tout au long du câble est assez petite pour négliger sa compression et donc sa variation de volume.

La densité du câble, ou bien sa masse volumique ou linéique, est généralement renseignée par le constructeur. Elle peut être vérifiée de deux façons :

- La masse linéique est mesurée en pesant une longueur donnée de câble. Plus la longueur sera grande, plus le résultat sera précis. La masse volumique peut alors être déduite du volume du câble calculé à partir de son diamètre et de sa longueur. Cependant la précision de mesure du diamètre influe fortement sur la précision de la masse volumique déterminée de cette façon.

- La densité peut être déterminée expérimentalement en équilibrant une portion de câble dans l'eau à l'aide de masses et de flotteurs (de densités et volumes connus, en connaissant la densité du fluide).

Les variations de volume et de densité du câble étant négligeables, sa flottabilité est donc considérée constante.

| Paramètre | | Moyen d'obtention |
|------------------------|------------------------|---|
| Diamètre | d | Donnée constructeur Mesure directe |
| Longueur | L | Variable |
| Surface projetée | S_r | Déduite du diamètre |
| Volume | V | Déduit du diamètre et de la longueur |
| Masse | m | Mesure directe |
| Masse volumique câble | $\rho_{c\grave{a}ble}$ | Donnée constructeur Mesure indirecte (masse et volume) |
| Coefficient de trainée | C_x | Abaques |
| Raideur en flexion | K_f | Mesure expérimentale |
| Raideur en torsion | K_t | Mesure expérimentale |
| Raideur axiale | K_a | Mesure expérimentale |

Tableau II.6 – Récapitulatif des moyens d'obtention des différents paramètres de câbles

II.2.6 Valeurs des paramètres pour deux câbles réels

Les mesures ont été réalisées dans notre étude sur deux types de câbles :

- Le premier câble est celui du *Tortuga* de Subsea Tech, fourni par Novacavi (spécification 2GAX108). Il est assez rigide, a un rayon externe de 9,5 mm et a une flottabilité neutre. Il transmet l'alimentation électrique du robot en plus des données.
- Le second câble est le Fathom Slim de Blue Robotics, il est plus souple, a un diamètre externe de 4 mm, est neutre et transmet uniquement des données.

Les valeurs des paramètres de ces deux câbles sont données dans le tableau II.7.

Les valeurs de ces paramètres ont alors été utilisées pour simuler des câbles réels à l'aide de plusieurs simulateurs, comme décrit dans la section II.3. Puis, les résultats de simulations simples ont été comparés à des cas réels afin de valider à la fois les paramètres et les modèles.

| Paramètre | Câble Tortuga | Câble Fathom Slim |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Diamètre (mm) | $9,5 \pm 0,5$ | $4,0 \pm 0,2$ |
| Masse volumique (kg m^{-3}) | 1000 ± 30 | 1000 |
| Raideur en flexion ($\text{N m}^2/\text{deg}$) | $1,43 \times 10^{-4}$ | 1×10^{-5} |
| Raideur en torsion ($\text{N m}^2/\text{deg}$) | $3,4 \times 10^{-4} \pm 10\%$ | $1,5 \times 10^{-5} \pm 10\%$ |

Tableau II.7 – Valeurs des paramètres mécaniques des câbles du Tortuga et Fathom Slim de Blue Robotics

II.3 Simulateurs

II.3.1 Simulateurs existants

Plusieurs simulateurs existants permettent de simuler des robots sous-marins reliés par ombilical en environnement aquatique en se basant sur des moteurs physiques.

UWSim (Prats et al. 2012), a été développé dans le cadre du projet européen Trident et permet de modéliser de manière réaliste des rendus visuels pour différentes profondeurs et différentes turbidités de l'eau. Il est possible d'y associer un simulateur dynamique comme Gazebo (Koenig et Howard 2004) afin de tester le comportement du système et les lois de commande (Kermorgant 2014) avec une interface Robot Operating System (ROS) (Quigley et al. 2009). Par ailleurs, il est aussi possible d'interfacer ROS avec le logiciel Unity (Katara et al. 2019).

II.3.2 Modèle sous Simulink

Un premier modèle du câble a été réalisé sous Simulink, d'abord en 2D puis en 3D (voir figure II.16). Cette modélisation a été validée d'une part par la superposition avec la chaînette dans le cas où la raideur interne était nulle et d'autre part par la superposition à des photos de câbles réels suspendus par leurs deux extrémités, en prenant en compte la raideur.

Pour cette simulation, le câble a été décomposé en petits solides rigides séparés par des liaisons pivot (en 2D) ou rotules (en 3D). Ces solides sont représentés par des cylindres de 5 cm de long. Leurs valeurs de diamètre et de densité correspondent à celles du câble réel simulé.

Les liaisons sont définies par une raideur, un amortissement et une position d'équilibre. Ces paramètres sont initialisés dans un script Matlab associé au modèle Simulink et disponible en annexe A.2. La raideur simulée correspond à celle déterminée pour le câble choisi, alors que l'amortissement est défini avec une valeur choisie de manière arbitraire. En effet, ce paramètre n'est pas aisé à déterminer expérimentalement alors que les systèmes étudiés évoluent généralement à faible vitesse dans un environnement fortement amorti et qu'aucune force de traînée n'est prise en compte par ailleurs dans le modèle Simulink. Dans un premier temps, le comportement statique du câble est observé, il est donc raisonnable de choisir un coefficient d'amortissement élevé dans le seul but de faciliter la stabilisation du système. Ce modèle ne permet pas de prendre en compte l'élongation.

La rémanence à l'enroulement (ou mémoire de forme) est prise en compte en introduisant un angle non nul pour la position d'équilibre des liaisons. Cependant, après validation de l'effet de ce paramètre, sa valeur a été laissée nulle lors des différentes simulations de câbles pour simplifier l'étude, dans un premier temps.

D'une manière générale, la liaison rotule définie par Simulink est composée de trois rotations indépendantes suivant les axes \vec{X} , \vec{Y} et \vec{Z} , sans translation. La raideur définie dans la liaison est le couple nécessaire pour faire tourner la liaison d'une unité angulaire, exprimé en N m/deg. Elle correspond donc à la raideur du câble telle que définie dans la section II.2, divisée par la longueur de chaque solide rigide composant le câble. L'amortissement est la force nécessaire pour maintenir une vitesse de rotation constante de la liaison, exprimée en N m/(deg/s). La raideur et l'amortissement sont définis indépendamment pour chacune des trois rotations élémentaires de la liaison, de façon strictement linéaire. Dans la simulation proposée dans cette étude, la raideur autour de l'axe \vec{X} de la liaison (axe longitudinal au câble) correspond à la raideur en torsion. Les raideurs autour des axes \vec{Y} et \vec{Z} sont identiques et correspondent à la raideur en flexion.

Une autre liaison, à 6 DDL est utilisée entre chaque portion de câble et le repère global afin de mesurer la position des maillons. Cette mesure s'effectue par rapport au centre de chaque élément. Cette liaison est libre et n'applique aucun effort sur le câble. Par la suite, elle est utilisée afin d'appliquer des forces extérieures au câble, exprimées dans le repère global, telles que la poussée d'Archimède ou les courants. Enfin, les efforts aux deux extrémités sont mesurés au travers de la liaison rotule qui relie le premier maillon libre au maillon encastré, de chaque côté. La force et le couple sont mesurés suivant les trois axes du repère global.

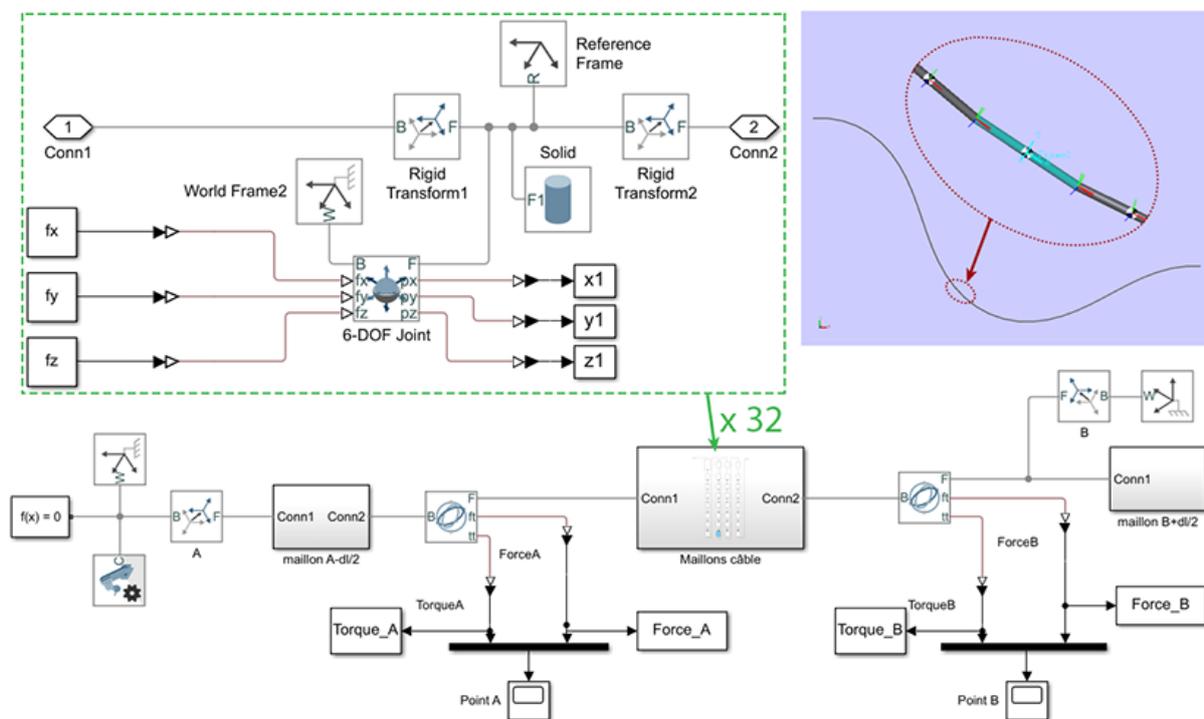


Figure II.16 – Illustration du modèle du câble réalisé sous Simulink

Comparaison du modèle Simulink à l'équation de la chaînette

Pour valider ce modèle, le comportement statique d'une chaîne de 1,6 m de longueur suspendue en l'air par ses deux extrémités a été simulé. La forme et les efforts aux points d'attache ont été comparés avec le modèle analytique de la chaînette.

Dans cette simulation, les points d'attache (A et B) se situent à la même hauteur et à une distance de 1,3 m (figure II.17). Ces dimensions ont été choisies afin de reproduire facilement la même expérience avec un câble réel dans l'air. Ce modèle est composé de 32 éléments de 5 cm de long reliés entre eux par des liaisons rotules. Aux extrémités, deux maillons supplémentaires sont fixés à l'horizontale afin de constituer les conditions aux limites. La comparaison a été effectuée avec les paramètres d'un câble de masse linéique 0,1 kg/m et masse volumique 1000 kg/m³. L'écart maximal sur la valeur en ordonnée entre la courbe de la chaînette et le modèle par portions simulé avec Simulink n'excède pas 0,08 % de sa valeur maximale.

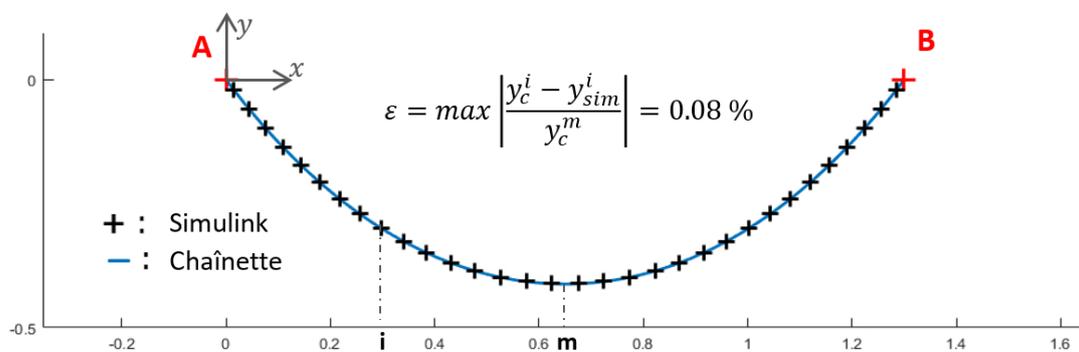


Figure II.17 – Comparaison de la simulation d'une chaîne sous Matlab Simulink avec le modèle analytique de la chaînette

Les efforts aux points d'attache fournis par ces deux modèles ont alors été comparés en s'attachant aux composantes horizontales (T_h) et verticales (T_v) de la tension au niveau du point A (tableau II.8 et équation II.7).

| | Équation de la chaînette | Modèle Simulink |
|-----------|--------------------------|-----------------|
| T_h (N) | 0.5594 | 0.5597 |
| T_v (N) | -0.7845 | -0.7848 |

Tableau II.8 – Comparaison de la tension au point A pour les deux modèles

A partir de ces résultats, en prenant en compte les erreurs de précision numériques, on peut considérer que la forme et les efforts d'une chaîne sont similaires entre le modèle analytique de la chaînette et le modèle Simulink. Cela valide donc le modèle de câble proposé, sans raideur, sous Simulink.

Comparaison du modèle Simulink à un câble réel

Pour valider le modèle en prenant en compte la raideur ainsi que les paramètres obtenus expérimentalement (section II.2), le modèle d'un câble de 1,6 m de long suspendu par ses

deux extrémités dans l'air a été utilisé. Pour l'expérience, le câble a été positionné dans un plan vertical contre un tableau comme illustré sur la figure II.18. Cette configuration implique une tangente horizontale au niveau des points d'attache en configuration initiale. Le câble est soumis uniquement à la gravité et aux forces de réaction au niveau des deux points d'attache, en plus de ses efforts internes.

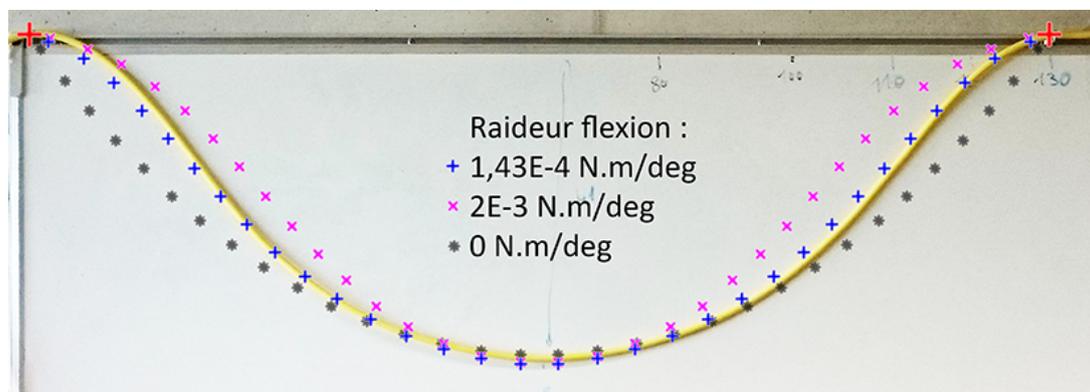


Figure II.18 – Validation du modèle et de la raideur en flexion par comparaison avec un câble réel suspendu dans l'air

Les valeurs utilisées des paramètres correspondent au câble Tortuga et sont présentées dans le tableau II.7. Ces valeurs sont considérées constantes dans le temps et l'espace. Cette expérience étant réalisée dans un plan, en statique, seule la raideur en flexion et la masse du câble ont une influence.

L'impact de la raideur sur la forme du câble est représenté par les courbes correspondant à deux câbles de mêmes dimensions, l'un ayant une raideur plus grande, $2 \times 10^{-3} \text{ N m/deg}$, que celle du câble réel et l'autre ayant une raideur nulle, tel qu'une chaînette. La figure II.18 présente ces trois courbes superposées à une photo du câble réel dans la même configuration. Cela montre que la forme du câble simulé à partir de ses paramètres correspond bien à la forme de ce câble.

Cet essai valide donc l'intérêt de la modélisation par segments et confirme le sens physique de l'identification de la raideur en flexion proposée en section II.2.

Pour le câble Fathom Slim, la même expérience a été reproduite à la différence que le câble n'était pas appuyé sur un tableau (figure II.19). Un système de mesure dans l'espace par caméras, décrit en section V.2.1, a été utilisé en plus des photos pour mesurer la position de quelques points sur le câble. On constate que ce câble a une forme nettement moins lisse que le Tortuga, il a conservé de nombreuses irrégularités dues à sa rémanence. Les points du câble ne se situent donc pas tous dans le même plan vertical. Les points mesurés sont représentés par des ronds bleus, les plus clairs étant les plus éloignés, l'écart maximal de profondeur entre ces points est de 29 mm. Ces irrégularités entraînent une moins bonne correspondance entre le modèle et la réalité.

Cependant, ce modèle ne permet pas de modéliser finement l'interaction avec le fluide et les temps de simulation deviennent prohibitifs pour des grandes longueurs en 3D (de l'ordre de 50 m). Le modèle proposé sous Simulink ne prend pas en compte les interférences du câble avec lui-même ni la variation de la longueur de câble au cours d'une simulation. Cette solution de simulation a donc une utilité pour valider quelques comportements

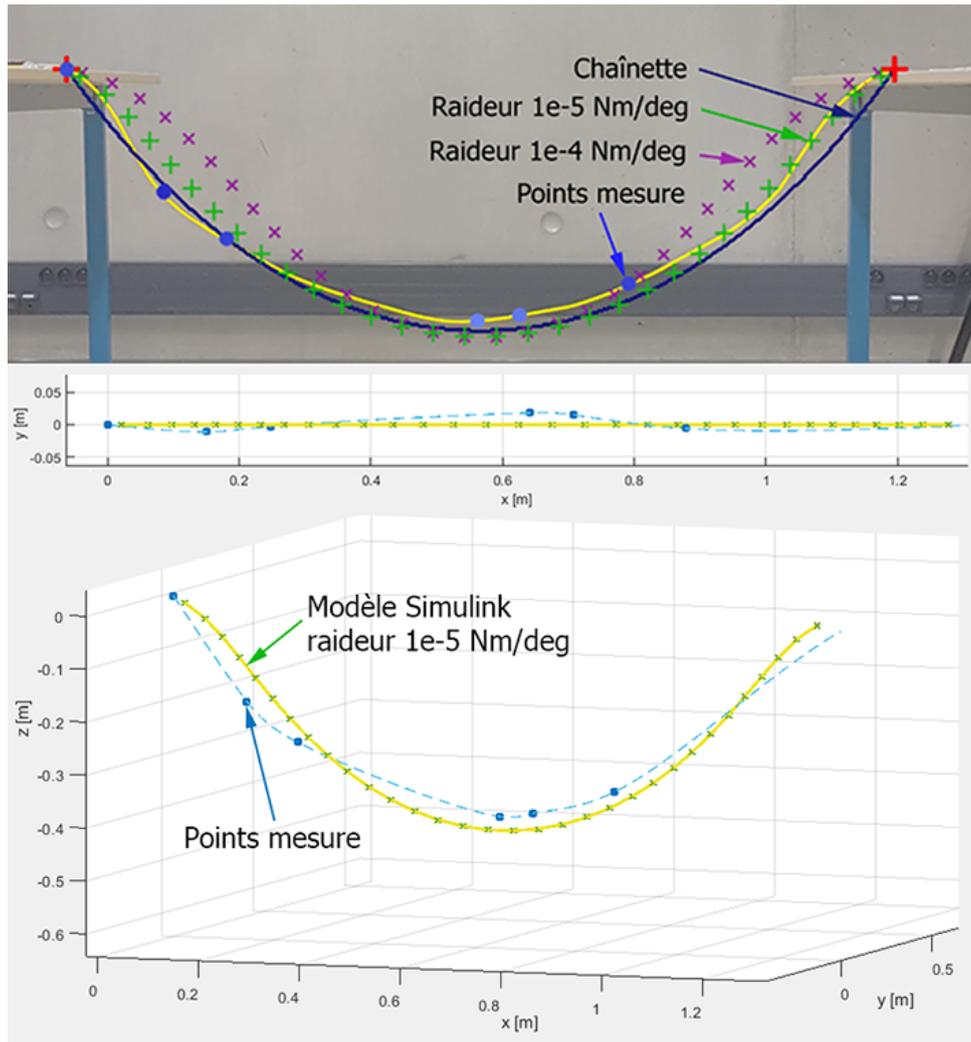


Figure II.19 – Superposition du modèle du Fathom Slim au câble réel suspendu dans l'air

simples ainsi que les paramètres du câble, sur de petites longueurs constantes, lorsqu'il est libre entre ses extrémités. Un modèle macroscopique se révèle nécessaire pour des simulations plus proches de la réalité.

II.3.3 Modèle sous Vortex

Un modèle plus précis a donc été réalisé dans l'objectif d'étudier le comportement du système complet lors de missions et en particulier l'impact du câble sur le comportement du ROV. Les stratégies de gestion du système sont évaluées grâce à ces simulations. Cette modélisation a été développée sous Vortex® de CM Labs.

Description du logiciel Vortex

Ce logiciel orienté métier est basé sur un moteur physique et doté d'un modèle d'environnement marin où les fonds marins, les vagues et les courants peuvent être définis.

Un rendu graphique est disponible afin d’avoir une vue d’ensemble des expériences simulées. Vortex® intègre la modélisation de câbles à partir d’un modèle de type masse-ressort en prenant en compte leurs paramètres physiques pour un résultat réaliste. Les données relatives au câble et aux forces qui y sont liées au cours de la simulation sont aussi disponibles. Le pas de temps des simulations Vortex® est de 17 *ms* (60 Hz).

La structure des simulations sous Vortex® est décrite sur la figure II.20. L’utilisation d’assemblages composés de pièces reliées entre elles par des contraintes est classique. Les pièces sont constituées de propriétés physiques et d’un corps géométrique utilisé pour les interactions avec les autres éléments. Les différents assemblages sont regroupés dans des mécanismes. Des fonctionnalités spécifiques sont intégrées aux mécanismes par l’intermédiaire d’extensions. Les scènes contiennent l’environnement, graphique et dynamique, des mécanismes. L’une des extensions disponibles dans les mécanismes concerne justement la simulation de câbles.

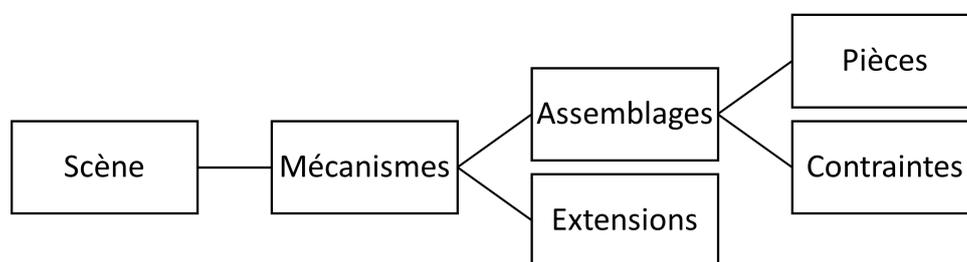


Figure II.20 – Schéma de la structure générale des simulations Vortex®

Modélisation du câble sous Vortex

Vortex® modélise le câble comme une suite de pièces reliées par des contraintes. Celles-ci sont configurées de telle sorte que le câble se comporte comme un objet flexible en prenant en compte ses propriétés matérielles de dimensions (longueur, diamètre), ses paramètres d’inertie (masse, densité, inertie), sa raideur en flexion et en torsion ainsi que son élongation. Ces paramètres sont renseignés par l’utilisateur ou calculés automatiquement par Vortex® à partir d’informations telles que le nombre de brins et leur module d’Young. La première option a été choisie dans cette étude. En plus de ses paramètres internes, le câble est défini par des points de passage (au moins deux, aux extrémités) qui peuvent être associés à des attaches, des poulies, des bobines ou des anneaux. D’autres paramètres sont utilisés pour gérer la simulation, tels que la longueur préférée des portions et la possibilité de désactiver les portions de câble qui ne subissent pas de déformations.

L’utilitaire de Vortex® calcule un amortissement 10 fois inférieur à la raideur pour les composantes axiales et de torsion et 2 fois inférieur pour la composante en flexion. Ces rapports sont donc repris pour les appliquer à l’amortissement à partir des raideurs déterminées précédemment. Les paramètres utilisés sont récapitulés dans le tableau II.9.

La collision du câble avec lui-même est aussi prise en compte afin de visualiser les emmêlements et nœuds du câble.

La première extrémité du câble a une attache de type bobine qui est connectée au tambour relié à l’USV par liaison pivot. Celle-ci est motorisée et contrôlée en vitesse de

| Paramètre | Câble Tortuga | Câble Fathom Slim |
|---|------------------------|------------------------|
| Raideur axiale (N) | $1 \times 10^{12} *$ | $1 \times 10^{12} *$ |
| Amortissement axial (kg m/s) | $8,2 \times 10^{14} *$ | $8,2 \times 10^{14} *$ |
| Raideur en flexion ($\text{N m}^2 \text{ rad}^{-1}$) | $8,2 \times 10^{-3}$ | $5,7 \times 10^{-4}$ |
| Amortissement en flexion ($\text{kg m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ rad}$) | $4,1 \times 10^{-3} *$ | $2,9 \times 10^{-4} *$ |
| Raideur en torsion ($\text{N m}^2 \text{ rad}^{-1}$) | 2×10^{-2} | $8,8 \times 10^{-4}$ |
| Amortissement en torsion ($\text{kg m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ rad}$) | $2 \times 10^{-3} *$ | $8,8 \times 10^{-5} *$ |
| Masse linéique (kg/m) | 71×10^{-3} | 12×10^{-3} |
| Coefficient de traînée | 1,8 * | 1,8 * |
| Rayon (m) | $4,75 \times 10^{-3}$ | 2×10^{-3} |
| Tension de rupture (N) | 5000 | 1520 |

Tableau II.9 – Paramètres utilisés pour la simulation de deux câbles sous Vortex®. Les valeurs des paramètres avec une * sont arbitraires. (Noter l'échelle en radians.)

rotation ou en couple. La vitesse linéaire de déroulement du câble dépend donc du rayon de la bobine. Une autre option pour contrôler la longueur de câble serait d'utiliser une attache de type "point d'enroulement" avec laquelle la vitesse en m/s de déroulement ou d'enroulement du câble serait contrôlée. Cependant, celle-ci ne permet pas de limiter le couple d'enroulement comme cela est possible avec la liaison motorisée de la bobine.

L'autre extrémité est attachée au ROV, avec un décalage pour la positionner au niveau de l'attache réelle sur le BlueROV2 (BR2) (vers l'arrière gauche du robot). Cette attache a une définition flexible qui contraint le câble à s'approcher de sa position d'équilibre (choisie dans l'axe longitudinal du robot) avec les mêmes paramètres de raideur que dans le reste du câble. Deux autres options sont disponibles : l'encastrement et la liaison rotule. L'option d'attache flexible apparaît comme la plus proche du système réel.

La longueur initiale de câble ne peut pas être définie. En effet, le câble est automatiquement créé comme une ligne droite reliant ses points de passage. Des points virtuels définissant une spline sont ajoutés à l'initialisation pour forcer le câble dans une configuration plus relâchée et augmenter la longueur de câble disponible au départ. Une fois la simulation démarrée, la longueur de câble est alors contrôlée par l'intermédiaire de la bobine.

Au cours de la simulation, Vortex® affiche la longueur totale de câble, son élongation ainsi que sa tension et sa torsion maximale. D'autres paramètres sont récupérés par l'intermédiaire de scripts.

Afin de valider la simulation du câble sous Vortex®, une portion de câble du Tortuga a été modélisée dans la configuration de la suspension avec les deux extrémités à la même hauteur déjà utilisée pour le modèle de la chaînette et le modèle Simulink. Le résultat est illustré sur la figure II.21.

La forme du câble obtenue par le modèle Vortex dans cette configuration a alors été superposée sur la figure II.22 à celle obtenue par le modèle Simulink ainsi qu'à la photo du câble réel. On observe une bonne cohérence sur la forme du câble entre ces deux modèles et la réalité.

Les forces et moments au niveau des deux extrémités du câble déterminés par le modèle

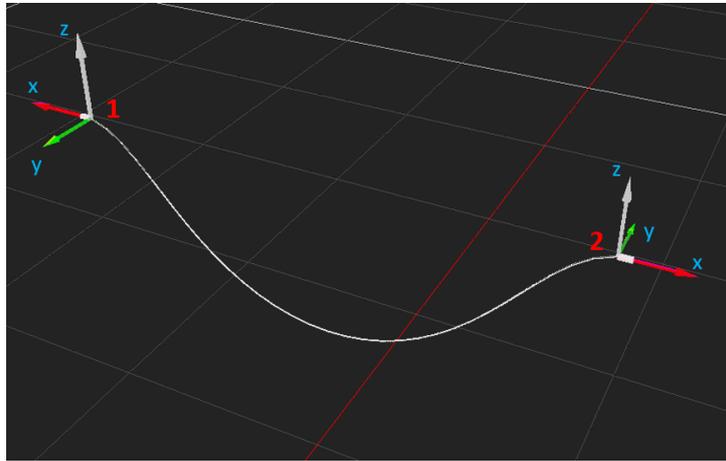


Figure II.21 – Modélisation sous Vortex du câble Tortuga suspendu en l’air entre ses deux extrémités

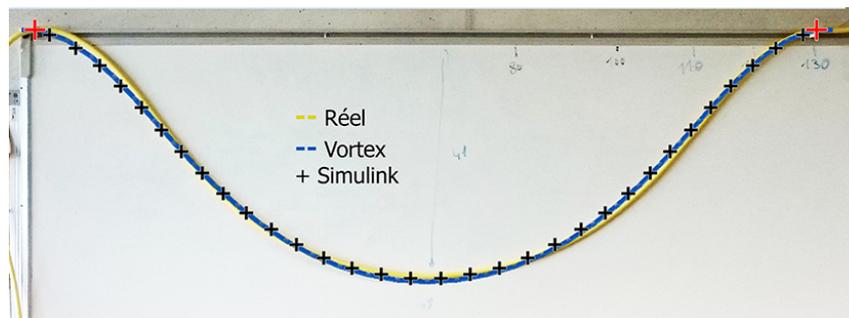


Figure II.22 – Comparaison de la forme du câble Tortuga entre le modèle Simulink, le modèle Vortex et le câble réel

ont alors été comparés entre le modèle Simulink et le modèle Vortex. Les valeurs des paramètres utilisés et des forces et moments mesurés au niveau du point d'attache de gauche sont présentées dans le tableau II.10. Ces efforts sont bien cohérents entre les deux

| | Simulink | Vortex |
|----------------------|--|---|
| Paramètres | Longueur câble : 1,6 m Distance entre les attaches : 1,3 m Raideur en flexion : $8,2 \times 10^{-3} \text{ N m}^2/\text{rad}$ Masse linéique : 0,071 kg/m | |
| Force (N) | $F_x = -0,2206$ $F_y = 0$ $F_z = -0,557$ | $F_x = -0,2218$ $F_y = 0$ $F_z = -0,5575$ |
| Moments (N m) | $M_x = 0$ $M_y = -0,05909$ $M_z = 0$ | $M_x = 0$ $M_y = -0,05856$ $M_z = 0$ |

Tableau II.10 – Comparaison des forces et moments au niveau de la première attache pour les modèles Simulink et Vortex

modèles.

Modélisation de l'environnement marin sous Vortex®

Sous Vortex®, l'environnement aquatique peut être simulé de deux façons :

- **Surface fluide** : Extension du mécanisme qui définit simplement un fluide sous la surface choisie ainsi que sa densité et sa vitesse (uniforme sur chacun des axes).
- **Océan** : Un environnement de type océan est intégré à Vortex®. Il contient des paramètres pour régler l'état de la mer tels que la force de la mer, les courants et le vent.

La première option est utilisée pour simuler le comportement du système complet dans un bassin rempli d'eau. Les forces dues au fluide, telles que la poussée et la traînée sont alors appliquées à tous les éléments présents sous la surface du fluide.

Modélisation du système complet sous Vortex®, scripts et configurations

Afin de simuler et d'observer l'influence du câble sur le pilotage du ROV, le système complet a été modélisé sous Vortex®. Celui-ci comprend l'USV et le BR2 reliés par le câble de longueur variable.

Au niveau du mécanisme, cette simulation s'appuie sur les extensions suivantes :

- **Câble**
- **Assemblages** : Tels que l'USV et le ROV.
- **Propulseurs** : Les propulseurs du ROV sont simulés grâce à cette extension qui transforme la vitesse de rotation en poussée à partir d'un modèle choisi.
- **Galerie** : L'apparence graphique de tous les éléments (câble, véhicules, etc.) est définie dans cette extension.

- **Surface fluide**
- **Scripts** : Le contrôle du système global et de ses différents éléments est géré par l'intermédiaire de scripts Python intégrés à Vortex®.
- **Configurations** : Le système est simulé sous différentes configurations définies au sein du même mécanisme.

Les pièces constituant les assemblages sont définies par leurs paramètres (masse, centre de gravité, matrice d'inertie et matrice de masses ajoutées) et une ou plusieurs géométries. Les géométries correspondent à des formes de base (cylindre, cube,...) ou à des maillages plus précis. Ces géométries sont utilisées pour définir les limites de la pièce pour calculer les collisions, sa flottabilité, sa traînée et sa portance. Ces interactions avec les autres éléments du mécanisme sont activées ou désactivées indépendamment pour chacune des géométries constituant une pièce. Au niveau de l'assemblage, les pièces sont aussi reliées à des variables d'entrées (transformation locale, contrôle en vitesse,...) et de sorties (transformation globale, vitesses et forces mesurées).

Cette simulation est détaillée dans le chapitre V et en annexe C.

Une fois que le câble est modélisé, il est alors possible d'étudier son comportement et son impact sur le système.

II.4 Étude de l'influence des paramètres du câble

Les différents impacts du câble sur le ROV ont été développés en section I.5. Les forces que le câble applique au ROV dépendent des forces internes au câble telles que la raideur et l'élasticité (Blintsov 2017). Cette section propose d'étudier l'influence de différents paramètres sur les forces qu'il transmet au ROV.

II.4.1 Influence de la longueur pour une chaînette

Dans un premier temps, l'influence de la longueur d'une chaînette sur les efforts appliqués au ROV a été étudié. Les efforts ont été déterminés à partir des équations de la tension de la chaînette résolues sous Matlab, pour une configuration donnée (voir section II.1.1 pour les détails des équations). Les deux extrémités de la chaînette sont distantes de 2 mètres (1,9 m en horizontal et 0,6 m en vertical) et sa longueur varie entre 2 m et 4 m. Les paramètres correspondant à cette simulation sont récapitulés dans le tableau II.11. Seul le poids est pris en compte dans ces calculs, ce qui correspond à un câble dans l'air et non dans l'eau.

On trace sur la figure II.23 les efforts que cette chaînette exerce au niveau de son extrémité basse, correspondant au ROV, en fonction de sa longueur normalisée par rapport à la distance entre ses extrémités. Une force horizontale négative correspond à une traction du ROV vers l'arrière et une force verticale positive correspond à une traction vers le haut (en considérant que le câble est attaché à l'arrière du ROV et que l'axe vertical est orienté vers le haut).

Le modèle de la chaînette étant en 2D, il n'y a pas d'efforts suivant l'axe transversal. De même, sa raideur étant nulle, la chaînette ne peut pas transmettre de moments au niveau du point d'attache. Lorsque la longueur du câble est égale à la distance entre ses deux extrémités, sa tension est infinie. Le ROV subit une traction extrême vers le haut et l'arrière. Lorsque la longueur augmente, la tension se relâche, la norme de la résultante

| | |
|-------------------------------|------------|
| A (m) | (0;0) |
| B (m) | (1,9;-0,6) |
| L (m) | 2 à 4 |
| μ (kg/m) | 0,012 |
| K_t (N m ² /deg) | 0 |
| K_f (N m ² /deg) | 0 |

Tableau II.11 – Valeurs des paramètres pour l'étude de la variation de longueur

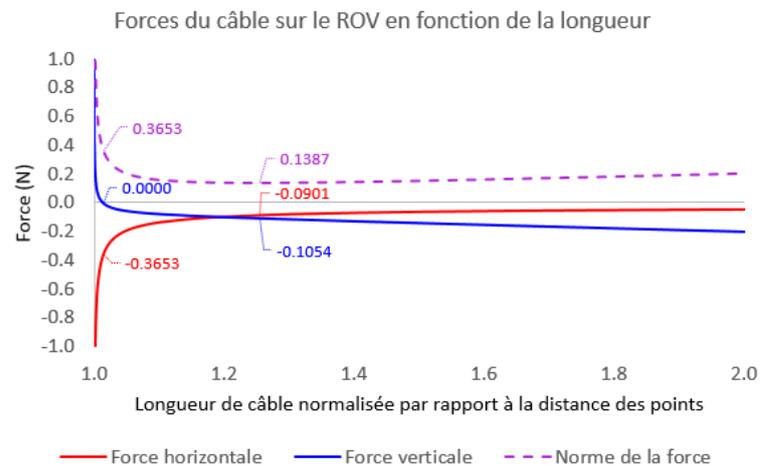


Figure II.23 – Efforts transmis par une chaînette au niveau du point d'attache du ROV en fonction de sa longueur

diminue rapidement, la force verticale devient négative (le ROV est tiré vers le bas) en raison d'un lobe formé par le câble, et la force horizontale tend vers 0.

On constate qu'il y a une configuration pour laquelle la composante verticale des efforts est nulle. Cette configuration sera appelée la configuration semi-tendue. Celle-ci est définie comme la configuration pour laquelle la chaînette a une tangente horizontale au niveau de son accroche au ROV. Dans cette configuration, le câble ne forme pas de lobe et n'est pas non plus tendu en direction de l'USV.

Il est à noter que la norme de la force n'est pas nécessairement minimale lorsque sa composante verticale est nulle, comme on peut le voir sur la figure II.23. Cependant, elle a une valeur assez faible. La norme de la force admet un minimum pour une longueur de câble légèrement supérieure à celle qui correspond à la configuration semi-tendue. Dans le but de minimiser l'impact du câble sur le ROV, il faut prendre en compte ses capacités. La majorité des ROV ont une propulsion plus performante suivant leur axe longitudinal, au dépens de leur propulsion verticale. Il est donc intéressant de viser la minimisation des efforts verticaux. Cependant, l'objectif sera à définir au cas par cas, en fonction du type de ROV et des missions, en faisant un compromis entre les différents efforts à minimiser.

II.4.2 Influence de la raideur du câble

On étudie ensuite l'influence de la raideur sur la force que le câble applique au ROV, en statique. Pour cela, un câble de 1,6 m de longueur a été modélisé en 3D sous Simulink, comme décrit en section II.3.2, avec les paramètres détaillés dans le tableau II.12. Ce modèle prend en compte le poids et la poussée d'Archimède comme efforts extérieurs (qui sont calculés à partir du volume du câble et de sa masse volumique). La raideur en torsion utilisée est proche de celle déterminée pour le câble Tortuga. La densité volumique a été choisie pour que le câble soit légèrement coulant (la forme d'un câble neutre dans l'eau n'étant pas déterminée).

| | |
|--|---|
| A (m) | (0;0;0) |
| B (m) | (1,2;-0,5;0) |
| L (m) | 1,6 |
| d (mm) | 4 |
| $\rho_{\text{câble}}$ (kg/m ³) | 1100 |
| K_t (N m ² /deg) | 1×10^{-6} à 2×10^{-2} |
| K_f (N m ² /deg) | $3,2 \times 10^{-4}$ |

Tableau II.12 – Valeurs des paramètres pour l'étude de la variation de raideur en flexion

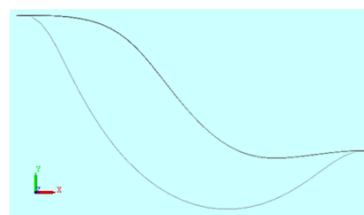


Figure II.24 – Illustration de l'impact de la raideur du câble sur sa forme

La figure II.25 représente les forces et moments que le câble transmet au ROV en fonction de sa raideur en flexion, dans une configuration donnée où il forme un lobe (sa longueur est largement supérieure à la distance entre les extrémités). On constate que plus la raideur du câble est importante, plus il a tendance à pousser le ROV vers l'avant et vers le fond. Lorsque la raideur est très faible (inférieure à 7×10^{-6} N m²/deg pour cette configuration), la force horizontale est négative (le câble tire le ROV vers l'arrière), puis

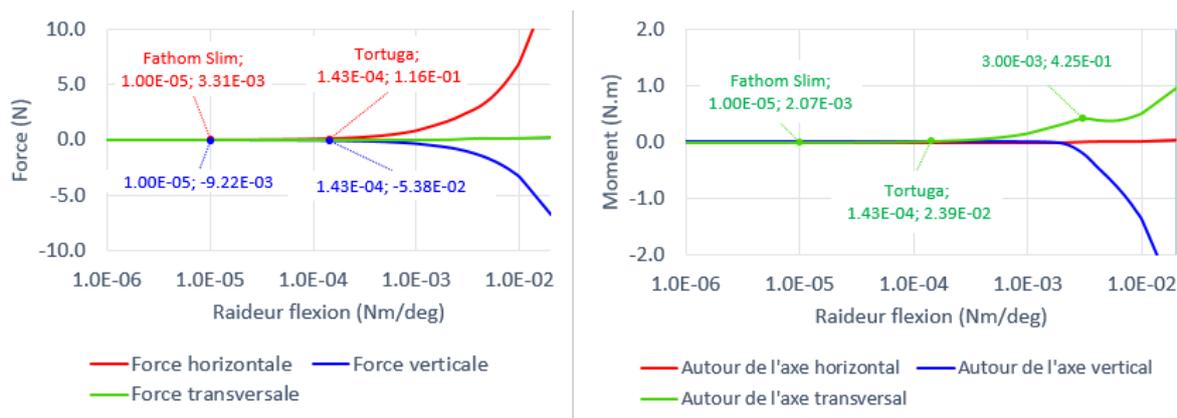


Figure II.25 – Forces (gauche) et moments (droite) transmis par le câble au ROV en fonction de sa raideur en flexion (noter l'échelle logarithmique de la raideur). Les points ayant une abscisse correspondant à la raideur respective des câbles Fathom Slim et Tortuga sont indiqués comme points de repères.

elle devient positive (le câble pousse le ROV vers l'avant). Le moment autour de l'axe transversal augmente aussi avec la raideur, en induisant un tangage du ROV vers le haut. Cela signifie qu'en fonction de la valeur de la raideur en flexion du câble, il est parfois intéressant d'augmenter la distance entre le ROV et l'USV pour réduire les efforts dus à la raideur en flexion transmis au ROV. La force transversale ainsi que les moments autour de l'axe longitudinal et de l'axe vertical sont d'abord nuls, puis, un moment autour de l'axe transversal apparaît soudainement. Ceci est dû au fait que le câble quitte le plan lorsque sa raideur en flexion dépasse un certain seuil par rapport à sa raideur en torsion (environ dix fois supérieure à celle-ci, dans la configuration présentée ici). Un plateau apparaît alors pour le moment autour de l'axe transversal, puis, sa valeur augmente à nouveau à mesure que la raideur et que le moment autour de l'axe vertical continuent d'augmenter. Il est à noter que le sens dans lequel le câble quitte le plan est indéterminé, le moment autour de l'axe vertical est ici négatif, mais il aurait pu tout aussi bien être positif.

Les raideurs correspondant à celles mesurées pour les câbles Fathom Slim de BlueRobotics et du Tortuga de SubseaTech sont indiquées sur ces courbes. La figure II.26 présente un détail des courbes de la figure II.25 autour de ces deux valeurs. On constate qu'une variation de 20 % de la valeur de la raideur déterminée entraîne une variation d'environ 20 % pour la force horizontale du câble Tortuga, 50 % pour celle du Fathom Slim, 17 % pour la force verticale et le moment du câble Tortuga, 16 % pour le moment du Fathom Slim et 7 % pour la force verticale du Fathom Slim.

A titre de comparaison, le BR2 a une poussée maximale de 88 N suivant son axe longitudinal et son axe transversal, de 68 N suivant son axe vertical et une pesée négative d'environ 2 N (différence entre son poids et sa poussée d'Archimède). En dehors des tensions extrêmes du câble, celui-ci ne devrait donc pas immobiliser le BR2 au delà de ses performances. Cependant, les efforts transmis par le câble peuvent rapidement se rapprocher de la force de pesée du BR2, ce qui perturbe son équilibre et sa manœuvrabilité.

La longueur de 1,6 m avait été choisie pour correspondre à un échantillon de câble disponible au laboratoire, cette longueur étant pratique pour faire des expériences. Plus la longueur de câble sera grande, plus faible sera la contribution de sa raideur sur la

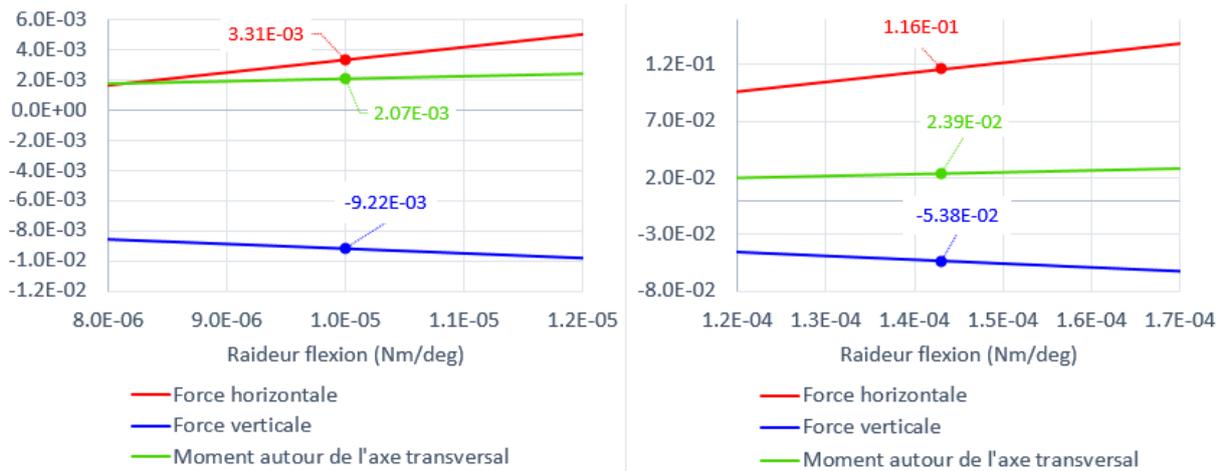


Figure II.26 – Détail des forces et moments transmis par le câble au ROV pour des raideurs variant autour de celle tu câble Fathom Slim (courbes de gauche) et du câble du Tortuga (courbes de droite)

transmission des efforts au ROV par rapport aux autres paramètres.

II.4.3 Influence de la distance entre les deux extrémités

L'influence des positions respectives des deux véhicules pour une longueur de câble donnée est ensuite étudiée, en faisant varier leur distance horizontale tout en conservant une distance verticale donnée, comme on peut le voir sur la figure II.27. Le modèle Simulink d'un câble de 1,6 m de long a été repris avec les paramètres détaillés dans le tableau II.13.

| | |
|--|-------------------------|
| A (m) | (0 ; 0 ; 0) |
| B (m) | (0,5 à 1,52 ; -0,5 ; 0) |
| L (m) | 1,6 |
| d (mm) | 4 |
| $\rho_{\text{câble}}$ (kg/m ³) | 1100 |
| K_t (N m ² /deg) | 1×10^{-5} |
| K_f (N m ² /deg) | $3,2 \times 10^{-4}$ |

Tableau II.13 – Valeurs des paramètres pour l'étude de la variation de la distance

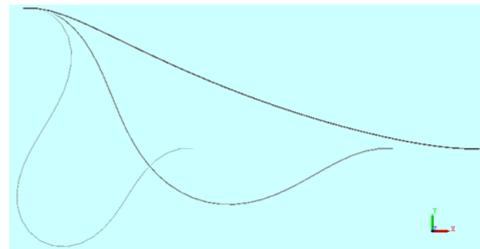


Figure II.27 – Illustration de la variation de distance entre les extrémités du câble

Les efforts transmis par le câble au ROV sont représentés sur la figure II.28 en fonction de la longueur de câble normalisée par rapport à la distance entre les points. A longueur constante, l'augmentation de cette longueur normalisée correspond à une réduction de la distance entre les extrémités du câble. Dans cette configuration, le câble reste dans un plan vertical, l'effort suivant l'axe transversal et les moments suivant l'axe longitudinal et l'axe vertical sont donc nuls. Les forces suivant l'axe longitudinal et l'axe vertical ont un comportement similaire à celui qui avait été observé pour la chaînette. On retrouve le point auquel la force verticale s'annule, qui correspond aussi à l'annulation du moment autour de l'axe transversal. La composante horizontale des efforts en ce point est plus faible dans

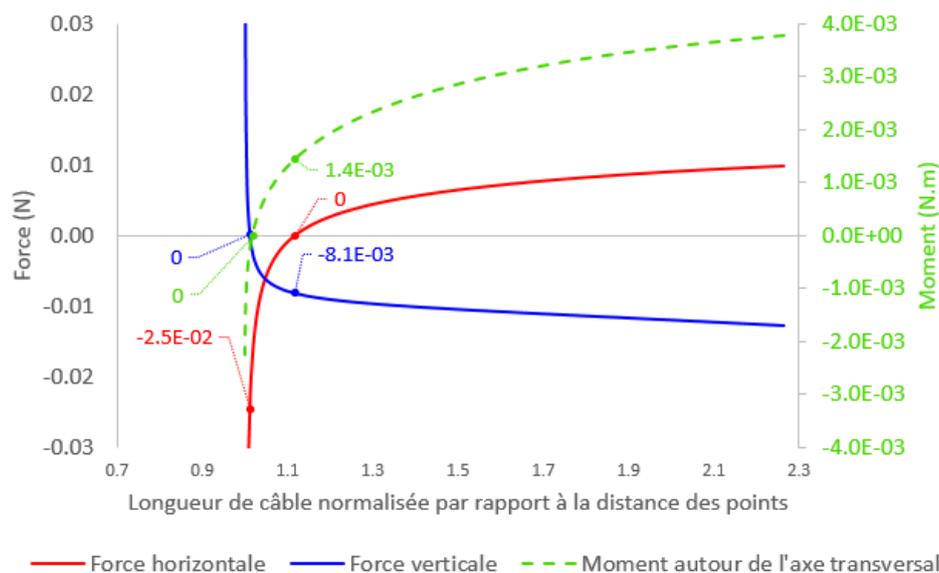


Figure II.28 – Forces et moments transmis par le câble au ROV en fonction de la distance entre les extrémités pour une longueur donnée de câble

ce cas que pour la chaînette mais il est à noter que la chaînette avait été étudiée dans l'air, son poids n'était donc pas du tout compensé par la poussée d'Archimède comme c'est le cas pour l'exemple discuté ici. La force horizontale augmente à mesure que la distance diminue et s'annule en un point où le câble passe d'une traction du ROV à une répulsion de celui-ci. On peut redéfinir la configuration semi-tendue d'un câble ayant une raideur non négligeable comme la zone comprise entre les points d'annulation de la composante verticale et d'annulation de la composante horizontale. Passé la zone de tension et cette zone semi-tendue, les efforts continuent d'augmenter (en valeur absolue) mais varient beaucoup moins que dans la zone tendue.

Après analyse de ces résultats, la configuration semi-tendue apparaît comme un bon compromis. En effet, un câble tendu exercerait une grande tension sur le ROV, en plus de lui transmettre le pilonnement du véhicule de surface, alors qu'un câble non tendu risque de s'emmêler ou de s'accrocher comme vu en section I.5.

II.4.4 Influence de la densité du câble

Finalement, l'influence de la densité du câble sur les efforts qu'il transmet au ROV est étudiée. Le même modèle Simulink que précédemment est repris, avec les paramètres détaillés dans le tableau II.14. On étudie la variation de la masse volumique du câble entre 1000 kg/m^3 et 1500 kg/m^3 . On rappelle que la densité correspond au rapport entre la masse volumique d'un corps (ici, le câble) et une masse volumique de référence (ici, celle de l'eau dans laquelle il est plongé). Une masse volumique de 1000 kg/m^3 , respectivement 1500 kg/m^3 , correspondent donc à une densité de 1, respectivement 1,5, en considérant une masse volumique de l'eau à 1000 kg/m^3 . La forme du câble pour ces deux valeurs est illustrée sur la figure II.29. Il est à noter que pour le câble neutre, sa position d'équilibre pourrait aussi bien présenter un lobe vers le haut qu'un lobe vers le bas, comme représenté

| | |
|--|----------------------|
| A (m) | (0;0;0) |
| B (m) | (1,2;-0,5;0) |
| L (m) | 1,6 |
| d (mm) | 4 |
| $\rho_{\text{câble}}$ (kg/m ³) | 1000 à 1500 |
| K_t (N m ² /deg) | 1×10^{-5} |
| K_f (N m ² /deg) | $3,2 \times 10^{-4}$ |

Tableau II.14 – Valeurs des paramètres pour l'étude de la variation de la densité du câble

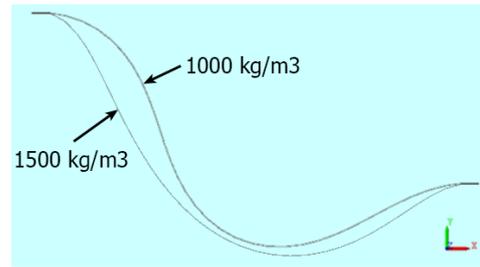


Figure II.29 – Forme du câble pour des masses volumiques de 1000 et 1500 kg/m³

ici. Afin d'éviter les résultats aléatoires, une condition initiale a été ajoutée pour favoriser la formation du lobe vers le bas. La figure II.30 représente les forces horizontales et verticales ainsi que le moment autour de l'axe transversal que le câble transmet au ROV. En effet, dans cette configuration, le câble est maintenu dans un plan vertical, les autres efforts sont donc nuls. On constate que la force verticale est toujours négative, tirant le ROV vers le bas, et le moment est toujours positif, entraînant un tangage vers le haut du ROV. Les valeurs absolues de ces deux composantes augmentent à mesure que la densité augmente. La force horizontale diminue à mesure que la densité augmente. Elle est d'abord positive, poussant le ROV vers l'avant, puis, à partir d'une masse volumique d'environ 1170 kg/m³, elle devient négative, tirant le ROV vers l'arrière. Ces trois efforts ont un comportement quasiment linéaire en fonction de la densité du câble. Il apparaît de façon évidente que, pour un câble non flottant, plus le câble sera dense, plus il aura d'impact sur le comportement du ROV. Un câble flottant (très peu dense) aura le même effet qu'un câble pesant, dans la direction opposée.

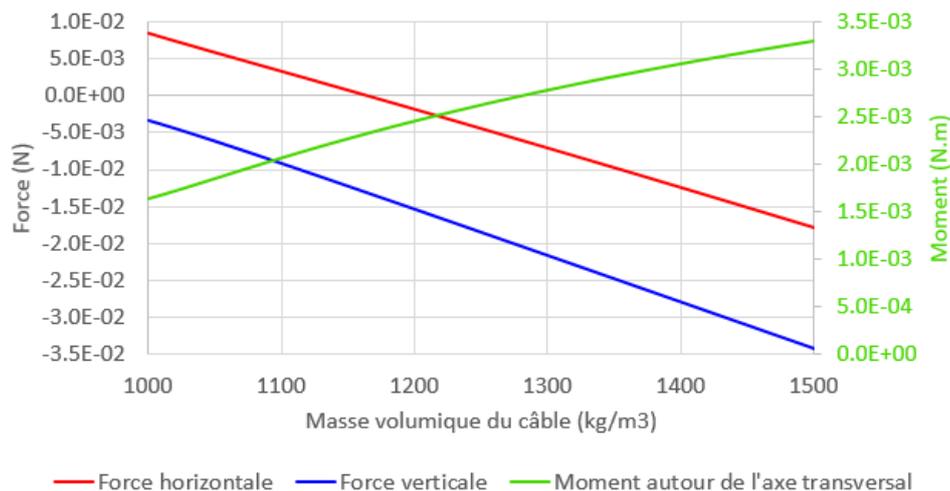


Figure II.30 – Forces et moments transmis par le câble au ROV en fonction de sa masse volumique

II.5 Conclusion du chapitre

La section I.5 a montré la nécessité de gérer les câbles afin de limiter leur impact sur les ROV. La modélisation du câble est nécessaire pour anticiper son influence sur le système. Les modèles se basent sur les paramètres physiques du câble, dont les moyens d'obtention sont présentés en section II.2.

Les simulations du câble sous Simulink ont permis d'étudier l'influence de différents paramètres sur les efforts qu'il transmet au ROV. La configuration semi-tendue du câble a été définie comme un bon compromis entre un câble trop tendu, qui exercerait une grande tension sur le ROV, en plus de lui transmettre le pilonnement du véhicule de surface, et un câble trop lâche, qui risque de s'emmêler ou de s'accrocher (comme vu en section I.5), tout en maintenant les efforts transmis au ROV dans des valeurs raisonnables.

La simulation du câble sous Vortex®, autorise une modélisation plus efficace que sous Simulink, en vue de la modélisation du système complet pour l'étude de son comportement global et en dynamique.

La connaissance du comportement du câble au cours d'une mission permet de connaître son influence sur la manœuvrabilité du ROV. En particulier, la connaissance de sa tension et de sa courbure donnent des informations sur le risque d'interaction du ROV avec le câble et sur les limitations éventuelles des mouvements du ROV.

La suite de cette étude propose une solution de gestion du câble en vue d'atteindre la configuration semi-tendue. Pour cela, un contrôle de la longueur de câble est envisagé. La limite entre la configuration semi-tendue et la configuration tendue étant mince, l'introduction d'une compliance du câble, proposée dans cette étude, apparaît nécessaire.

Chapitre III

Conception mécatronique d'une solution de gestion du câble

| | |
|---|------------|
| III.1 Solutions existantes d'instrumentation et de contrôle du câble | 83 |
| III.1.1 Solutions d'instrumentation du câble existantes | 83 |
| III.1.2 Systèmes existants de contrôle du câble | 86 |
| III.2 Présentation du concept proposé | 89 |
| III.3 Instrumentation du câble en vue de la détection de sa configuration et de son contrôle | 91 |
| III.3.1 Conception mécanique de l'instrumentation du câble | 91 |
| III.3.2 Acquisition numérique du capteur | 93 |
| III.3.3 Étude du comportement du système amorti | 99 |
| III.4 Conception d'un système de contrôle de longueur de câble . | 105 |
| III.4.1 Conception et dimensionnement de l'enrouleur | 106 |
| III.4.2 Architecture et algorithme de contrôle de l'enrouleur | 107 |
| III.4.3 Comportement de l'enrouleur | 109 |
| III.5 Conclusion du chapitre | 113 |

La section I.4 a montré la nécessité d'utiliser des câbles comme moyen de communication directe avec les Remotely Operated Vehicle (ROV). Cependant, la présence du câble limite la liberté de fonctionnement du ROV, comme vu en sections I.5 et II.4. Ces limites se caractérisent par :

- La réduction de l'étendue de l'espace de travail du ROV, liée à la longueur du câble,
- Une manœuvrabilité réduite du fait des efforts transmis par le câble au ROV,
- Des risques d'interférence mécanique avec l'environnement ou le ROV lui même (nœuds, accroches...).

L'élargissement de l'espace d'action du ROV sans accroître exagérément la longueur de l'ombilical est assuré dès lors que le ROV est relié à une base mobile en surface

(Unmanned Surface Vehicle (USV)). Ce véhicule de surface a la possibilité de suivre les explorations du ROV, de fournir des informations de localisation géoréférencée et de servir de relais pour transmettre les ordres ainsi que les mesures entre l'opérateur et le ROV. La notion de suivi est à spécifier selon les besoins de la mission, les contraintes et conditions environnementales, ainsi que les objectifs d'optimisation tels que l'autonomie énergétique ou la limitation des risques liés à l'ombilical.

Pour que l'ombilical n'interfère pas avec l'environnement en traînant sur le fond marin ou en s'accrochant sur des obstacles, le maintien dans la configuration semi-tendue, présentée en section II.4, est recherché. Outre la limitation des risques, cette forme vise à produire la juste longueur de câble entre le ROV et l'USV afin de réduire la traînée. La gestion de cette juste longueur de câble est ainsi possible en jouant sur 3 paramètres, à savoir :

- les déplacements de l'USV,
- les déplacements du ROV,
- la longueur de câble déroulé.

Cette thèse n'abordant pas les modes de suivi de l'USV selon les explorations du ROV (travail en perspective), l'USV est considéré comme quasi-immobile par rapport au ROV en exploration. La variation de la distance ROV/USV sera donc imputable aux déplacements du ROV. Le ROV en exploration pourra être téléguidé en fonction des mesures observées en temps réel autour de points d'intérêt ou suivre un itinéraire pré-enregistré. Afin de ne pas impacter la qualité de ses trajectoires, il ne sera pas en charge de la gestion de son ombilical.

Ceci signifie que la gestion de la juste longueur de câble revient à un système dédié qui équipera l'USV. Afin de satisfaire cette fonction cruciale au bon déroulement d'une mission, la suite de ce chapitre étudie les moyens d'instrumentation de l'ombilical et les modes d'action possibles pour envisager sa gestion lors de missions d'exploration. Pour cela, il est nécessaire de contrôler la longueur de câble déroulée à l'aide d'un enrouleur actionné et de mesurer, de façon directe ou indirecte, la configuration courante du câble. Ce chapitre propose donc la conception d'un système sensorimoteur offrant une gestion conforme de l'ombilical.

III.1 Solutions existantes d'instrumentation et de contrôle du câble

III.1.1 Solutions d'instrumentation du câble existantes

La détection de la configuration du câble peut s'effectuer de manière directe (instrumentation du câble et capteurs proprioceptifs) ou indirecte (capteurs externes au câble).

On retrouve trois méthodes principales pour la détection des câbles sous-marins par mesures externes : visuelles, acoustiques et magnétiques, ainsi que la fusion de données de plusieurs capteurs (Xu, Chen et al. 2016). Ces mesures externes se basent généralement sur des modèles de câbles tels que ceux présentés dans le chapitre II pour la détection et la reconstitution de la géométrie globale du câble.

La détection acoustique est efficace pour détecter les objets cylindriques, tels que les câbles. Cependant, les performances des sonars sont limitées par la courbure du câble et le bruit ambiant. Par ailleurs, la détection magnétique des câbles est rendue possible par leur composition de matériaux conducteurs. Cependant, les champs magnétiques s'atténuent rapidement et sont sensibles aux interférences, limitant la portée des capteurs (Xu, Chen et al. 2016).

Moreira (2019) propose une stratégie d'asservissement visuel du câble à partir des images de la caméra embarquée du BlueROV2 (BR2) afin de contrôler le positionnement relatif de deux robots. La détection du câble se base sur une correspondance de sa projection dans le plan de l'image avec un modèle géométrique de chaînette (voir figure III.1). Le câble est donc nécessairement pesant pour que ce modèle soit appliqué. Cette solution a été conçue pour une distance maximale entre les robots d'environ 10 m et un écart vertical inférieur à 5 m.

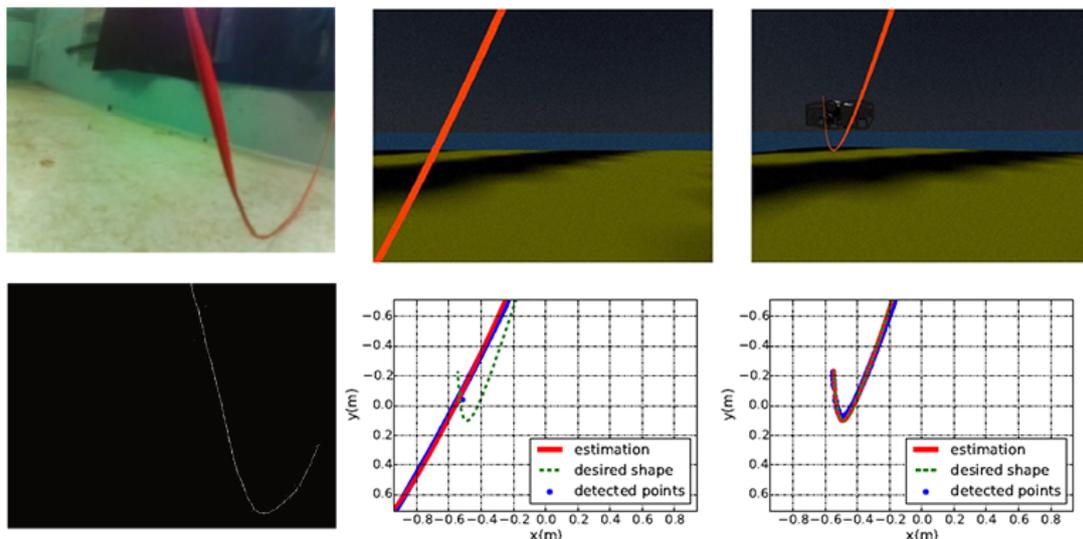


Figure III.1 – Exemples de détection de câbles par vision présentés dans (Moreira 2019)

Dans le cas de câbles neutres dans l'eau, qui sont courants en robotique sous-marine,

le modèle de la chaînette ne s'applique pas. Wnuk et al. (2017) propose une solution de détection visuelle d'objets déformables quelconques en vue de leur manipulation. Ces objets, tels que des câbles, sont modélisés par la méthode des systèmes multi-corps avec des segments finis, comme illustré sur la figure III.2. Les paramètres de ces modèles sont obtenus par apprentissage à partir d'enregistrements vidéos. La détection de ces objets déformables demande un temps de calcul important et est donc souvent traitée dans un environnement *cloud*, ce qui n'est pas adapté à la robotique sous-marine.

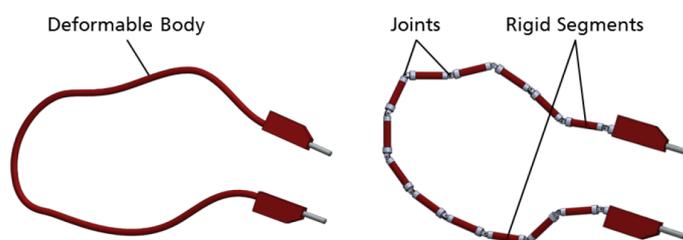


Figure III.2 – Illustration de la segmentation d'un câble pour sa détection dans Wnuk et al. (2017)

La perception visuelle du câble à des fins de contrôle est intéressante mais limitée à de faibles distances à cause de la portée limitée des caméras et de la turbidité de l'eau (Moreira 2019). L'utilisation de capteurs supplémentaires apparaît donc nécessaire pour s'adapter aux milieux turbides ou à des longueurs de câble dépassant la dizaine de mètres.

En parallèle aux mesures indirectes de la configuration du câble passant par sa modélisation, il est aussi possible de l'instrumenter afin de contraindre sa forme ou de la mesurer. L'utilisation de systèmes intermédiaires contrôlant le câble tels que des flotteurs et des ballasts répartis sur sa longueur ou que les Tether Management System (TMS) a été décrite en section I.6. La mesure directe de la configuration du câble s'effectue grâce à des capteurs intégrés au câble, en des points précis ou sur toute sa longueur.

Par exemple, le Smart Tether™ intègre des nœuds de capteurs inertiels de façon régulière sur le câble afin de déterminer la forme du câble en temps réel (Frank et al. 2013). Cependant, cette solution entraîne une forme irrégulière sur le câble qui est gênante lors de son enroulement.

Un capteur de tension du câble a été développé dans McLain et Rock (1992). Ce capteur, monté sur le câble à 23 m au dessus du ROV, transpose la tension dans le câble en une force normale à celui-ci, mesurée par une jauge de contrainte, avec une plage de mesure de 0 à 31 kN (voir figure III.3). Cependant, dans cette étude, la longueur de câble est fixe et on peut imaginer qu'un tel système ne permet pas un bon glissement du câble en cas de longueur variable.

Une technologie très prometteuse se base sur l'utilisation de la fibre optique au sein du câble. Elle se base sur les propriétés d'interferométrie de la fibre optique pour mesurer la courbure tout au long du câble et reconstruire sa forme en trois dimensions (3D) en temps réel (Duncan et al. 2007). Cependant, cette solution est très coûteuse, par exemple *Luna* la commercialise à environ 200 000 euros pour 50 m de câble, ce qui la réserve à des applications militaires ou à des intégrations sur de très courtes longueurs de câbles.

Une autre solution, commercialisée par *Measurand Inc.* sous le nom de ShapeTape™, a

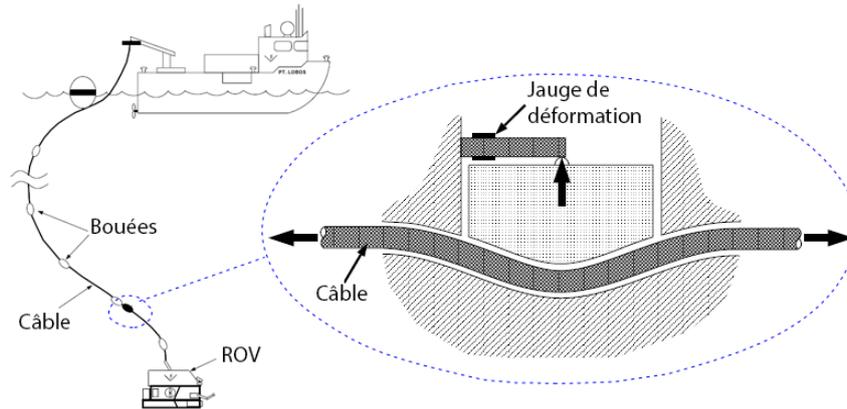


Figure III.3 – Illustration du capteur de tension développé dans McLain et Rock (1992)

été utilisée pour la localisation d'un petit ROV par rapport à un Autonomous Underwater Vehicle (AUV) (Yu, Yuh et Kim 2013) (figure III.4). Elle est composée d'un ensemble de capteurs de flexion et de torsion à partir de fibre optique montés sur un ruban (Xu, Wan et al. 2016). La forme de la portion de câble sur lequel le capteur est monté est alors déduite de sa courbure. Ce capteur présente une erreur d'environ 3 cm pour 1 m de long. Cette erreur se cumule le long du câble et contraint donc l'usage de cette solution à de courtes longueurs. Bradley J Buckham (1997) avait tenté de mesurer en temps réel les mouvements d'un câble de ROV de 6,55 m de long en utilisant plusieurs capteurs Shape-Tape™ en série (figure III.5) mais la dérive était trop importante pour une telle longueur.

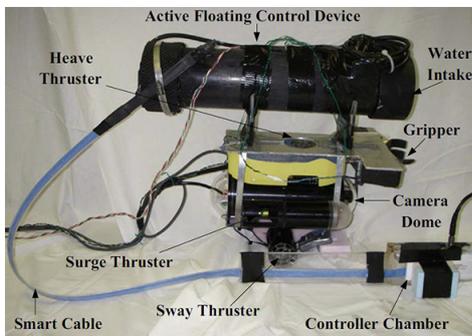


Figure III.4 – Capteur Shape-Tape™ fixé à un petit ROV (Yu, Yuh et Kim 2013)

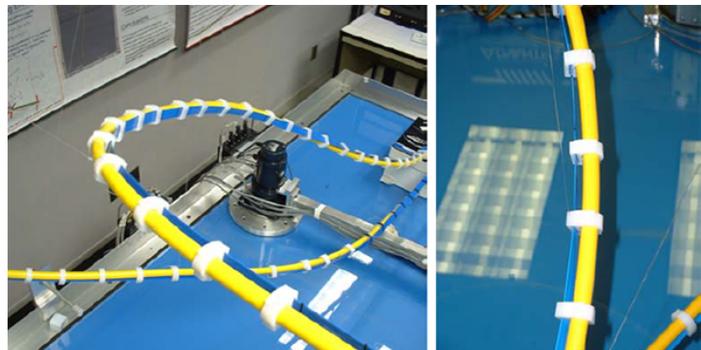


Figure III.5 – Capteur ShapeTape™ monté sur un câble (Bradley J Buckham 1997)

Il a été envisagé, lors de la conception au sein du laboratoire d'un précédent prototype d'enrouleur automatique, de mesurer, d'une part, l'effort d'enroulement à travers la mesure du couple d'enroulement et, d'autre part, de mesurer la traction du câble par la déformation de la structure porteuse du tambour d'enroulement (voir section III.1.2). Bien que fonctionnelle, cette solution produit une mesure qui est une image de la tension dans le câble au niveau de l'enrouleur. Son utilisation est donc pertinente à condition d'embarquer l'enrouleur sur le ROV. Dans le cas contraire (enrouleur à distance du ROV), l'effort mesuré peut être dû à un câble réellement tendu ou aux courants, au pillonnement de l'USV, ou encore à la traînée du câble.

Une solution similaire est proposée par Brignone et al. (2015) avec les mesures de la

tension et de la longueur du câble effectuées par une poulie à ressort reliée à un capteur de déplacement linéaire (voir figure III.6). Ces mesures sont alors utilisées pour le contrôle du câble par un enrouleur motorisé.

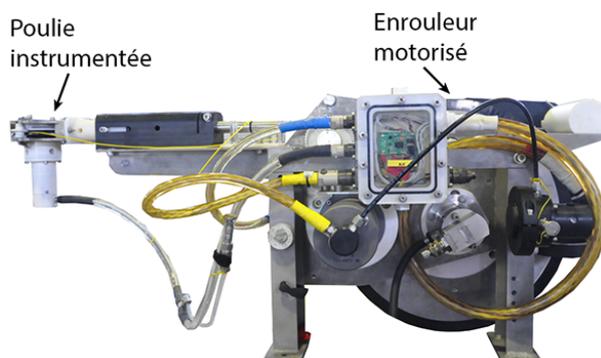


Figure III.6 – Photo du système de gestion de câble proposé par Brignone et al. (2015) et comprenant une partie de mesure de la tension et un enrouleur motorisé [IFREMER]

Ce chapitre propose donc une alternative aux solutions existantes en arbitrant entre les différentes contraintes et limitations (détection imprécise de la configuration du câble, limitation à des portions définies du câble, impact sur sa configuration, usage de capteurs onéreux) en couplant l'instrumentation du câble à son contrôle.

III.1.2 Systèmes existants de contrôle du câble

Le contrôle actif de la configuration du câble passe généralement par un système d'enrouleur qui gère la longueur de câble déroulée. Les enrouleurs classiques sont largement décrits dans la littérature et présents sur le marché. Cependant, peu d'enrouleurs sont motorisés et contrôlés de façon autonome en robotique sous-marine.

On retrouve un enrouleur avec contrôle de la tension du câble pour les drones aériens, proposé par *Elistair* sous le nom de Safe-T (De, Dubois et Penet 2016) (figure III.7). Ce contrôle s'effectue par un asservissement en courant du moteur d'enroulement ou par la mesure de la tension du câble à partir d'un capteur. Pour cela, le câble passe par une poulie montée sur un bras rotatif dont l'inclinaison, qui dépend de la tension du câble (plus il est tendu, plus le bras monte), est mesurée par un capteur de position. Cet enrouleur mesure par ailleurs la longueur de câble, afin de la limiter si nécessaire. Cette mesure s'effectue à partir de marqueurs placés sur le câble en complément d'un encodeur rotatif directement monté sur l'axe du tambour d'enroulement. Celui-ci n'a pas encore été adapté aux drones sous-marins. Par ailleurs, cette solution se comporte mal sur les plateformes mobiles (tels que les bateaux) et est assez onéreuse (environ 20 000 €).

Parmi les systèmes plus spécifiques, l'*Ifremer* a publié un brevet (Drogou, Rigaud et Artzner 2012) sur un système comportant un enrouleur de fibre optique embarqué sur l'Hybrid Remotely Operated Vehicle (HROV) *Ariane* afin de contrôler la portion de câble reliant le véhicule à son TMS. Le système développé par l'*Ifremer* est un système mécatronique lourd et sophistiqué dédié à un véhicule de grande taille, ce qui n'est pas adapté aux objectifs fixés dans le cadre de cette thèse.

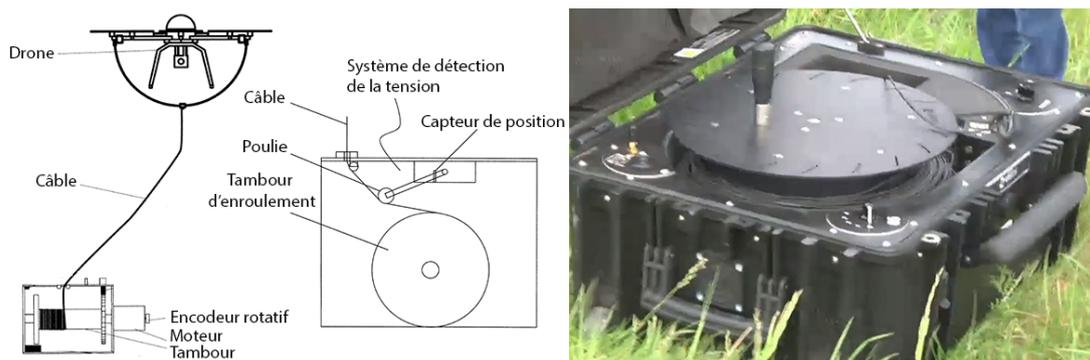


Figure III.7 – Schémas et photo du système d'enrouleur automatique pour drone aérien proposé par Elistair

Différents modes de contrôle sont envisagés pour ces enrouleurs. Le contrôleur proposé par Brignone et al. (2015) est basé sur une machine à états composée de modes de contrôle discret combinés à des boucles d'asservissement de type Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID). Le contrôle dépend de la vitesse du véhicule et de ses actions. Dans le mode automatique, le câble est enroulé de manière active et déroulé de manière passive (moteur libre) afin de maintenir une tension déterminée (4 daN) pour limiter les risques. Lorsque le ROV doit être maintenu en position, la tension consigne du câble est réduite (1,5 daN) et le moteur contrôle à la fois le déroulement et l'enroulement du câble.

Dans Banerjee et Do (1994), le contrôle du câble se base sur une portée minimale et maximale du câble et sur une tension consigne, qui dépend de la longueur déroulée de câble. Ces paramètres sont déterminés à partir de points de fonctionnement caractérisés par la vitesse du véhicule et sa profondeur. La tension du câble est contrôlée par l'enrouleur avec un asservissement Proportionnel-Intégral (PI) alors que la portée du câble est contrôlée par l'ajustement de la vitesse du véhicule par rapport au bateau, avec un asservissement proportionnel. En effet, l'objet de l'étude proposée par Banerjee et Do (1994) consiste en un robot sous-marin guidant un bateau à travers un champ de mines au travers du câble les reliant.

En 2017, le laboratoire COSMER avait mené une étude sur un enrouleur actif intelligent via un projet d'étudiants de l'école d'ingénieurs *SEATECH*. Ce projet s'est conclu par la conception et mise en œuvre d'un démonstrateur concluant pour les cordées de robots (figure III.8). Ce prototype rassemble 4 grandes fonctions essentielles :

- L'enrouleur est montable sur les ROV de faibles dimensions tels que le BR2. Il est donc compatible avec ceux-ci en termes de masse, dimensions et alimentation électrique.
- De plus, l'enrouleur permet de trancanner le câble (rangement de façon ordonnée) afin de limiter le risque de nœuds et de tension inégale dans le bobinage. Cette fonction est assurée par un déplacement axial de la bobine d'enroulement.
- L'enroulement s'effectue à tension constante, ce qui vient compléter les apports du trancannage pour un enroulement ordonné. Cette fonction est assurée par un module de tension qui éjecte ou avale le câble sur commande et dissocie l'enroulement du câble sur la bobine de toute tension en aval.
- La tension du câble est mesurée à la sortie du système par un capteur d'effort. Ceci

permet de détecter toute surcharge inopinée due par exemple à l'accrochage du câble sur un obstacle ou à l'éloignement du ROV de sa base.

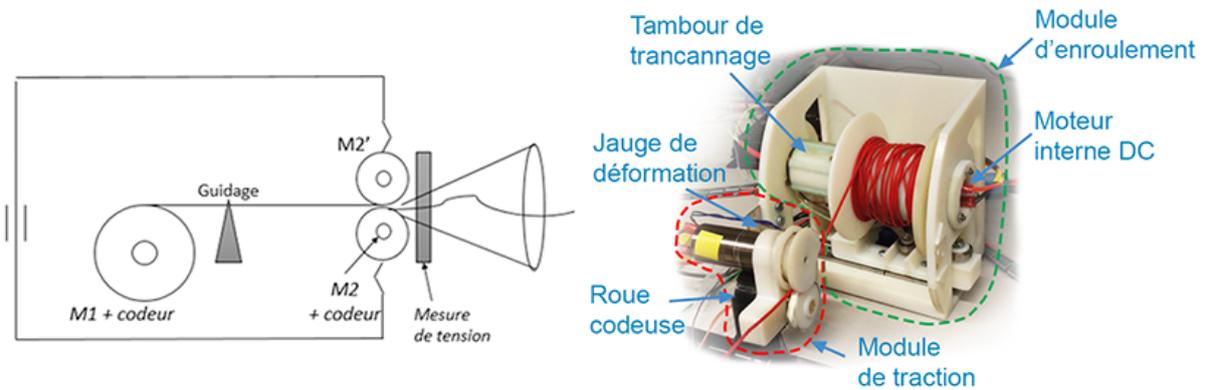


Figure III.8 – Illustration de l'enrouleur développé précédemment au sein du laboratoire

Cet enrouleur est muni de cinq modes : pour enrouler et dérouler rapidement le câble, pour maintenir une tension fixée et pour enrouler et dérouler un peu de longueur de câble lorsque nécessaire.

Ce système a été fabriqué en prototypage rapide et, bien que prometteur, il a présenté quelques petits défauts. De plus, il avait été conçu et dimensionné pour un autre câble (de dimensions différentes) que ceux employés dans le cadre de cette thèse. Il a donc été nécessaire de concevoir un autre enrouleur afin d'effectuer les expérimentations présentées dans cette thèse. Ce second prototype d'enrouleur, présenté dans la section III.4, et développé au cours de la thèse, ne comprend que la partie correspondant au module de traction pour des raisons de contraintes temporelles.

III.2 Présentation du concept proposé

Le contrôle automatique du câble se base sur des données de configurations souhaitées et des informations sur la configuration actuelle du câble. Il est donc nécessaire d'avoir un moyen de mesurer l'état du câble. L'objectif étant de minimiser l'impact du système sur le ROV afin qu'il effectue ses déplacements sans contraintes, les efforts dus à la traînée et à la tension du câble doivent être limités, de même que les risques d'accroche du câble. Ceci passe par un contrôle souple de la juste longueur de câble. D'autre part, le système étant dans l'eau, sa dynamique est fortement amortie et son contrôle ne nécessite pas une vitesse trop importante. La solution proposée dans cette étude se base sur le contrôle du câble en configuration semi-tendue. La section II.4 a montré que la configuration semi-tendue est intéressante mais est caractérisée par une tolérance assez faible sur la longueur de câble. Lorsque le câble est asservi autour de sa configuration semi-tendue, les perturbations extérieures (vagues, courants, déplacements des deux véhicules,...) peuvent rapidement mener le câble dans la configuration critique où il est tendu. Pour éviter cela, une solution consiste à contrôler le système de façon très réactive. Cependant, un contrôle trop réactif entraîne une instabilité du système. Il est donc intéressant d'introduire une compliance au système. Cette compliance peut être passive ou active.

La solution proposée ici est constituée d'une instrumentation du câble et d'un enrouleur actif (voir schéma sur la figure III.9). L'instrumentation du câble a pour rôle de mesurer la configuration du câble et d'apporter une certaine compliance passive à celui-ci. L'enrouleur a pour rôle de distribuer du câble sur demande. L'alliance de ces deux systèmes apporte une compliance active au système en basant le contrôle de l'enrouleur sur la mesure de la configuration du câble, via son instrumentation. De ce fait, la mesure doit être effectuée sans déphasage, afin de ne pas introduire d'instabilités dans le contrôle. Le système de compliance passive rend aussi le contrôle du câble plus souple, en amortissant les perturbations extérieures.

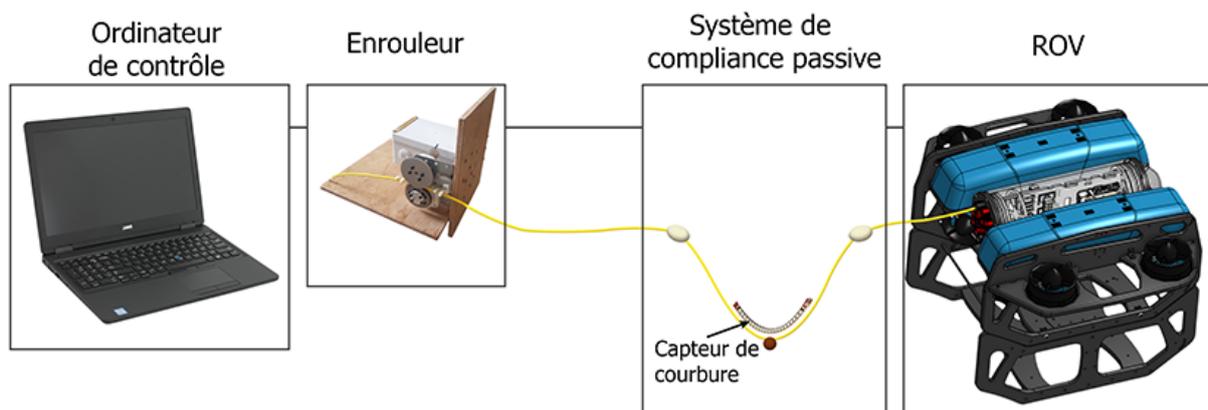


Figure III.9 – Schéma de la solution de gestion du câble proposée

Pour fournir une compliance passive, le câble doit admettre une déformation en présence d'efforts à ses extrémités. Son extension longitudinale intrinsèque étant très limitée (raideur axiale très importante, limitant sa déformation élastique), il convient de conférer cette propriété de compliance passive artificiellement au câble. La forme en spirale, très utilisée

pour les flexibles d'air, est intéressante mais nécessite que l'ombilical ait été ainsi formé lors de sa fabrication. L'emploi de lests et de flotteurs est fréquent pour découpler la portion de câble à proximité du ROV du reste du câble, comme on peut le voir avec les TMS (voir section I.6).

C'est ce dernier type de solution qui est proposé dans cette étude, avec un système d'amortissement monté sur le câble et composé de deux flotteurs et d'une masse afin de créer une forme de V, comme présenté sur la figure III.10. Le câble peut alors s'étirer et se rétracter en fonction de sa tension, sans interférer de manière trop importante sur le ROV. Au repos, seule la raideur intrinsèque du câble s'oppose aux actions de la masse et des flotteurs et le système se positionne naturellement dans un plan vertical. L'objectif étant de limiter l'impact du câble sur le ROV, qui effectue des mesures ou des manipulations, l'instrumentation est placée proche du ROV. En effet, en fonction de la longueur de câble, son comportement peut être très différent entre la zone à proximité de l'USV et celle à proximité du ROV.

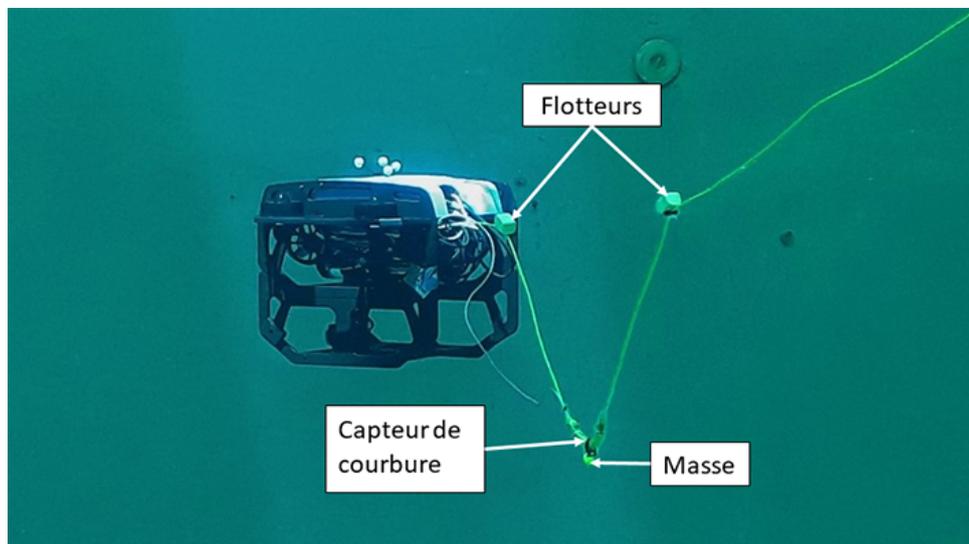


Figure III.10 – Système d'amortissement passif monté sur le câble

En vue du contrôle actif qui vient compléter la compliance passive, la déformation de cette zone du câble est mesurée par un capteur de courbure placé dans la partie basse de la forme en V (au niveau de la masse). En effet, c'est à ce niveau que la déformation du câble est la plus importante.

Les sections qui suivent présentent d'abord la conception et l'évaluation du système d'instrumentation du câble puis de l'enrouleur, indépendamment. Les modes de contrôle de l'enrouleur en fonction des données du système de compliance passive, formant un système complet, sont alors présentés dans le chapitre suivant.

III.3 Instrumentation du câble en vue de la détection de sa configuration et de son contrôle

III.3.1 Conception mécanique de l'instrumentation du câble

La dimension du système de compliance passive dépend des propriétés du câble, du capteur de déformation qui lui est associé et de la sensibilité souhaitée. Sa déformation maximale contraint aussi la réactivité minimale du contrôle du câble déroulé.

Le prototype conçu au cours de cette étude se base sur le câble *Fathom Slim* de Blue Robotics, dont les paramètres sont détaillés dans le tableau II.7. Il a une flottabilité neutre et une raideur assez faible.

Le capteur utilisé est un capteur de courbure de type résistif classiquement utilisé dans les applications haptiques pour mesurer les flexions des doigts. Il s'agit du FS-L-0095-103-ST fabriqué par *Spectra Symbol* (figure III.11). Ce capteur est très fin (moins de 0,5 mm), a une longueur de 11,24 cm et présente une résistance à la flexion négligeable.

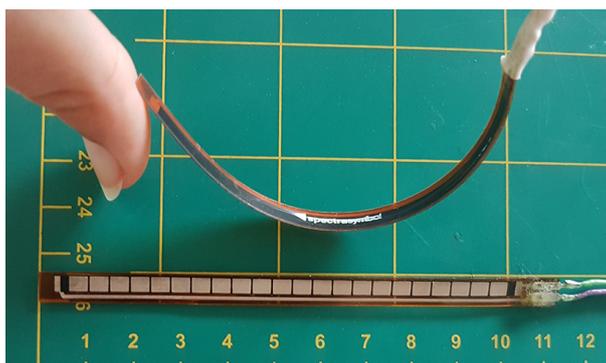


Figure III.11 – Photo du capteur de courbure utilisé (référence FS-L-0095-103-ST)

Afin d'obtenir une mesure qui reflète bien le niveau de tension du câble, on souhaite introduire une déformation du câble sans qu'il ne quitte le plan, en générant une forme de V et non de goutte d'eau (voir figure III.12), pour garantir un comportement monotone du capteur de courbure. On souhaite par ailleurs obtenir une compliance d'environ 1 m. Il a été observé sur le câble réel que pour une longueur d'environ 1 m, les deux extrémités peuvent être rapprochées de 20 cm avant d'atteindre la forme en goutte d'eau. En considérant cet écartement minimal d'une vingtaine de centimètres entre les deux flotteurs, et la compliance souhaitée de 1 m, les flotteurs sont fixés au câble à une distance de 1,2 m l'un de l'autre.

La masse a alors été dimensionnée à 47,5 g en simulation, sous Matlab Simulink, de sorte que la position d'équilibre avoisine une vingtaine de centimètres (figure III.13). Ainsi le système amorti prend une forme de V et non de goutte d'eau. Cette masse est fixée au milieu des deux flotteurs, dont le premier se situe à une vingtaine de centimètres du ROV.

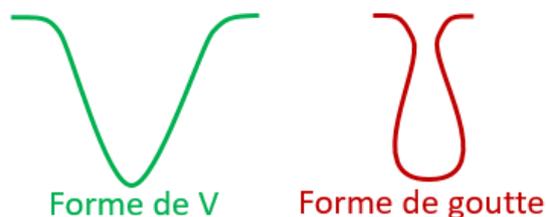


Figure III.12 – Illustration de la forme de V souhaitée (gauche) comparée à la forme en goutte d'eau à éviter (droite)

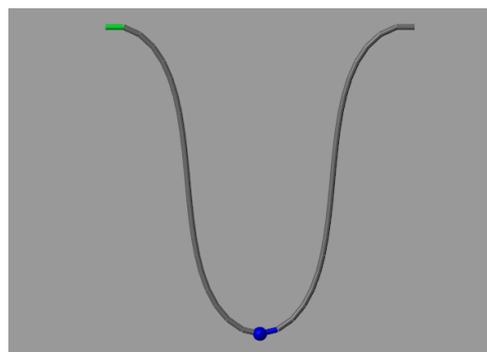


Figure III.13 – Simulation du système de compliance passive sous Matlab Simulink pour le dimensionnement de la masse. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/eb1qrultUcA>.)

Le système d'amortissement du câble doit être naturellement neutre dans l'eau afin de ne pas entraîner le ROV vers le fond ni vers la surface. La dimension des flotteurs est donc liée à la masse. Le système est conçu de façon symétrique avec deux flotteurs identiques. Plus la masse sera lourde, plus le système sera raide et reviendra rapidement à sa position d'équilibre. Cependant, l'augmentation de la masse implique l'augmentation du volume des flotteurs et donc de la traînée. Un compromis est donc nécessaire entre un système trop mou et un système ayant une traînée trop importante.

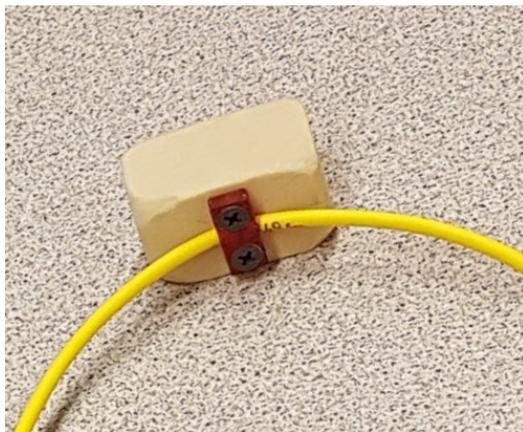
Après le dimensionnement de la masse, les flotteurs ont été dimensionnés selon les règles de neutralité de flottaison. Le tout étant dépendant de la raideur du câble et de ses paramètres de flottaison (densité, volume...). Il en découle une certaine réactivité qui intègre la raideur du système de compliance passive qui s'oppose à la raideur en flexion du câble. Les temps de réponse dépendent donc aussi des inerties et frottements qui complètent ce système masse, ressort (compliance réglée), amortisseur.

Pour se rapprocher de la valeur pré-dimensionnée pour la masse, un petit plomb de pêche de 50 g et d'environ 20 mm de diamètre a été utilisé. Les flotteurs ont été découpés dans de la mousse de flottabilité fournie par *Blue Robotics* avec le BR2. La pesée, qui correspond à la différence entre le poids et la poussée, a été estimée pour la masse, les pièces support et la visserie. Le volume souhaité des deux flotteurs a été déterminé afin d'obtenir une pesée totale proche de zéro (en eau douce à 1000 kg/m^3). Le pré-dimensionnement de la masse et des flotteurs est présenté dans le tableau III.1 (ces valeurs ont par la suite été adaptées à la marge lors des expériences). Les flotteurs ont alors été découpés sous forme de parallélépipèdes d'environ $2,9 \text{ cm} \times 2,9 \text{ cm} \times 4,7 \text{ cm}$ de côtés. Cette forme a été choisie pour sa facilité de découpe, mais une forme plus hydrodynamique serait préférable pour diminuer la traînée du système. L'ajustement du volume des flotteurs a été effectué en limant les angles, ce qui les rend plus hydrodynamiques.

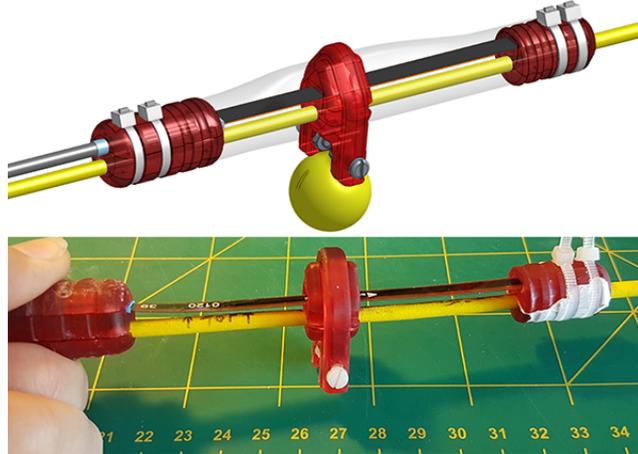
Chacun des deux flotteurs est fixé au câble par serrage d'une patte de fixation vissée aux flotteurs (figure III.14a). Le capteur de courbure est monté sur le câble au niveau de la masse. L'une de ses extrémités est fixée au câble du ROV par l'intermédiaire d'une pièce serrée autour du câble d'une part et du connecteur du capteur d'autre part (figure III.14b).

| Éléments | Volume (cm^3) | Masse (g) | Masse volumique (kg/m^3) | Poids (N) | Poussée (N) | Pesée (N) |
|-----------|-------------------|---------------|------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Masse | 4,43 | 50 | 11300 | $4,91 \cdot 10^{-1}$ | $4,34 \cdot 10^{-2}$ | $4,47 \cdot 10^{-1}$ |
| Flotteurs | 78 | 21,5 | 288 | $2,3 \cdot 10^{-1}$ | $7,65 \cdot 10^{-1}$ | $-5,45 \cdot 10^{-1}$ |
| Supports | 17 | 19,5 | 1150 | $1,91 \cdot 10^{-1}$ | $1,67 \cdot 10^{-1}$ | $2,55 \cdot 10^{-2}$ |
| Visserie | 0,765 | 6,14 | 8020 | $6,02 \cdot 10^{-2}$ | $7,51 \cdot 10^{-3}$ | $5,37 \cdot 10^{-2}$ |

Tableau III.1 – Estimation des paramètres des éléments pour la pesée du système amorti



(a) Photo d'un flotteur fixé au câble



(b) Dessus : Vue 3D du capteur de courbure et de la masse fixés au câble. Dessous : Photo du système en cours de montage.

Figure III.14 – Fixation du système amorti et du capteur au câble

Afin que le capteur se déforme avec le câble, l'autre extrémité du capteur est simplement guidée dans une autre pièce serrée autour du câble. Une seconde pièce guidant le capteur, tel un passant de ceinture, est fixée entre ses deux extrémités. Cette pièce centrale sert aussi de support à la masse. Ces pièces ont été fabriquées spécifiquement pour les besoins de l'expérience en prototypage rapide (impression 3D par Photopolymérisation UV LCD résine).

III.3.2 Acquisition numérique du capteur

Le capteur de courbure est associé à un conditionneur de type pont diviseur de tension. Celui-ci est schématisé sur la figure III.15, où V_{cc} correspond à la tension d'alimentation, R_0 à la résistance de charge, R_c à la résistance variable du capteur et V_m à la tension de mesure, définie par l'équation III.1.

$$V_m = \frac{R_0}{R_0 + R_c} \cdot V_{cc} \quad (\text{III.1})$$

La résistance de charge a été dimensionnée pour maximiser la plage de mesure comme présenté en annexe D.1. La plage de mesure obtenue est de 1,36 V, avec une résistance de

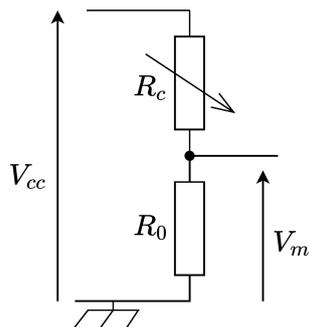


Figure III.15 – Schéma du pont diviseur de tension pour la mesure du capteur de courbure

charge de 22 kΩ.

Étant donné que le BR2 utilisé dans cette étude est contrôlé via Robot Operating System (ROS), installé sur une carte Raspberry Pi, l'acquisition du capteur a aussi été implémentée sous ROS.

L'acquisition bas niveau du capteur se fait via une carte Arduino qui alimente le capteur en 5 V et récupère la tension mesurée aux bornes de la résistance de charge sur une entrée analogique (voir schéma de montage figure III.16). Cette entrée est reliée à un convertisseur analogique/numérique ayant une résolution de 10 bits qui renvoie une valeur numérique comprise entre 0 (pour 0 V) et 1023 (pour 5 V). Le pas de quantification (plus petit écart de tension entre deux valeurs du signal numérisé) est alors de $\frac{5}{1023} \approx 4,9 \text{ mV}$. Il est à noter que la fréquence d'acquisition a aussi une influence sur la précision des mesures.

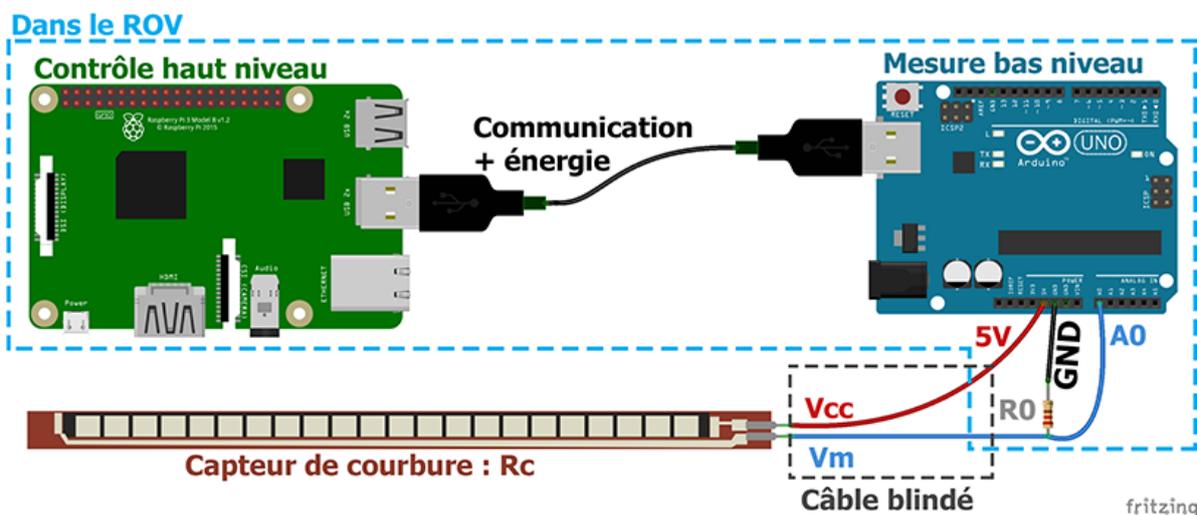


Figure III.16 – Implantation électronique du capteur de courbure

L'acquisition de la mesure s'effectue à une fréquence de 250 Hz. La valeur est alors filtrée à l'aide d'un filtre passe-bas de type Butterworth, d'ordre 2 et de fréquence de coupure 2 Hz. Ce filtre, dont l'effet est illustré sur la figure III.17, lisse les pics non désirés du signal et entraîne un faible déphasage d'environ 120 ms. La valeur de la résistance du capteur de courbure ainsi que sa dérivée et la valeur analogique brute sont ensuite publiées

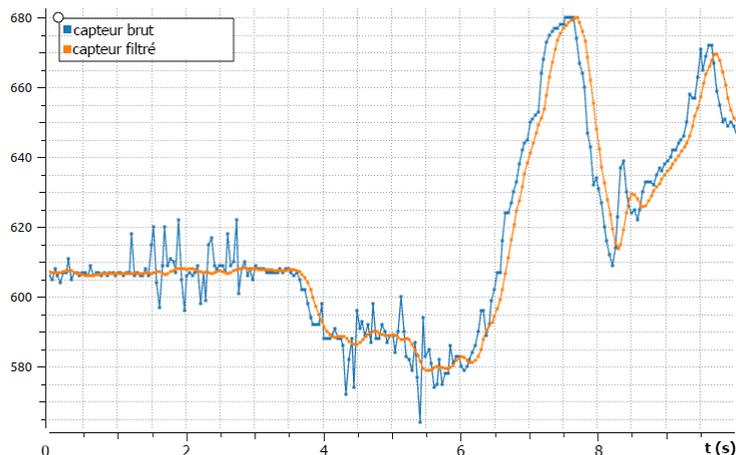


Figure III.17 – Effet du filtre sur le signal analogique brut du capteur de courbure lorsque celui-ci est statique puis déformé

en tant que messages ROS à une fréquence de 25 Hz. Une fréquence de publication trop élevée a tendance à saturer l'*Arduino* et donc à diminuer la qualité des calculs pour le filtre et la dérivée. Le programme d'acquisition bas niveau du capteur de courbure est disponible en annexe D.2 et schématisé sur la figure III.18. L'allure de trois signaux (analogique brut, résistance filtrée et sa dérivée) sont aussi visibles sur cette figure.

Un nœud ROS récupère ces données capteur afin de les traiter et de les intégrer au contrôle du système. Celui-ci se base sur le lien entre la valeur du capteur de courbure et la configuration du système. Il est donc nécessaire de caractériser ce lien.

Caractérisation du capteur de courbure

La caractérisation du capteur de courbure a été effectuée dans l'eau en mesurant sa valeur pour différents écartements des flotteurs avec le système monté sur le câble. Les points de mesure obtenus lors de deux essais consécutifs d'écartement progressif des flotteurs sont visibles sur la figure III.19. Le capteur présente l'avantage d'avoir un comportement monotone. Par ailleurs, la mesure est instantanée, ne présente ni hystérésis significatif, ni déphasage.

La résistance du capteur de courbure étant directement liée à sa courbure et donc à la distance entre les flotteurs lorsque le capteur est monté sur le câble, il a été choisi d'établir le modèle inverse du capteur en exprimant directement cette distance en fonction de la résistance du capteur. La résistance du capteur ne dépendant pas de sa tension d'alimentation ni de la résistance de charge utilisée, le modèle obtenu est invariable par rapport à ces deux paramètres. Lors des expériences, la mesure de la valeur du capteur est initialisée à un écartement donné afin de s'affranchir des éventuels déphasages, dus par exemple à la température.

La courbe de la figure III.20 présente le modèle de la distance entre les flotteurs en fonction de la résistance centrée sur la valeur initiale du capteur de courbure et son modèle polynomial d'ordre 3. Ce modèle a une exactitude satisfaisante de plus de 98 %. Il a été utilisé dans un programme ROS, disponible en annexe D.3, afin de déterminer la distance

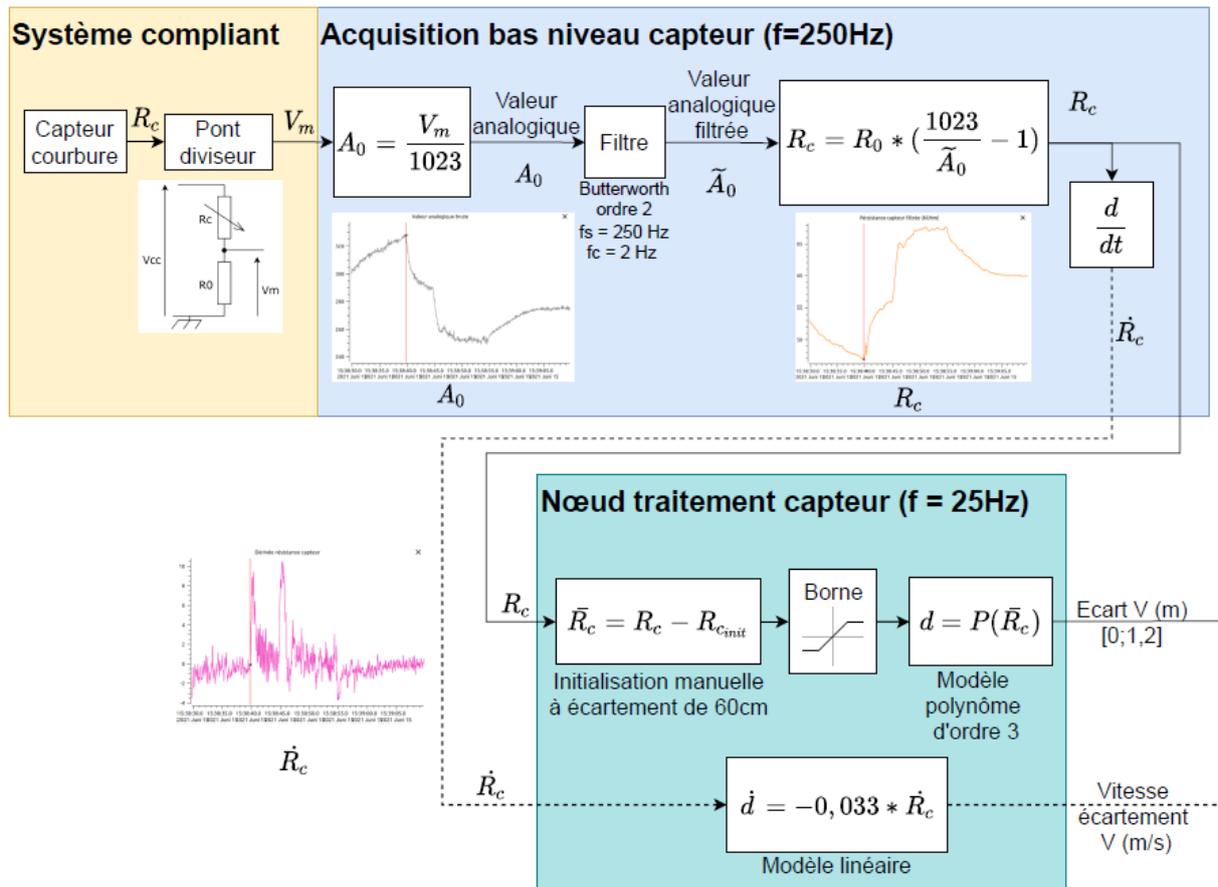


Figure III.18 – Schéma de l'acquisition du capteur de courbure

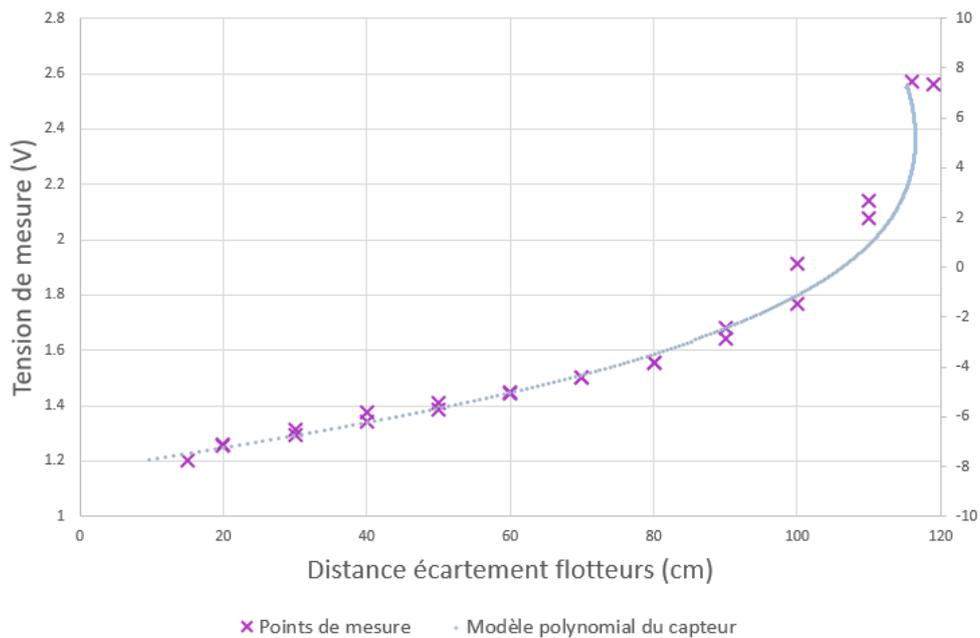


Figure III.19 – Caractéristique du capteur de courbure en fonction de la distance d'écartement des flotteurs

entre les flotteurs en fonction des données capteur lors des expérimentations. Bien que ce modèle ne soit pas monotone au niveau des grandes distances (ce qui aurait été le cas avec une approximation polynomiale d'ordre 4), il est satisfaisant pour l'usage qui en est fait. En effet, le rôle du capteur de courbure est de fournir une image de l'évolution de l'effort entre le câble et le ROV de sorte à contrôler la distribution du câble autour de la longueur semi-tendue. Le système de contrôle étant donc développé pour éviter la zone tendue, le changement de monotonie dans cette zone ne devrait pas impacter le contrôle du système.

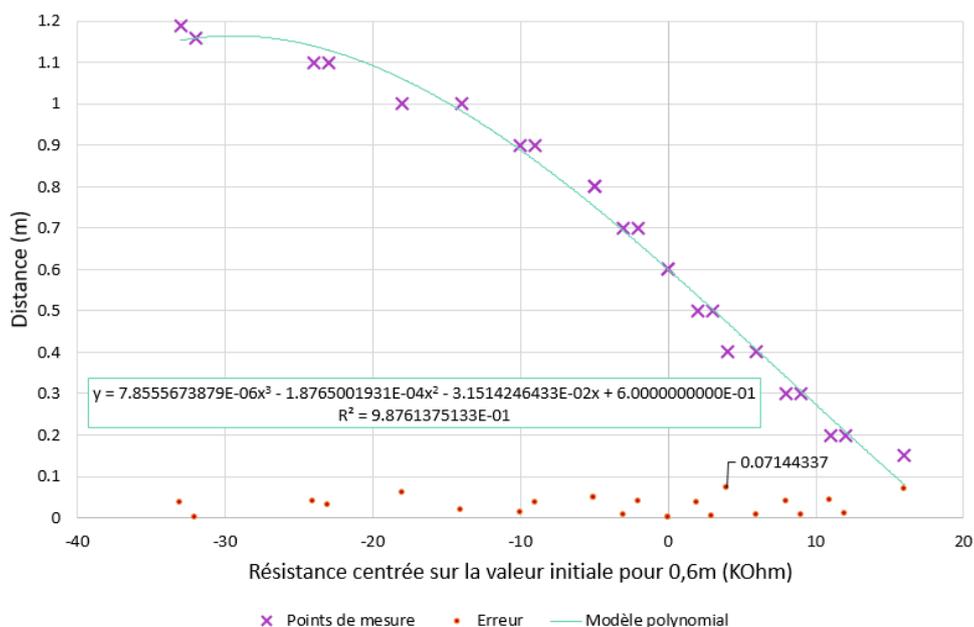


Figure III.20 – Modèle de la distance entre les flotteurs en fonction de la résistance du capteur de courbure

On relève une erreur moyenne de 3 cm et maximale de 7 cm (pour une distance de 40 cm) entre ce modèle et les points de mesures. Ces erreurs sont indiquées sur la figure III.20. L'incertitude de mesure de distance liée à la quantification de l'entrée analogique dépend de la résistance de charge R_0 (voir détails en annexe D.1). Elle est visible sur la figure III.19 où les points de la courbe du modèle correspondent à la discrétisation de la mesure en tension. On observe que les points sont plus denses lorsque la distance entre les flotteurs est élevée, ce qui correspond à une sensibilité de mesure accrue. En effet, l'erreur de quantification décroît avec la distance et atteint une valeur nulle pour une distance de 1,17 m, au point où le modèle a une tangente, horizontale sur la figure III.20 et verticale sur la figure III.19. Elle est maximale (5,6 mm) à la borne inférieure de la plage de mesure des distances. Ces valeurs garantissent une estimation de l'écart entre les flotteurs satisfaisante pour le contrôle du système.

Gestion des interférences sur le capteur

Le capteur de courbure utilisé n'étant pas prévu pour des utilisations en robotique sous-marine, des problèmes d'interférences ont été rencontrés.

D'une part, lors des premiers essais, il a été constaté que l'étendue du signal de sortie était nettement plus faible quand le capteur est utilisé dans l'eau que dans l'air. En effet, la plage de variation du capteur dans l'air est d'environ 45 k Ω pour 5 k Ω dans l'eau et 2 k Ω dans l'eau salée. Cette différence s'explique simplement par le fait que les deux bornes de la résistance variable sont très proches l'une de l'autre (comme on peut le voir en bas à droite de la figure III.11) et que l'eau est un élément conducteur, ce qui diminue de façon importante la résistance entre les deux bornes. A l'inverse, aucune différence visible n'a été observée sur la résistance en fonction de la température du capteur.

D'autre part, des perturbations ont été observées lorsque les propulseurs du BR2 étaient actionnés alors que tout le système était dans l'eau, rendant les mesures du capteur inexploitable.

Ces deux problèmes ont été réglés d'une part en utilisant un câble blindé pour le capteur de courbure et d'autre part en isolant le capteur de l'eau grâce à une poche en latex. Cette matière présente l'avantage d'être souple (pour ne pas empêcher la courbure du câble et du capteur) et résistante, en plus d'être étanche.

La figure III.21 illustre le comportement du capteur de courbure avec et sans isolant et câble blindé, pour différents niveaux d'utilisation des propulseurs. L'axe des abscisses correspond au temps, chacun des trois graphiques représentant une période de 10 s. L'axe des ordonnées correspond à la valeur analogique brute du capteur sur sa plage complète de mesure (entre 0 et 1023). Seul le bruit de mesure et non les niveaux moyens sont à comparer entre les différentes courbes. Lorsque les propulseurs sont à l'arrêt (graphique de gauche), le capteur est légèrement plus bruité sans isolant ni blindage qu'avec isolant. Lorsque les propulseurs ont une puissance assez faible (graphique du centre), correspondant au mode de stabilisation du BR2, le capteur est assez bruité en l'absence de câble blindé. Lorsque la puissance des propulseurs est plus importante (graphique de droite), correspondant à des consignes de déplacement envoyées régulièrement au BR2, le capteur non isolé et non blindé est très bruité avec des mesures allant jusqu'à la saturation de l'entrée analogique. Avec l'isolant, le bruit reste très important bien que ne saturant pas l'entrée analogique. Avec le blindage en complément de l'isolant, le bruit devient totalement négligeable. Pour ce dernier graphique, il est à noter qu'il est normal que la valeur du capteur varie au cours du temps étant donné que le ROV se déplace, entraînant son câble en modifiant sa courbure.

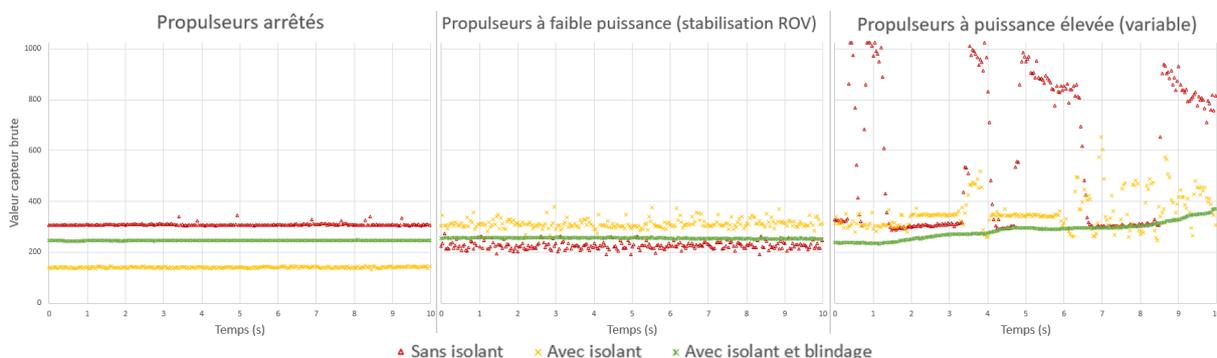


Figure III.21 – Mise en évidence des interférences sur les mesures du capteur de courbure

III.3.3 Étude du comportement du système amorti

La dynamique du système de compliance passive a été étudiée afin de valider son intérêt et de dimensionner l'enrouleur et son contrôleur. Son comportement passif a d'abord été étudié en simulation sous Vortex®, en se basant sur les paramètres du câble du Tortuga. Les détails de la simulation sont disponibles en section V.3.1. Le capteur de courbure n'a pas été simulé, la distance entre les deux flotteurs étant disponible directement en simulation. Il est aussi à noter que ces simulations ont été effectuées avec un asservissement en vitesse du ROV. La consigne en vitesse est donc généralement atteinte malgré la présence de perturbations. Ce n'est pas le cas pour le BR2, qui est piloté en boucle ouverte.

Influence de la profondeur

Dans un premier temps, l'écart et la vitesse d'écartement des flotteurs sont étudiés lorsque le ROV avance avec une vitesse constante, pour différentes profondeurs. Dans cette simulation, le ROV se situe initialement à 4 m de l'USV dans le plan horizontal et à des profondeurs variables de 0,5 m à 3 m. Une longueur de 10 m de câble est d'abord déroulée, puis, à 11 s, le BR2 commence à avancer avec une vitesse consigne de 0,6 m/s pendant 4 s. La vitesse consigne est atteinte en 0,3 s. La marge de câble (écart entre la longueur de câble déroulée et la distance entre le ROV et l'USV) est d'au moins 3 m tout au long de la simulation. On s'intéresse au comportement du système à partir de 10 s, lorsqu'il est stable après le déroulement du câble et avant le déplacement du ROV.

On constate sur les courbes de la figure III.22 que l'influence de la profondeur sur le comportement du système amorti est négligeable pour les faibles profondeurs.

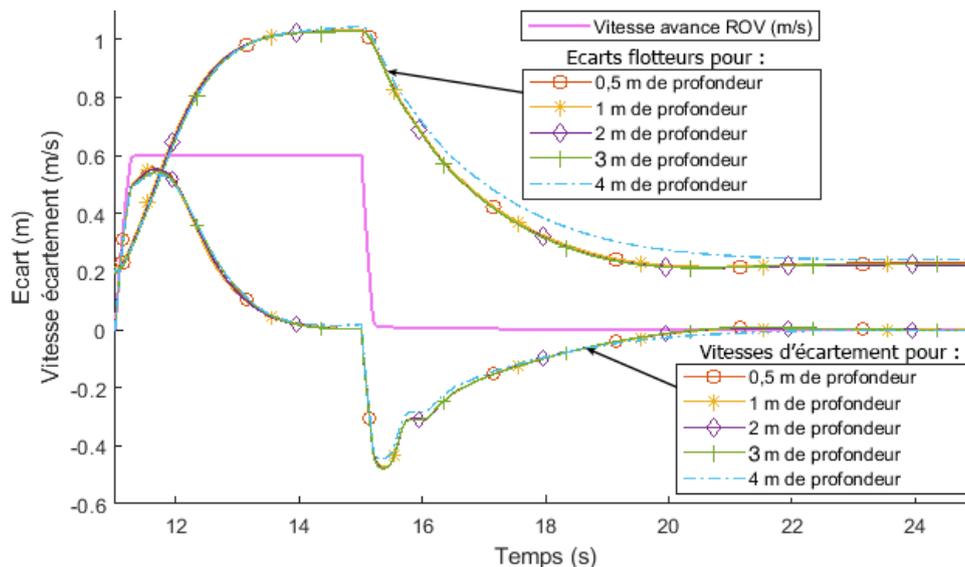


Figure III.22 – Écartement et vitesse d'écartement des flotteurs lorsque le ROV avance à une vitesse constante à différentes profondeurs

A partir de ces courbes, on constate par ailleurs que le système reprend sa position d'équilibre en 5,5 s après l'arrêt du ROV, son temps de réponse à 5 % est de 3,8 s (ces ordres

de grandeur sont retrouvés lors des expériences présentées en section V.2.2). Le système de compliance passive se comporte donc bien comme un amortisseur. Cette dynamique fortement amortie confirme que l'impact du retard de 120 ms du capteur de courbure (dû à son filtrage) est négligeable et que la fréquence d'interprétation des données à 25 Hz est satisfaisante. L'enrouleur devra présenter un temps de réponse plus faible que celui-ci. Malgré cette dynamique amortie, le changement de vitesse du ROV a un effet visible presque immédiat sur l'écart entre les flotteurs. Ceci confirme l'intérêt de l'utilisation de ce paramètre pour le contrôle de la distribution automatique du câble.

Influence de la masse

La même simulation a été reproduite avec une masse de 100 g au lieu de 50 g. L'écart entre les flotteurs ainsi que leur vitesse d'écartement sont tracés sur le figure III.23. On constate que l'augmentation de la masse réduit l'écart entre les flotteurs à la fois en statique et en dynamique. L'écart à l'équilibre est alors de 0,14 m pour une masse de 100 g (contre 0,22 m pour 50 g) et de 0,9 m lorsque le BR2 avance à une vitesse de 0,6 m/s (contre 1,02 m pour 50 g). La vitesse d'écartement est aussi légèrement plus faible et la vitesse de rapprochement légèrement plus élevée lorsque la masse est plus lourde. Ceci confirme le fait que l'augmentation de la masse augmente la raideur du système de compliance passive.

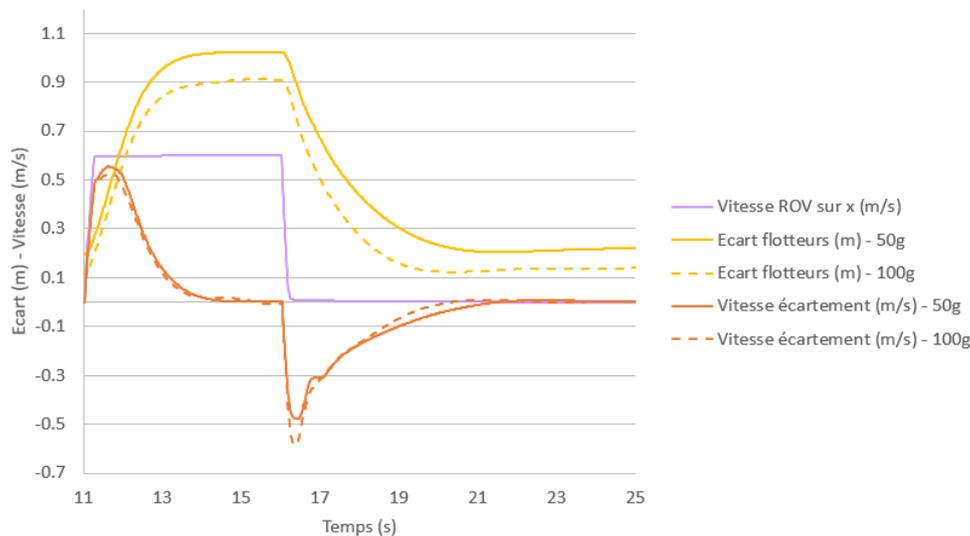


Figure III.23 – Comportement du système de compliance passive pour différentes masses

Influence de la vitesse du ROV

On observe ensuite le comportement du système amorti en fonction de la vitesse consigne du ROV. Dans cette simulation, le ROV se situe initialement à 4 m de l'USV dans le plan horizontal et à une profondeur de 0,5 m. Une longueur de 10 m de câble est d'abord déroulé puis, à 10 s, le BR2 commence à avancer avec une vitesse suivant l'axe \vec{X} , pendant 10 s, mais la fin de son mouvement est entravée par une longueur trop courte

de câble. La simulation a été répétée pour différentes consignes de vitesse (0,3 m/s, 0,6 m/s et 0,8 m/s).

Les courbes d'écart et de vitesse d'écartement entre les flotteurs sont visibles sur la figure III.24. La longueur de câble étant la même pour les trois simulations, le câble devient trop tendu plus tôt lorsque le ROV est plus rapide. Au repos, avec une grande marge de câble, l'écartement des flotteurs est d'environ 0,22 m. Cet écartement est respectivement de 0,8 m, 1,06 m et 1,12 m pour les trois vitesses de croisière du ROV et atteint son maximum, 1,2 m lorsque le câble est totalement tendu. On constate que l'écartement est assez proche de son maximum lorsque le ROV avance à une vitesse de 0,8 m/s. Il faudra donc éviter de dépasser cette vitesse pour un comportement optimal du système. La vitesse d'écartement quant à elle présente un pic important à la fois lorsque le BR2 commence son avancée et lorsque le câble devient tendu. Celle-ci constitue donc aussi un paramètre pertinent pour le contrôle du câble.

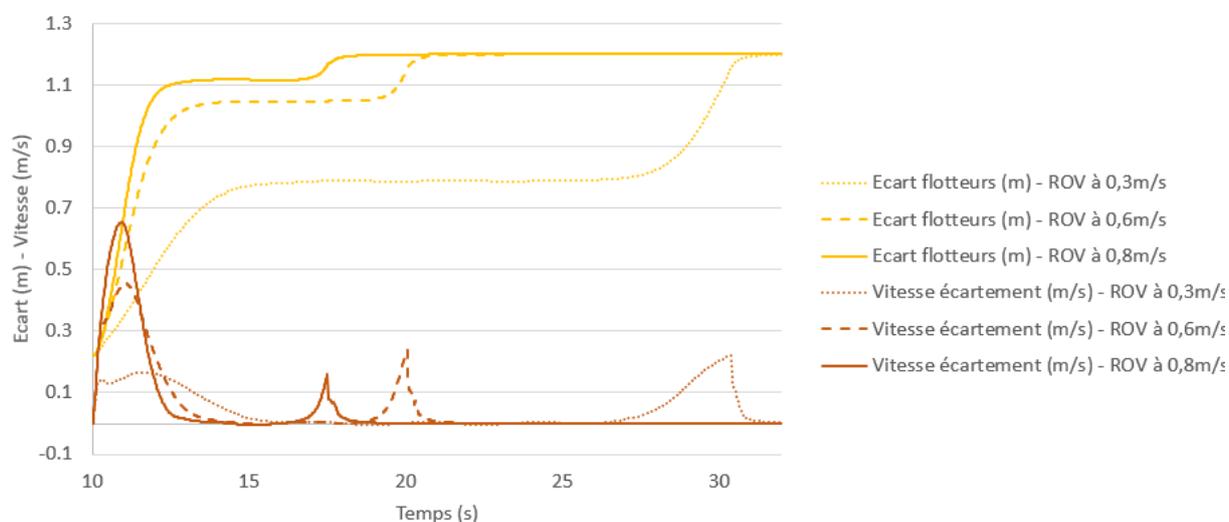


Figure III.24 – Étude de la distance entre les flotteurs et de leur vitesse d'écartement en fonction de la vitesse consigne du ROV

La relation entre la vitesse d'avancée du ROV et l'écartement des flotteurs lorsqu'il se situe à une profondeur de 0,5 m est illustrée sur la figure III.25. Cette caractéristique pourra être utilisée pour adapter le contrôle du câble en fonction de la vitesse du ROV.

Evaluation de l'impact sur le ROV

L'impact sur le ROV du système de compliance passive est alors comparé à celui d'un câble sans système amorti et représenté sur les courbes des figures III.26, III.27 et III.28. Ces courbes ont été obtenues avec la même simulation Vortex® que précédemment, pour laquelle le ROV se situe initialement à 4 m de l'USV et à une profondeur de 0,5 m. Une longueur de 10 m de câble est d'abord déroulée puis, à 10 s, le BR2 commence à avancer avec une vitesse consigne de 0,8 m/s pendant 10 s, mais la fin de son mouvement est entravée par une longueur trop courte de câble. A cet instant, les propulseurs continuent de pousser le ROV vers l'avant mais le câble l'en empêche, ce qui induit un déplacement du ROV suivant les axes \vec{Y} et \vec{Z} , que le contrôleur du ROV tente alors de corriger. C'est

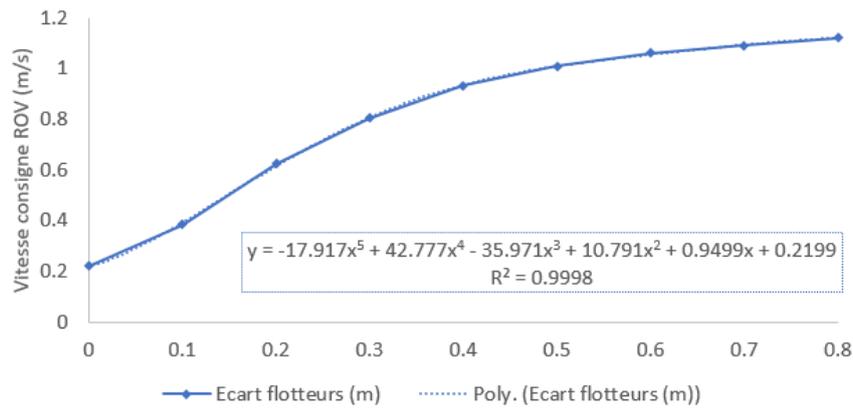


Figure III.25 – Écart entre les flotteurs en fonction de la vitesse consigne du ROV

pourquoi, on voit sur la figure III.26 entre 18s et 20s que la vitesse suivant \vec{X} s'annule et que les vitesses suivant \vec{Y} et \vec{Z} augmentent puis diminuent. On étudie uniquement la période de 10s où le ROV a une consigne de vitesse.

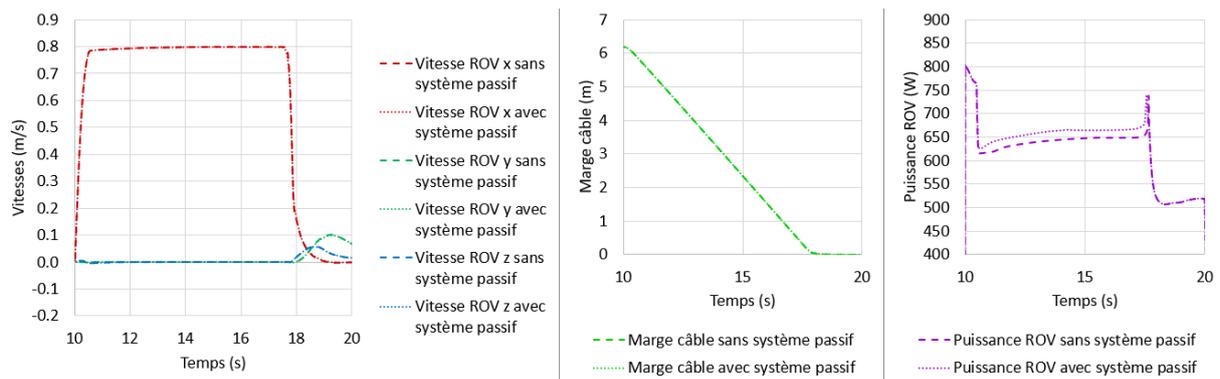


Figure III.26 – Comparaison de l'impact du câble sur la vitesse et la puissance du ROV sans ou avec système amorti non contrôlé

On constate d'abord que la vitesse du ROV n'est pas impactée par le système amorti, étant donné qu'en simulation le ROV est asservi en vitesse (figure III.26). Les mouvements du ROV sont donc les mêmes lors des deux simulations (avec et sans système amorti). De ce fait, la marge (écart entre la longueur de câble déroulée et la distance entre le ROV et l'USV) de câble est identique dans les deux simulations. La puissance totale des propulseurs du ROV est globalement supérieure de 2% avec le système amorti.

La valeur absolue de la force (figure III.27) est en moyenne supérieure de 19% suivant l'axe \vec{X} , de 15% suivant l'axe \vec{Y} et de 18% suivant l'axe \vec{Z} avec le système amorti. Lorsque le câble commence à se tendre, l'impact sur la force est observé plus rapidement avec le système amorti mais il est aussi plus lissé que sans le système. Concernant les couples appliqués par le câble sur le ROV, celui suivant l'axe \vec{X} est globalement nul dans les deux configurations, celui suivant l'axe \vec{Y} est globalement plus faible de 3% en valeur absolue avec le système amorti et est aussi lissé, et celui suivant l'axe \vec{Z} est globalement plus élevé de 16% en valeur absolue avec le système amorti, en revanche, son pic est plus faible de 0,06 N avec le système amorti.

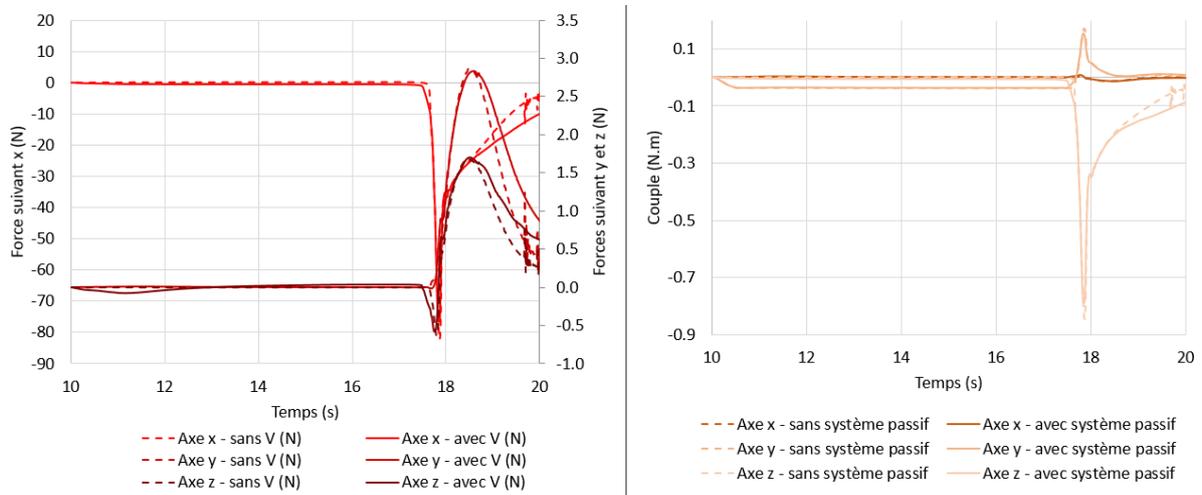


Figure III.27 – Comparaison des efforts transmis par le câble au ROV sans ou avec système amorti non contrôlé

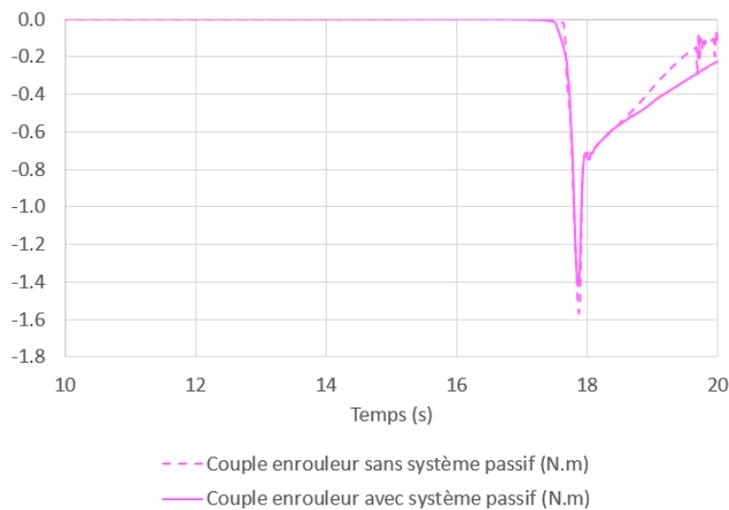


Figure III.28 – Comparaison du couple transmis à l'enrouleur sans ou avec système amorti non contrôlé

Enfin, avec le système amorti, le couple au niveau de l'enrouleur est globalement plus grand de 11 % en valeur absolue, il réagit plus tôt, est lissé et a un pic inférieur de 10 % par rapport au câble simple (figure III.28).

En résumé, on constate que le système de compliance passive apporte une tension dans le câble légèrement supérieure tout au long du mouvement du ROV par rapport à un câble simple non contrôlé (avec une longueur suffisante). Cependant, les changements de tension sont moins brutaux, facilitant le contrôle du câble, qui est par ailleurs rendu possible par la mesure de sa configuration par mesure de déformation du système de compliance passive. Des résultats expérimentaux détaillés sur l'évaluation de cette solution sont présentés dans le chapitre V.

III.4 Conception d'un système de contrôle de longueur de câble

Cette section détaille la conception du système de contrôle du câble dont le cahier des charges est récapitulé dans le tableau III.2. L'objectif principal de l'enrouleur est de faire en sorte que le câble gêne le moins possible le ROV dans ses mouvements. Pour cela, l'enrouleur doit être capable de délivrer du câble à une vitesse au moins égale à la vitesse d'éloignement du ROV. Ce dernier a une vitesse d'avancée maximale de 1,5 m/s (BlueRobotics 2019a). En général, pour des raisons de stabilité, le ROV est piloté à des vitesses bien inférieures à celle-ci. On considère donc que l'enrouleur n'aura pas besoin de dérouler du câble plus rapidement qu'à cette vitesse.

Si l'utilisateur perd le contrôle du ROV lors d'une mission, il est nécessaire de pouvoir le ramener vers l'USV à l'aide de l'enrouleur. Au contraire, si l'enrouleur ne fonctionne pas correctement, il peut être intéressant que le ROV soit capable de contrer sa force. Sa force maximale ne doit donc pas être trop importante lorsqu'il est contrôlé et sa résistance doit être négligeable lorsqu'il n'est pas contrôlé. D'après les données du BR2 (BlueRobotics 2019a), et en particulier sa vitesse maximale et la force maximale de ses propulseurs (BlueRobotics 2019b), on déduit que sa force maximale est d'environ 100 N et que la force nécessaire pour le traîner dans l'eau à une vitesse de 0,5 m/s est d'environ 11 N. On souhaite donc que l'enrouleur ait une force maximale comprise entre ces deux valeurs.

Afin de contrôler au mieux le système global et de ne pas perturber l'acquisition du capteur de courbure, l'enrouleur doit avoir un comportement assez souple. Pour cela, il doit aussi être facilement contrôlable à faible vitesse.

Toujours dans l'optique de ne pas gêner le ROV dans ses déplacements, et en particulier de ne pas l'encombrer, il est préférable d'intégrer l'enrouleur à l'USV et non au ROV.

| Fonctions | Critères | Niveaux |
|---------------------------------------|---|--|
| Délivrer du câble | Vitesse minimale Vitesse maximale Force minimale Force maximale Stabilité Rapidité | 0,1 m/s \pm 0,1 m/s 1,5 m/s \pm 0,2 m/s > 11 N < 100 N Dépassement < 10 % $t_{r5\%} < 1$ s |
| Mesurer la longueur de câble délivrée | Précision Exactitude Dérive Rapidité | \pm 1 cm \pm 5 cm \pm 1 cm/h Retard < 0,5 s |
| Limiter l'impact sur le ROV | Encombrement minimal | |
| Etre ergonomique | Montage et démontage facile du câble | |

Tableau III.2 – Cahier des charges du système de contrôle du câble

A des fins de contrôle, le calcul de la longueur du câble déroulé doit s'effectuer sans dérive tout en considérant que le câble sera mouillé et donc plus glissant. L'enrouleur devra aussi s'installer et se désinstaller facilement du câble sans avoir à retirer les connecteurs aux extrémités de ce dernier.

Afin de valider expérimentalement les stratégies de contrôle de câble, un prototype d'enrouleur qui répond aux besoins décrits ci-dessus a été conçu et fabriqué (figure III.29). Celui-ci peut être contrôlé en longueur ou en vitesse. Son asservissement bas niveau est programmé sur une carte Arduino, qui est connectée à l'ordinateur. Cet enrouleur est interfacé avec le reste du système grâce à ROS, qui gère l'envoi des commandes à l'enrouleur via l'ordinateur. Cette version prototype a été conçue pour être fixée au bord d'un bassin et sera, à terme, intégrée à un USV.

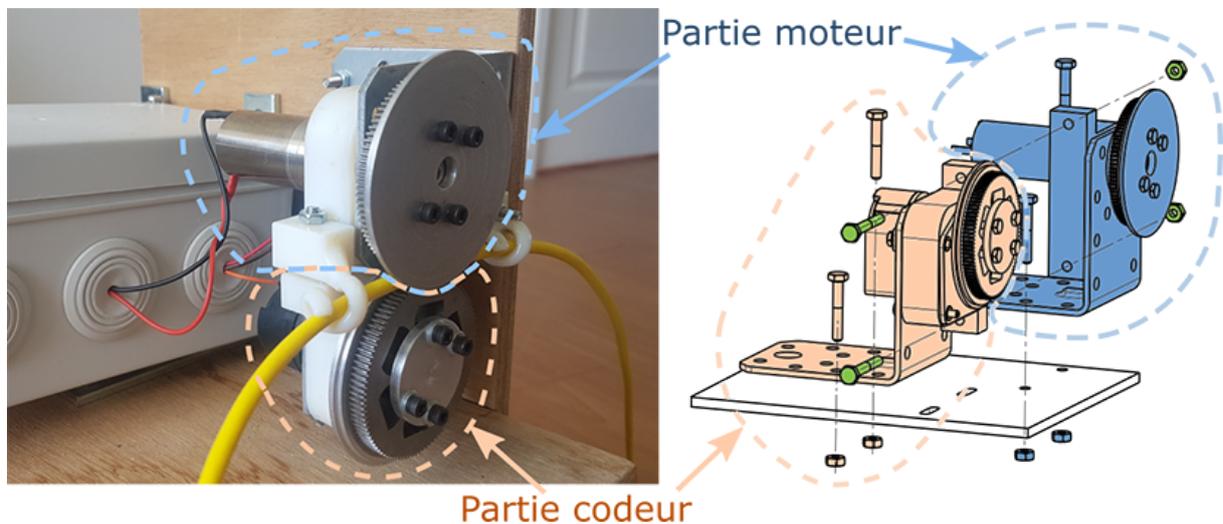


Figure III.29 – Vue globale de l'enrouleur décomposé en une partie moteur et une partie codeur

III.4.1 Conception et dimensionnement de l'enrouleur

Le câble est enroulé et déroulé par entraînement entre deux roues. L'une des deux roues est motorisée et l'autre est entraînée par frottement avec le câble et est instrumentée avec un codeur incrémental. L'entraxe entre les deux roues est réglable manuellement pour s'adapter à différentes sections de câbles. Des guides pour le câble ont été ajoutés à la sortie et à l'entrée des roues afin d'éviter que le câble n'arrive de travers et se coince. Cet ensemble est composé de pièces fabriquées par enlèvement de matière, de pièces en prototypage rapide (ABS) et de composants sur étagère. Le tout est monté sur un support en bois facile à fixer au bord d'un bassin. D'autres vues de l'enrouleur sont disponibles en annexe E.

La partie codeur est composée d'une roue folle guidée en rotation par une boîte à roulements et fixée à un codeur incrémental (figure E.1). La roue folle est constituée d'un arbre codeur, d'un pignon denté et d'un flasque. Le pignon denté, disponible sur étagère, garantit une bonne adhérence sur le câble sans nécessiter de trop le serrer entre la roue folle et la roue motrice. Il a un diamètre extérieur de 51,7 mm. Le flasque et l'arbre codeur ont été usinés à façon. La boîte à roulements a été fabriquée en prototypage rapide.

La roue menante est motorisée par un moteur à courant continu 12 V, modèle Maxon DCX22S-GB-KL-12V avec un réducteur intégré GPX22-A-21:1. En théorie, ce moto-réducteur a une vitesse maximale à vide d'environ 590 tours/min et un couple maximal de 0,9 N m. Ce qui correspond, avec les roues utilisées qui ont un diamètre de 51,7 mm, à une vitesse linéaire maximale de 1,6 m/s et à une force maximale de 35 N. En particulier, il est capable de fonctionner en continu avec une vitesse de 185 tours/min et un couple de 0,29 N m qui correspondent à une vitesse de câble de 0,5 m/s avec une force de 11,25 N. En pratique, nous avons constaté une vitesse de déroulement maximale du câble de 1,4 m/s (câble dans l'air, non accroché au ROV). Ces caractéristiques correspondent bien aux valeurs de vitesse et de force souhaitées.

La vitesse de rotation du moteur est contrôlée par une carte de puissance moteur de type EM-174DC 12/24Vdc 8A. Cette carte permet de moduler sa tension d'alimentation, à partir d'un signal de consigne en vitesse et de sens de rotation, avec une bonne linéarité. Elle permet aussi de limiter le courant de sortie afin de protéger le moteur.

La carte de contrôle doit être alimentée en 12 V afin de fournir une tension au moteur entre 0 V et 12 V. L'alimentation est assurée par une batterie de type Lipo 3S 11,1 V qui fournit une tension, en fonction de son taux de charge, variant entre 11,7 V (60 %) et 12,6 V (100 %).

Le codeur incrémental monté sur la roue folle, de type HEDS-5640-A06, offre une résolution de 500 points par tour, ce qui correspond à une résolution linéaire de câble d'environ 0,3 mm.

L'ensemble du système est contrôlé depuis une carte Arduino Leonardo qui alimente le codeur en 5 V, fait l'acquisition de ses données sur deux entrées digitales, envoie les consignes à la carte de contrôle moteur à l'aide d'un signal Pulse Width Modulation (PWM) et d'un signal digital pour le sens de rotation. Le signal de PWM a une valeur numérique comprise entre 0 et 255 qui représente une valeur analogique comprise entre 0 et 5 V. La carte Arduino se connecte directement à l'ordinateur de contrôle par USB et communique par l'intermédiaire de ROS. L'implantation électronique de l'enrouleur est illustrée sur le schéma figure III.30 et résumée sur les graphiques de la figure III.33.

III.4.2 Architecture et algorithme de contrôle de l'enrouleur

Le contrôle bas niveau de l'enrouleur s'effectue sur la carte Arduino. Celui-ci est constitué d'un asservissement en vitesse avec un correcteur de type PI et, en option, d'une boucle d'asservissement en longueur avec un correcteur proportionnel qui englobe la boucle d'asservissement en vitesse. Le schéma bloc de l'enrouleur est décrit sur la figure III.31.

L'entrée est soit une longueur de câble consigne, soit directement une vitesse consigne. Le bloc d'asservissement en longueur est employé uniquement dans le premier cas. Celui-ci consiste en un simple correcteur proportionnel appliqué à l'erreur entre la longueur consigne et la longueur actuelle et détermine la vitesse consigne. La longueur de câble est calculée dans la boucle d'asservissement en vitesse afin d'être toujours accessible, même lorsque le contrôle en longueur est désactivé.

La vitesse consigne, qu'elle vienne directement de l'entrée du programme ou qu'elle soit issue de l'asservissement en longueur, est d'abord bornée dans le bloc d'asservissement en

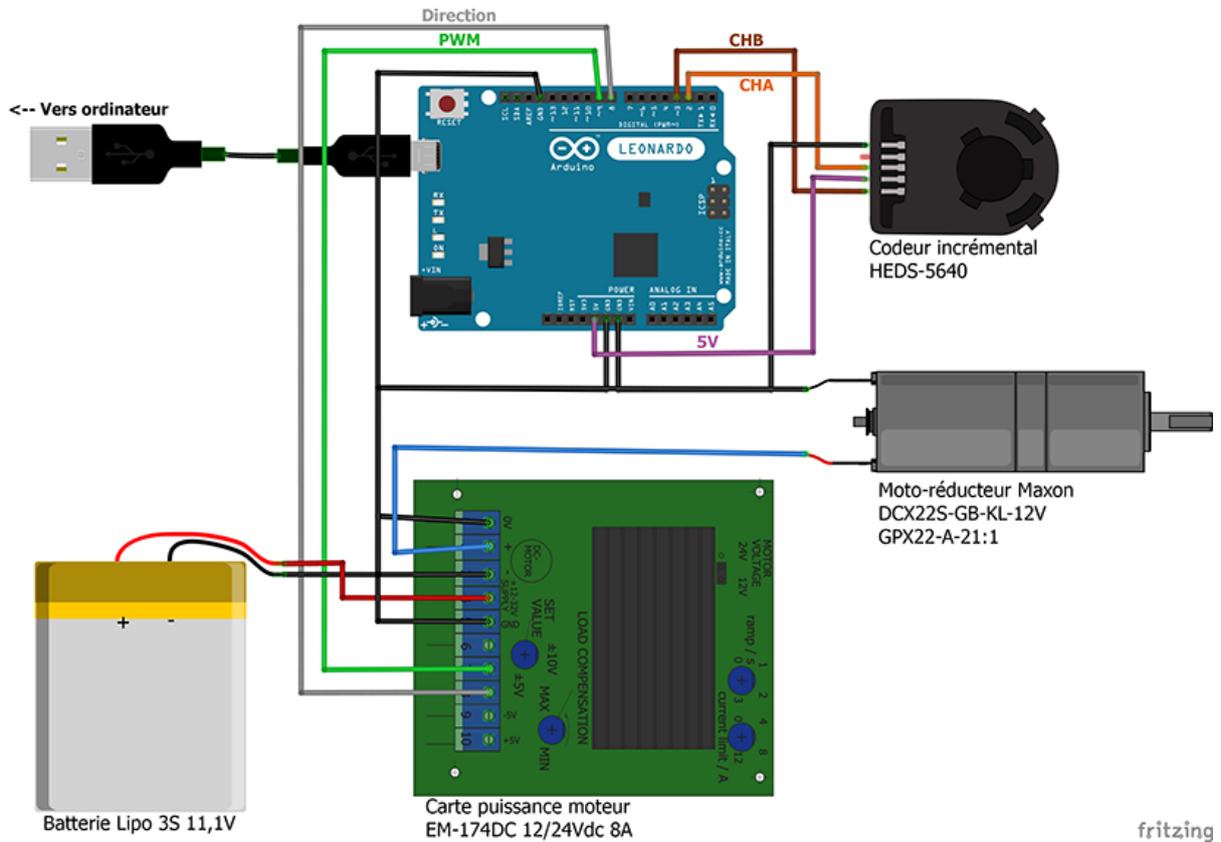


Figure III.30 – Implantation électronique de l'enrouleur

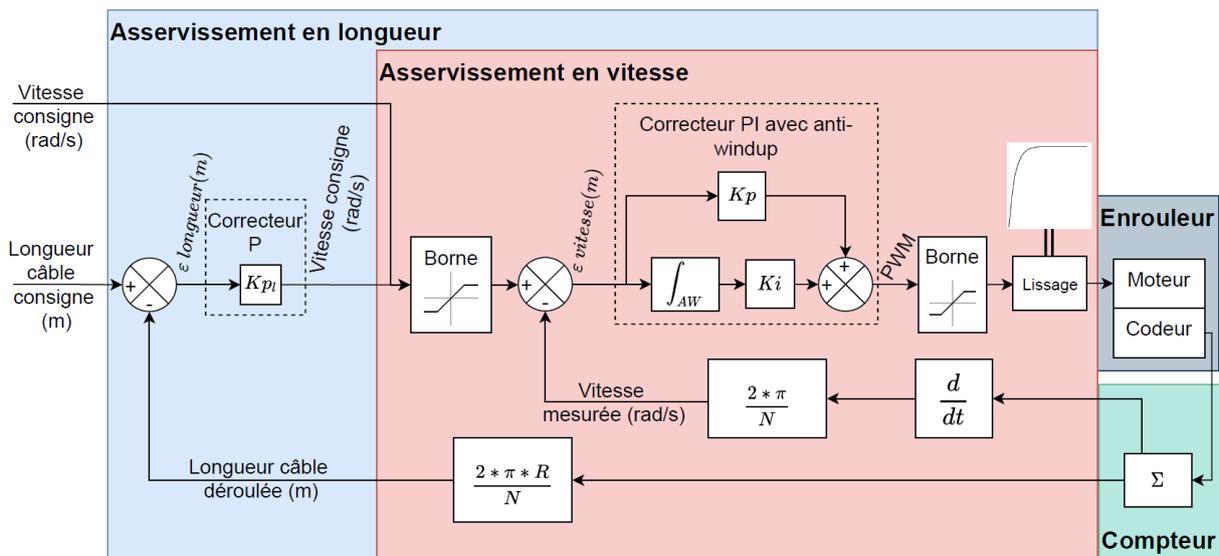


Figure III.31 – Schéma bloc de l'enrouleur

vitesse pour ne pas dépasser les limites du moteur. Un correcteur PI est appliqué à l'erreur entre la vitesse consigne bornée et la vitesse mesurée. Celui-ci a un système *anti-windup* qui limite la somme des erreurs passées afin de stabiliser le système. Ce correcteur détermine le signal de PWM brut. Ce dernier est borné entre -255 et 255, pour correspondre à la plage de valeurs possibles, puis il est lissé par un filtre passe bas avec une constante de temps d'environ 80 ms. Il est alors envoyé à la carte d'amplification moteur sous la forme d'une valeur absolue et d'un sens. Pour l'asservissement en longueur, l'erreur statique, la stabilité et le temps de réponse étant satisfaisants avec un simple coefficient proportionnel, il n'a pas été nécessaire d'ajouter de terme intégral ni dérivé.

Les différents paramètres utilisés pour le contrôle de l'enrouleur sont résumés dans le tableau III.3.

| Paramètre | Description | Valeur |
|-----------|---|-------------------------------------|
| Kp_l | Coefficient proportionnel de l'asservissement en longueur | 150 |
| Kp | Coefficient proportionnel de l'asservissement en vitesse | 4 |
| Ki | Coefficient intégral de l'asservissement en vitesse | 2 |
| N | Nombre de ticks par tour du codeur | 500 |
| R | Rayon des roues de l'enrouleur | 51,7 mm |
| | Bornes de la vitesse consigne de l'enrouleur | $[-54; 54]$ rad/s |
| | Bornes de la PWM | $[-255; 255]$ |
| | Bornes de la somme des erreurs pour le calcul du terme intégral | $[-\frac{255}{Ki}, \frac{255}{Ki}]$ |

Tableau III.3 – Paramètres utilisés pour le contrôle de l'enrouleur

Cet asservissement fait partie du code de l'Arduino qui est disponible en annexe E. Ce programme se comporte comme un noeud (programme) ROS qui publie et s'abonne à des *topics* (conteneurs de messages). Il est donc constitué en premier lieu de *callbacks* et de *publishers*. Les *callbacks* correspondent à des abonnements à des topics externes au programme. A chaque fois qu'un nouveau message est publié sur l'un de ces topics, la fonction de callback associée est activée. Dans notre cas, il y a quatre callbacks : *stop_callback*, *speed_callback*, *length_callback* et *init_callback*. Ce code comprend un seul *publisher* : *feedback_pub*, qui permet de publier des informations accessibles à l'extérieur du programme. En plus de la fonction *setup*, qui permet d'initialiser le programme, celui-ci comporte cinq autres fonctions : *loop*, *counter*, *asserv*, *length_control* et *pub*. La structure du code est schématisée sur la figure III.32 et toutes les fonctions sont détaillées en annexe E.

III.4.3 Comportement de l'enrouleur

La structure de contrôle bas niveau de l'enrouleur est résumée sur le schéma de la figure III.33. Les comportements respectifs de la carte de puissance et du moteur sont

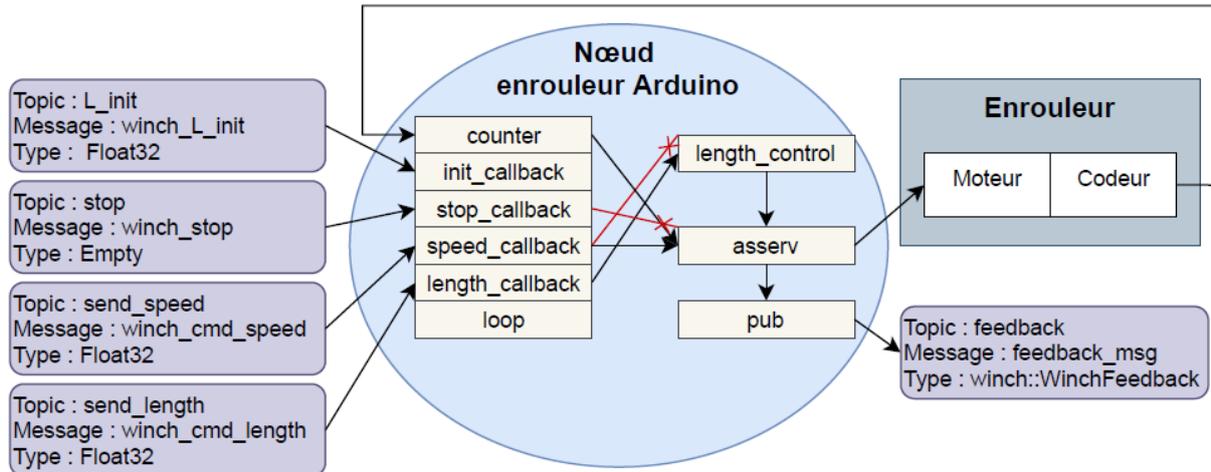


Figure III.32 – Schéma de structure du code de contrôle bas niveau de l'enrouleur. Les croix rouges illustrent le fait que les fonctions "stop callback" et "speed callback" arrêtent respectivement les fonctions "asserv" et "length control".

aussi tracés sur cette figure. Le comportement de la carte de puissance a été étudié en mesurant la tension aux bornes de la sortie de la carte pour différentes PWM envoyées par l'Arduino (courbe de gauche). Le comportement du moteur a été étudié en mesurant la vitesse de rotation calculée dans le code Arduino à partir de la mesure du codeur en fonction de différentes tensions de sortie de la carte de puissance (courbe de droite). Ces tests ont été effectués sans appliquer de résistance sur le câble qui n'expose ici aucune force freinant l'enroulement ou le déroulement. La carte EM-174 a un comportement presque parfaitement linéaire qui permet d'exploiter toute la capacité du moteur. On constate que le moteur a un bon comportement linéaire avec une petite saturation aux extrémités (vitesse presque constante pour les PWM entre 240 et 255 en valeur absolue).

Enfin, en combinant le comportement de la carte de puissance et le comportement du moteur, on obtient la caractéristique de l'enrouleur, en fonction de la commande en PWM envoyée, tracée sur la figure III.34. La vitesse linéaire du câble en m/s est calculée à partir de la vitesse en rotation pour un diamètre de roue de 51,7 mm. On constate que le système a un bon comportement linéaire et que la vitesse du câble est limitée à 1,4 m/s. Ceci correspond bien à la plage de vitesses définie dans les besoins.

A partir du comportement de l'enrouleur, on déduit la valeur de PWM théorique à envoyer en commande pour obtenir une vitesse de rotation désirée de l'enrouleur en rad/s, pour un câble et un entraxe donnés (équation III.2). Celle-ci peut être utilisée pour le pilotage du système en boucle ouverte.

$$PWM = 4,7003 * vitesse\ desirée \quad (III.2)$$

Les figures III.35 et III.36 montrent respectivement le résultat de la réponse du système à un échelon de vitesse de 10 rad/s et à un échelon de longueur de 0,1 m d'une durée de 3 s.

Les performances de l'enrouleur piloté via ROS sont satisfaisantes car il affiche un temps de réponse en vitesse de 0,1 s à 5 % et une erreur statique en longueur inférieure à 1 mm, tout en ayant un comportement lisse et continu, même à faible vitesse, comme

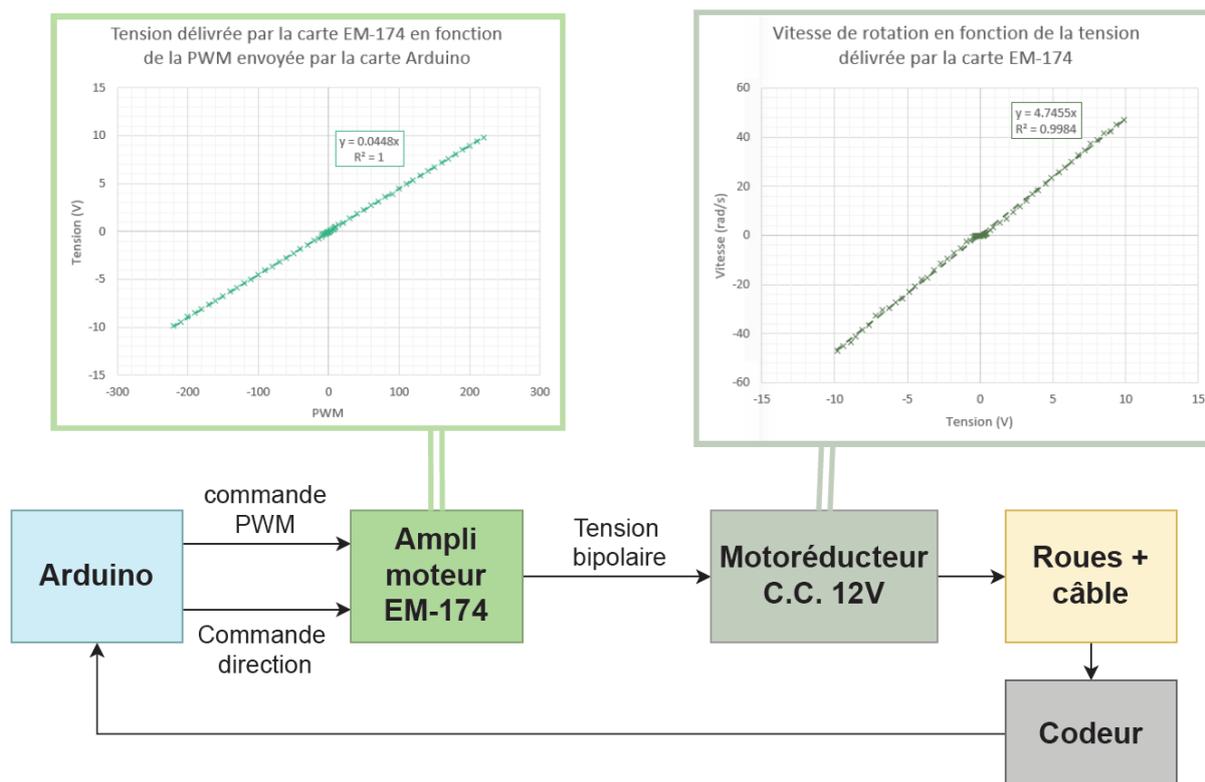


Figure III.33 – Schéma de structure du contrôle bas niveau de l'enrouleur

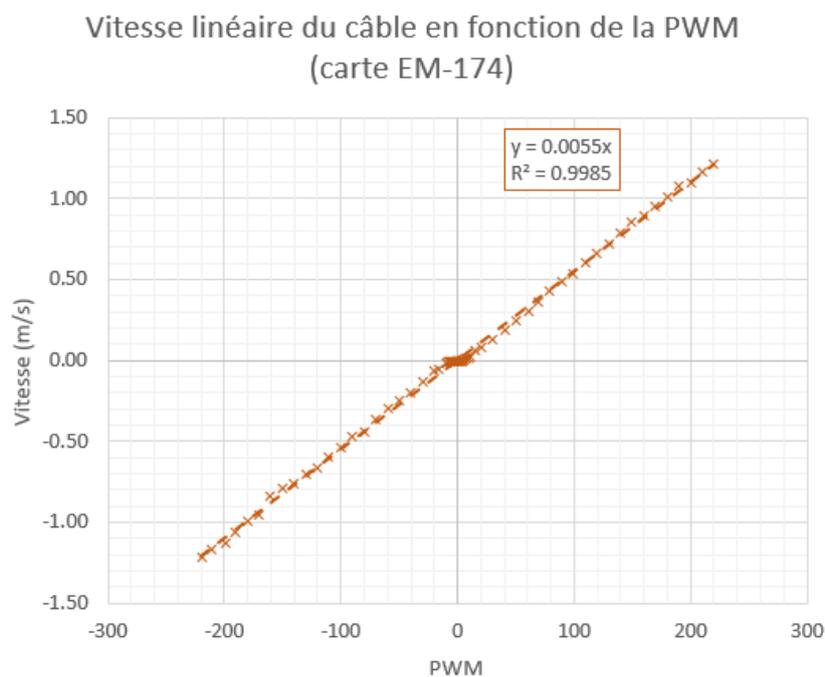


Figure III.34 – Vitesse de rotation de l'enrouleur en fonction de la PWM

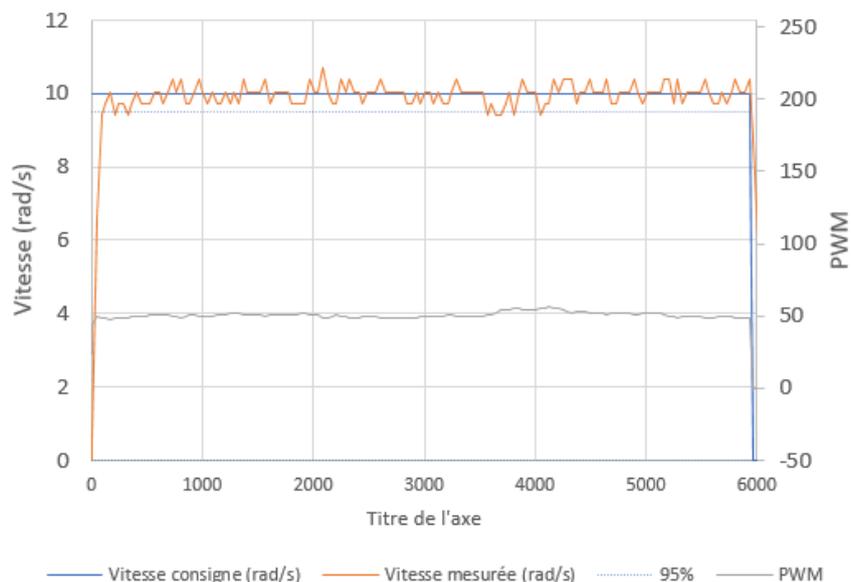


Figure III.35 – Réponse à un échelon en vitesse de la boucle d’asservissement en vitesse de l’enrouleur

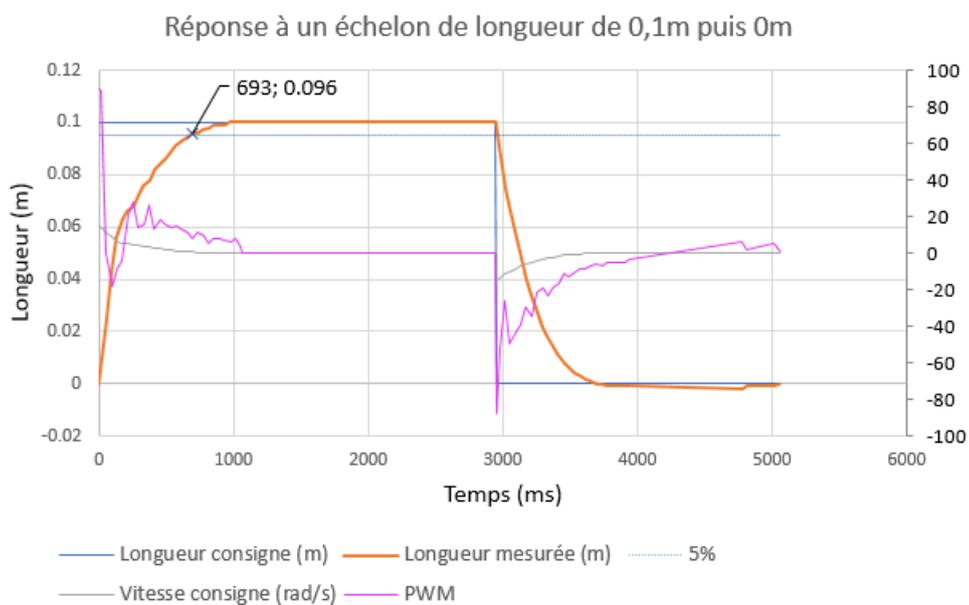


Figure III.36 – Réponse à un échelon en longueur de la boucle d’asservissement en longueur de l’enrouleur

exigé par les spécifications de conception initiale. Par ailleurs, le comportement a pu être validé lors de tests en bassin lors desquels le câble était bien entraîné, sans glissements, même lorsqu'il était mouillé. De plus, aucune dérive au cours du temps n'a été constatée pour le calcul de la longueur de câble déroulé.

III.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté une solution d'instrumentation du câble composée d'un système de compliance passive et d'un enrouleur actif. La compliance passive est constituée par une masse et deux flotteurs qui imposent une forme de V au câble en se comportant comme un amortisseur. Un capteur de courbure complète ce système afin d'en mesurer l'état. L'enrouleur a pour fonction de délivrer ou rétracter le câble à partir d'une consigne en longueur ou en vitesse en plus de fournir des informations sur la longueur de câble déroulé et sa vitesse. Après conception, ces deux systèmes ont été fabriqués puis testés et validés, dans un premier temps indépendamment l'un de l'autre, comme présenté dans ce chapitre. Le modèle de la distance entre les flotteurs en fonction de la valeur du capteur de courbure a été établi.

Afin d'améliorer encore le comportement du système, une compliance active est introduite. Celle-ci sera obtenue grâce au contrôle de l'enrouleur en fonction du comportement du système de compliance passive, déterminé à partir du modèle établi précédemment de la distance entre les flotteurs. La compliance passive, en plus de fournir des informations sur l'état du câble, a l'avantage de compenser les éventuels retards du contrôle de sa longueur.

L'ensemble du système (incluant le ROV, son câble instrumenté et son enrouleur) est interfacé avec ROS pour l'acquisition des données et l'envoi des commandes. Ceci simplifie les communications entre les différents éléments du système.

Ce système amène à proposer une gestion intelligente du câble en déchargeant le ROV de cette tâche. Plusieurs modes de contrôle reposant sur les données des différents capteurs sont envisagés et présentés dans le chapitre IV.

Chapitre IV

Commande du système

| | |
|--|------------|
| IV.1 Modes de commande standard de l'enrouleur | 118 |
| IV.1.1 Commande de la longueur de câble | 118 |
| IV.1.2 Commande en fonction de la tension | 119 |
| IV.1.3 Commande en fonction du couple de l'enrouleur | 121 |
| IV.1.4 Commande de la longueur semi-tendue | 122 |
| IV.1.5 Commande en fonction de la vitesse de consigne du ROV . . . | 125 |
| IV.2 Commande de l'enrouleur à partir du système compliant . . | 127 |
| IV.2.1 Commande en fonction de la distance entre les flotteurs | 127 |
| IV.2.2 Autres modes de commande basés sur le système compliant . . | 131 |
| IV.3 Conclusion du chapitre | 134 |

La nécessité de gérer le câble a été mise en évidence dans les chapitres I et II. Celle-ci a pour objectif de limiter les perturbations du câble sur le Remotely Operated Vehicle (ROV) (dues aux efforts qu'il lui transmet, provenant entre autre de sa traînée, de sa tension propre et des courants) et de réduire les risques que l'utilisation du câble engendre (emmêlements et accroches) tout en garantissant un espace de travail convenable au ROV (distance à la station de contrôle limitée par la longueur de câble disponible). La longueur de câble disponible entre le ROV est l'Unmanned Surface Vehicle (USV) peut être gérée par les mouvements de l'USV et du ROV (pour contrôler la distance qui les sépare) et par l'enrouleur. Cette étude propose d'effectuer la gestion du câble par l'intermédiaire d'un enrouleur actif associé à un système de compliance passive (décrits dans le chapitre III), dont la configuration actuelle est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de courbure.

Différents modes de commande du système, et en particulier de l'enrouleur, sont envisagés en se basant sur les données capteurs et le type de mission. Ce chapitre décrit les différents modes de commande envisagés en étudiant leurs avantages et inconvénients. Ceux-ci ont été simulés et testés sur le système réel ou uniquement en simulation. En effet, certains de ces modes reposent sur des données capteurs non disponibles sur la configuration actuelle du ROV utilisé pour effectuer les expériences. Ces modes seront

évalués et comparés dans des situations de missions proches de la réalité dans le chapitre V.

La gestion du câble est évaluée par ses performances suivant différents critères :

- Efforts transmis au ROV (et éventuellement à l'USV bien que généralement moins critique en terme de performances que le ROV)
- Réactivité
- Souplesse : éviter les oscillations et amortir les perturbations brutales afin d'aider le ROV à s'y adapter)
- Robustesse : atteindre la consigne même en présence de perturbations extérieures

Ces critères peuvent être observés sur différents paramètres tels que la vitesse du ROV, sa trajectoire, la puissance de ses propulseurs, les efforts transmis par le câble au ROV, le comportement de l'enrouleur et la configuration du câble (marge de câble, distance entre les flotteurs et vitesse d'écartement). La marge de câble correspond à la différence entre la longueur de câble déroulé et la distance entre l'enrouleur et l'attache du câble au ROV.

En fonction des possibilités de mesure de ces paramètres et de leur précision, ils peuvent servir de données d'entrée pour le contrôle autonome du câble. Le tableau IV.1 récapitule l'accessibilité de ces paramètres en simulation et sur le système réel.

Afin de valider l'utilisation de ces paramètres en tant que données d'entrée pour une loi de commande, on compare la réaction de ces paramètres à une entrée en tension du câble. La figure IV.1 compare ces différents paramètres obtenus en simulation sous Vortex® pour un câble instrumenté mais non contrôlé avec une consigne d'avancement du ROV de 0,8 m/s sur l'axe \vec{X} .

On constate que la force suivant l'axe \vec{X} , la vitesse d'écartement des flotteurs et la puissance des propulseurs sont les premiers paramètres à réagir à la tension du câble de façon significative. Cependant, la puissance des propulseurs dépend principalement de la consigne envoyée au ROV, elle peut donc être assez complexe à utiliser comme paramètre d'entrée d'une loi de commande. L'écartement des flotteurs réagit aussi rapidement mais de manière beaucoup moins visible que leur vitesse d'écartement, de plus, on a vu dans la partie III.3.3 que l'écartement des flotteurs était étroitement lié à la vitesse du ROV. Les autres paramètres, incluant les forces suivant les axes \vec{Y} et \vec{Z} , les couples du câble sur le ROV, le couple de l'enrouleur et la vitesse du ROV réagissent plus lentement. La vitesse d'écartement des flotteurs apparaît donc comme un paramètre pertinent pour la commande du câble. Cependant, sur le système réel, le bruit de mesure sur le capteur de courbure est susceptible de compromettre l'exploitation de sa dérivée comme paramètre d'entrée unique.

Dans les sections suivantes, chacune des commandes envisagées est étudiée suivant les critères explicités ici. Le tableau IV.2 disponible en fin de chapitre récapitule les performances, avantages et inconvénients de ces stratégies de commande. Dans un premier temps, quelques modes standards de commande de l'enrouleur, non basés sur le système compliant, sont présentés dans la section IV.1. Puis, dans un second temps, des modes de commande spécifiques, prenant en compte le comportement du système compliant seront présentés dans la section IV.2.

| | Paramètres | Simulation | Système réel |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Impacts sur le ROV | Efforts transmis par le câble au ROV | Vecteurs des forces et couples au niveau de l'attache du câble au ROV disponibles. | Indisponible en l'absence de capteurs d'efforts entre le câble et le ROV. |
| | Mouvements du ROV | Positions et vitesses, consignes et mesurées, du ROV dans le repère global de la simulation disponibles | La profondeur du ROV est obtenue à partir de son capteur de pression. La vitesse et la position du ROV pourraient être intégrées à partir de son accélération mesurée par son IMU mais ces données sont trop bruitées. Les consignes de vitesse envoyées au ROV sont disponibles. Un système de suivi de mouvements est utilisé pour évaluer en post-traitement les mouvements du ROV. |
| | Puissance du ROV | La puissance de chacun des propulseurs du ROV est disponible. | La commande de propulsion nécessaire à la stabilisation du ROV (en profondeur et angulaire) est connue. La consommation en courant du ROV peut donner une image de sa puissance de propulsion. |
| Comportement du câble | Longueur de câble déroulé | Disponible | Mesurée par l'enrouleur. |
| | Marge de câble | Calculée à partir de la longueur de câble et de la distance entre le ROV et l'enrouleur. | Indisponible étant donné que la position du ROV par rapport à l'enrouleur n'est pas connue. |
| | Tension du câble | Tension maximale au sein du câble fournie par Vortex. | Indisponible en l'absence de capteurs spécifiques. |
| | Distance entre les flotteurs | Calculée à partir de leur position des deux flotteurs dans le repère global. | Modélisée à partir de la mesure du capteur de courbure. Observée en post-traitement grâce au système de suivi de mouvements. |
| | Vitesse d'écartement des flotteurs | Dérivée de la distance. | Dérivée assez bruitée pour les deux méthodes de mesure (capteur de courbure et système de suivi de mouvements). |
| Comportement de l'enrouleur | Vitesse de déroulement | Disponible. | Mesurée par l'enrouleur. |
| | Couple de l'enrouleur | Disponible. | Non mesuré sur le système actuel. |

Tableau IV.1 – Récapitulatif des différents paramètres décrivant le comportement du système et leur mesurabilité en simulation et sur le système réel

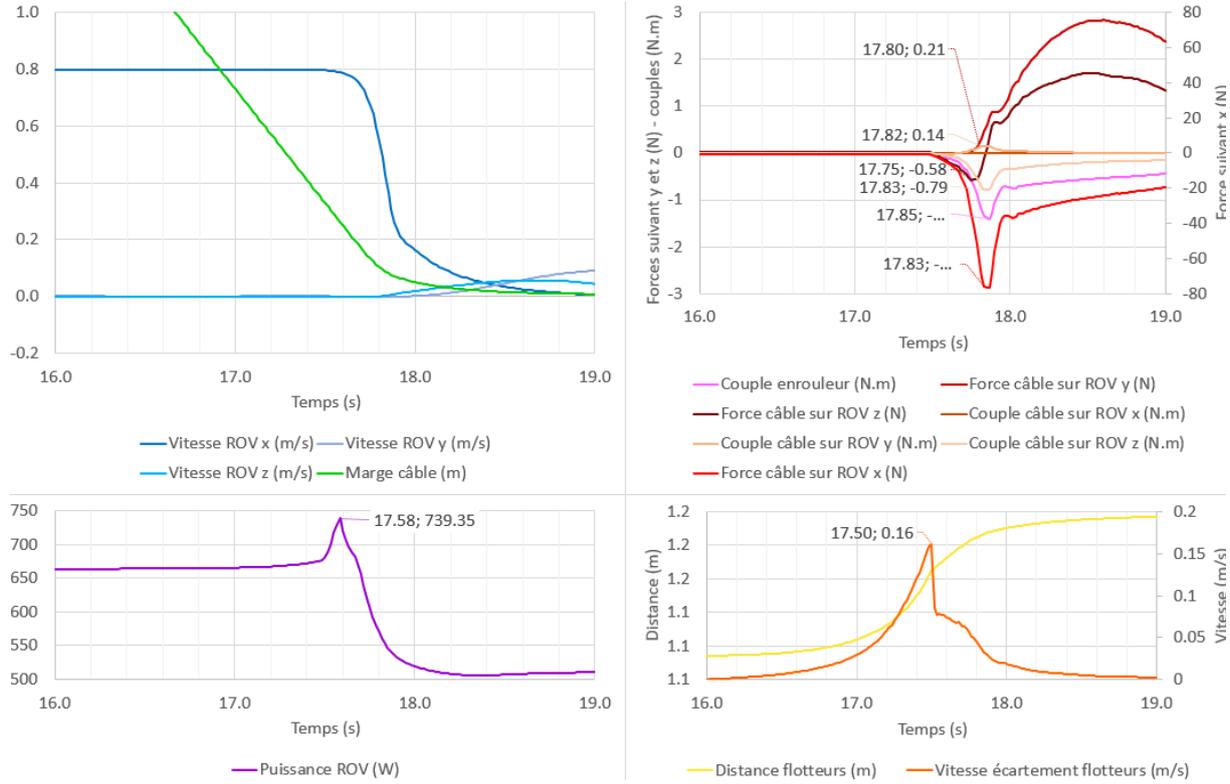


Figure IV.1 – Comparaison des différents paramètres lorsque le câble entre sous tension

IV.1 Modes de commande standard de l'enrouleur

IV.1.1 Commande de la longueur de câble

Le premier mode consiste simplement en une commande en longueur du câble. Celui-ci pourra être utilisé en premier lieu lorsque le ROV est mis à l'eau ou lorsqu'il se dirigera vers un point d'intérêt à une distance connue. Dans ces deux cas, la longueur nécessaire de câble est connue et sera déroulée à l'avance.

Pour cela, un simple asservissement proportionnel sur la longueur de câble a été mis en place comme présenté, d'une part en section III.4.2 pour le système réel, et d'autre part sur la figure IV.2 pour la simulation. Le lissage de la vitesse consigne de l'enrouleur

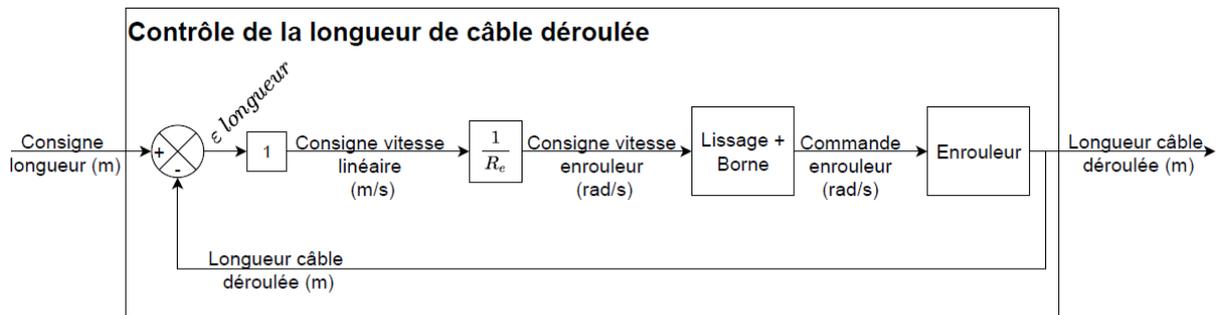


Figure IV.2 – Schéma de commande du câble à une longueur consigne

correspond à une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps d'environ 0,3s. En simulation, cette même fonction est réutilisée pour tous les lissages.

La figure IV.3 montre la réponse du câble en simulation à un échelon sur sa consigne de longueur. On voit que la consigne est atteinte assez rapidement (temps de réponse à 5% d'environ 2s), sans dépassement et sans oscillations. Le comportement de ce mode de commande sur le système réel avait été présenté dans le chapitre précédent sur la figure III.36.

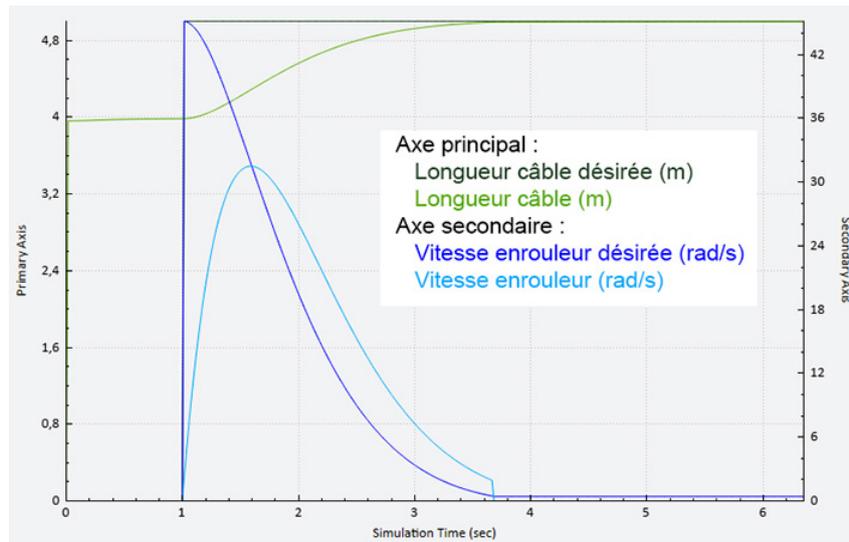


Figure IV.3 – Courbe de réponse du câble à un échelon sur la consigne en longueur

IV.1.2 Commande en fonction de la tension

A partir des résultats présentés en section II.4, on détermine la plage de tension de fonctionnement normal du câble à $[-0,4\text{N}; 0\text{N}]$. Le mode de commande du câble en fonction de sa tension est décrit sur le schéma de la figure IV.4. La tension mesurée en simulation correspond à la force que le câble applique sur le ROV suivant son axe \vec{X} . De cette façon, lorsque le câble tire sur le ROV, la tension est négative. Lorsque la tension est inférieure à $-0,4\text{N}$, le câble est considéré comme trop tendu, l'enrouleur est donc contrôlé pour dérouler à sa vitesse maximale. Lorsque la tension est positive, le câble est considéré comme lâche, un compteur est alors incrémenté et dès qu'il atteint 50 itérations consécutives (ce qui correspond à 0,8s avec un pas de temps de 1/60s), une vitesse d'enroulement d'environ la moitié de la vitesse maximale est envoyée en consigne à l'enrouleur. Dans les autres cas, la vitesse consigne est nulle. La mesure de la tension étant assez bruitée dans la simulation, un filtre passe-bas est appliqué sur cette mesure ainsi que sur la commande en vitesse de rotation de l'enrouleur.

Ce mode de commande a été simulé sous Vortex® mais n'a pas été testé sur le système réel en l'absence de capteur de tension sur le câble.

Le comportement de cette loi de commande est représenté sur la figure IV.5. Pour cet exemple, le BlueROV2 (BR2) se situe initialement à 4 m de l'USV suivant l'axe \vec{X} et à

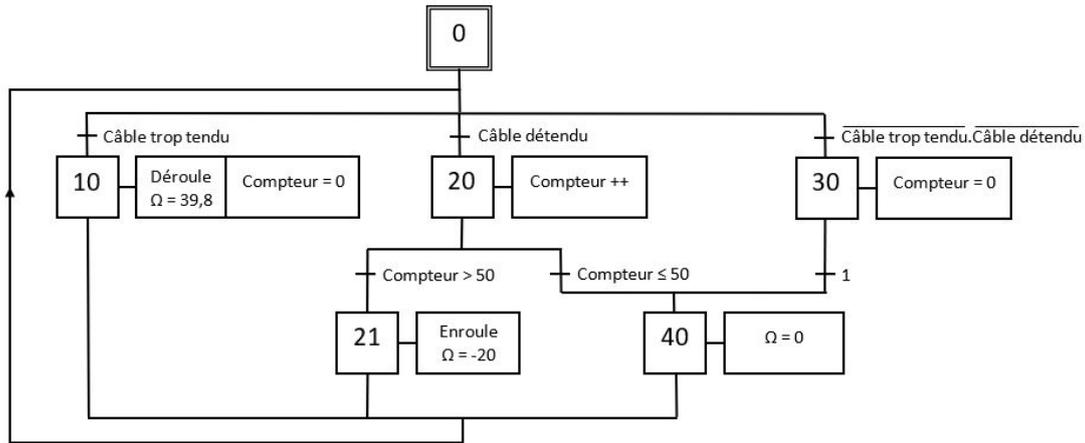


Figure IV.4 – Schéma logique de la commande en tension du câble

0,5 m de profondeur. L'USV est fixe durant toute la simulation. Au début de la simulation, le ROV et l'enrouleur sont maintenus en position pendant 1 s pour que le câble se stabilise. Le ROV recule alors de 1 m, ce qui a pour effet de pousser légèrement le câble au début de son mouvement. La longueur de câble déroulée est donc trop grande et la force suivant l'axe \vec{X} est globalement nulle. L'enrouleur se met à enrôler du câble par à-coups. La distance entre le ROV et la bobine diminue ainsi que la longueur de câble. Une fois que le ROV a atteint sa position consigne, il s'arrête pendant une seconde puis avance de 1,5 m. La distance entre le ROV et l'enrouleur augmente et se rapproche de la longueur de câble, ce qui a pour effet d'augmenter (en valeur absolue) la force que le câble transmet au ROV. Le câble est alors déroulé pour conserver une longueur de câble plus grande que la distance entre l'enrouleur et le ROV. Une fois que le ROV a atteint sa position finale, la force qu'il reçoit du câble ne variant plus, l'enrouleur maintient la longueur de câble constante.

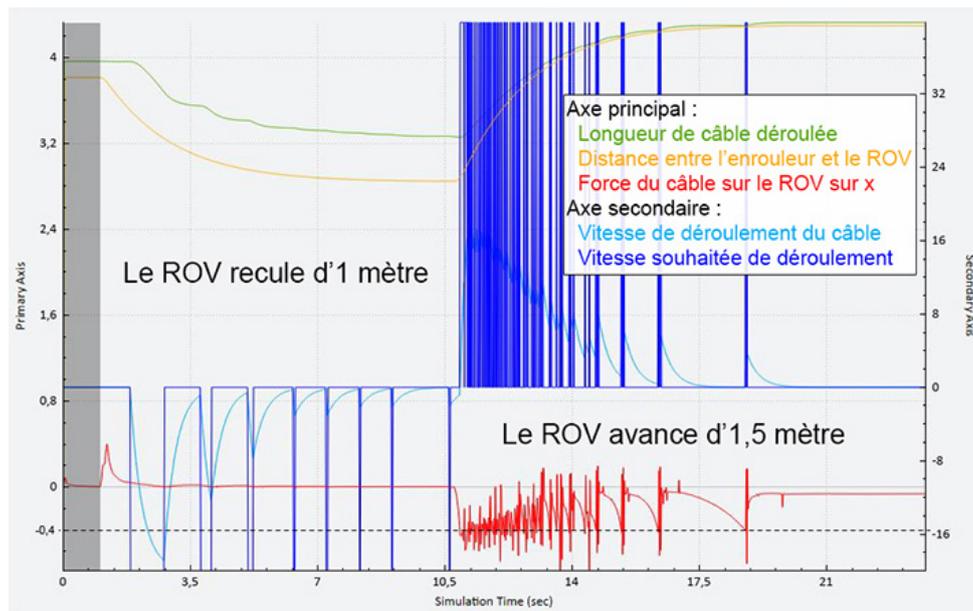


Figure IV.5 – Courbes de comportement de l'asservissement en tension

Cette solution constitue une proposition de machine d'états finis pertinente pour piloter le câble. Elle permet de maintenir la tension du câble dans des valeurs raisonnables alors que l'évolution de la longueur de câble reste relativement lisse. La simulation montre des à-coups, qui pourraient être limités par une modulation de la vitesse de l'enrouleur proportionnelle à l'erreur en tension par rapport à la consigne ou par l'introduction d'une compliance.

IV.1.3 Commande en fonction du couple de l'enrouleur

Lorsque le câble n'est pas muni de capteur de tension, il est possible de la déduire localement à partir du couple du moteur de l'enrouleur. L'objectif d'une commande basée sur le couple de l'enrouleur est d'obtenir un comportement similaire à celui d'un ressort de rappel.

Sur le système réel, cette commande serait mise en place par l'utilisation d'une carte de commande moteur disposant directement d'une entrée de commande en couple. Cependant, la carte de commande de l'enrouleur utilisé dans cette étude (décrit en section III.4) n'est qu'un driver moteur sous forme d'un ampli Pulse Width Modulation (PWM) (qui n'autorise pas le contrôle en courant ou en couple).

En simulation, le couple de l'enrouleur peut être mesuré mais ne peut pas être contrôlé de façon directe, seule sa vitesse peut être commandée. La loi de commande proposée consiste donc en une consigne de vitesse issue d'une comparaison du couple par rapport à un seuil, comme décrit sur le schéma bloc de la figure IV.6. Pour déterminer le seuil

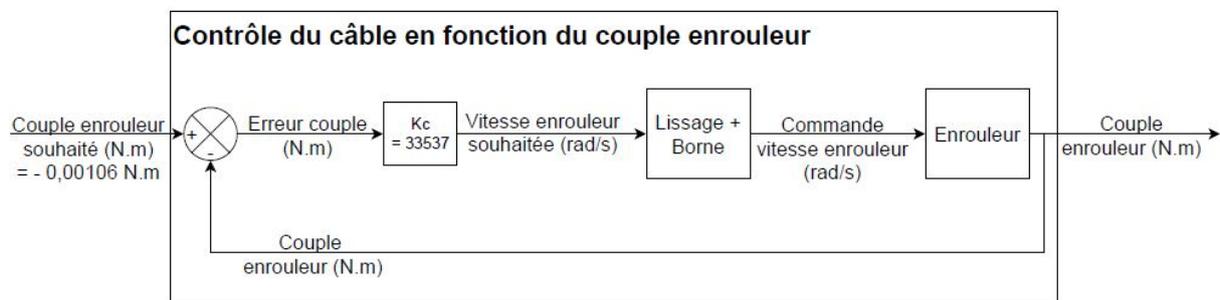


Figure IV.6 – Schéma logique de la commande en couple du câble

de couple et le coefficient à appliquer à la vitesse de l'enrouleur, la valeur du couple a été observée lorsque le câble est enroulé à une vitesse importante (voir figure IV.7). Le couple de l'enrouleur est en moyenne de $-1,06 \times 10^{-3}$ N m lorsque l'enrouleur tourne à $-35,55$ rad/s et qu'il y a une marge importante de câble. On choisit donc un seuil de couple de $-1,06 \times 10^{-3}$ N m et un coefficient proportionnel $K_c = \frac{35,55}{0,00106} = 33\,537$. La vitesse obtenue est alors lissée et bornée, comme pour les autres modes de commande, avant d'être envoyée en commande à l'enrouleur.

Cette commande a été testée en simulation sous Vortex® avec le câble du Tortuga, lors d'une trajectoire d'avance et de marche arrière du BR2. L'enrouleur simulé avait alors une vitesse limite de 39,8 rad/s et un diamètre d'enroulement de 2,5 cm, correspondant à une limite en vitesse linéaire de 0,82 m/s. La figure IV.8 présente les courbes du couple de

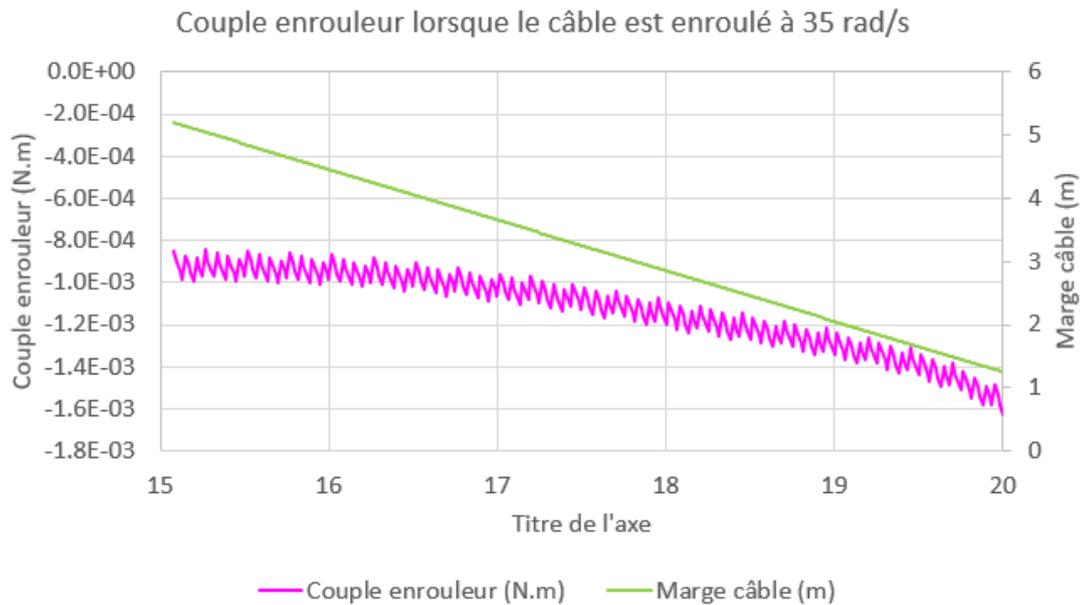


Figure IV.7 – Couple de l'enrouleur lorsque le câble est enroulé à 0,8 m/s

l'enrouleur et de la vitesse de l'enrouleur, contrôlée à partir du couple, au cours de cette trajectoire.

La figure IV.9 présente l'évolution de la vitesse du ROV suivant son axe longitudinal, de la marge de câble (écart entre la longueur de câble déroulé et la distance entre le ROV et l'USV) et de la force que le câble transmet au ROV suivant son axe longitudinal.

On constate tout d'abord que la marge de câble est assez limitée lorsque le ROV est arrêté et lorsqu'il avance mais elle devient assez importante lorsqu'il recule. Cette loi de commande fonctionne donc correctement lorsque le ROV s'éloigne mais n'enroule pas assez vite lorsqu'il se rapproche. Ce comportement très différent entre l'avance et la marche arrière du ROV indiquent une mauvaise robustesse de ce mode de commande. La force mesurée au niveau du point d'attache admet des pics à chaque changement brutal de consigne du ROV. Celle-ci reste inférieure à 0,1 N en valeur absolue (correspondant à environ 0,09 fois le poids du BR2). Lorsque le câble est déroulé, la force devient positive, ce qui signifie que le câble a tendance à pousser le ROV. Cette force est négative (traction) lorsque le ROV recule ou est statique.

IV.1.4 Commande de la longueur semi-tendue

Afin d'atteindre la configuration semi-tendue définie en section II.4, un contrôle direct de la longueur de câble correspondant à cette configuration a été envisagé. Pour cela, la longueur semi-tendue est déterminée par la résolution de l'équation II.9, avec pour paramètres les valeurs des positions horizontale et verticale des deux extrémités du câble. En simulation, ces positions sont connues dans le repère global. La longueur semi-tendue est alors utilisée comme longueur consigne pour la commande de la longueur de câble comme décrit dans la partie IV.1.1.

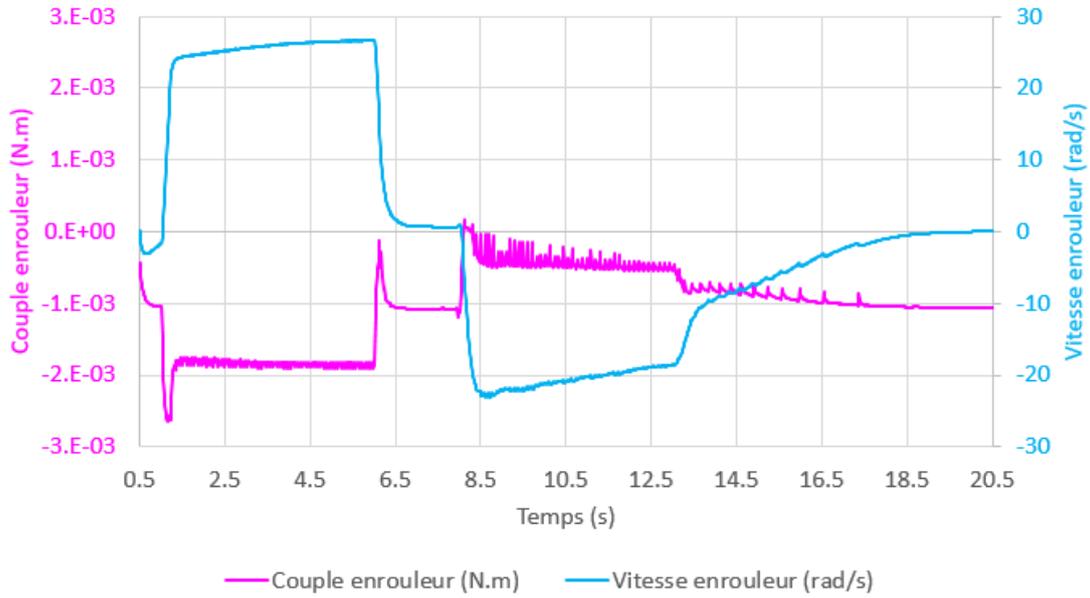


Figure IV.8 – Couple et vitesse mesurés de l'enrouleur lors de la commande du câble en fonction du couple

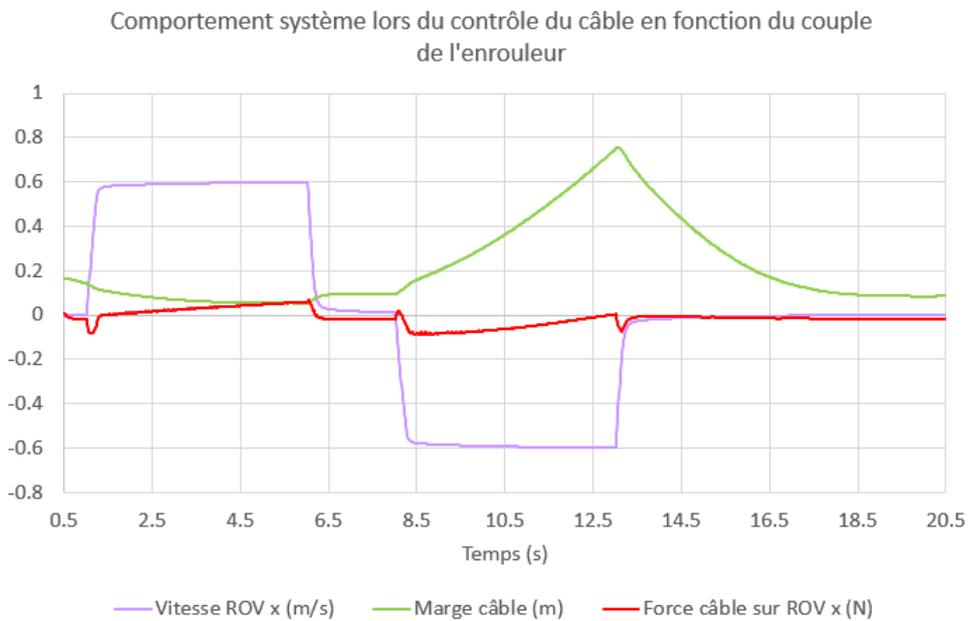


Figure IV.9 – Comportement du système lors de la commande du câble en fonction du couple de l'enrouleur

Le comportement de ce mode de commande a été évalué en simulation pour des mouvements simples du ROV, lorsqu'il avance (figure IV.10) puis lorsqu'il recule (figure IV.11).

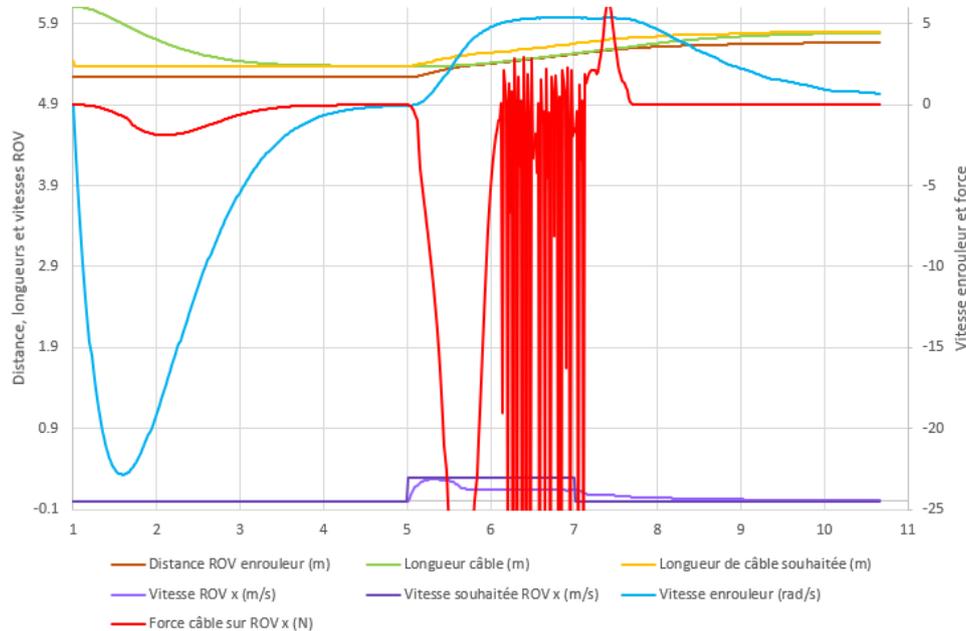


Figure IV.10 – Comportement de la commande de câble en longueur semi-tendue lorsque le ROV avance

Dans le premier cas, le ROV se situe initialement à 5 m de l'USV dans le plan horizontal et à une profondeur de 2 m. Le contrôle du câble est activé à partir de 1 s, puis, entre 5 s et 7 s, le ROV reçoit une consigne de vitesse de 0,3 m/s suivant l'axe \vec{X} avant de s'arrêter. On peut voir sur la figure IV.10 que la longueur semi-tendue est atteinte assez rapidement lorsque le ROV est à l'arrêt. Cependant, le ROV se trouve freiné lorsqu'il tente d'avancer. En effet, la longueur semi-tendue est très ajustée et ce mode de commande n'anticipe pas les déplacements du ROV. La vitesse du ROV se trouve donc limitée à 0,15 m/s.

Le comportement du câble avec commande en longueur semi-tendue est alors comparé avec son comportement non contrôlé, lorsque le ROV recule. La configuration initiale du ROV est la même que pour la simulation précédente puis, entre 5 s et 10 s, il reçoit une consigne de vitesse de 0,3 m/s suivant l'axe \vec{X} .

On constate sur la figure IV.11 qu'avec contrôle, la longueur de câble tend vers la longueur semi-tendue avec un léger retard. La force que le câble applique au ROV suivant l'axe \vec{X} est plus grande lorsque le câble est contrôlé en longueur semi-tendue que lorsqu'il n'est pas contrôlé. De plus, lorsque le ROV est proche de la surface (moins d'un mètre de profondeur), la longueur semi-tendue correspond presque à la longueur tendue, ce qui augmente la force que le câble applique sur le ROV. C'est pourquoi cette commande est plus intéressante lorsque le ROV est en profondeur. Bien que permettant de fournir la longueur théorique de câble correspondant à la configuration semi-tendue, ce type de commande n'est donc pas suffisant sur un système réel. Ces résultats justifient l'intérêt du système de compliance passive décrit en section III.3.

Par ailleurs, la position et la vitesse réelles du ROV ne sont pas connues de façon précise

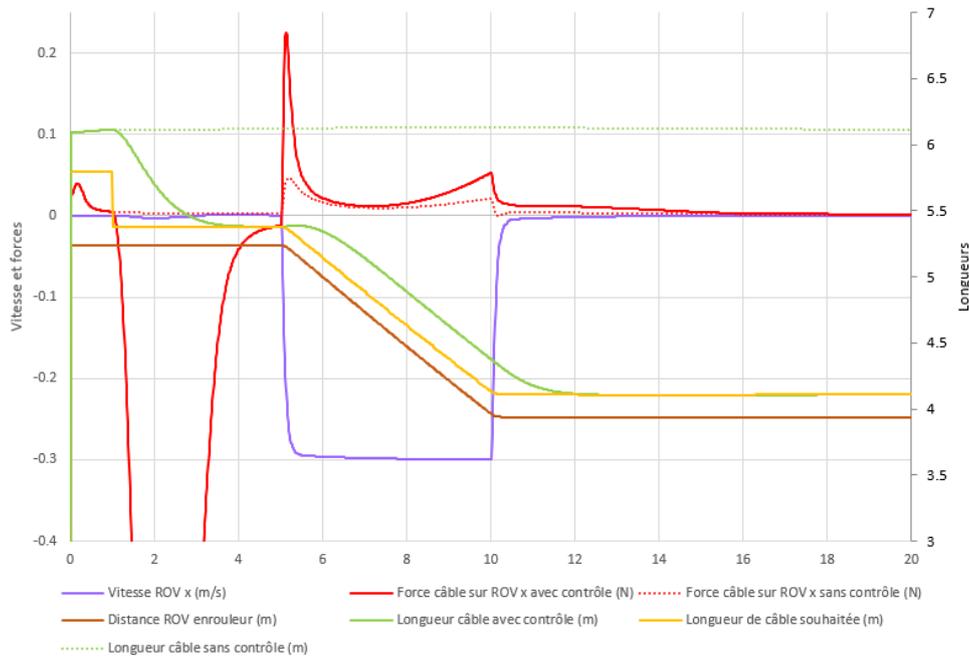


Figure IV.11 – Comparaison des efforts sur le câble avec et sans contrôle en longueur semi-tendue lorsque le ROV recule

sur le système réel. De plus, le calcul de la longueur semi-tendue se base sur l'équation théorique de la chaînette, qui ne s'applique en réalité qu'aux câbles pesants et sans raideur. Il est donc risqué de baser la commande du câble uniquement sur la position du ROV par rapport à celle de l'USV. Pour les lois de commande suivantes, la vitesse réelle du ROV est supposée non connue.

IV.1.5 Commande en fonction de la vitesse de consigne du ROV

L'étude du mode de commande basé uniquement sur la longueur semi-tendue a mis en évidence la nécessité de prendre en compte les déplacements souhaités du ROV dans la commande du câble en l'absence de compliance passive. Un mode de commande basé sur la vitesse consigne du ROV est donc proposé pour anticiper les tensions de câble éventuelles.

Cette commande consiste en un asservissement en vitesse du câble, indépendant de sa longueur, comme décrit sur la figure IV.12. Cela suppose donc que ce mode de commande soit activé alors que le câble a déjà une longueur adaptée à la configuration du système. La consigne en vitesse de déroulement linéaire du câble est déterminée à partir de la norme de la vitesse consigne du ROV. Le comportement de ce mode de commande a été évalué en simulation sous Vortex® pour une trajectoire simple du ROV d'avance puis de marche arrière avec une consigne en vitesse de 0,6 m/s. Le ROV se situe initialement à 4 m de l'USV dans le plan horizontal et à une profondeur de 0,5 m. La figure IV.13 présente les courbes de la vitesse du ROV, de la marge de câble et de la vitesse de l'enrouleur lors de la commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV. On constate que malgré le contrôle, la marge de câble est très faible (environ 5 cm) et tend à diminuer lorsque le ROV avance, indiquant que le câble n'est pas déroulé assez vite. Lorsque le ROV

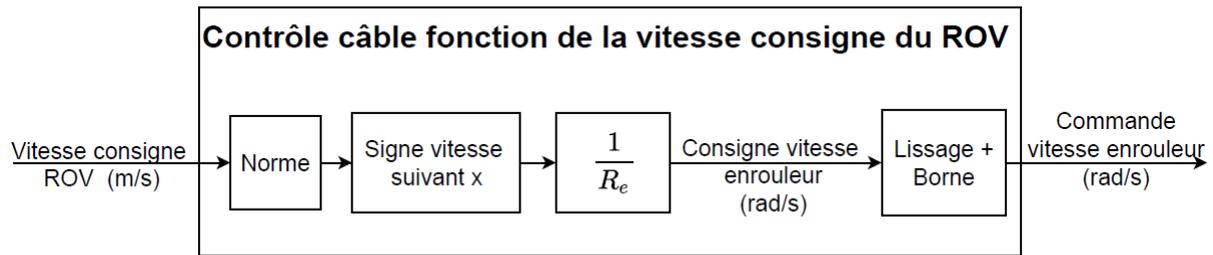


Figure IV.12 – Schéma de commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV

recule, le délai de réaction de l'enrouleur induit une augmentation de la marge de câble (environ 25 cm), qui est alors maintenue par l'enroulement du câble à la même vitesse que le ROV. La vitesse de l'enrouleur est nulle dès lors que la vitesse consigne du ROV est nulle. L'excédent de câble est donc conservé après l'arrêt du ROV.

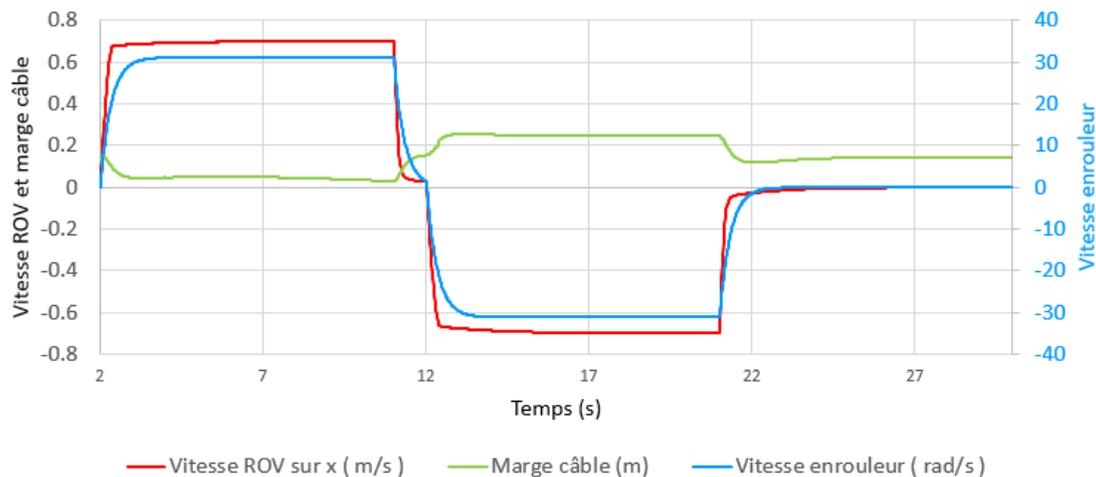


Figure IV.13 – Comportement de la commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV

La figure IV.14 présente l'évolution des efforts transmis par le câble au ROV, exprimés dans son repère local, au cours de sa trajectoire. On constate que la force de traction du câble sur le ROV suivant son axe \vec{X} est assez importante (jusque 2 N en valeur absolue) et instable lorsque le ROV avance et que la marge de câble est faible. Elle devient positive (poussée) lorsque le ROV recule et se limite à des valeurs inférieures à 0,4 N (en valeur absolue). La force suivant l'axe vertical est du même ordre de grandeur et toujours positive (tirant le ROV vers le bas). La force transversale est presque nulle tout du long de la trajectoire.

Pour que cette commande soit plus efficace, il faudrait prendre en compte la profondeur du ROV, sa position et son orientation afin d'avoir une valeur plus précise de la longueur de câble nécessaire. Cependant, nous considérons que la position et l'orientation du BR2 ne sont pas disponibles de façon fiable lors des missions réelles. Il apparaît donc intéressant de coupler ce type de commande à une commande basée sur la configuration actuelle du câble.

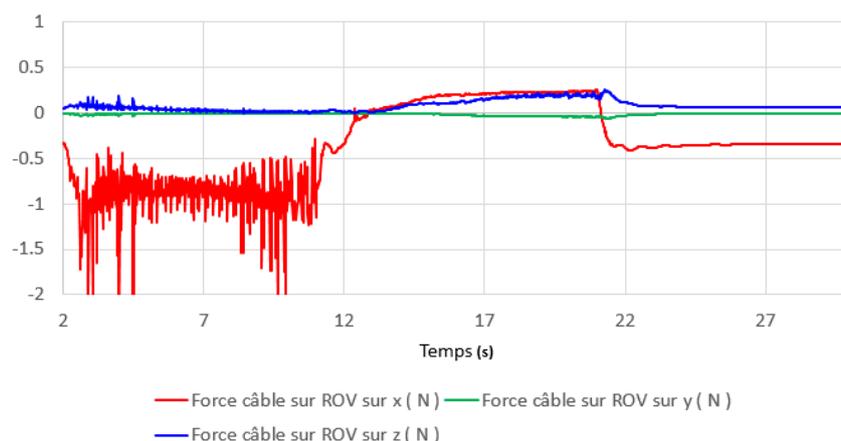


Figure IV.14 – Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en fonction de la vitesse consigne du ROV

IV.2 Commande de l'enrouleur à partir du système compliant

Les paragraphes précédents ont montré que les modes standards de commande du câble ne sont pas suffisants pour les ROV de petite taille qui ne sont pas munis de capteurs de position et de vitesse fiables. Le paragraphe III.3 a montré que le système de compliance passive fournissait des informations pertinentes sur la configuration réelle du câble. Les modes de commande de l'enrouleur proposés par la suite se basent donc sur les informations de l'état du câble fournies par le système amorti présenté en section III.3.

IV.2.1 Commande en fonction de la distance entre les flotteurs

Cette commande consiste en un asservissement basé sur la distance entre les flotteurs, soit avec un simple correcteur proportionnel, soit avec un correcteur Proportionnel-Dérivé (PD), qui prend en compte la vitesse d'écartement entre les flotteurs, comme schématisé sur la figure IV.15.

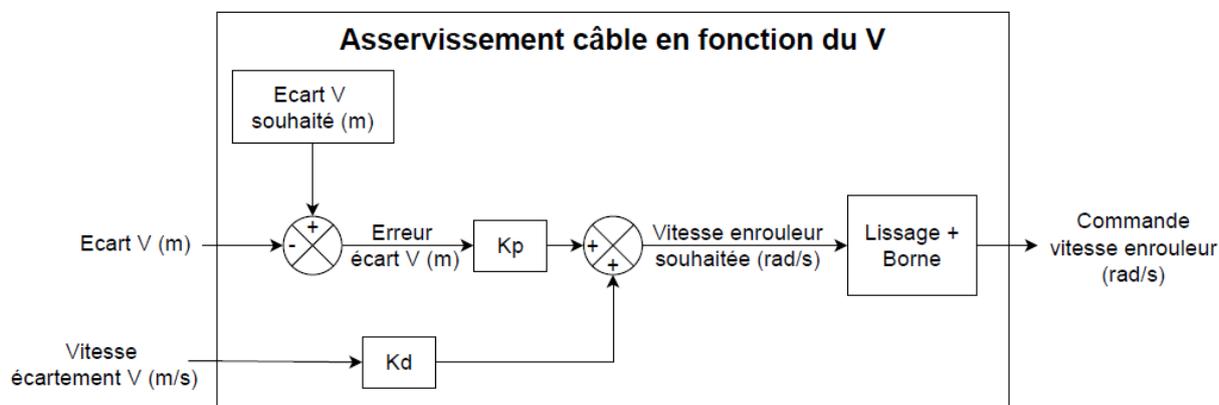


Figure IV.15 – Schéma de commande du câble en fonction de la distance entre les flotteurs

Dans un premier temps, cette commande a été testée en simulation sous Vortex® avec une consigne de 0,9 m de distance entre les flotteurs, un coefficient proportionnel de 200 et un coefficient dérivé de 15, calculé pour ne pas saturer les gains en vitesse et anticiper les réponses d'appel de câble. La consigne de rotation déterminée à partir de ce correcteur est lissée et bornée avant d'être envoyée en commande à l'enrouleur.

La figure IV.16 présente les courbes de la vitesse du ROV, de la marge de câble et de la vitesse de l'enrouleur lors de la commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV lorsqu'il se situe à une profondeur de 0,5 m.

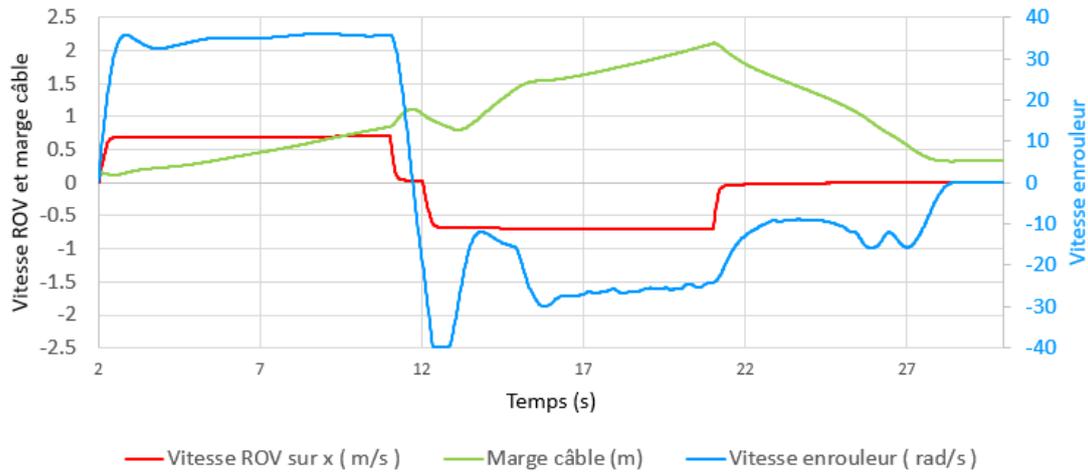


Figure IV.16 – Comportement de la commande du câble en fonction de la distance entre les flotteurs

En simulation, le ROV étant asservi en vitesse, celle-ci n'est pas impactée par le comportement du câble. La marge de câble a une valeur raisonnable de 0,3 m en statique mais est assez importante (jusque 2 m) lorsque le ROV recule.

La figure IV.17 présente l'évolution de la distance entre les flotteurs ainsi que leur vitesse d'écartement. Celle-ci est assez grande (1,06 m) au début de la simulation, elle

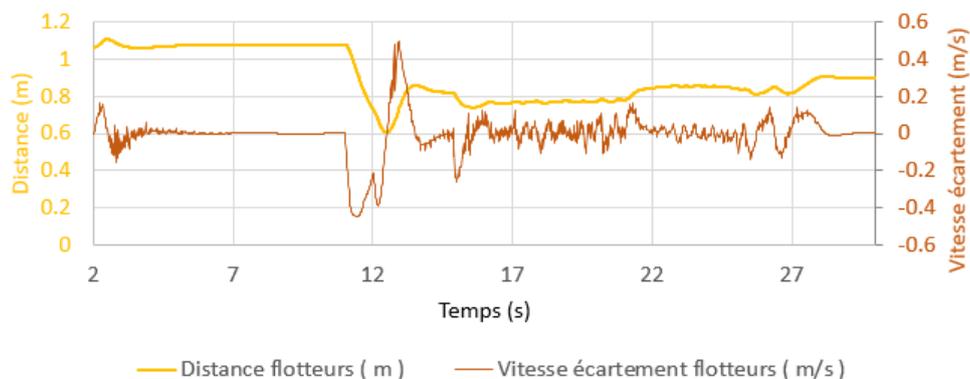


Figure IV.17 – Evolution de la distance entre les flotteurs lorsque le câble est contrôlé en fonction de cette distance

admet un léger pic (1,1 m) lorsque le ROV commence son avancée puis revient à 1,06 m.

Elle diminue alors jusqu'à sa consigne lorsque le ROV s'arrête et la dépasse lorsqu'il commence à reculer. La consigne est finalement de nouveau atteinte après l'arrêt final du ROV. Par ailleurs, on constate que des oscillations du système de compliance passive et de l'enrouleur sont introduites par le coefficient dérivé du correcteur.

La figure IV.18 présente l'évolution des efforts transmis par le câble au ROV, exprimés dans son repère local, au cours de sa trajectoire. La force suivant l'axe longitudinal oscille lorsque la marge de câble est faible et que le câble oscille. Lorsque la marge de câble est plus importante, les oscillations du câble ne sont quasiment pas transmises au ROV. La force de traction est de l'ordre de 0,5 N lorsque le ROV avance. Cette force devient une force de répulsion d'environ 0,2 N lorsque le ROV recule. Un effort transversal apparaît durant la marche arrière du ROV, lorsque l'excédent de câble poussé par le ROV quitte le plan vertical.

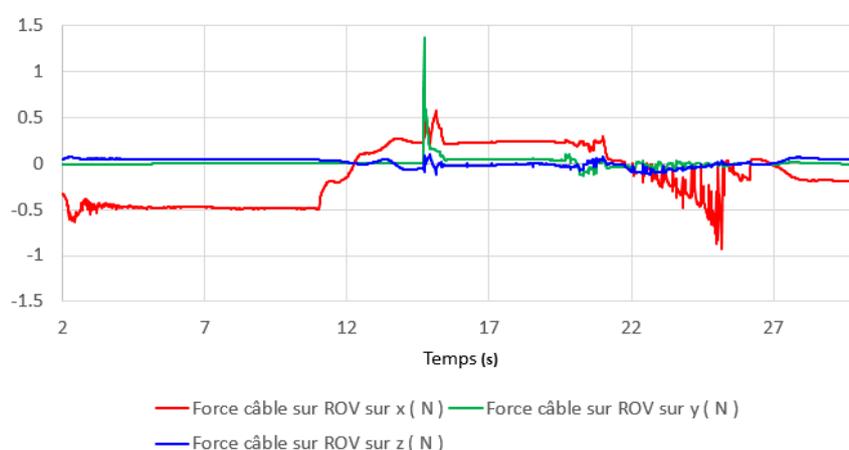


Figure IV.18 – Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en fonction de la distance entre les flotteurs

Le mode de commande en fonction du système de compliance passive a alors été testé sur le système réel. Celui-ci consiste en un simple asservissement proportionnel de la distance entre les flotteurs. Lors de ce test, la vitesse d'écartement des flotteurs n'était pas prise en compte. En effet, la vitesse d'écartement peut fournir des informations plus sensibles sur les changements de tension brusques du câble mais est assez bruitée sur le système réel. L'écart souhaité entre les flotteurs était de 0,6 m et le coefficient d'asservissement proportionnel algébrique (lié au sens d'enroulement) était de 30.

Pour le système réel, la distance entre les flotteurs est obtenue via le capteur de courbure et le modèle établi en section III.3.2. Afin d'éviter les oscillations autour de la consigne, l'écart souhaité a une certaine tolérance avec une borne supérieure et une borne inférieure. Entre ces deux valeurs, le câble est considéré comme semi-tendu et l'erreur sur la distance souhaitée est nulle. Cet asservissement, dont le code est disponible en annexe E.3, fournit une consigne en vitesse de rotation de l'enrouleur qui est alors contrôlé comme décrit en section III.4.2.

Avant de tester ce mode de commande dans l'eau, il a d'abord été testé dans l'air. Pour cela, le BR2 a été placé sur un chariot roulant et les flotteurs sur une glissière à hauteur du ROV dans l'axe de l'enrouleur. De cette façon, les mouvements du ROV d'une part, et

la commande de l'enrouleur d'autre part, engendrent effectivement un écartement ou un rapprochement des flotteurs mesurés par le capteur de courbure. Les différents paramètres de la loi de commande ont été ajustés lors de ces premiers tests.

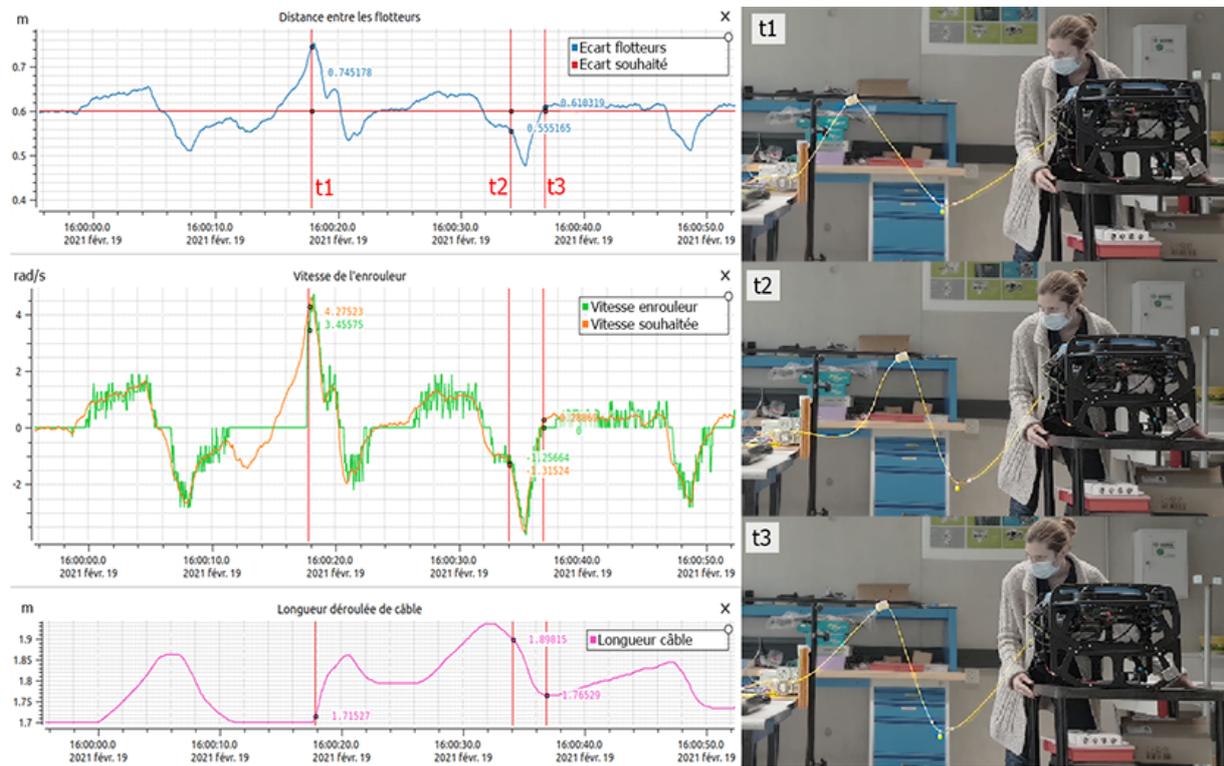


Figure IV.19 – Test de la commande de l'enrouleur à partir du système de compliance passive. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/_MQ6_1XwIXE)

Le comportement du système lors de ce test est représenté sur la figure IV.19. L'écart entre les flotteurs, la vitesse consigne de l'enrouleur, sa vitesse mesurée et la longueur de câble déroulée sont représentés sur la partie gauche. La partie droite illustre la configuration du câble à trois instants différents de cette expérience. A l'instant t_1 , le ROV s'écarte en augmentant la distance entre les flotteurs, l'enrouleur déroule donc du câble. A l'instant t_2 , le ROV se rapproche et diminue la distance entre les flotteurs, l'enrouleur réduit donc la longueur de câble. On observe aussi à l'instant t_2 un surplus de câble entre l'enrouleur et le flotteur de gauche qui est dû à un léger retard de l'enrouleur. Ce retard est rapidement rattrapé, comme on peut le voir à l'instant t_3 où la consigne d'écart entre les flotteurs est atteinte.

La configuration semi-tendue du câble est donc bien contrôlée à partir du système de compliance passive et de l'enrouleur et tend à satisfaire les critères de souplesse, robustesse, réactivité et de limitation des efforts transmis au ROV.

IV.2.2 Autres modes de commande basés sur le système compliant

Afin d'améliorer la commande de l'enrouleur, d'autres paramètres sont pris en compte en plus de la configuration du système amorti, et en particulier la vitesse du ROV.

On a vu en section III.3.3 que la vitesse du ROV influe sur la distance entre les flotteurs. Il a donc été prévu de moduler la consigne d'écartement entre les flotteurs en fonction de la vitesse du ROV, pour rendre cette consigne atteignable.

Afin d'anticiper les besoins en câble avant que sa tension ne soit détectée par le capteur de courbure, la vitesse consigne du ROV est prise en compte dans une commande en *feed forward*. Une consigne de vitesse de déroulement linéaire du câble identique à la vitesse du ROV est alors ajoutée à la consigne de vitesse générée par l'asservissement sur le système compliant. La vitesse d'éloignement réelle du ROV par rapport à l'enrouleur n'étant pas connue, cette commande se base sur la vitesse consigne du ROV. Cette erreur, ainsi que les perturbations extérieures, sont compensées grâce au contrôle du système de compliance. La structure de cette loi de commande est présentée sur la figure IV.20.

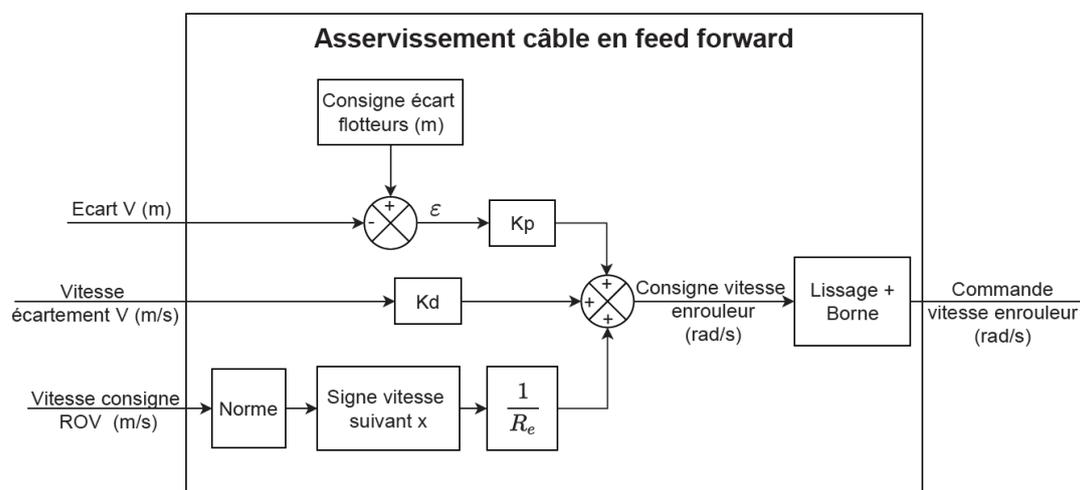


Figure IV.20 – Schéma de commande du câble combinant le V et la vitesse consigne du ROV

La figure IV.21 présente les courbes de la vitesse du ROV, de la marge de câble et de la vitesse de l'enrouleur lors de la commande en feedforward. La figure IV.22 présente l'évolution de la distance entre les flotteurs ainsi que de leur vitesse d'écartement.

Lorsque le ROV avance, l'enrouleur atteint sa vitesse maximale de déroulement. La distance entre les flotteurs reste assez importante (1,07 m) malgré une augmentation de la marge de câble. Lorsque le ROV recule, la consigne en distance (0,9 m) est retrouvée. La vitesse de l'enrouleur oscille légèrement au moment où le ROV s'arrête, avant de se stabiliser puis de devenir nulle lorsque la consigne de distance entre les flotteurs est atteinte.

La figure IV.23 présente l'évolution des efforts transmis par le câble au ROV, exprimés dans son repère local, au cours de sa trajectoire. Celle-ci est très similaire à celle observée pour la commande du câble en fonction de la distance entre les flotteurs, sans les oscillations

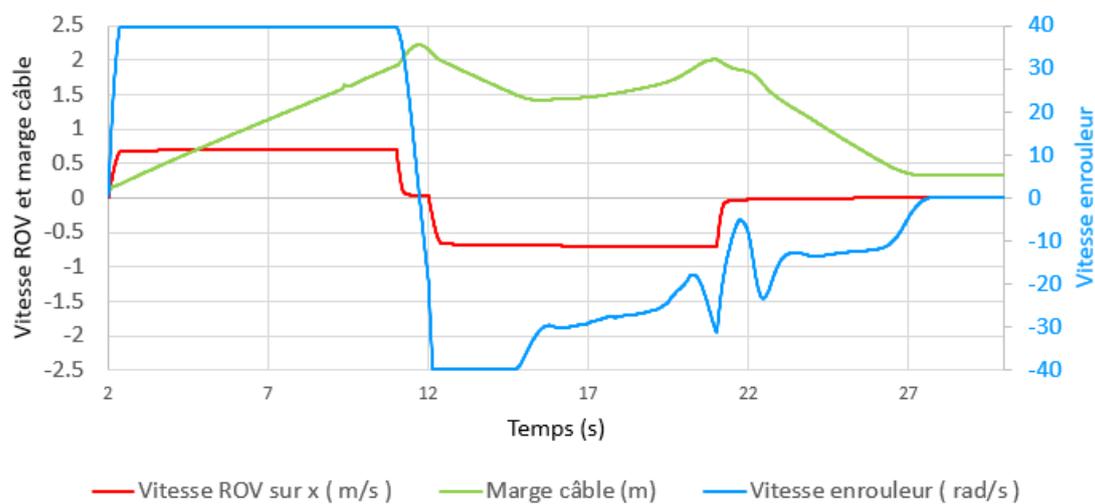


Figure IV.21 – Comportement de la commande du câble en feedforward

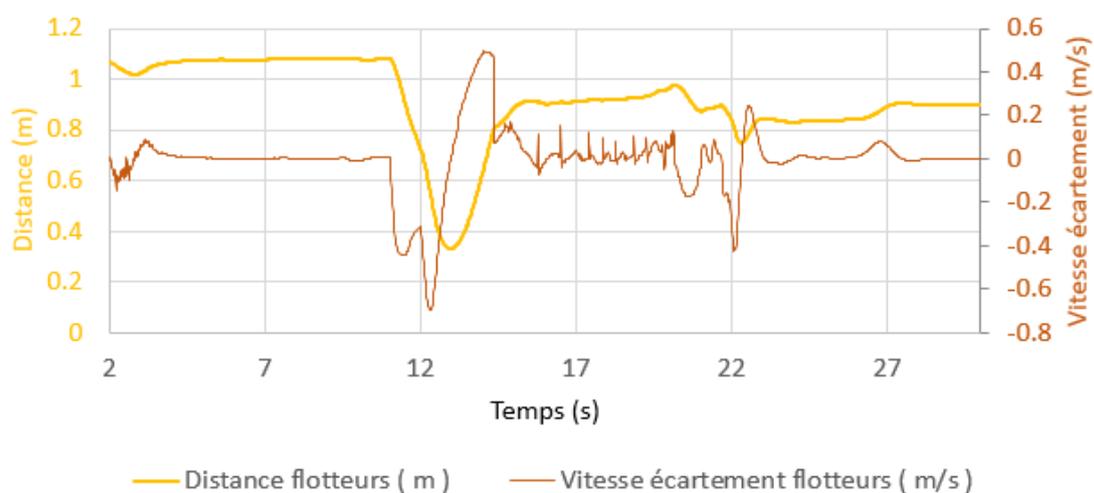


Figure IV.22 – Evolution de la distance entre les flotteurs lorsque le câble est contrôlé en feedforward

importantes au moment où le ROV s'arrête.

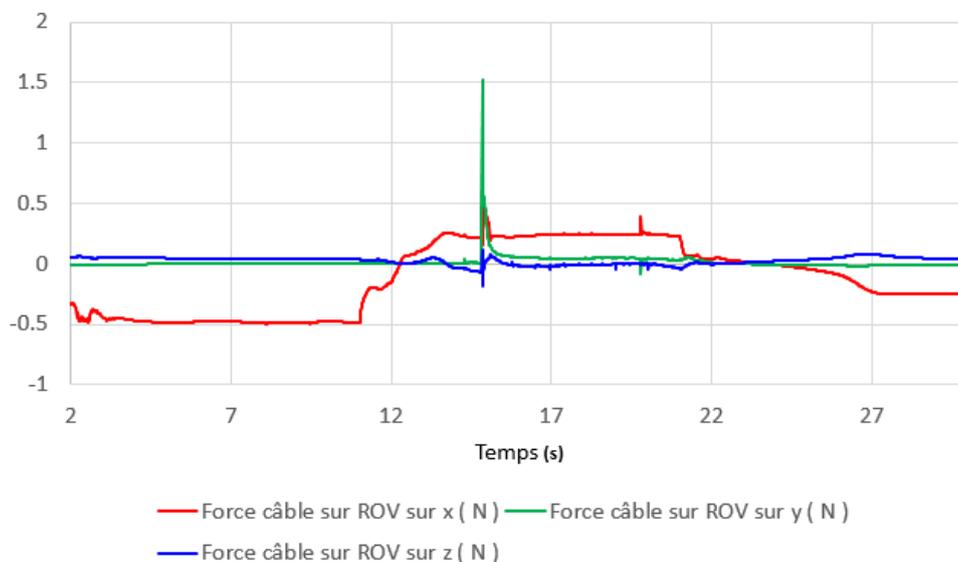


Figure IV.23 – Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en feedforward

La commande combinant la vitesse consigne du ROV et l'écart entre les flotteurs est comparée à ces deux commandes indépendantes par l'évolution de la vitesse de l'enrouleur et la distance entre les flotteurs, qui sont tracées sur la figure IV.24. On constate que

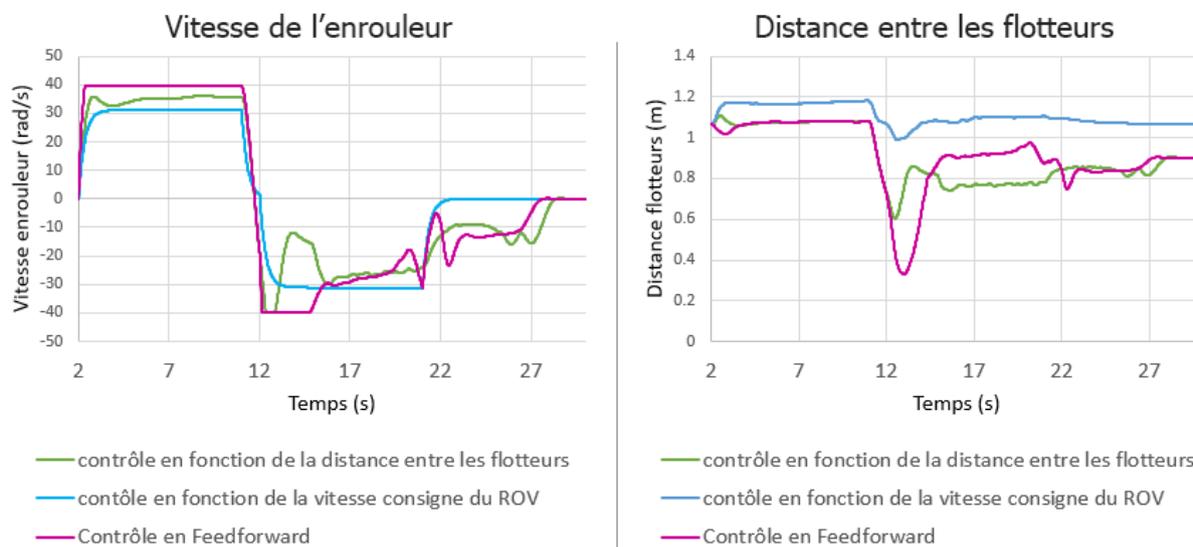


Figure IV.24 – Comparaison du comportement du câble entre les commandes en fonction de la distance des flotteurs, en fonction de la vitesse consigne du ROV et en feedforward

la commande simple en fonction de la distance entre les flotteurs est plus efficace pour maintenir la distance entre les flotteurs proche de leur consigne. C'est aussi la commande qui offre la meilleure stabilité de la vitesse de l'enrouleur, les deux autres lois de commande entraînant des oscillations.

IV.3 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté les différents modes de commande envisagés pour l'enrouleur, dont les avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau IV.2. Les modes de commande standard se basent par exemple sur la tension dans le câble, le couple de l'enrouleur, la position ou la vitesse du ROV. Ceux-ci ne sont pas toujours compatibles avec les ROV de petite taille, dont les capteurs sont insuffisants pour connaître l'état du système de façon précise. Un contrôle du câble basé sur la configuration du système compliant est donc proposé et validé.

Le schéma de la figure IV.25 illustre l'intégration de cette commande entre les blocs d'acquisition du capteur de courbure et d'asservissement bas niveau de l'enrouleur présentés dans le chapitre III.

Ce mode de commande offre une option intéressante de compliance active, qui vise à être utilisée en complément avec d'autres modes de commande plus standards. En particulier, la vitesse consigne du ROV est prise en compte pour améliorer le comportement de ce système. Le contrôle autonome du câble ouvre aussi les portes d'un contrôle global du système avec répartition réfléchie de la mobilité entre le ROV, l'USV et le câble, qui figure dans les perspectives des travaux présentés ici.

Ces modes de commande ont été évalués dans un premier temps de façon sommaire en simulation et dans l'air. Des expériences plus poussées avec le système complet dans l'eau ont été réalisées et sont présentées dans le chapitre suivant.

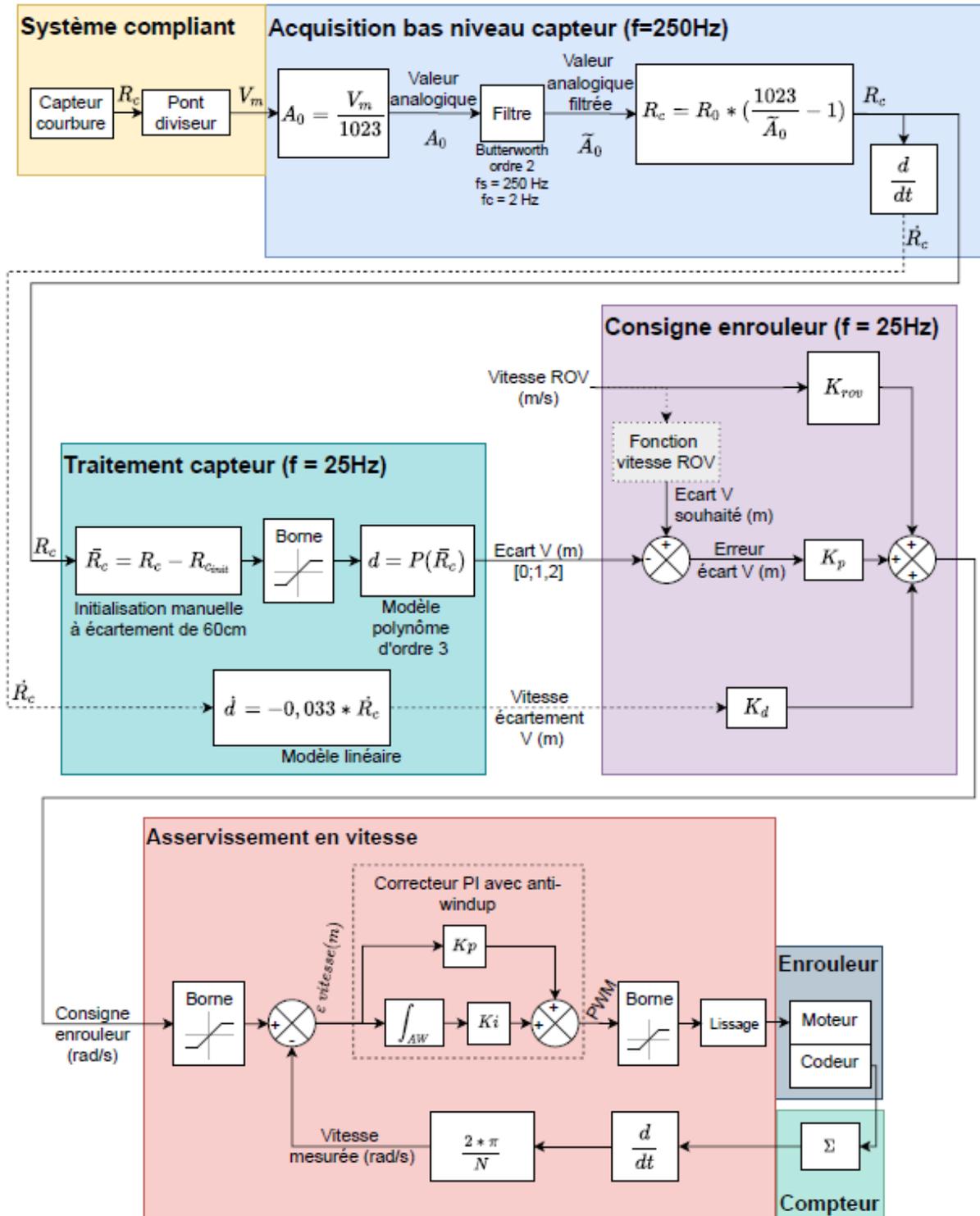


Figure IV.25 – Schéma logique global du contrôle du câble basé sur le système de compliance passive

| Mode de commande | Spécificités | Faisabilité sur un système réel |
|------------------------------|---|--|
| Longueur de câble | Ce mode de commande est principalement envisagé pour le début d'une mission, pour dérouler une longueur de câble déterminée par l'opérateur avant les déplacements du ROV. Cette commande est assez stable, ne présente pas de dépassement ni d'oscillations et a un comportement lisse. Cependant, elle n'est pas capable de limiter de façon automatique les efforts transmis au ROV. | Testé sur le système réel grâce au codeur incrémental de l'enrouleur. |
| Tension du câble | Machine d'états finis qui déroule ou enroule le câble suivant si sa tension au niveau du point d'attache est en dessous ou au dessus d'un certain niveau. Cette commande est assez réactive mais manque de souplesse. La force suivant l'axe \vec{X} dépasse parfois les 0,4 N en valeur absolue. | Nécessiterait d'instrumenter le câble d'un ou plusieurs capteurs de tension. |
| Couple de l'enrouleur | Cette commande permet de maintenir les efforts en dessous d'une valeur raisonnable de 0,1 N (en valeur absolue). Elle n'est pas assez robuste car son comportement est très différent suivant la direction de déplacement du ROV. Elle manque de souplesse sur le déroulement du câble. | Nécessiterait une carte de commande moteur disposant directement d'une entrée de contrôle en couple. |
| Longueur semi-tendue | Ce type de commande est efficace lorsque le ROV est à l'arrêt ou recule mais limite radicalement ses mouvements lorsqu'il s'éloigne à cause de son manque de souplesse. La force suivant l'axe \vec{X} dépasse parfois les 25 N. | Non adapté à un système réel pour lequel la distance exacte entre les deux véhicules n'est pas connue. |
| Vitesse consigne du ROV | Ce mode de commande n'est pas assez réactif et génère une erreur statique sur la marge de câble qui n'est jamais corrigée. Il n'est donc pas robuste face aux perturbations externes. La force suivant l'axe \vec{X} dépasse parfois 2 N lorsque le ROV avance. | La vitesse réelle du ROV n'étant pas connue sur un système réel, c'est sa vitesse consigne qui est employée pour cette commande. |
| Distance entre les flotteurs | Mode de commande assez souple, robuste et réactif. Des oscillations du système de compliance passive et de l'enrouleur sont visibles lorsque cette commande comporte un terme dérivé en plus de son terme proportionnel. Les oscillations autour de la consigne sont évitées avec le mode proportionnel en introduisant une certaine tolérance autour de la consigne. La force suivant l'axe \vec{X} est d'environ 0,5 N (en valeur absolue) lorsque le ROV avance. | Commande possible sur le système réel grâce au capteur de courbure qui instrumente le câble et fournit une image de la distance entre les flotteurs. |
| Feedforward | Ce mode de commande prend en compte à la fois la distance entre les flotteurs et la vitesse consigne du ROV. Il présente parfois quelques oscillations passagères mais reste assez stable et est très réactif. La force suivant l'axe \vec{X} est d'environ 0,5 N (en valeur absolue) lorsque le ROV avance. | Commande possible sur le système réel grâce au capteur de courbure et par la prise en compte de la consigne en vitesse du ROV. |

Chapitre V

Résultats des simulations et expériences

| | | |
|------------|--|------------|
| V.1 | Description du système utilisé | 138 |
| V.2 | Expérimentations en bassin | 140 |
| V.2.1 | Infrastructures et équipements utilisés | 140 |
| V.2.2 | Analyse du comportement du système réel | 143 |
| V.2.3 | Réalités expérimentales | 161 |
| V.3 | Simulations de missions sous Vortex | 165 |
| V.3.1 | Simulation du système complet sous Vortex | 165 |
| V.3.2 | Analyse du comportement du système en simulation | 168 |
| V.4 | Conclusion du chapitre | 179 |

Le modèle du câble établi dans le chapitre II et sa solution de gestion basée sur un système de compliance contrôlé par enrouleur, proposée dans le chapitre III, ont conduit à des évaluations du système global, d'une part en simulation et d'autre part sur un démonstrateur physique. Ces évaluations ont pour objectif, d'une part de valider la modélisation du système global en comparant son comportement à celui du système réel sous les mêmes conditions, et d'autre part d'évaluer la solution de gestion du câble proposée dans cette étude face à des cas de missions proches de la réalité. Ce chapitre présente la mise en place de ces évaluations et leurs résultats.

La modélisation du système global est évaluée de manière qualitative, en observant le comportement du câble et du Remotely Operated Vehicle (ROV), et de manière quantitative, en se basant sur quelques paramètres tels que la position et la vitesse du ROV et des flotteurs du système amorti. Une fois validée par les expériences, la modélisation permet d'aller plus loin afin d'effectuer des simulations plus complexes que sur les expériences sur le système réel ou de faire facilement varier de nombreux paramètres, sans nécessiter d'équipements et d'infrastructures onéreux. La solution de contrôle du câble proposée est évaluée de façon qualitative et quantitative, en observant le comportement du système global sous différentes conditions.

V.1 Description du système utilisé

L'étude porte sur un système composé d'un Unmanned Surface Vehicle (USV) et d'un ROV reliés par un ombilical instrumenté et actionné tel que décrit dans le chapitre III. Des algorithmes de contrôle de la longueur de câble fournie au ROV ont été développés dans le chapitre IV. La figure V.1 représente le schéma d'implémentation globale du système.

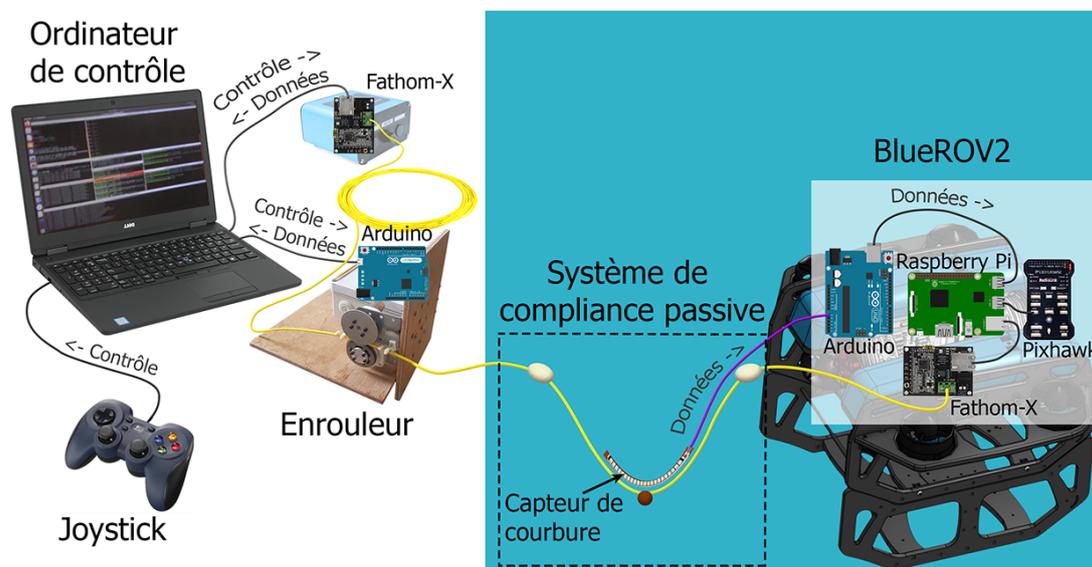


Figure V.1 – Schéma d'implémentation globale du système

Le ROV utilisé est un BlueROV2 (BR2) - Heavy dont les caractéristiques sont détaillées en section I.2.3. C'est un ROV de petite taille, d'une dizaine de kilogrammes, légèrement flottant, capable d'atteindre une profondeur de 100 m et une vitesse de 1,5 m/s grâce à ses 8 propulseurs de type T200. Son modèle physique est décrit en annexe C. Le BR2 est fourni par *BlueRobotics* avec une carte *Pixhawk* intégrant le pilote automatique open-source de drones *ArduSub* et une carte *Raspberry Pi* intégrant le logiciel open-source *Companion* pour un contrôle via l'application open-source *QGroundControl*. Cependant, les robots du laboratoire sont tous interfacés avec Robot Operating System (ROS). Il a donc été installé sous une version Linux Ubuntu, avec la librairie *mavros*, sur la *Raspberry Pi* pour interfacer le contrôle haut niveau avec le pilote automatique *ArduSub*, en remplacement de *QGroundControl*. Le BR2 est normalement téléguidé via un joystick connecté à l'ordinateur de contrôle. Des trajectoires ont aussi été pré-enregistrées afin de fournir une comparaison entre les différentes expériences. L'ordinateur de contrôle, situé à terre ou à bord de l'USV, a le rôle de *master* ROS.

L'étude porte sur la gestion du câble entre un ROV et un USV. En simulation, un USV de petite taille de type catamaran a été modélisé. Cependant, le laboratoire ne possédant pas de véhicules de surface fonctionnels, les expérimentations ont été menées sans USV, en contrôlant le reste du système depuis la terre.

Le BR2 et l'ordinateur de contrôle sont reliés par un câble de 25 m de long de type *Fathom Tether slim*, fourni par *BlueRobotics*. Ses propriétés physiques sont détaillées dans la section II.2 et le tableau II.7. Il est neutre en eau douce, très souple et a un faible

diamètre de 4 mm. Il est constitué d'une paire torsadée dédiée à la communication du BR2 et ne transporte pas d'énergie. Deux cartes *Fathom-X* fournissent une connexion Ethernet haut débit à partir de la paire torsadée et sont reliées d'une part à la *Raspberry Pi* à l'intérieur du robot, et d'autre part à l'ordinateur de contrôle.

Le câble est instrumenté par un système de compliance passive présenté en section III.3. Il s'agit de deux flotteurs et d'une masse montés sur le câble à proximité du BR2 pour amortir la transmission des perturbations extérieures du câble au ROV. Un capteur de courbure fournit les informations sur la configuration de ce système en temps réel. Celui-ci est connecté à la carte *Arduino* embarquée à cet effet dans le BR2. Les données capteur sont transmises par le câble à l'ordinateur de contrôle par l'intermédiaire de la *Raspberry Pi*.

L'enrouleur est présenté en section III.4 et ses modes de contrôle dans le chapitre IV. Il s'agit d'un démonstrateur prévu pour être fixé au bord d'un bassin lors des expériences. Sa vitesse de déroulement maximale est de 1,4 m/s. Il est directement connecté à l'ordinateur de contrôle, qui lui transmet les consignes de pilotage et les données du capteur de courbure via ROS. En simulation, l'enrouleur est embarqué à bord de l'USV.

Le schéma de la figure V.2 représente l'architecture des *nœuds* ROS pour le contrôle du système global lors des expériences. Les cases ovales correspondent aux *nœuds* et les cases rectangulaires aux *topics* échangés par ces *nœuds*. Les cases colorées correspondent aux algorithmes développés et aux *topics* créés dans le cadre de la thèse. Les *nœuds* colorés en bleu tournent sur les deux cartes *arduino* dédiées respectivement à l'acquisition du capteur de courbure et au contrôle bas niveau de l'enrouleur. Les *topics* colorés en jaune sont directement publiés par l'utilisateur depuis l'ordinateur de contrôle.

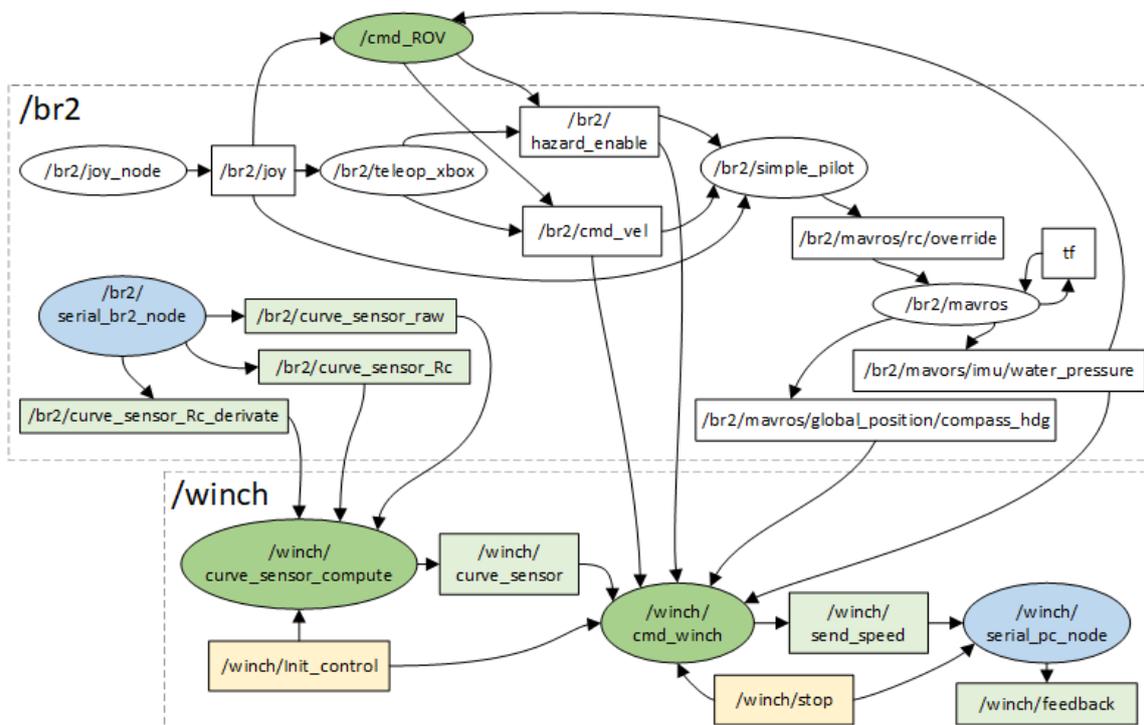


Figure V.2 – Graphique de l'architecture ROS de contrôle global

V.2 Expérimentations en bassin

V.2.1 Infrastructures et équipements utilisés

Bassins d'essais

Après les tests de base de parties du système dans l'air, celui-ci a été évalué dans l'eau. Afin de maîtriser l'environnement et de limiter les perturbations extérieures dans un premier temps, les expériences ont eu lieu dans des bassins d'essai. Celles-ci ont été conduites dans quatre bassins différents (voir figure V.3) :

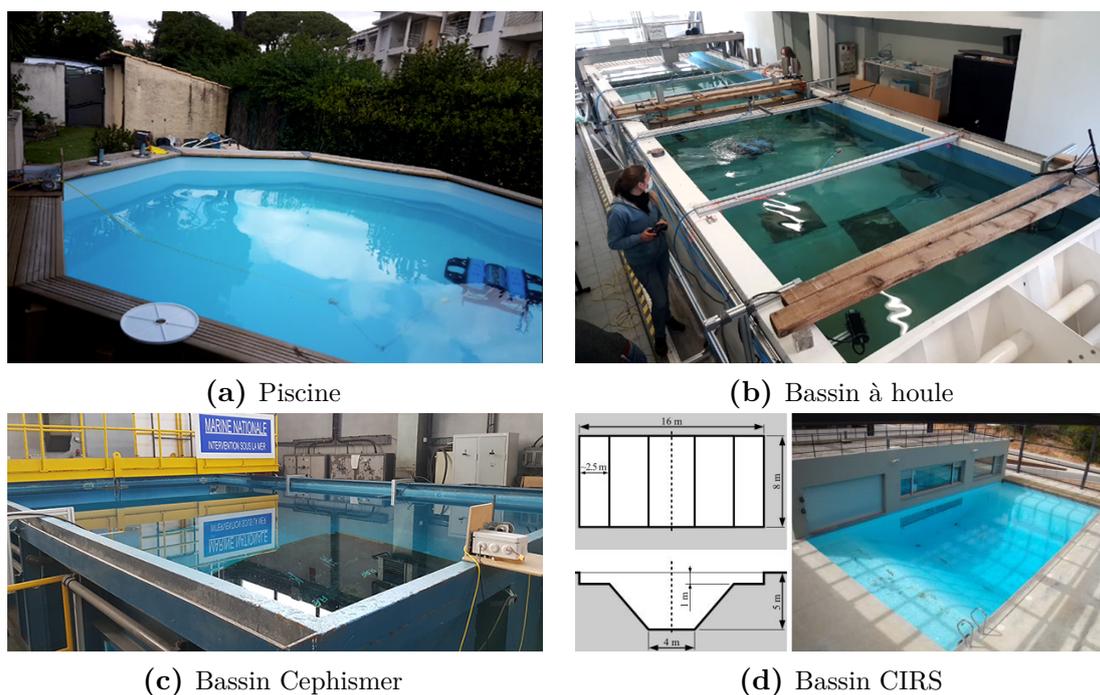


Figure V.3 – Bassins d'expérimentations

1. Des tests ont été effectués dans une petite **piscine** de 4 m de diamètre et 1,3 m de profondeur entre janvier et juin 2021 (figure V.3a). Grâce à sa facilité d'accès, de nombreux essais ont été effectués afin de déboguer, d'effectuer les premières mesures et de régler les paramètres du système.
2. Quelques tests de debug et réglages ont aussi été menés dans le **bassin à houle de l'Université de Toulon** en novembre 2020 et 2021 et avril 2021. Il s'agit d'un bassin de 2,8 m × 10 m avec une profondeur de 1 m (figure V.3b). Cependant, il était occupé par d'autres expérimentations en cours, ne laissant accès qu'à une partie de sa longueur. Son générateur de vagues n'a pas été utilisé lors des expérimentations.
3. En mars et mai 2021, la **Cephismer** nous a offert plusieurs semaines d'accès à son bassin d'entraînement. Ce bassin fait 7,2 m × 4,2 m avec une profondeur allant de 1,2 m à 3 m, avec une petite fenêtre d'observation dans un coin (figure V.3c). Nous avons donc pu commencer les expérimentations du système global avec un champ de travail plus important.

- Enfin, en juin 2021, nous avons eu accès pendant une semaine au **bassin du laboratoire CIRS** (Underwater Robotics Research Center) à Gérone dans le cadre d'un projet Européen TNA (TransNational Access). Ces installations ont l'avantage d'offrir une pièce avec vue sous-marine du bassin aux dimensions importantes de $16\text{ m} \times 8\text{ m}$ avec une profondeur entre 2,4 m et 5 m (figure V.3d). Le système a alors été testé sur des trajectoires plus longues que dans les autres bassins.

Système de suivi de mouvement par caméras Qualisys

Afin d'obtenir une vérité terrain lors des expériences, le système de *motion-tracking* Qualisys a été employé pour mesurer les mouvements du BR2 et du câble. Le système Qualisys disponible au laboratoire emploie des caméras optiques sous-marines de type *Miquis M5u* bénéficiant d'un angle de vue de $51^\circ \times 51^\circ$, d'une résolution de 2048×2048 (4 MP) et d'une distance de mesure maximale de 17 m avec une fréquence de 180 images par secondes. Elles fonctionnent par l'éclairage avec des LEDs bleues de marqueurs réfléchissants placés sur le ROV et le câble, comme on peut les voir sur la figure V.4.

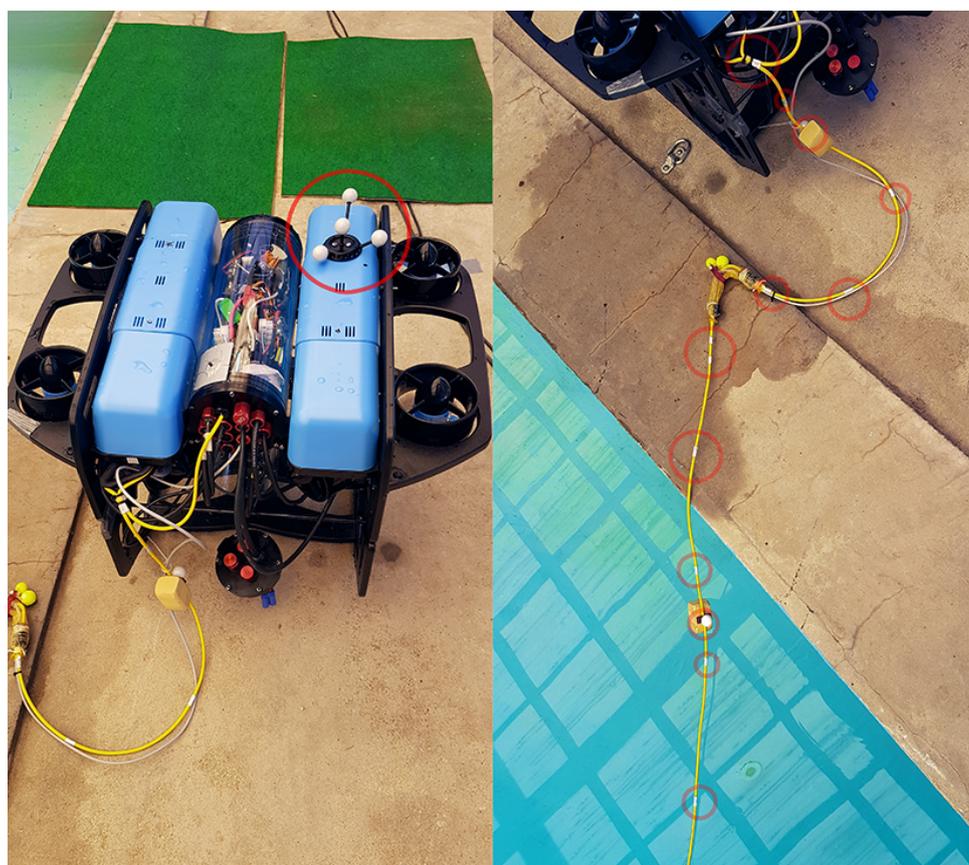


Figure V.4 – Marqueurs pour suivi de mouvement placés sur le ROV et sur le câble

Avant les expérimentations, les caméras sont calibrées à l'aide d'une mire statique et d'une mire qui est déplacée dans le champ d'observation. La mire statique (en L) sert de repère de référence global lors de tous les enregistrements. Les données sont enregistrées depuis le logiciel Qualisys Track Manager (QTM), qui est contrôlé depuis un ordinateur

dédié lors des expériences. Ce logiciel détermine la position en trois dimensions (3D) de chacun des marqueurs à partir de leur détection par plusieurs caméras. Lorsqu'un marqueur est détecté durant une certaine période, une trajectoire est automatiquement créée. Les données étant horodatées, ces trajectoires fournissent la vitesse et l'accélération des marqueurs en plus de leur position dans le repère global. La fonctionnalité de communication en temps réel entre QTM et ROS n'a pas été exploitée lors des expériences, toutes les données ont donc été exploitées en post-traitement. Un corps rigide est appliqué sous QTM aux marqueurs correspondant au BR2. De cette façon, dès qu'au moins trois marqueurs de ce corps sont détectés, son orientation dans le repère global est obtenue. La figure V.5 illustre une vue 3D dans QTM des marqueurs du BR2, du câble et de la position des caméras de mesure.

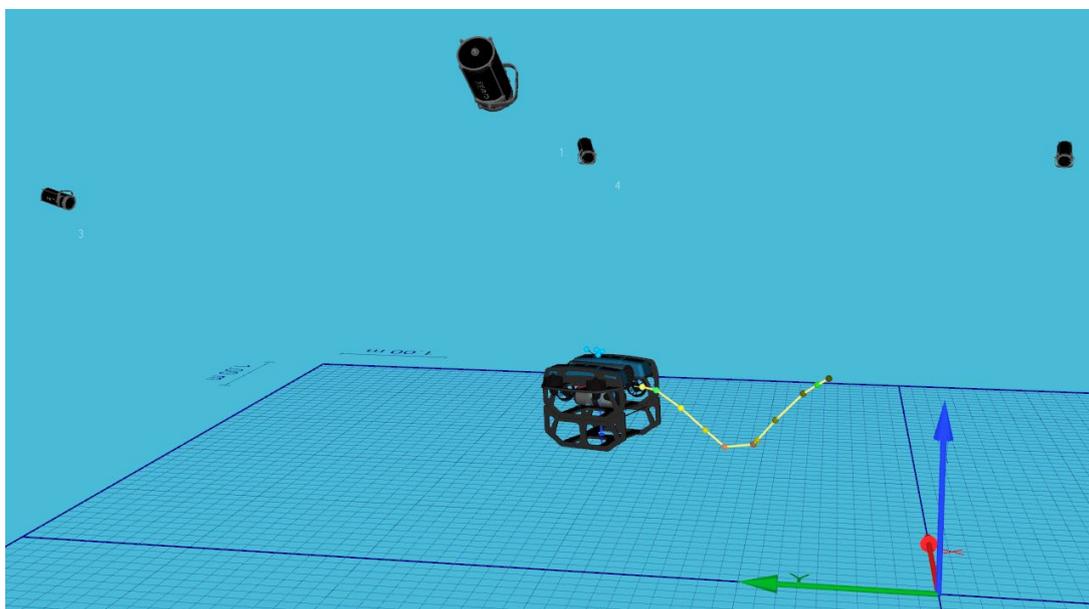


Figure V.5 – Vue 3D dans QTM des marqueurs du BR2, du câble et de la position des caméras de mesure

Ce système est très pratique en phase de développement et tests, pour obtenir des données de position et de vitesse des différents éléments sans les instrumenter avec des capteurs supplémentaires, ou pour comparer les données des capteurs avec cette mesure extérieure. Cependant, le champ de déplacements du système étudié est limité par la présence des caméras (le ROV ne doit pas trop s'en approcher pour ne pas risquer de les heurter) et par la nécessité de conserver les marqueurs dans une zone couverte par plusieurs caméras. Nous avons utilisé jusqu'à cinq caméras dans un bassin mais une meilleure précision de détection aurait été obtenue avec un nombre plus élevé de caméras. De ce fait, le BR2 ou le système amorti n'étaient pas toujours détectés tout au long de chaque expérience. La précision de positionnement des marqueurs est renseignée par QTM sous la forme de résidus. Celle-ci était de l'ordre de 1,3 mm pour les points 3D pour le corps rigide du BR2, avec un minimum de 0,9 mm et un maximum de 10 mm pour celui-ci.

V.2.2 Analyse du comportement du système réel

Différentes séries d'expériences du système décrit en section V.1 ont eu lieu dans les bassins décrits en section V.2.1. Les différents éléments du système et leur contrôle ont été validés par étapes. Le pilotage du BR2 seul a été validé en parallèle du comportement du système amorti et du capteur de courbure. Le contrôle du câble par l'enrouleur a alors été intégré, d'abord sans contrôle du ROV, puis avec un pilotage au joystick et finalement en exécutant des trajectoires pré-enregistrées. Pour cela, en absence d'USV, l'enrouleur a été fixé au bord du bassin.

Les résultats expérimentaux, présentés dans les sections qui suivent, sont constitués d'observations en temps réel et de l'analyse qualitative et quantitative des données des différents capteurs et messages ROS, à savoir :

- Vidéos des expériences : filmées avec des appareils numériques depuis la surface ou sous l'eau (fenêtres sur les côtés des bassins ou caméras étanches)
- Données QTM : positions, orientations, vitesses et accélérations du BR2 et du câble
- Messages ROS :
 - Données de mesures du capteur de courbure : valeur brute et estimation de l'écart entre les flotteurs
 - Données de mesures et consignes de l'enrouleur : longueur de câble déroulée, vitesse de déroulement consigne et réelle
 - Données de mesures et consignes du BR2 : l'étude se concentre sur l'exploitation des consignes de poussée envoyées au BR2 et sa profondeur (capteur de pression) bien que d'autres données soient disponibles.

Evaluation du comportement du système de compliance passive dans l'eau

Ces essais avaient pour objectif d'évaluer le comportement du système amorti passif lors de déplacements du BR2 dans l'eau. Pour réaliser ces objectifs, le système *Qualisys* a été installé dans le bassin de la Cephismer.

La raideur du système amorti a été évaluée en maintenant le ROV en position statique et en tendant le câble puis en le relâchant brusquement avec beaucoup de mou. Le temps de retour à la position d'équilibre du système amorti et l'écart entre les flotteurs ont été observés à partir des vidéos, du système de *motion-tracking* (figure V.6) et des données du capteur de courbure (figure V.7). Dans cette configuration, le système amorti se stabilise à un écart entre les flotteurs de 0,42 m après avoir été tendu (à 1,19 m), avec un temps de réponse à 5 % de 2,85 s.

Un modèle de la distance entre les flotteurs en fonction des données du capteur de courbure avait aussi été déterminé à partir des données de cette expérience. Cependant il ne s'agit pas du modèle présenté en section III.3.2 car les pièces de fixation du capteur au câble ont été modifiées après cette série d'expérience, ce qui modifie le comportement du capteur.

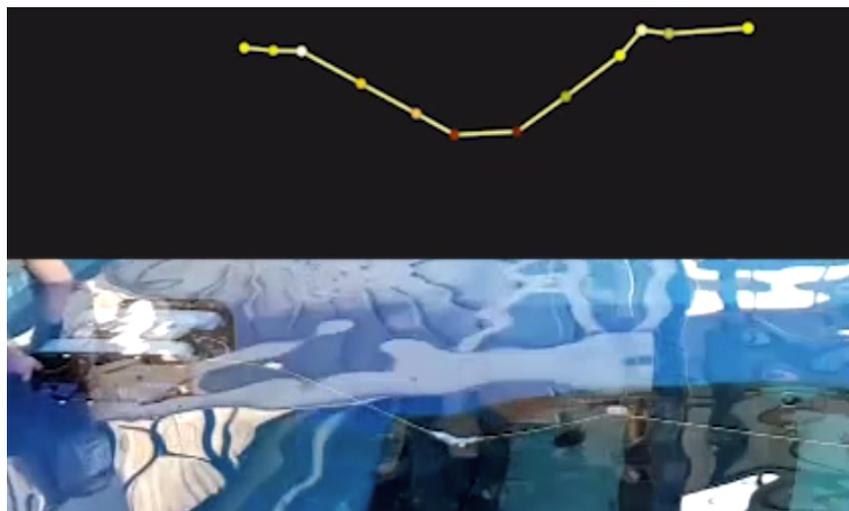


Figure V.6 – Comportement du système amorti passif observé par vidéo et par suivi de ses marqueurs avec le système Qualisys. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/bryO1E7HKZU>)

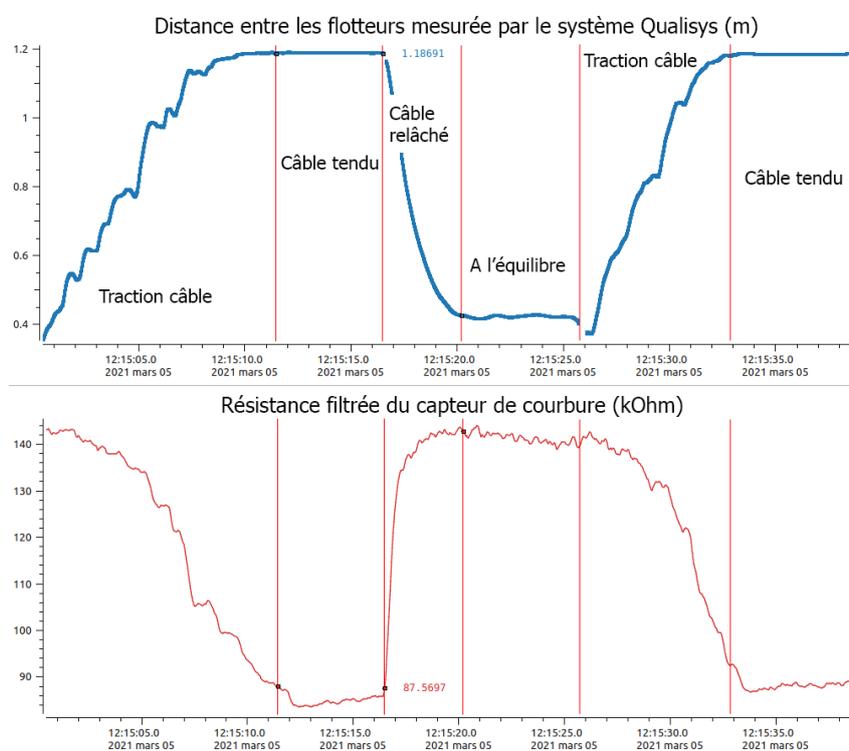


Figure V.7 – Courbe de l'écart entre les flotteurs et de la résistance du capteur de courbure du système amorti passif

Apports du système de compliance passive

Cette section vise à comparer le comportement du système global avec ou sans le système de compliance passive instrumentant le câble. Afin de comparer le comportement de ces deux configurations, il est nécessaire de répéter des expériences dans des conditions similaires. Le pilotage manuel du BR2 au joystick ne répondant pas à ce critère, des trajectoires ont été définies et programmées pour être reproduites lors des expériences. La figure V.8 présente les trois trajectoires utilisées pour les essais de mai 2021. Toutes ces trajectoires ont été associées à un contrôle en profondeur du BR2. Elles ont été définies pour

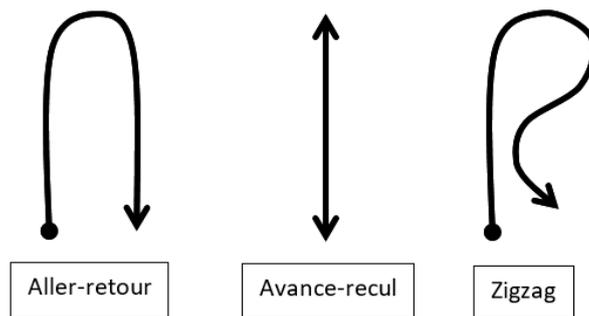


Figure V.8 – Trajectoires du ROV définies pour les expériences de mai 2021

illustrer des portions de trajectoires courantes, rectilignes et incurvées, lors de l'utilisation de robots sous-marins, pour lesquelles le contrôle du câble devrait jouer un rôle important par rapport à un risque élevé d'accroche ou d'emmêlement du câble.

- La première trajectoire correspond à un aller-retour du ROV : il avance en ligne droite, effectue un demi-tour puis revient en ligne droite.
- Pour la seconde trajectoire, le ROV avance puis s'arrête avant d'effectuer une marche arrière.
- La troisième trajectoire a été définie en zigzag, de sorte que, sur le retour, le ROV se rapproche de la trace de sa trajectoire en avancée, probablement occupée par le câble.

A partir de ces trajectoires définies, l'évaluation du système s'effectue par la mesure de la vitesse du ROV et de ses trajectoires réelles, grâce au système *Qualisys* et par l'observation directe du comportement du câble et du système amorti. La première étape était donc d'ajuster ces trajectoires de façon à ce qu'elles soient entièrement dans la zone couverte par les caméras de suivi.

L'objectif était d'évaluer le comportement du système pour différentes configurations. Celui-ci a été comparé dans les configurations du câble non instrumenté (avec beaucoup de mou) d'une part et instrumenté avec le système de compliance passive d'autre part (sans contrôle de l'enrouleur). Le tableau V.1 récapitule les séries d'expériences lors des essais de mai 2021.

Les figures V.9, V.10a et V.10b présentent les traces des trajectoires observées vues de dessus dans ces deux configurations pour ces trois trajectoires pré-définies. Les courbes du bas sur ces figures représentent les consignes de déplacement envoyées au ROV. Il ne s'agit pas de consignes en vitesse (le BR2 n'étant pas asservi en vitesse) mais de taux (entre -1

| Série | Trajectoire | Configuration du câble |
|-------|--------------|------------------------------------|
| 1 | Aller-retour | Avec système de compliance passive |
| 2 | Avance-recul | Avec système de compliance passive |
| 3 | Zigzag | Avec système de compliance passive |
| 4 | Aller-retour | Non instrumenté |
| 5 | Avance-recul | Non instrumenté |
| 6 | Zigzag | Non instrumenté |

Tableau V.1 – Récapitulatif des séries d’expériences de mai 2021

et 1) de propulsion sur chacun des axes. Des points caractéristiques de ces trajectoires, qui correspondent à un changement de consigne envoyée au ROV, sont indiqués pour fournir des repères sur les courbes des consignes et les traces formées par les trajectoires effectuées du ROV. Sur les graphiques, les trajectoires ont été superposées entre elles au point 1 afin de faciliter leur comparaison. En effet, la position de départ exacte du ROV n’est pas connue (il est en dehors du champ de mesure du système *Qualisys* au début de son mouvement).

Pour la trajectoire d’aller retour (figure V.9), on constate que la rotation du ROV est limitée lorsque son câble est équipé du système de compliance passive : l’angle de rotation est plus faible et la distance parcourue plus faible. En revanche, sur le retour, lorsque le ROV se rapproche de son point de départ, la distance parcourue est sensiblement la même.

Les traces des déplacements du ROV observées avec la trajectoire d’avance-recul sont sensiblement les mêmes pour les deux configurations (figure V.10a), en dehors d’une légère déviation du ROV vers la gauche lorsque le câble est équipé du système de compliance passive. Pour cette trajectoire, le déplacement du ROV entre les points 1 et 2 est dû uniquement à son inertie, étant donné que sa consigne de propulsion est nulle à ce moment. Ce déplacement est de 0,47 m avec le câble non instrumenté et de 0,44 m avec le système de compliance passive. Cela montre que la raideur du système amorti freine peu le ROV.

Pour la trajectoire en zigzag (figure V.10b), la trace observée du ROV est légèrement convexe avec le câble instrumenté et légèrement concave avec le câble non instrumenté sur la portion où le ROV a une consigne d’avance en ligne droite (avant le point 1). L’angle de rotation entre les points 1 et 2 est moins important avec le système de compliance passive que sans. Les distances parcourues sont sensiblement les mêmes.

En résumé, on constate que lorsque le câble est équipé du système de compliance passive, il a une déviation vers la gauche : lorsqu’il est censé avancer en ligne droite, il dévie légèrement vers la gauche et lorsqu’il est censé tourner vers la droite, son angle de rotation est plus faible. Cela s’explique simplement par le fait que le câble est fixé au coin arrière gauche du ROV et que son système de compliance passive entraîne une tension supérieure sur le ROV que le câble non instrumenté lorsque sa longueur est suffisante.

Par ailleurs, la consigne du ROV suivant l’axe vertical, qui est déterminée par son asservissement en profondeur, est visiblement impactée par la configuration pour les trajectoires d’avance-recul et de zigzag. Une fois sa profondeur consigne atteinte, le ROV est plus stable en profondeur avec le système de compliance passive qu’avec le système non instrumenté, ce qui est illustré par une consigne suivant l’axe vertical qui tend vers 0

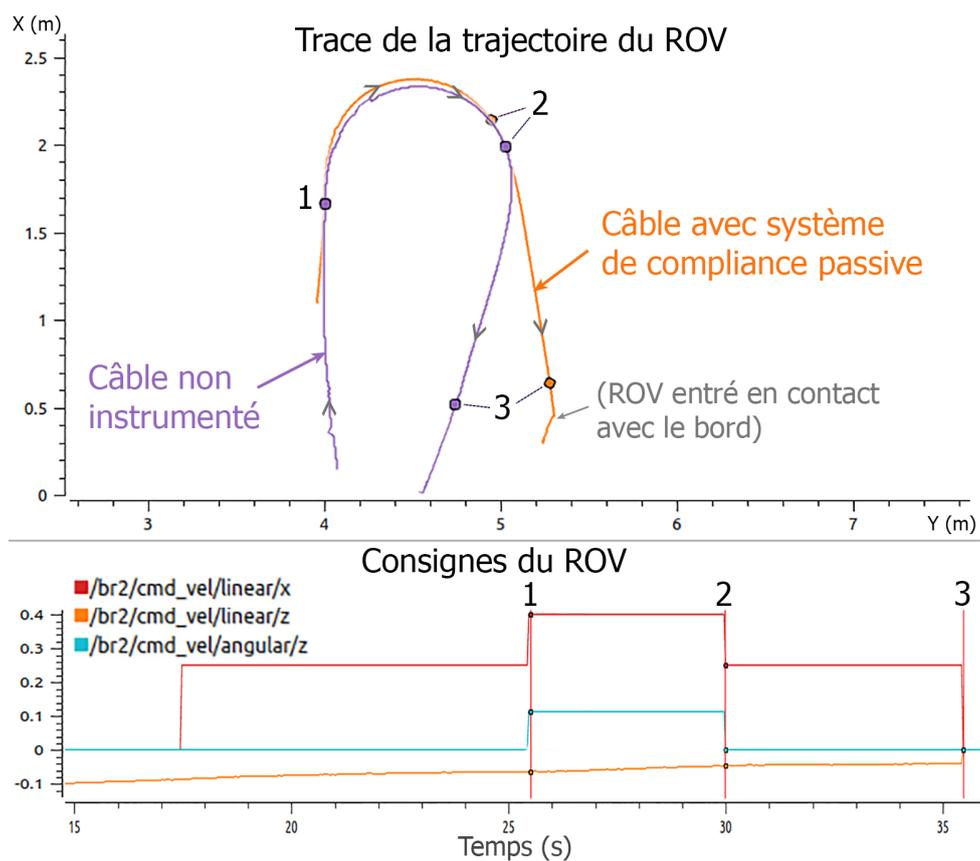
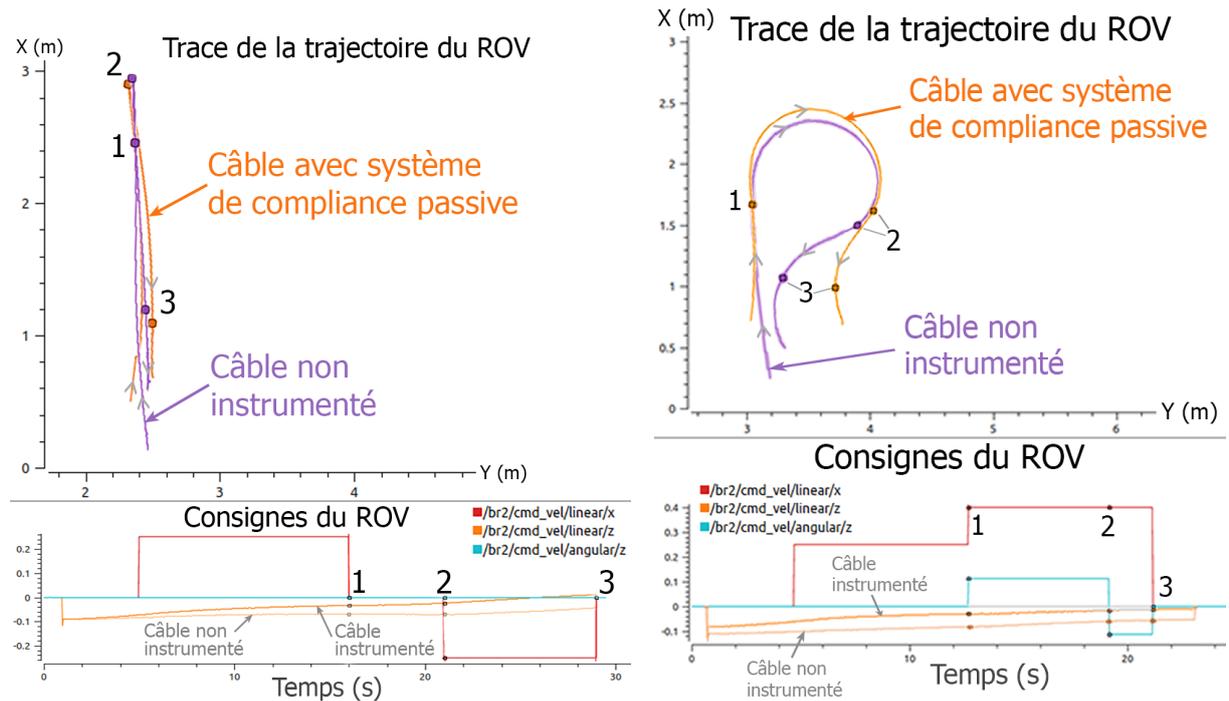


Figure V.9 – Trajectoire réelle d’aller-retour du ROV vue de dessus avec le câble non instrumenté et le câble équipé du système de compliance passive. (Vidéos disponibles à ces liens : <https://youtu.be/jca4o0Sd6zM>, pour le câble instrumenté et <https://youtu.be/mH-efBfEvvI>, pour le câble non instrumenté.)



(a) Trajectoire d'avance-recul. (Vidéos disponibles à ces liens : <https://youtu.be/Ppf6XwClSiw>, pour le câble instrumenté et <https://youtu.be/B4jBcIX0Wnw> pour le câble non instrumenté.)

(b) Trajectoire de zigzag. (Vidéos disponibles à ces liens : <https://youtu.be/4XR-CLVEfCM>, pour le câble instrumenté et <https://youtu.be/UnP4JPPpIU68> pour le câble non instrumenté.)

Figure V.10 – Trajectoires réelles du ROV vues de dessus avec le câble non instrumenté et le câble équipé du système de compliance passive

sur les figures V.10a et V.10b.

Enfin, il a été observé lors des expériences que le câble non instrumenté forme de multiples boucles lorsqu'il n'est pas tendu et que le ROV revient au milieu de cet amas de câble à la fin de sa trajectoire de zigzag. Le risque que le ROV s'emmêle dans le câble lorsqu'il n'est pas du tout tendu apparaît évident.

Le système de compliance passive impacte donc légèrement les trajectoires du BR2 dans le plan horizontal mais semble contribuer à la stabilité de sa profondeur. Les déviations observées sont limitées et pourraient facilement être corrigées par un contrôle adapté du ROV.

Apports de la compliance active

Une fois les apports de la compliance passive étudiés, les apports du contrôle actif de ce système de compliance ont été étudiés. Pour ces essais, le nombre de trajectoires a été réduit à deux trajectoires, présentées sur la figure V.11. En effet, les trajectoires précédentes d'aller-retour et de zigzag étaient assez similaires et ont donc été combinées en une nouvelle trajectoire curviligne en forme de S. La trajectoire rectiligne d'avance-recul a été conservée.

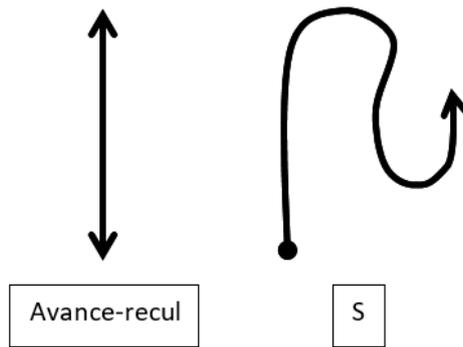


Figure V.11 – Trajectoires du ROV définies pour les expériences de juin 2021

Ces essais ont consisté à observer le comportement du système avec le câble instrumenté dans trois modes :

- Câble contrôlé par l'enrouleur de façon automatique en fonction des données du capteur de courbure intégré au système de compliance passive.
- Câble non contrôlé avec assez de marge de câble.
- Câble non contrôlé en partant tendu. Le câble est monté sur l'enrouleur qui autorise son déroulement de manière passive, avec une légère résistance, et qui mesure sa longueur déroulée en continu. Le câble n'est pas enroulé au cours de l'essai.

| Série | Trajectoire | Mode |
|-------|--------------|---------------------|
| 1 | Avance-recul | Contrôle enrouleur |
| 2 | Avance-recul | Passif avec mou |
| 3 | Avance-recul | Passif départ tendu |
| 4 | S | Passif avec mou |
| 5 | S | Non instrumenté |
| 6 | S | Passif départ tendu |

Tableau V.2 – Récapitulatif des séries d'expériences de juin 2021

Le tableau V.2 récapitule les séries d'expériences lors des essais de juin 2021, qui ont été effectués dans le bassin du CIRS à l'Université de Gérone, avec le système *Qualisys*. Les comparaisons entre les différents modes reposent principalement sur la trajectoire du BR2 mesurée par le système *Qualisys* et sur les mesures du capteur de courbure instrumentant le câble, en plus des observations, en direct et grâce aux vidéos, du comportement du système global.

Lors de ces essais, la longueur de câble était contrôlée en vitesse à partir d'un asservissement proportionnel sur la distance entre les flotteurs (le coefficient proportionnel était de 30 et la consigne entre 0,6 m et 0,7 m d'écart entre les flotteurs).

Trajectoire d'avance-recul Les consignes envoyées au ROV correspondant à la trajectoire d'avance-recul sont représentées sur la figure V.12. Une consigne d'avancée de 0,25 est envoyée pendant 15 s, entre les points 1 et 2, puis la consigne est nulle pendant 5 s entre les points 2 et 3, une consigne en marche arrière est alors envoyée pendant 10 s entre les points 3 et 4.

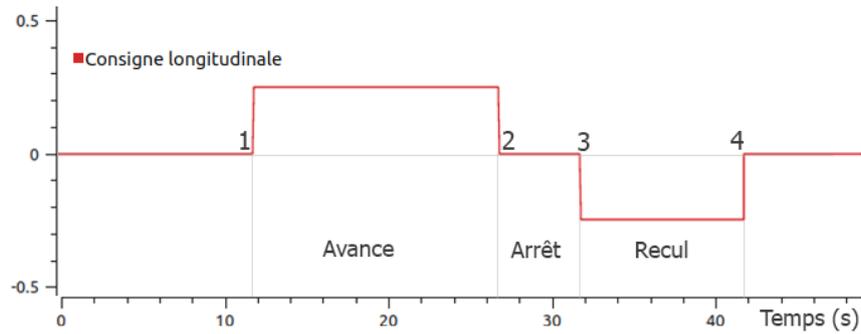


Figure V.12 – Consigne de propulsion envoyée au ROV pour la trajectoire d'avance-recul

Le comportement du contrôle du câble pour cette trajectoire est illustré sur les courbes de la figure V.13. Les courbes du haut correspondent à la distance entre les flotteurs du

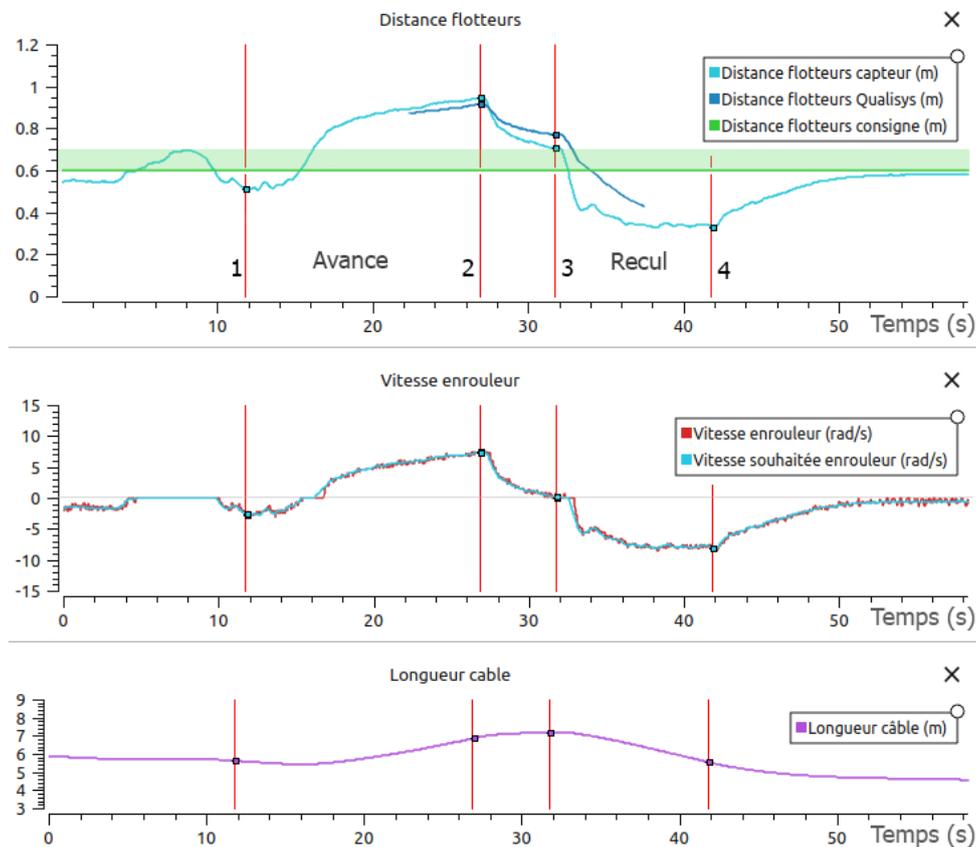


Figure V.13 – Comportement du contrôle du câble et du système de compliance pour la trajectoire d'avance-recul du ROV

système de compliance passive, mesurée avec le système de *motion-tracking* d'une part et à partir du capteur de courbure d'autre part. La distance consigne entre les flotteurs est aussi indiquée. Les courbes du milieu représentant la vitesse souhaitée de l'enrouleur pour contrôler la distance entre les flotteurs, ainsi que sa vitesse mesurée. Enfin, la courbe du bas correspond à l'évolution de la longueur de câble déployée par l'enrouleur. Les points caractéristiques de la trajectoire sont aussi indiqués sur ces courbes.

On constate sur ces courbes que la distance entre les flotteurs est bien maintenue proche de la plage d'écartement souhaitée lorsque le ROV n'a pas de consigne en vitesse (avant le point 1, entre les points 2 et 3 et après le point 4). Lorsque le ROV a une consigne d'avance (entre les points 1 et 2), la distance entre les flotteurs devient plus grande que souhaité mais reste toutefois limitée grâce au déroulement du câble. Lorsque le ROV recule (entre les points 3 et 4), la distance entre les flotteurs diminue, déclenchant l'enroulement du câble. L'écartement des flotteurs atteint donc un pallier avant qu'ils ne se touchent.

Par ailleurs, on observe une légère différence entre la mesure de la distance entre les flotteurs à partir du capteur de courbure et leur mesure par le système *Qualisys*. Ces deux mesures sont identiques lorsque la distance est de 0,9 m mais la mesure à partir du capteur de courbure devient plus grande que celle du système de suivi de mouvements pour les distances supérieures à 0,9 m et plus faible pour les distances inférieures à 0,9 m.

Quelques vues du système global à différentes étapes de la trajectoire d'avance-recul sont visibles sur la figure V.14. On y voit que le câble conserve une longueur déroulée cohérente avec la distance entre le BR2 et l'enrouleur. Ce dernier contrôle bien le câble de façon à ce qu'il ne soit ni trop tendu lorsque le ROV avance, ni trop lâche lorsqu'il recule.

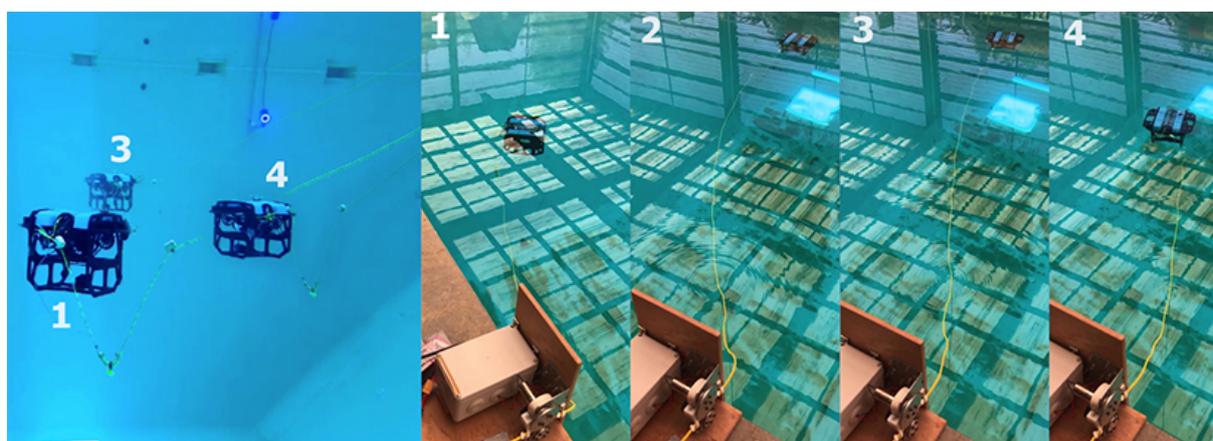


Figure V.14 – Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire d'avance-recul lorsque le câble est contrôlé. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/owekUkN_UtM)

Les positions et vitesses du BR2 relevées grâce au système *Qualisys* sont présentées sur la figure V.15. Les courbes en haut à gauche correspondent à la position du BR2 dans le repère global du bassin. Les courbes en haut à droite correspondent à sa vitesse dans le repère global, obtenue à partir de la dérivée de ses positions. Celle-ci est assez bruitée du fait que le ROV ne soit pas toujours bien tracké par le système de suivi de mouvements. Les courbes en bas à gauche correspondent aux orientations du BR2 dans le repère global. Pour cette trajectoire, les trois angles devraient en théorie être constants. Cependant, on constate une diminution de l'angle de lacet au cours de la trajectoire, ce qui correspond à une rotation du BR2 vers sa gauche (l'axe \vec{Z} étant orienté vers le bas). Cette déviation est d'environ 54° . Celle-ci est due à la traction du câble sur le ROV au niveau de son point d'attache, qui se situe à l'arrière gauche du BR2. Il est à noter que lors de ces essais la position de départ du BR2 n'était pas dans l'alignement de l'enrouleur mais à environ 3 m sur sa gauche (comme on peut le voir sur la figure V.14), ce qui influence le sens de traction du câble. Les angles de tangage et de roulis admettent par ailleurs un pic

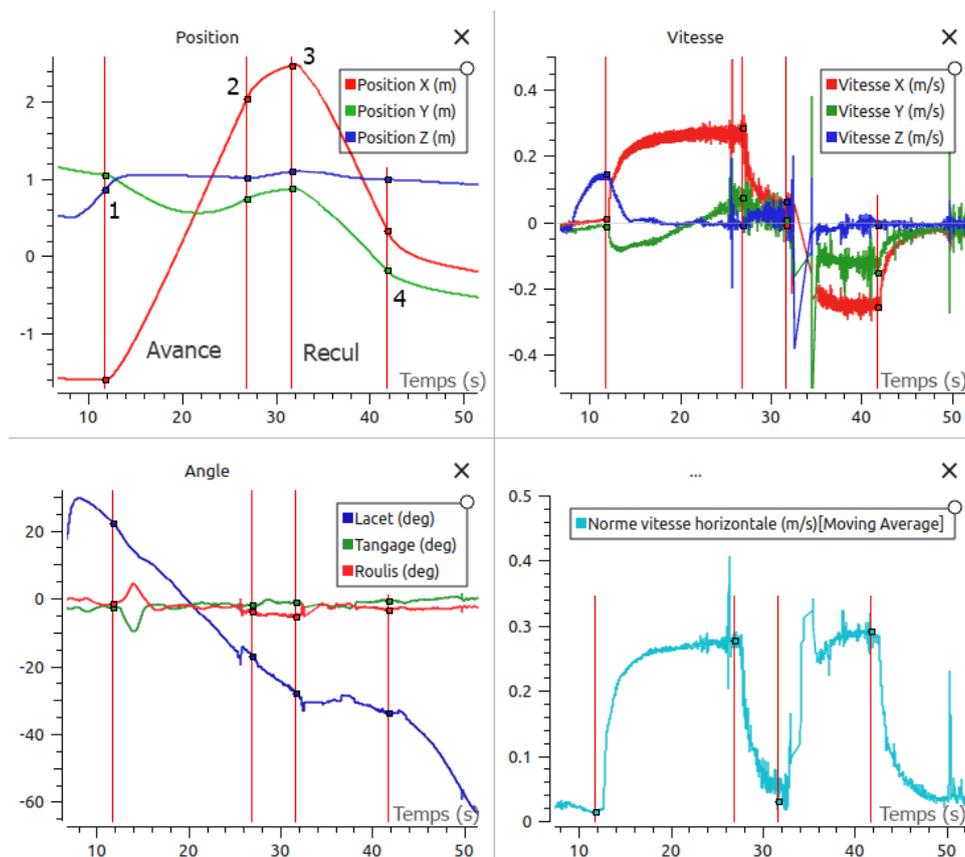


Figure V.15 – Positions et vitesses du BR2 au cours de la trajectoire d’avance-recul lorsque le câble est contrôlé

d’environ 7° lorsque le BR2 accélère pour débuter son avance. La courbe en bas à droite représente la norme de la vitesse horizontale du BR2, calculée à partir des vitesses suivant les axes \vec{X} et \vec{Y} .

Le comportement du système global avec contrôle du câble a alors été comparé pour cette trajectoire au comportement du système lorsque le câble n’est pas contrôlé.

La figure V.16 présente le comportement du système de complianc dans les trois configurations étudiées. Les courbes du haut correspondent à la distance entre les flotteurs estimée à partir du capteur de courbure, celles du milieu correspondent à la vitesse de déroulement du câble mesurée par l’enrouleur et les courbes du bas correspondent à la longueur de câble déroulée, calculée à partir des données de de l’enrouleur.

Pour le câble non contrôlé tendu, celui-ci a été manuellement enroulé au début de l’essai afin de limiter au maximum sa longueur. Lorsque le BR2 avance (entre les points 1 et 2), la distance entre les flotteurs atteint rapidement son maximum (1,2 m) dans cette configuration. La tension du câble sur l’enrouleur déroule alors du câble de manière passive, augmentant sa longueur. Lorsque le ROV recule (entre les points 3 et 4), la longueur de câble reste identique, la distance entre les flotteurs diminue donc et atteint un minimum de 10 cm (limite du modèle basé sur le capteur de courbure). En réalité, on constate que les flotteurs se croisent, entraînant une torsion du câble, comme on peut le voir sur la figure V.17 (point 4), avant de revenir dans le plan, avec une distance très faible, lorsque

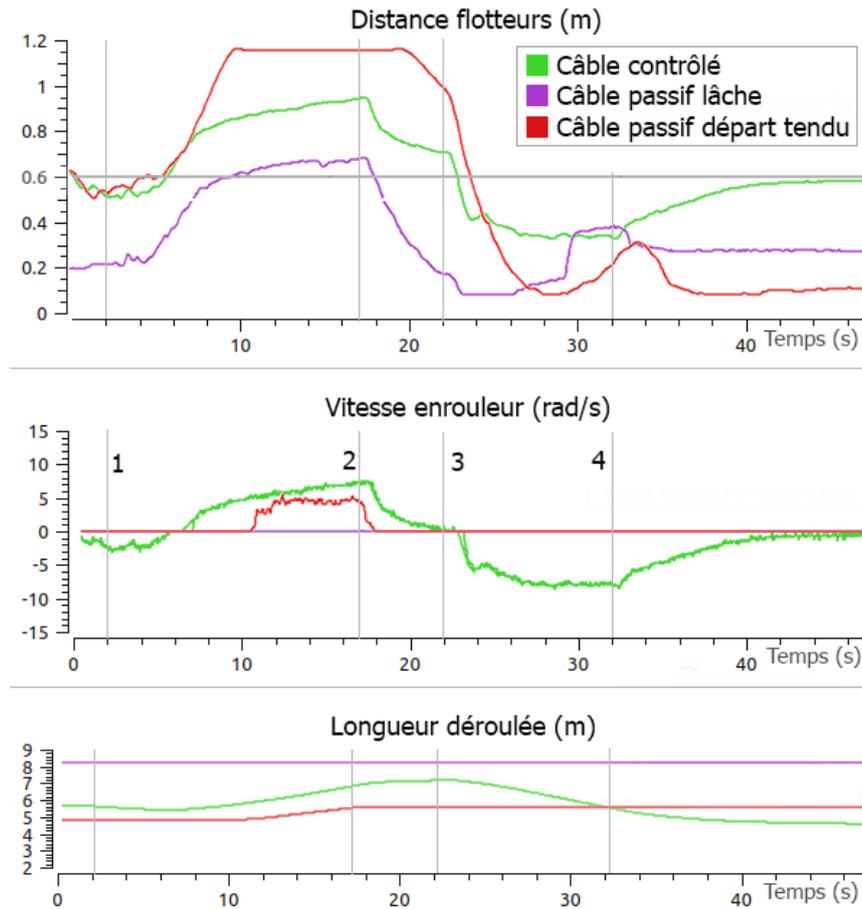


Figure V.16 – Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non

le ROV s'arrête.

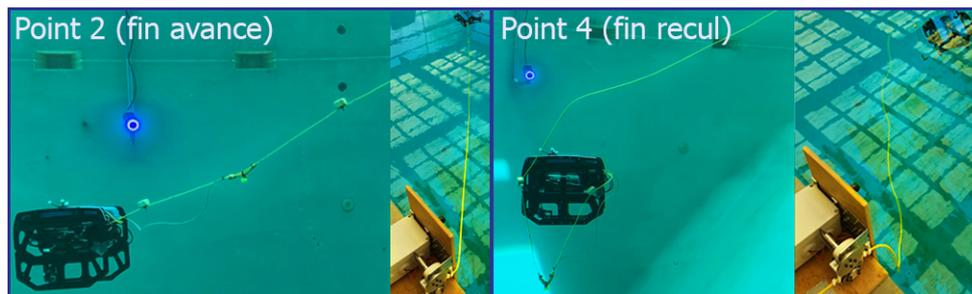


Figure V.17 – Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire d'avance-recul lorsque le câble n'est pas contrôlé avec un départ tendu. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/1RTT23-USDY>.)

Pour le câble lâche non contrôlé, une longueur importante de câble (un peu plus de 8 m) a été déroulée manuellement avant l'essai. Cette longueur est restée constante tout au long de l'essai, la vitesse de l'enrouleur étant donc nulle comme on peut le voir sur la figure V.16. Avant le départ du ROV, la distance entre les flotteurs était à l'équilibre à 0,2m. A l'accélération du BR2, la distance augmente rapidement jusqu'à atteindre

environ 0,7 m lorsque le BR2 atteint sa vitesse de croisière d'environ 0,25 m/s, comme cela avait été anticipé en simulation (figure III.25). Cette augmentation de la distance entre les flotteurs alors qu'assez de câble est disponible est due à l'amortissement du système compliant. Lorsque le ROV s'arrête (entre les points 2 et 3), cette distance diminue jusqu'à sa position d'équilibre. Lorsque le ROV recule (entre les points 3 et 4), il pousse le système compliant derrière lui, rapprochant encore plus les flotteurs. Une portion libre de câble se retrouve en contact avec un propulseur à l'arrière du ROV et le bas du système compliant se retrouve en dessous du ROV, comme on peut le voir sur la figure V.18. L'augmentation de la distance entre les flotteurs observée sur la figure V.16 à la fin de cette étape (juste avant le point 4) correspond à une torsion du câble.

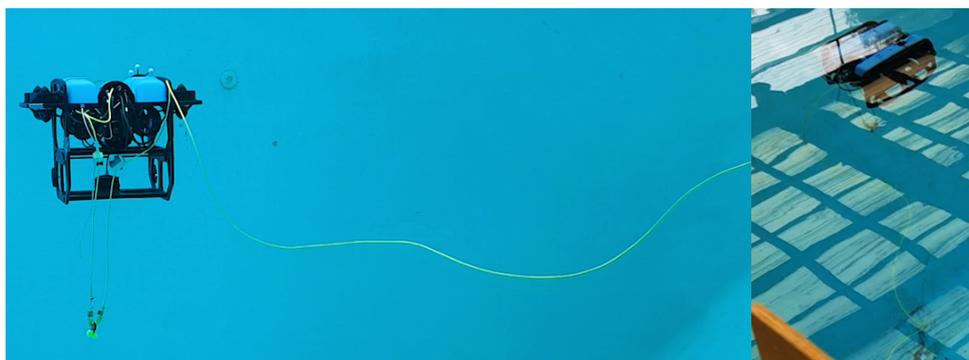


Figure V.18 – Vue du système à la fin de la marche arrière du ROV lorsque le câble est lâche (non contrôlé). (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/FG5iyNfjzck>.)

Lorsque le câble n'est pas contrôlé, qu'il soit tendu ou lâche, la distance entre les flotteurs atteint des extremums qui sont limités avec le contrôle du câble.

On observe alors l'impact du contrôle ou non du câble sur la trajectoire réelle effectuée par le BR2 pour une même consigne de propulsion. La figure V.19 présente les traces, vues du dessus, des trajectoires du BR2 mesurées par le système *Qualisys* dans les trois configurations étudiées. Ces traces ont été superposées au niveau du point 2 sur la figure afin de les comparer plus facilement. Sans aucune perturbation extérieure, la trace du ROV pour cette trajectoire devrait être une simple ligne droite. On constate une légère déviation du ROV vers la gauche lors de son avance pour le câble passif avec du mou. Cette déviation est un peu plus importante avec le câble contrôlé et est observée à la fois lors de son avance et lors de sa marche arrière. Cette déviation correspond à la variation de 54° de l'angle de lacet du BR2 déjà soulignée sur la figure V.15. Celle-ci est nettement plus grande avec le câble tendu, approchant les 90° . La distance parcourue par le BR2 est aussi nettement plus courte avec le câble tendu.

On observe alors l'évolution de la profondeur du BR2 au cours de la trajectoire d'avance-recul, dans les trois configurations étudiées. Cette profondeur était asservie à une valeur constante de 1,5 m tout au long des trajectoires. La profondeur du BR2 mesurée à partir de son capteur de pression interne ainsi que la consigne de propulsion verticale pour contrôler cette profondeur sont tracées sur la figure V.20 au cours de la trajectoire, pour chacune des trois configurations étudiées. On constate que la profondeur est bien maintenue proche de sa consigne lorsque le câble est contrôlé. En revanche, une erreur de l'ordre de 0,6 m sur la profondeur est observée avec le câble non contrôlé, tendu ou lâche. Les propulseurs

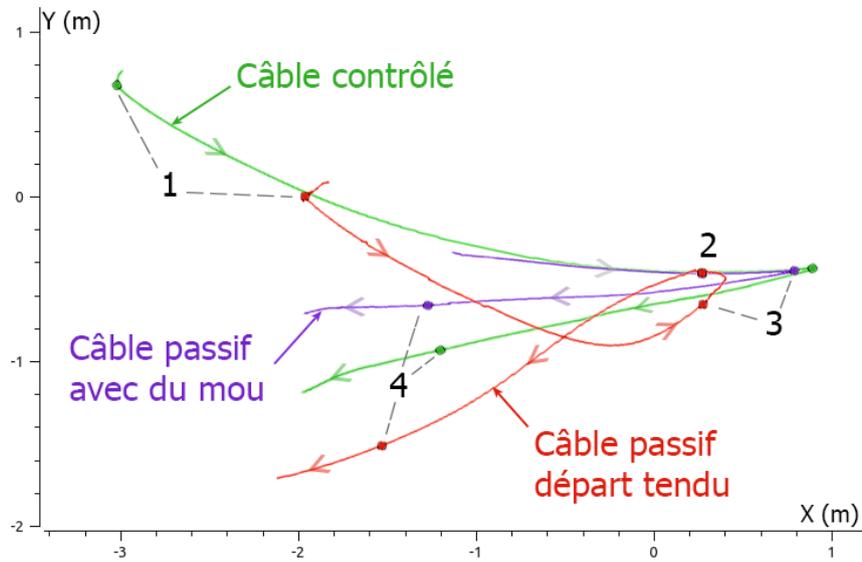


Figure V.19 – Trajectoires réelles d’avance-recul du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu

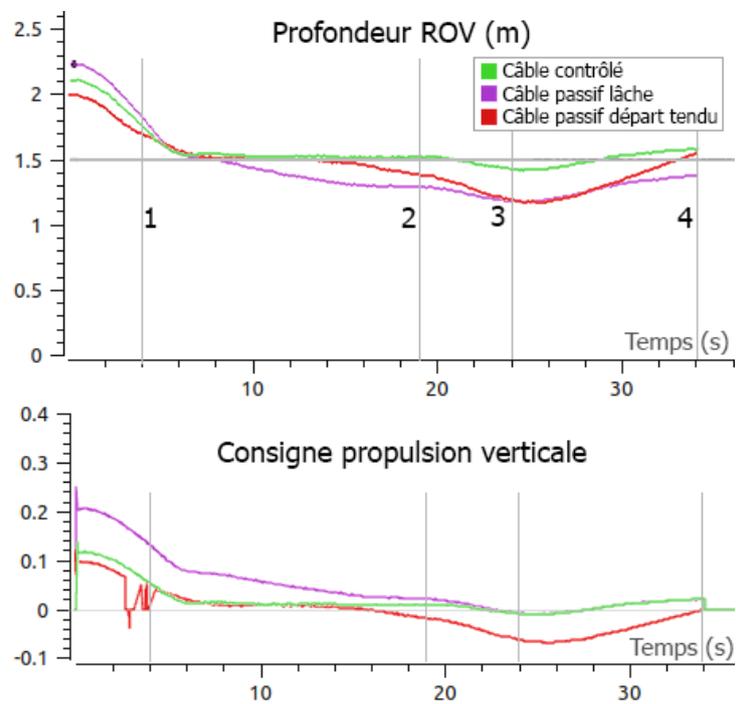


Figure V.20 – Trajectoires réelles d’avance-recul du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu

verticaux sont aussi nettement plus exploités lorsque le câble n'est pas contrôlé que lorsqu'il est contrôlé.

Trajectoire en S Les consignes envoyées au ROV correspondant à la trajectoire en S sont représentées sur la figure V.21. Une consigne d'avancée de 0,25 est envoyée pendant 15 s (entre les points 1 et 2) puis une consigne de lacet de 0,1125 est envoyée en parallèle d'une consigne d'avance de 0,4 pour effectuer un virage à droite pendant 6,5 s (entre les points 2 et 3), suivie d'un virage à gauche pendant 6 s (entre les points 3 et 4) et enfin d'une consigne d'avance de 0,25 envoyée pendant 4 s (entre les points 4 et 5).

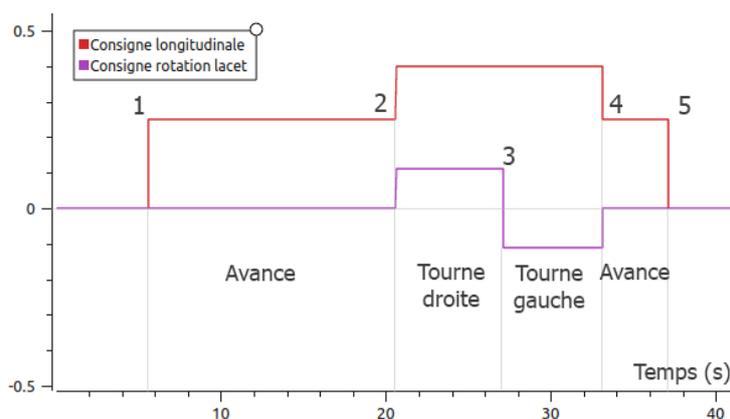


Figure V.21 – Consigne de propulsion envoyée au ROV pour la trajectoire en S

Le comportement du contrôle du câble pour cette trajectoire est illustré sur les courbes de la figure V.22. On observe, comme pour la trajectoire précédente, que les mesures de la distance entre les flotteurs à partir du capteur de courbure sont plus larges que celles du système *Qualisys*. Le modèle appliqué aux données du capteur de courbure semble donc exagérer légèrement les déformations du système. Cependant, cela ne gêne en rien le contrôle du système qui en devient d'autant plus réactif. En effet, la précision de mesure autour de la distance consigne est suffisante pour l'asservissement. Comme pour la trajectoire précédente, lorsque le ROV s'éloigne de l'enrouleur, la distance entre les flotteurs est supérieure à la distance consigne, malgré le contrôle du câble, mais la consigne est de nouveau approchée lorsque le BR2 se rapproche de l'enrouleur ou qu'il est à l'arrêt. Lorsque le BR2 commence à tourner à droite (entre les points 2 et 3), son accélération est importante et l'enrouleur atteint sa vitesse de déroulement limite, la distance entre les flotteurs atteint donc un maximum (de 1,2 m d'après les données du capteur de courbure mais 1,1 m d'après la mesure en *motion-tracking*).

Quelques vues du système global à différentes étapes de la trajectoire en S sont visibles sur la figure V.23. On y voit que le système de compliance conserve bien sa forme et une distance moyenne entre les flotteurs lors des virages du ROV.

Le comportement du système global avec contrôle du câble a alors été comparé pour cette trajectoire au comportement du système lorsque le câble n'est pas contrôlé. La figure V.24 présente le comportement du système de compliance passive dans les trois configurations étudiées. En mode passif tendu, la distance entre les flotteurs est presque toujours à son maximum et le câble est déroulé de manière passive (grâce à sa tension) à

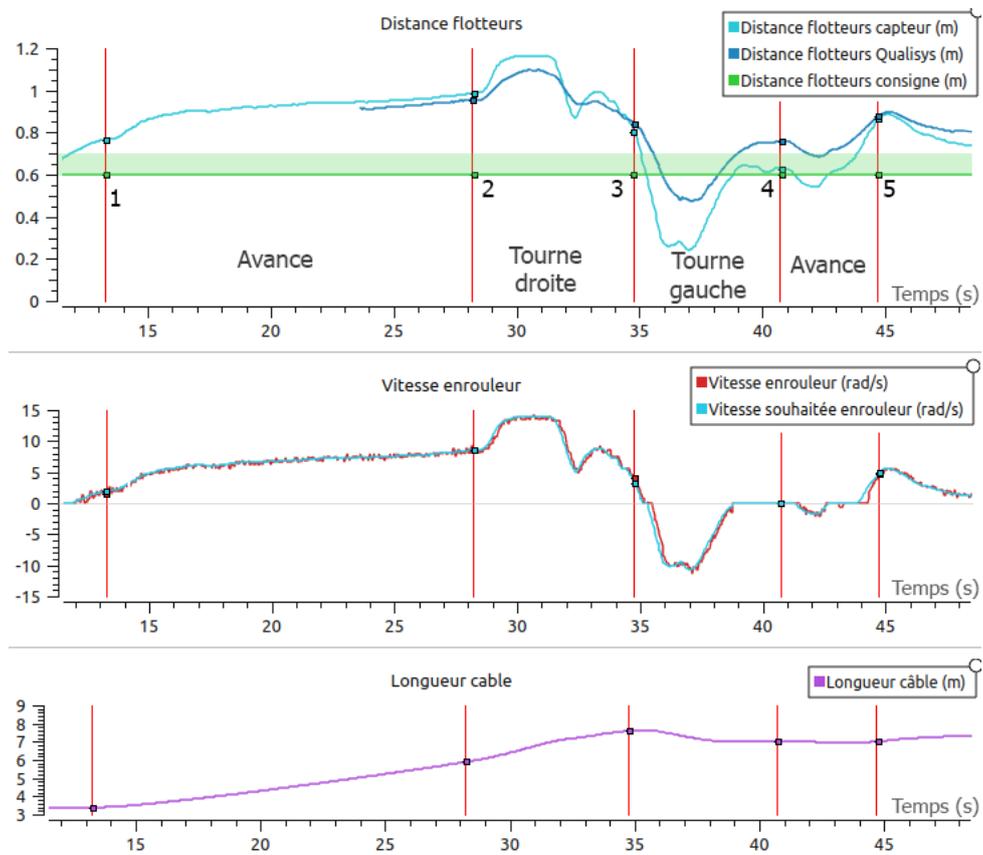


Figure V.22 – Comportement du contrôle du câble et du système de compliance pour la trajectoire en S du ROV

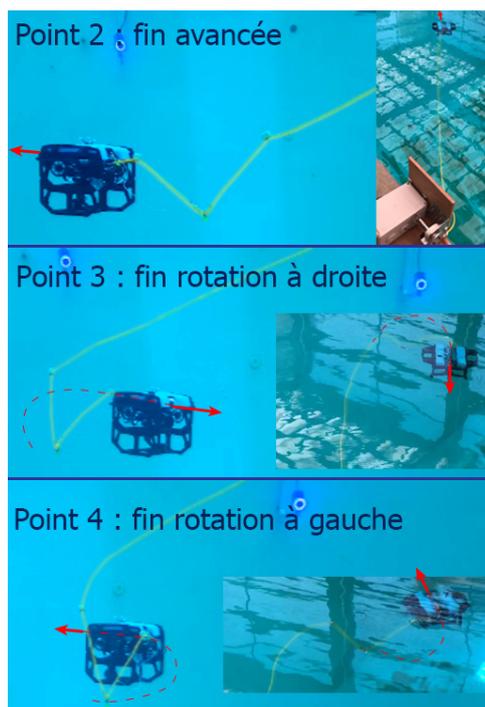


Figure V.23 – Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire en S lorsque le câble est contrôlé. Les flèches rouges indiquent le sens d’avancée du ROV. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/fy-JTc8PvIY>)

une vitesse légèrement inférieure à celle de déroulement du câble contrôlé. La longueur de câble reste inférieure en mode passif tendu à la longueur en mode contrôlé. En revanche, on constate que lorsque le BR2 s’éloigne de l’enrouleur, la distance entre les flotteurs est plus proche de la valeur souhaitée avec le câble lâche non contrôlé qu’avec le câble contrôlé. Ceci est dû au fait que la distance entre les flotteurs est beaucoup plus faible au départ avec le câble lâche non contrôlé qu’avec le câble contrôlé. Cela justifie l’intérêt d’anticiper les déplacements du ROV dans le contrôle du câble, en prenant par exemple en compte la vitesse consigne envoyée au ROV afin de ne pas attendre que le câble se tende pour réagir en distribuant du câble. Enfin, lorsque le BR2 s’arrête, le câble est bien enroulé pour atteindre la distance souhaitée entre les flotteurs avec le câble contrôlé, alors que cette distance reste très faible (environ 0,2 m) lorsque le câble n’est pas contrôlé, indiquant que le câble est trop lâche, ce qui augmente le risque d’emmêlements et d’accroches.

La figure V.25 présente l’évolution de l’angle de lacet du BR2 (mesuré avec le compas interne du BR2) au cours de la trajectoire en S dans les trois configurations étudiées. L’augmentation de cet angle correspond à une rotation à droite du BR2. La valeur de l’angle a été initialisée à 0° au début des trois trajectoires pour faciliter leur comparaison. Pour un système parfait sans aucune perturbation, cette valeur devrait être constante lors des consignes de ligne droite du BR2 (avant le point 2 et après le point 5). Elle devrait aussi être linéaire lors des consignes en rotation (entre les points 2 et 3 et 3 et 4). On constate une petite déviation d’une vingtaine de degrés à droite au cours de la première ligne droite du BR2 (d’une distance d’environ 2,6 m) pour le câble lâche non contrôlé. Cette déviation est orientée vers la gauche et sa valeur absolue est doublée avec le câble contrôlé et encore doublée avec le câble tendu non contrôlé. L’angle mesuré de rotation

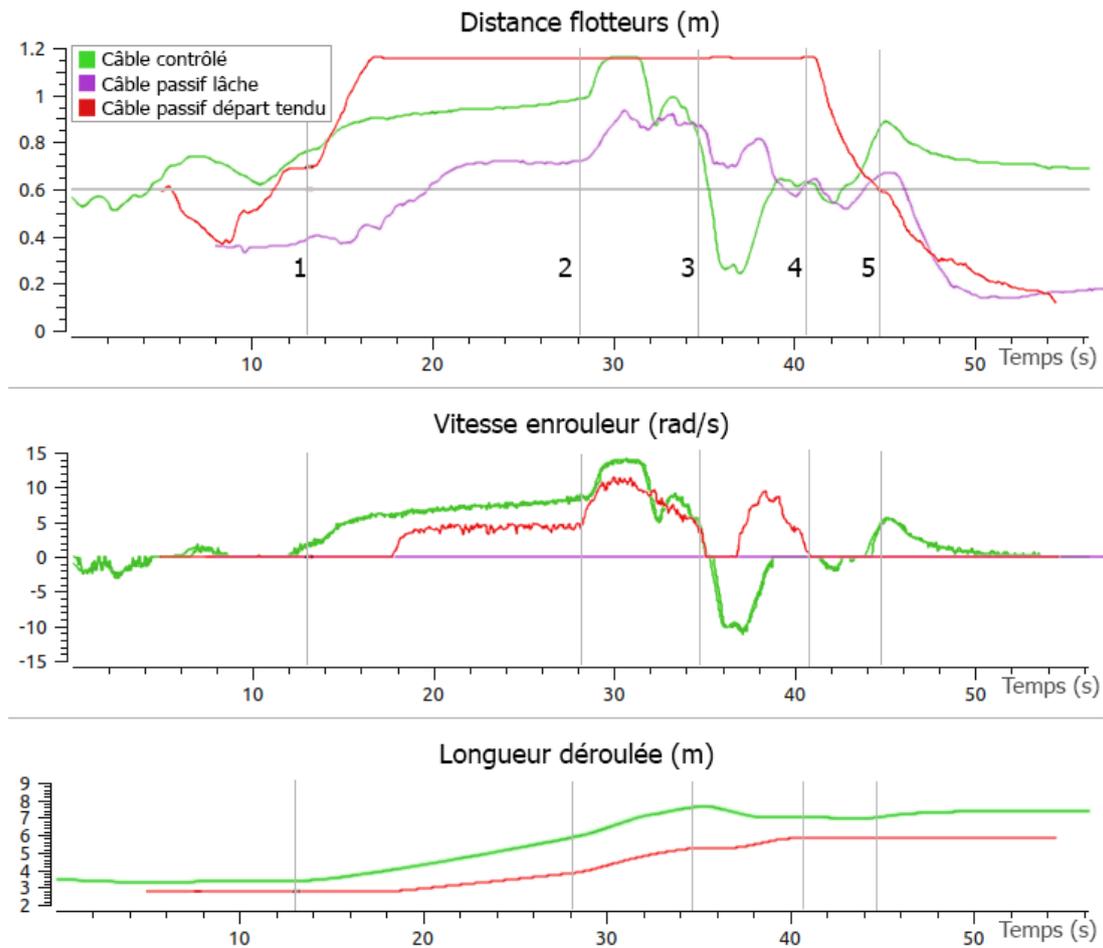


Figure V.24 – Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non. (Vidéos disponibles à ces liens : <https://youtu.be/LR4BKefRSnM>, pour le passif lâche et <https://youtu.be/74p5Bzee9kY> , pour le passif départ tendu.)

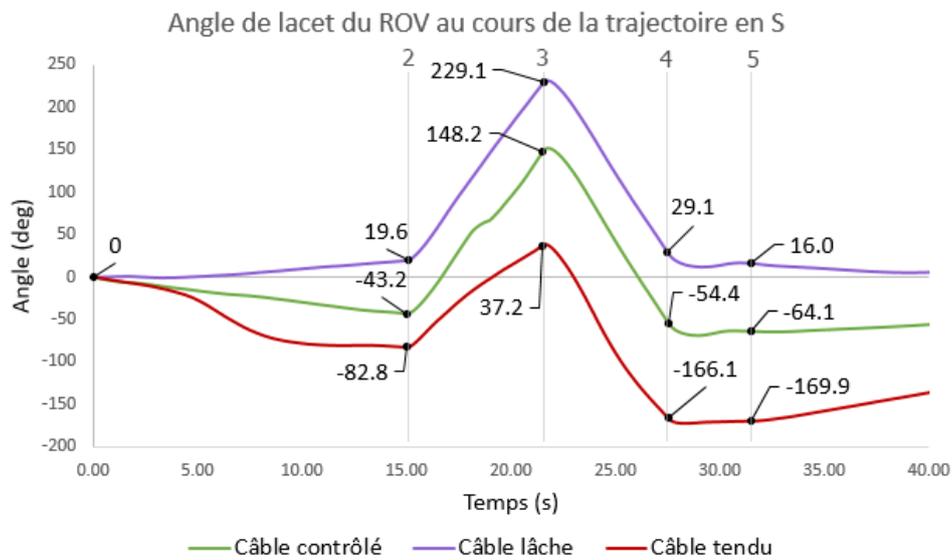


Figure V.25 – Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non

à droite (entre les points 2 et 3) est respectivement de 210° , 191° et 120° avec le câble respectivement lâche, contrôlé et tendu. Pour la rotation à gauche (entre les points 3 et 4), ces angles sont presque identiques, avec des valeurs respectives de 200° , $202,6^\circ$ et $203,3^\circ$. On constate aussi que la variation de l'angle est bien linéaire pour le câble lâche, dans les deux sens de rotation. Pour le câble contrôlé, elle est linéaire pour la rotation à gauche mais est légèrement ralentie au milieu de sa rotation à droite. Pour le câble tendu, la courbe de son angle de lacet est légèrement concave pour la rotation à droite et convexe pour la rotation à gauche. On en déduit, comme pour la trajectoire précédente, que la traction du câble au niveau de l'arrière gauche du BR2 induit une légère déviation vers la gauche pour le câble contrôlé à la fois en ligne droite et lors d'une rotation à droite. Cette déviation est beaucoup plus importante pour le câble tendu non contrôlé. Dans cette configuration, la rotation à gauche du BR2 ne semble pas impactée par le contrôle ou non du câble.

L'impact de ces déviations est observé sur la figure V.26, qui présente les traces, vues du dessus, des trajectoires du BR2 mesurées par le système *Qualisys* dans les trois configurations étudiées. Ces traces ont été superposées au niveau du point 2 sur la figure

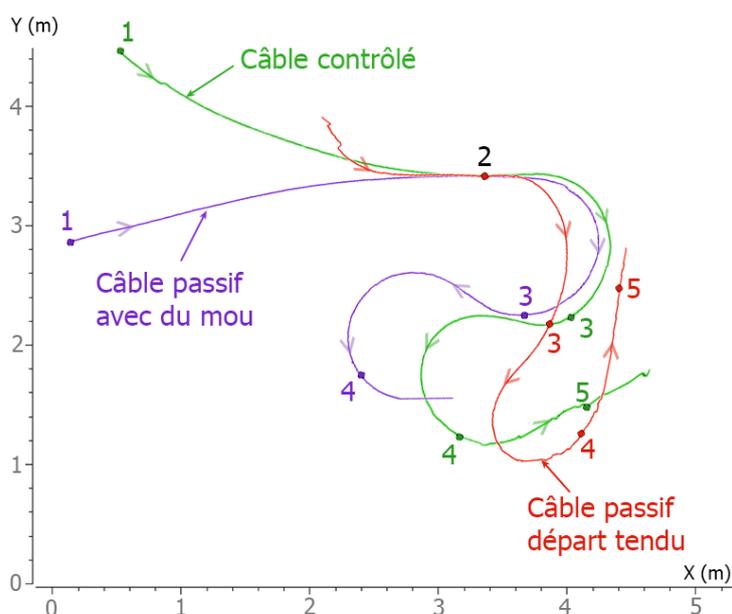


Figure V.26 – Trajectoires réelles de S du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu

afin de les comparer plus facilement. On observe que les distances parcourues par le BR2 sont assez proches entre le câble contrôlé et le câble lâche non contrôlé. Les virages sont sensiblement différents entre ces deux modes. La trace de la trajectoire du BR2 avec le câble tendu non contrôlé est totalement déformée, la première rotation à droite (entre les points 2 et 3) est très limitée et la rotation à gauche (entre les points 3 et 4) est assez irrégulière (courbure beaucoup plus importante au milieu qu'au début et à la fin).

Par ailleurs, il a été constaté que la portion de câble située juste derrière le BR2, et principalement le premier flotteur, a tendance à osciller lorsque le ROV avance, comme illustré sur la figure V.27. Cela est dû aux forces hydrodynamiques agissant sur le ROV,

son câble et ses flotteurs.

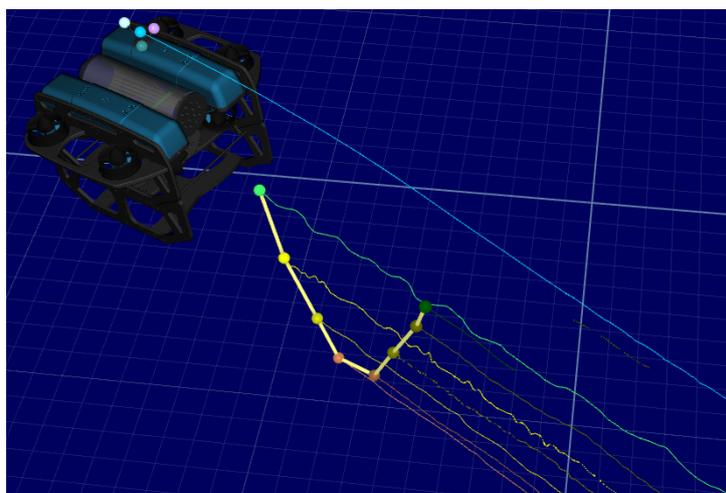


Figure V.27 – Illustration des ondulations des flotteurs et du câble à l'arrière du ROV

En résumé, la solution proposée de gestion du câble basée sur son instrumentation remplit bien les objectifs de contrôle du câble en configuration semi-tendue en vue de limiter la traînée du système ainsi que les risques d'accroches et de nœuds. Le capteur de courbure fournit une information pertinente sur le niveau de tension du câble et l'enrouleur est assez réactif en regard des vitesses de commande du BR2. De plus, aucune erreur ou dérive n'a été observée sur la longueur de câble pilotée. En effet, le câble ne glisse pas au niveau de l'enrouleur malgré le fait qu'il soit mouillé, et, dans le cas où il se retrouve coincé, l'enrouleur peut patiner et son calcul de longueur reste bon grâce à l'emploi d'une roue folle. Ce système induit une légère déviation de la trajectoire du BR2 dans le plan horizontal, qui pourrait être facilement corrigée avec un contrôle spécifique du ROV (par exemple en boucle fermée ou en anticipant les perturbations dues à la tension du câble). Cette déviation pourrait aussi être évitée en fixant le câble plus proche du centre du BR2. Par ailleurs, le système amorti semble faciliter la stabilisation du BR2 dans le plan vertical.

V.2.3 Réalités expérimentales

De nombreux aléas liés à la réalité terrain ont dû être gérés lors des expériences décrites dans ce chapitre. Cette section décrit une partie de ces problèmes et les moyens employés pour les résoudre.

Interférences sur la mesure du capteur de courbure

Les interférences entre les propulseurs du BR2 et le capteur de courbure ont été évoquées en section III.3.2. Les effets de ces interférences avaient été observés lors des expériences. En effet, à chaque fois que le ROV se déplaçait, la vitesse de l'enrouleur augmentait de manière disproportionnée, fournissant une longueur de câble trop importante, comme on peut le voir sur les graphiques de la figure V.28. Les paramètres du contrôleur avaient d'abord été remis en cause, avant que les analyses des données expérimentales ne révèlent

cette interférence. Ce problème a été résolu par l'utilisation d'un câble blindé et d'un

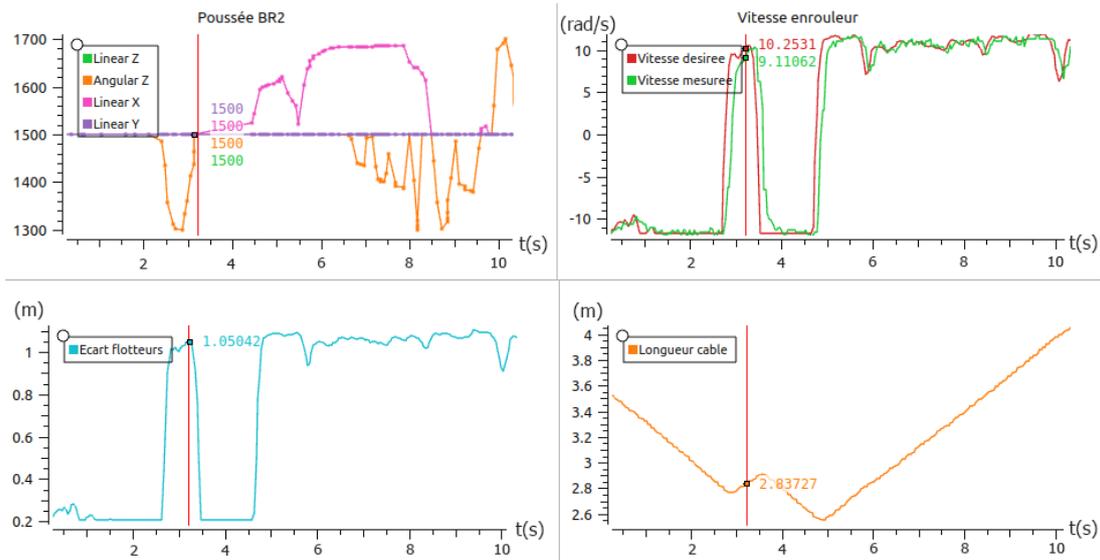


Figure V.28 – Courbes représentant le problème d'interférences entre les propulseurs et le capteur de courbure et comportement de l'enrouleur associé

isolant pour le capteur de courbure.

Équilibrage des flotteurs

Le système de compliance passive avait été pré-dimensionné afin d'équilibrer ses flotteurs et son lest pour garantir leur neutralité dans l'eau, comme décrit en section III.3.1. Le dimensionnement de la masse était alors de 50 g. Cependant, la flottabilité du système a été impacté par l'ajout de l'isolant autour du capteur de courbure, et la masse de 50 g s'est révélée être trop légère pour compenser l'air présent dans l'isolant. On peut voir sur l'image V.29, extraite de cette expérience, que le deuxième flotteur reste à la surface, il n'est donc pas au même niveau que le premier flotteur lorsque le ROV est en profondeur. Ceci montre que le système amorti n'était pas équilibré. Les courbes de la figure V.30 illustrent le fait que, dans ce cas, lorsque le ROV est en profondeur, le système de compliance passive reste tendu bien que suffisamment de câble soit déroulé. Ce phénomène est aussi visible sur la figure V.29 avec une distance importante entre les deux flotteurs malgré l'excès de câble visible en haut à droite de la photo. Une masse de 26 g a alors été ajoutée à la masse de 50 g, pour un total de 76 g et l'équilibre du système amorti a pu être ajusté.

Reflets à la surface de l'eau

Il a par ailleurs été constaté que la surface de l'eau engendrait une multitude de reflets perturbant le système de suivi des mouvements *Qualisys*. Un programme de contrôle en profondeur du BR2, asservi grâce à son capteur de pression, a alors été développé de façon à maintenir celui-ci, ainsi que le système de compliance passive, à distance de la surface pour éviter les reflets et améliorer la qualité des enregistrements.

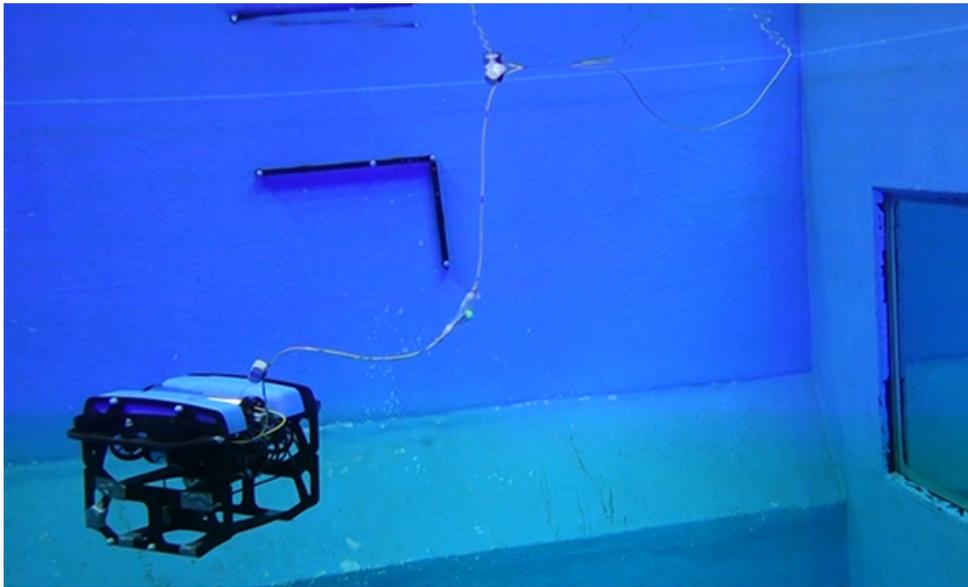


Figure V.29 – Photo illustrant le problème d'équilibrage du système amorti lors des premiers essais de contrôle. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/wr_tSbhOieU.)

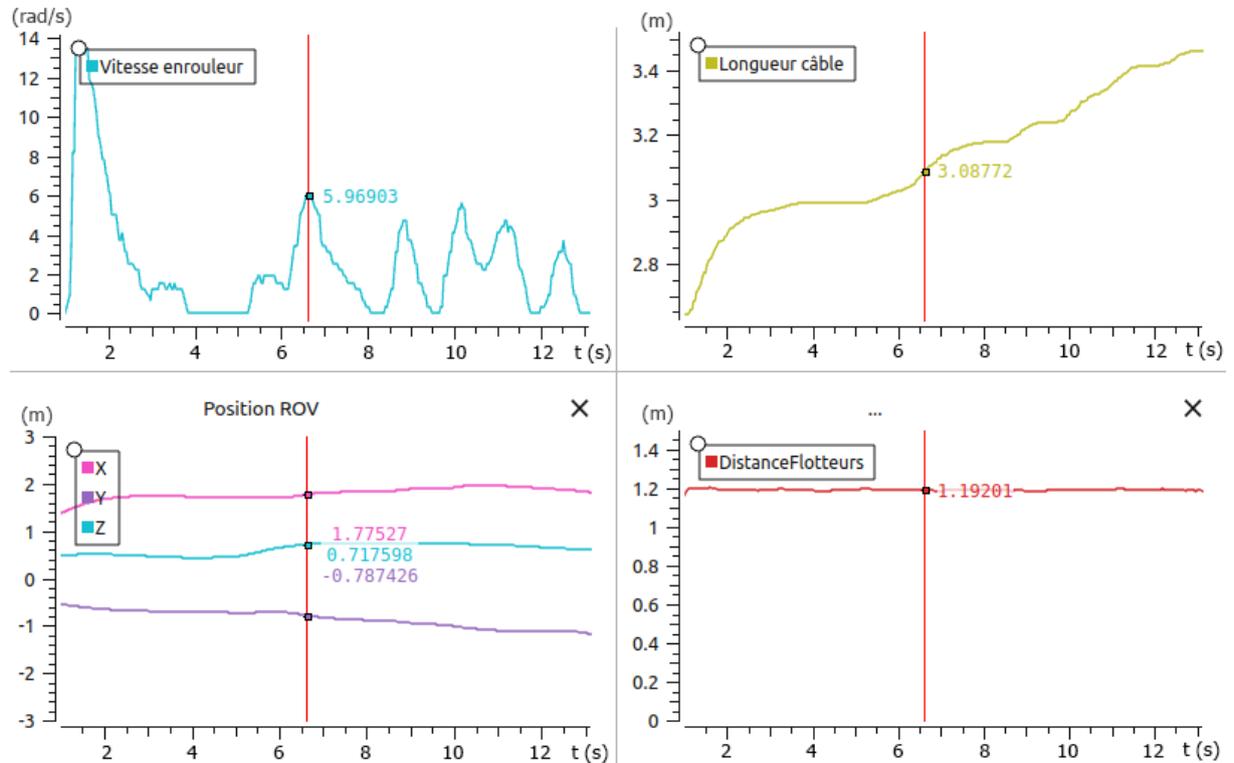


Figure V.30 – Comportement du système lorsqu'il n'est pas équilibré

Limitations dues aux bassins

Les expériences en bassins limitent grandement l'espace de déplacements du ROV. N'offrant pas la possibilité d'évaluer le comportement sur de grandes distances ni de vitesses plus importantes. Par ailleurs, il a aussi fallu s'adapter aux configurations des bassins pour positionner l'enrouleur lors des expériences. Celui-ci étant donc parfois décalé (dans le plan horizontal) par rapport à la zone de départ du BR2 et généralement à une hauteur non négligeable au dessus de la surface de l'eau. Cette configuration s'éloigne un peu d'une configuration pour laquelle l'enrouleur est embarqué sur un USV et aucune portion de câble n'est en dehors de l'eau.

V.3 Simulations de missions sous Vortex

V.3.1 Simulation du système complet sous Vortex

Afin d'évaluer le comportement du système global en complément des expériences sur le système réel, celui-ci a été modélisé sous Vortex® de la façon la plus réaliste possible. Cette section détaille la conception de ce modèle ainsi que des résultats de simulations sur le comportement du système dans différentes configurations.

Simulation du BR2

Le BR2 a été modélisé sous Vortex® comme détaillé en annexe C. Ce modèle se base sur sa maquette 3D, fournie par Blue Robotics et différents paramètres tels que la position de ses centres de flottaison et de masse, son volume, sa masse et ses coefficients de traînée. Son comportement dynamique passif a alors été validé : le ROV se maintient à l'horizontale et est légèrement flottant. Son contrôle s'effectue dans un script Python grâce au pilotage de ses huit propulseurs à partir de leur matrice de configuration.

Simulation du système de compliance du câble

La modélisation du câble sous Vortex® a déjà été détaillée en section II.3.3. Le système de compliance passive a alors été simulé en accrochant les deux flotteurs et la masse au câble à l'aide de l'outil *grabbing tool* de Vortex® aux positions souhaitées au début de la simulation, comme illustré sur la figure V.31. Cet outil permet à une pièce de s'accrocher au câble au niveau du point de contact entre le câble et la pièce à l'instant initial. Pour s'assurer que la géométrie de collision de la pièce à accrocher est en intersection avec la géométrie de collision du câble, des points de passage du câble ont été rajoutés à l'initialisation. Le volume et la masse de ces trois éléments ont été ajustés de façon à ce que le système soit globalement neutre dans l'eau (en considérant une masse volumique de

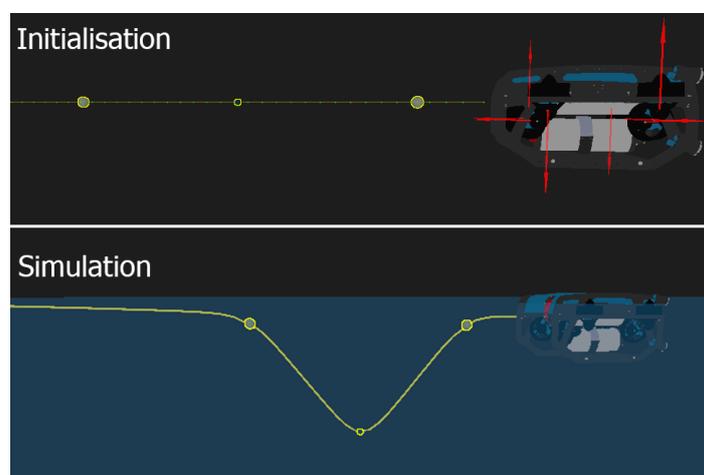


Figure V.31 – Illustration de la simulation du système d'instrumentation du câble sous Vortex

l'eau de 1000 kg/m^3). Afin de faciliter le calcul du volume, les flotteurs ont été simulés sous forme de sphère, ce qui peut légèrement modifier le comportement hydrodynamique par rapport au système réel.

On observe que ce système est bien neutre dans l'eau et que la portion de câble instrumentée prend bien une forme naturelle de V lors de la simulation.

Le capteur de courbure n'a pas été simulé sous Vortex® car la position des deux flotteurs dans le repère global est directement fournie. La distance entre les flotteurs a donc été calculée à partir de ces données.

Simulation de l'USV

L'USV a été modélisé sous Vortex® de la même façon que le BR2, comme illustré sur la figure V.32. Une maquette 3D de catamaran, conçue lors d'un projet étudiant au

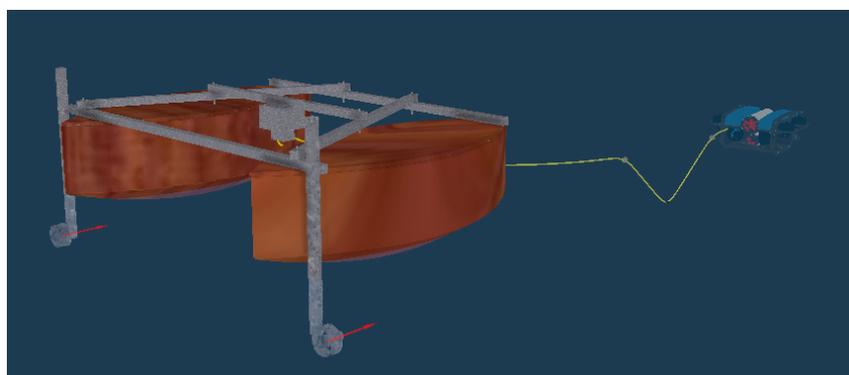


Figure V.32 – Illustration de l'USV simulé sous Vortex

cours de la thèse, a été importée sous Vortex® et associée à ses paramètres de position de ses centres de flottaison et de masse, volume, masse et coefficients de trainée. Ses deux propulseurs, de type T200 comme pour le BR2, ont aussi été simulés. Cependant, lors des simulations détaillées par la suite, l'USV était statique à la surface du bassin.

L'enrouleur est intégré à l'USV et simulé par un simple tambour en forme de cylindre en liaison pivot avec le corps de l'USV.

Scripts de contrôle de la simulation

Afin d'automatiser le contrôle et les mesures du système lors des simulations, des scripts Python ont été développés :

- **Asservissement du BR2** : Ce script a pour variables d'entrée les consignes de contrôle du BR2 et pour variables de sortie les commandes envoyées à chacun de ses propulseurs ainsi que le calcul de la puissance totale de propulsion, de sa position et de sa vitesse dans le repère global. Le BR2 est contrôlé de façon angulaire avec un asservissement à 0 pour les angles de roulis et de tangage. Il peut être contrôlé en position ou en profondeur et en vitesse, en fonction des consignes. Ces modes de contrôle sont détaillés en annexe C.

- **Contrôle de l'USV** : Ce script a pour variables d'entrée les consignes de contrôle de l'USV et pour variables de sortie les commandes envoyées à ses deux propulseurs ainsi que sa position et sa vitesse dans le repère global. Son contrôle consiste en un simple asservissement proportionnel en vitesse de ses deux propulseurs par rapport à une vitesse linéaire consigne.
- **Mesure des efforts du câble** : Ce script calcule les efforts et moments que le câble transmet au BR2 au niveau de son point d'accroche. Pour obtenir ces forces, une petite pièce virtuelle a été rajoutée entre le BR2 et l'extrémité du câble. Le câble est attaché à cette pièce de façon flexible, comme détaillé en section II.3.3. Les forces sont alors mesurées au sein de la liaison encastrement qui relie cette pièce virtuelle au BR2.
- **Mesure du comportement du système de compliance passive** : Ce script calcule la distance entre les flotteurs ainsi que leur vitesse d'écartement, à partir des positions dans le repère global des deux flotteurs, fournies par le simulateur.
- **Asservissement du câble** : Ce script a pour variables d'entrée les consignes de contrôle du câble, sa longueur déroulée, sa longueur totale, l'état du système de compliance passive, les mesures d'efforts transmis par le câble au ROV ainsi que le couple de l'enrouleur. Sa sortie correspond à la commande en vitesse de rotation de l'enrouleur. Différents modes de contrôle ont été développés, comme détaillé dans le chapitre IV :
 - Asservissement à une longueur consigne de câble. Ce contrôle est utilisé en début de simulation afin de dérouler une longueur suffisante de câble avant d'activer son contrôle automatique ou les déplacements du ROV. En effet, le câble est initialisé sous forme de ligne droite entre ses extrémités et points de passage, il est donc trop tendu à l'instant initial.
 - Asservissement en longueur semi-tendue à partir des positions respectives du BR2 et de l'USV.
 - Asservissement à une vitesse de déroulement linéaire consigne.
 - Contrôle en fonction de la tension du câble au niveau du point d'attache au ROV.
 - Contrôle en fonction du couple de l'enrouleur.
 - Contrôle automatique en fonction du système de compliance passive.

La vitesse de l'enrouleur ainsi que la longueur de câble sont bornées afin de conserver un comportement réaliste en ne dépassant les contraintes de longueur et de vitesse du système réel. La commande en vitesse de l'enrouleur est par ailleurs lissée avant d'être envoyée en commande, de façon à éviter les changements trop brusques de vitesse de rotation en simulation, qui ne seraient pas réalistes sur un système physique. En effet, dans la simulation, la vitesse de rotation de l'enrouleur est identique à sa vitesse commande, de façon instantanée.

- **MAIN** : Ce script gère les liens entre les autres scripts ainsi que la succession des différentes actions du système en fonction de son état et du temps. Les différents modes de contrôle du BR2 et du câble peuvent être désactivés ou activés et paramétrés, manuellement en variable d'entrée de ce script, ou bien automatiquement. Typiquement, ce script peut par exemple envoyer pour consignes le maintien en position du ROV pendant que le câble est asservi en longueur, puis, dès que cette longueur est atteinte, l'asservissement automatique du câble est activé et une succes-

sion de consignes de positions ou vitesses sont envoyées au BR2 afin de définir une trajectoire. Les variables de sortie de ce script constituent alors les variables d'entrée des autres scripts.

Les scripts Python de Vortex® communiquent entre eux et avec le système simulé par l'intermédiaire de variables d'entrée, de sortie et de paramètres. Les liens entre les différentes variables sont gérés par un éditeur de connections, dont un extrait est présenté sur la figure V.33.

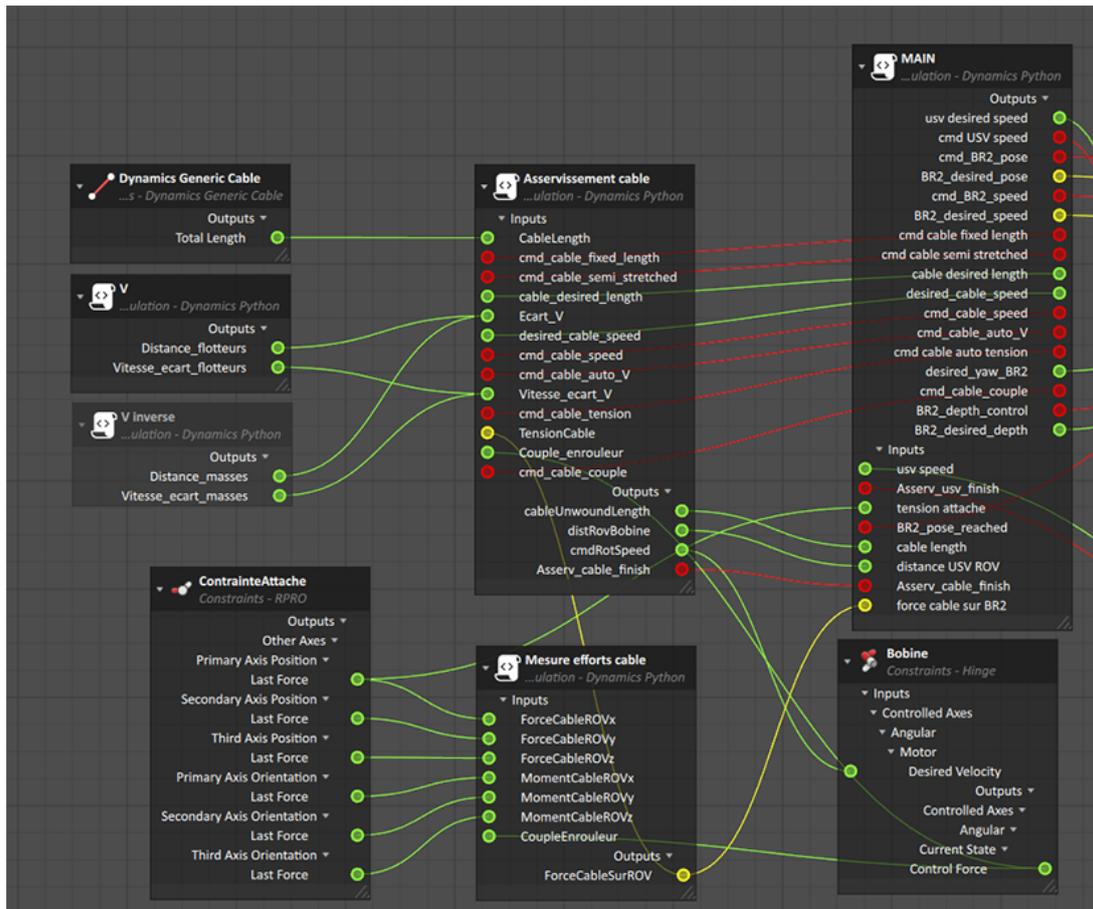


Figure V.33 – Illustration de l'éditeur de connections entre les différents scripts et objets Vortex

V.3.2 Analyse du comportement du système en simulation

Définition de la trajectoire complexe étudiée

Une trajectoire complexe du BR2 a été définie afin de comparer différents modes de contrôle sur une même trajectoire sous Vortex®. La figure V.34 représente les courbes des consignes en vitesse, profondeur et angle ainsi que les valeurs mesurées au cours de la simulation pour un ROV sans câble. Les points caractéristiques de cette trajectoire sont aussi indiqués sur ces courbes pour fournir des repères. Cette trajectoire débute par une avancée du BR2 suivant son axe longitudinal à différentes vitesses successives entre les

points 0 et 1 (0,1 m/s, 0,2 m/s, 0,3 m/s puis 0,35 m/s) en parallèle d'un contrôle à une profondeur de 0,5 m. Puis, un retour à une vitesse longitudinale de 0,3 m/s est envoyé (point 1), suivi d'une consigne de maintien à une profondeur de 2 m (point 2). Puis, tout en avançant à la même vitesse, le ROV reçoit différentes consignes successives d'orientation en lacet : 45° à gauche (point 3), 45° à droite (point 4), 0°, 90° à droite (point 5) et enfin 180° (point 6). Enfin, sa consigne en vitesse longitudinale devient nulle alors que la consigne en profondeur est conservée (point 7). La trajectoire dans le plan horizontal, déduite de la vitesse longitudinale et de l'orientation du BR2 est aussi représentée en bas à droite de cette figure. La différence entre la consigne et les déplacements réels du BR2 est due

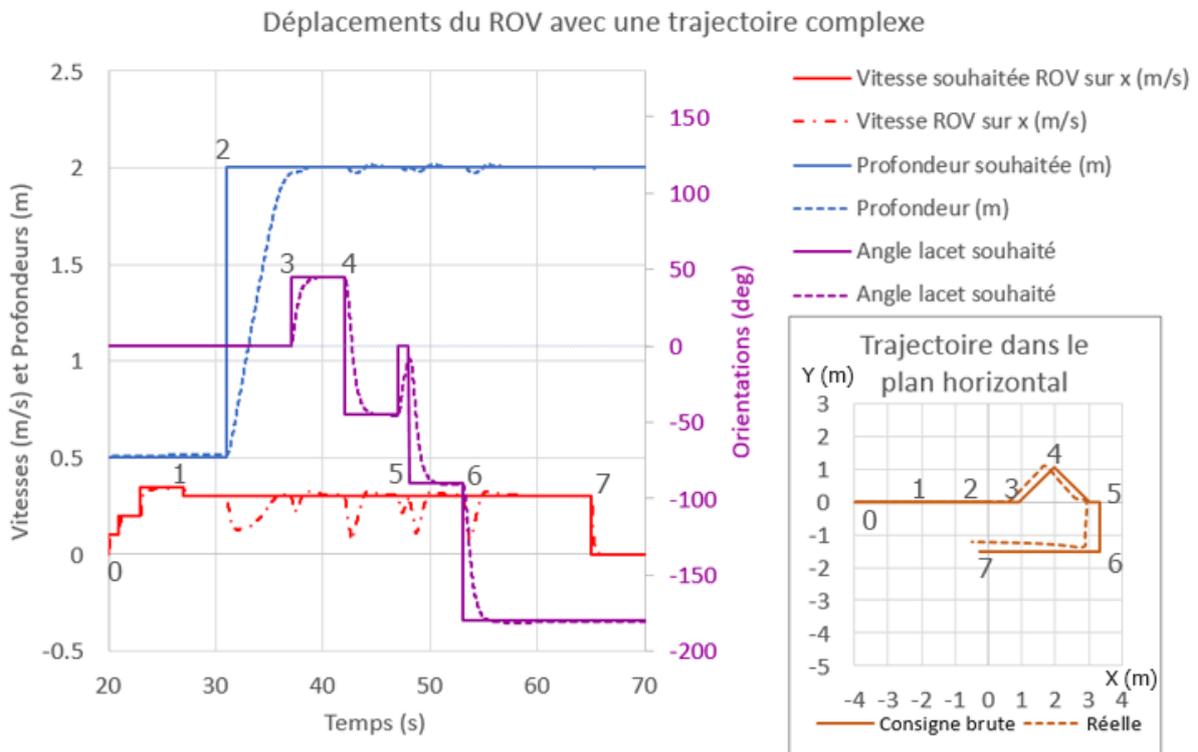


Figure V.34 – Trajectoire complexe définie pour les simulations Vortex

aux forces hydrodynamiques qui freinent le ROV dans l'eau. Lors des changements de consigne en profondeur et en lacet, une accélération importante est nécessaire et sature les propulseurs, ce qui impacte la vitesse suivant l'axe \vec{X} , comme on peut l'observer sur les courbes de la figure V.34.

Evaluation du contrôle en feedforward amélioré lors d'une trajectoire complexe

Le mode de contrôle étudié ici est un contrôle en *feedforward* amélioré, dont le schéma est présenté sur la figure V.35. Cet asservissement en vitesse de l'enrouleur est constitué d'un contrôleur de type Proportionnel-Dérivé (PD) sur la distance entre les flotteurs cumulé à un terme dépendant de la vitesse consigne du ROV. De plus, la consigne d'écart entre les flotteurs est aussi une fonction de cette vitesse consigne envoyée au BR2. Par ailleurs, une certaine tolérance est introduite sur cette consigne, le coefficient proportionnel

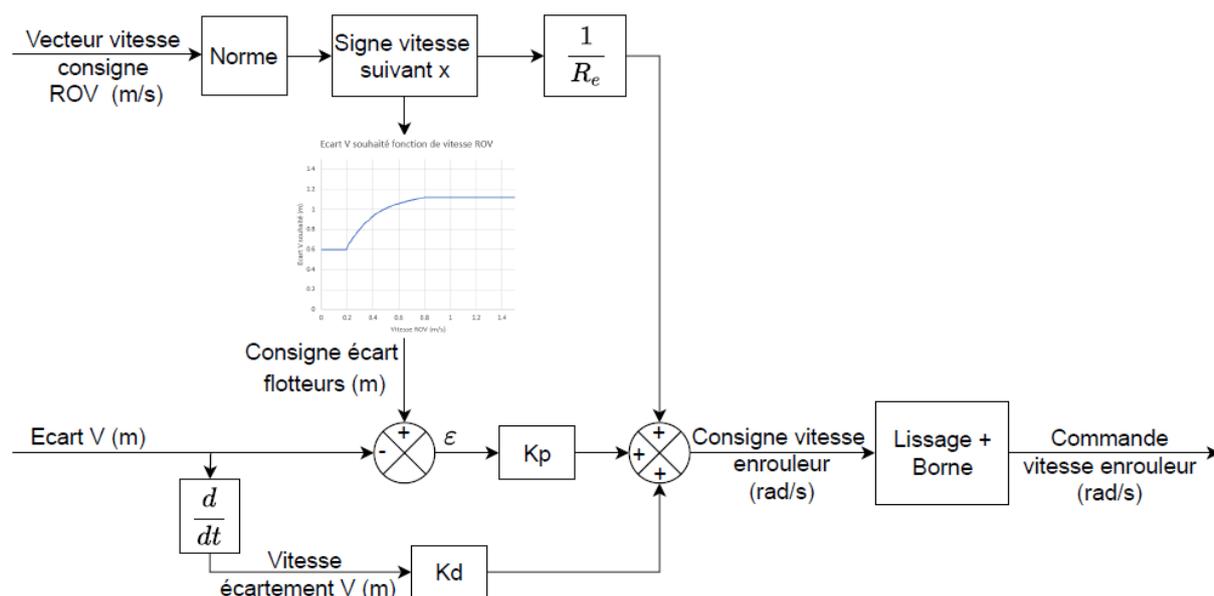


Figure V.35 – Schéma du contrôle feedforward amélioré du câble

est donc activé uniquement lorsque l'erreur est inférieure à -5 cm (câble trop tendu) ou supérieur à 0 (câble détendu) depuis plus d'une seconde.

Les simulations Vortex® présentées dans cette section ont été menées avec le câble *Fathom Slim* de BlueRobotics.

Le comportement du câble et du système de compliance lors d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré est illustré sur les courbes de la figure V.36. La consigne de distance entre les flotteurs (qui dépend de la vitesse consigne du ROV) est tracée en complément de la distance mesurée. On constate que la distance entre les flotteurs est très proche de sa consigne en dehors des moments où le ROV tourne vers sa droite (à partir du point 4 jusque peu après le point 6). Lors de ces rotations, l'erreur atteint jusque $0,3$ m, ce qui reste raisonnable. La distance entre les flotteurs est toujours conservée entre $0,9$ m et $0,38$ m. L'évolution de cette distance reste assez souple. C'est lorsque le ROV avance en ligne droite que le système est le plus stable, sans être vraiment instable lors des rotations. En effet, pour chaque rotation, on observe une oscillation puis une stabilisation de la distance entre les flotteurs. La marge de câble est bien limitée en dessous de 1 m jusqu'à ce que le ROV entame son retour (avance vers l'enrouleur, à partir du point 6). Celle-ci devient alors trop importante (plus de 5 m). En effet, la composante prenant en compte la consigne en vitesse du ROV est biaisée car elle ne prend pas en compte la direction de celui-ci.

L'évolution de la vitesse de déroulement du câble est présentée sur la figure V.37. Celle-ci n'est jamais saturée (la vitesse maximale est de $39,8$ rad/s dans cette simulation) et a un comportement assez souple.

On observe alors l'impact de ce mode de contrôle sur les forces et moments que le câble transmet au BR2 au niveau de son point d'attache, dont l'évolution est tracée sur les courbes de la figure V.38. Ces forces sont exprimées dans un repère associé au ROV et centré sur son point d'attache au câble. On constate que le câble maintient en permanence

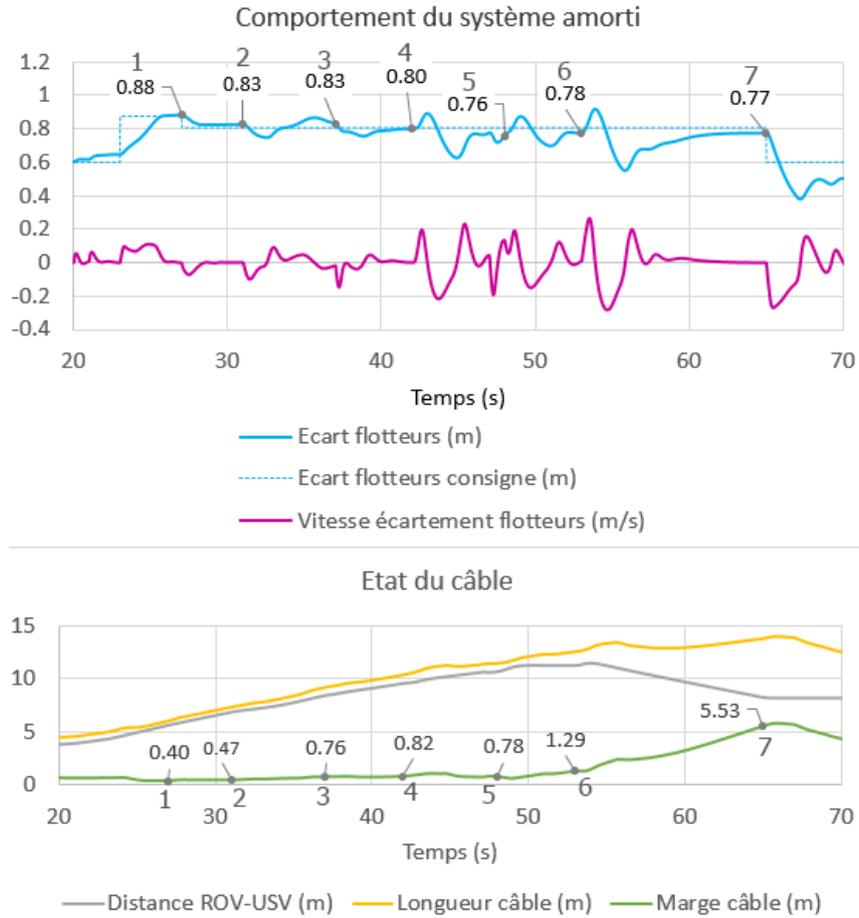


Figure V.36 – Comportement du câble et du système de complianse lors d’une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/zN4ueoqEZhs>.)

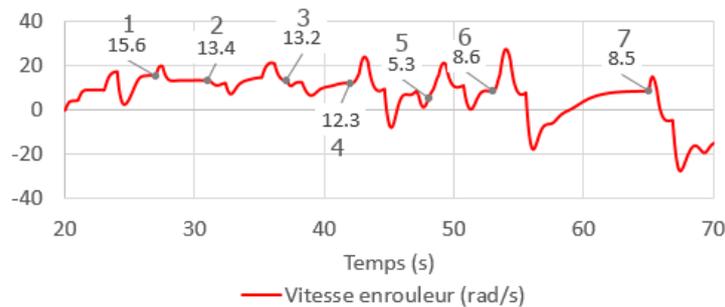


Figure V.37 – Comportement de l’enrouleur lors d’une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré

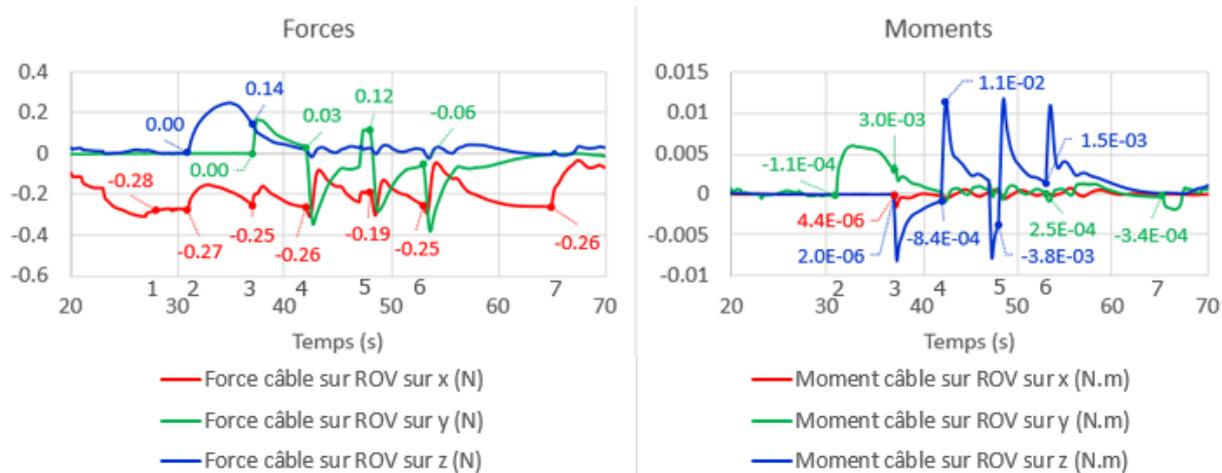


Figure V.38 – Évolution des forces et moments que le câble transmet au ROV lors d’une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré

une légère traction du ROV suivant son axe \vec{X} . Celle-ci reste toujours inférieure à 0,3 N en valeur absolue et diminue aux alentours de 0,06 N lorsque le ROV s’arrête. La force suivant l’axe \vec{Z} est presque toujours nulle, hormis lorsque le BR2 a un déplacement vertical pour changer de profondeur (entre les points 2 et 3). Son signe positif indique que le câble a tendance à légèrement tirer le ROV en profondeur. Elle atteint alors un pic de 0,24 N avant de se stabiliser à nouveau autour d’une valeur nulle. Lors des rotations du ROV, elle oscille légèrement. La force suivant l’axe \vec{Y} est directement impactée par les changements d’orientation du ROV, qui génèrent des pics de l’ordre de 0,3 N. Cette force est parfois positive et parfois négative suivant l’orientation du ROV. Le moment autour de l’axe \vec{X} oscille légèrement autour d’une valeur nulle. Le moment autour de l’axe \vec{Y} a un comportement similaire à la force suivant \vec{Z} , il oscille légèrement autour d’une valeur nulle, hormis lorsque le BR2 a un déplacement vertical (entre les points 2 et 3), pour lequel il admet un pic de $5,8 \times 10^{-3}$ N.m. Enfin, le moment autour de l’axe \vec{Z} admet des pics de l’ordre de $1,1 \times 10^{-2}$ N.m au début des changements d’orientation, il se stabilise à une valeur nulle en dehors de ces moments.

Le couple de l’enrouleur mesuré au cours de cette simulation est tracé sur la figure V.39. Son comportement est très proche de celui de la vitesse de l’enrouleur. Sa valeur se situe généralement entre 0 et 2×10^{-3} N.m mais admet des pics plus importants (jusque 6×10^{-3} N.m) lorsque l’enrouleur accélère ou décélère.

Finalement, on observe l’impact du câble sur la puissance du BR2 avec ce mode de contrôle. La puissance avait été mesurée en simulation sur cette même trajectoire pour le BR2 seul, sans câble, afin d’extraire la part de la puissance des propulseurs du BR2 due à la présence du câble et à son contrôleur, en faisant abstraction de la puissance strictement nécessaire aux déplacements du BR2 dans l’eau sans aucune perturbation extérieure. La figure V.40 présente donc la surconsommation du BR2 (pourcentage de la différence entre la puissance avec câble et la puissance sans câble par rapport à la puissance maximale du BR2) dans le plan horizontal et dans le plan vertical. On rappelle ici que les 8 propulseurs du BR2 *Heavy version* sont découplés suivant ces deux plans. Cette surconsommation est en moyenne de 0,19 % suivant l’axe vertical du ROV, avec un

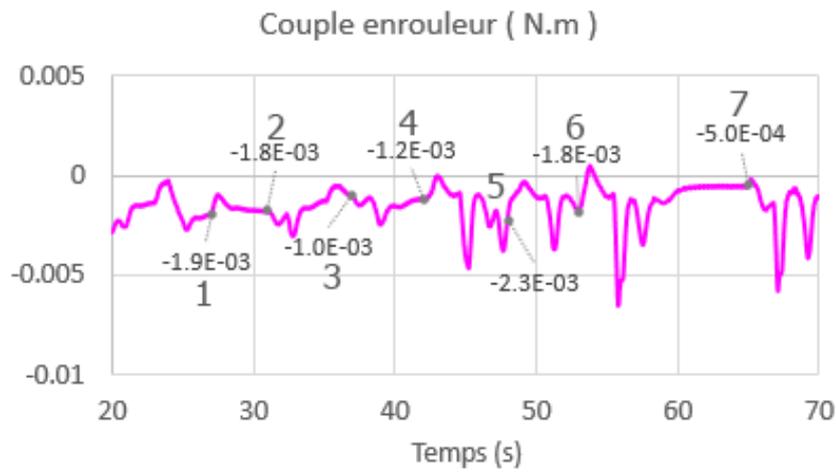


Figure V.39 – Évolution du couple de l'enrouleur d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré

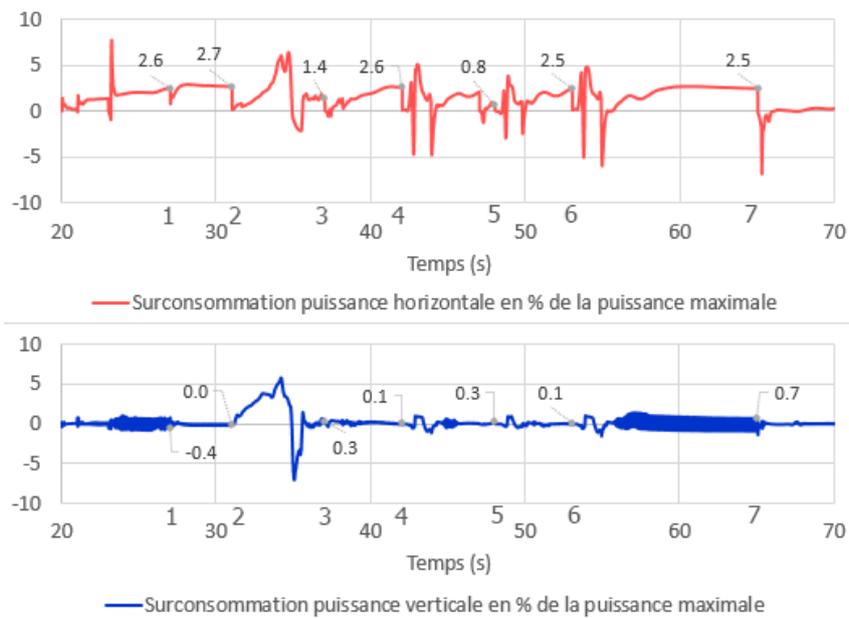


Figure V.40 – Évolution du couple de l'enrouleur d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré

maximum de 6,1 %, en valeurs absolues. Celle-ci est très peu impactée par la présence du câble en dehors du moment où le ROV descend en profondeur. Dans le plan horizontal, la surconsommation est en moyenne de 1,3 %, avec un maximum de 7,8 %. Celle-ci admet des pics qui correspondent aux variations des efforts et moments que le câble transmet au ROV.

Comparaison de différents modes de contrôle

On compare alors le comportement du système en simulation lors de cette trajectoire complexe pour différents modes de contrôle, ou non, du câble, qui sont :

- Contrôle en feedforward
- Contrôle en fonction de la distance entre les flotteurs
- Contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV
- Câble non contrôlé, avec compliance passive, avec du mou
- Câble non contrôlé, sans compliance, avec du mou

Pour les modes non contrôlés, une longueur de 15 m de câble est déroulé avant le début des déplacements du ROV afin de s'assurer que le câble ne soit jamais tendu.

On commence par comparer la marge de câble disponible en fonction des différents modes, dont les courbes sont présentées sur la figure V.41. Les deux courbes correspondant

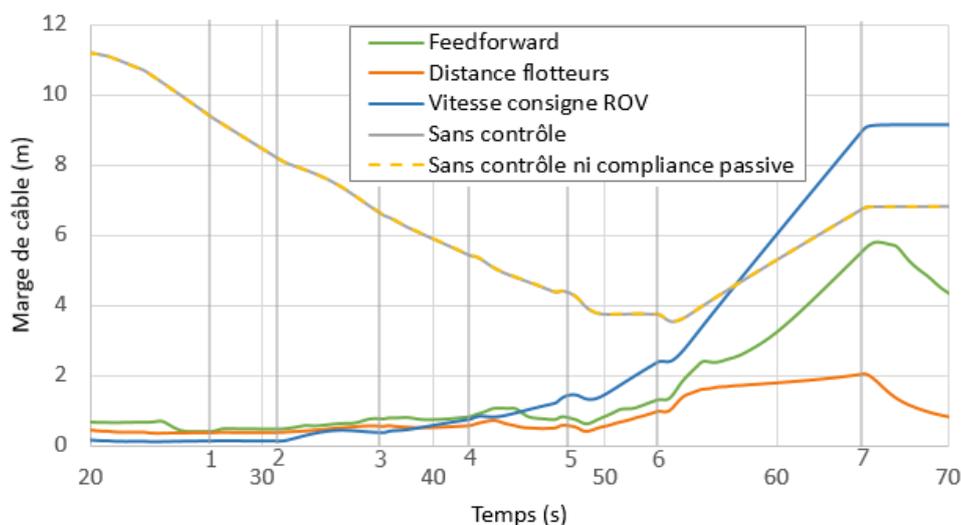


Figure V.41 – Comparaison de l'évolution de la marge de câble pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe

au câble non contrôlé sont superposées. En effet, les déplacements du ROV sont identiques et la longueur de câble est fixe (car non contrôlée), la marge de câble est donc identique lorsque le câble n'est pas contrôlé, qu'il soit équipé du système de compliance passive ou non. Les trois courbes correspondant au câble contrôlé ont globalement la même allure au début de la trajectoire : la marge est presque constante et assez faible jusqu'au point 5 (4 pour le mode de contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV) lorsque le ROV s'oriente vers la droite. Elle augmente alors de façon conséquente pour le contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV et un peu moins pour le contrôle en *feedforward*.

Elle augmente très peu pour le contrôle en fonction de la distance entre les flotteurs. Elle atteint son maximum au niveau du point 7, lorsque le ROV s'arrête. La marge de câble diminue alors pour les modes de contrôle en *feedforward* et en fonction de la distance entre les flotteurs, mais elle reste constante pour le contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV (sa vitesse consigne étant nulle).

L'évolution de la distance entre les flotteurs est présentée sur la figure V.42 pour ces différents modes. Le mode non contrôlé et sans compliance passive n'apparaît de toute évidence pas sur ces courbes, étant donné qu'il n'est pas équipé de flotteurs. On constate

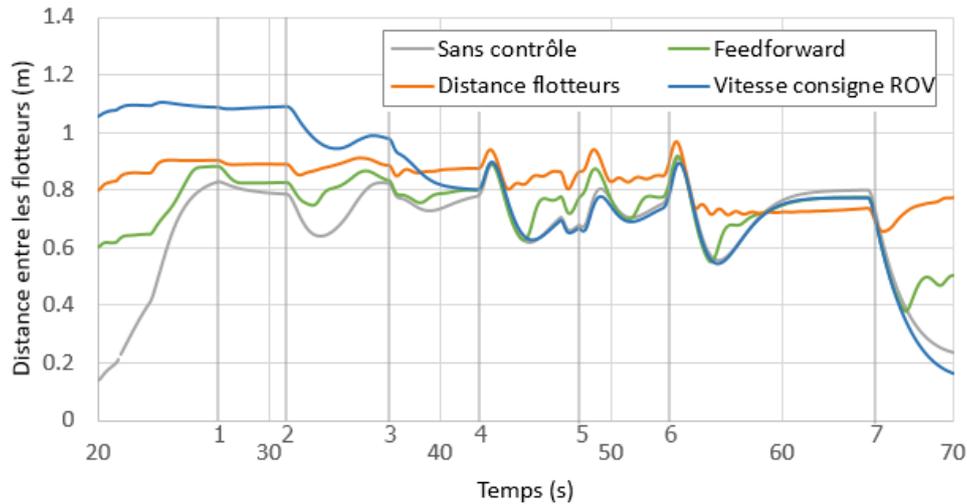


Figure V.42 – Comparaison de l'évolution de la distance entre les flotteurs pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe

que la distance entre les flotteurs est bien maintenue dans des valeurs raisonnables (entre 0,4 m et 0,9 m) pour les contrôleurs en *feedforward* et en fonction de la distance entre les flotteurs. Celle-ci atteint des extremums plus importants 0,16 m et 1,1 m lorsque le câble n'est pas contrôlé ou qu'il est contrôlé uniquement en fonction de la vitesse consigne du ROV. Le contrôle en fonction de la distance entre les flotteurs admet de petites oscillations autour de sa consigne lorsque le ROV tourne (à partir du point 3 et jusqu'à un peu après le point 6). A partir du point 4, cette distance est presque identique entre le mode de contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV et le câble non contrôlé.

La figure V.43 présente l'évolution de la vitesse de déroulement du câble pour les trois modes de contrôle comparés. Lorsque le BR2 avance suivant son axe \vec{X} avec une vitesse assez faible (avant le point 1), la vitesse de l'enrouleur est presque identique entre ces trois modes de contrôle. Pour le contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV, la vitesse de l'enrouleur est constante entre les points 1 et 7 étant donné que la consigne en vitesse du BR2 est constante et que son orientation n'est pas prise en compte. Le contrôle en fonction de la distance entre les flotteurs admet des oscillations de faible amplitude alors que le contrôle en *feedforward* admet des oscillations d'amplitude plus importante.

On compare alors la surconsommation entre ces différents modes, dans le plan horizontal (figure V.44) et dans le plan vertical (figure V.45). Cette valeur est exprimée sous forme de pourcentage de la valeur maximale de puissance du BR2. Dans le plan horizontal, cette surconsommation est assez similaire entre les différents modes, hormis pour le câble non

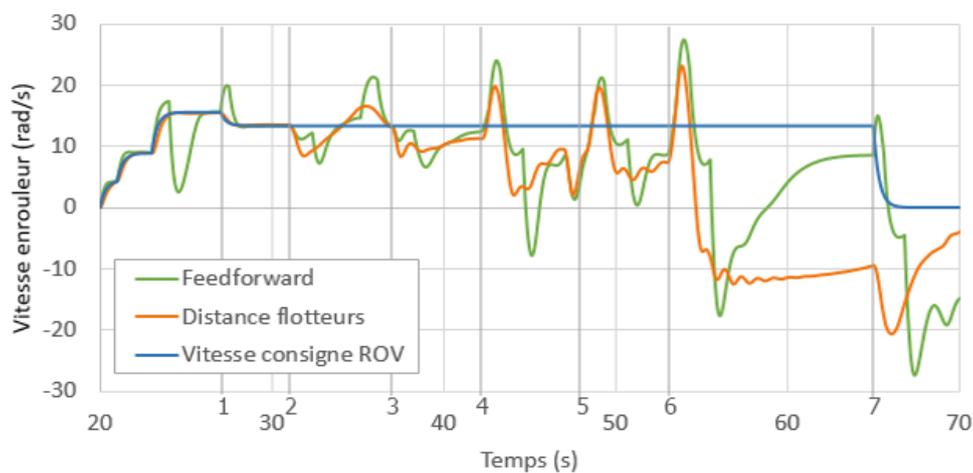


Figure V.43 – Comparaison de l'évolution de la vitesse de l'enrouleur pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe

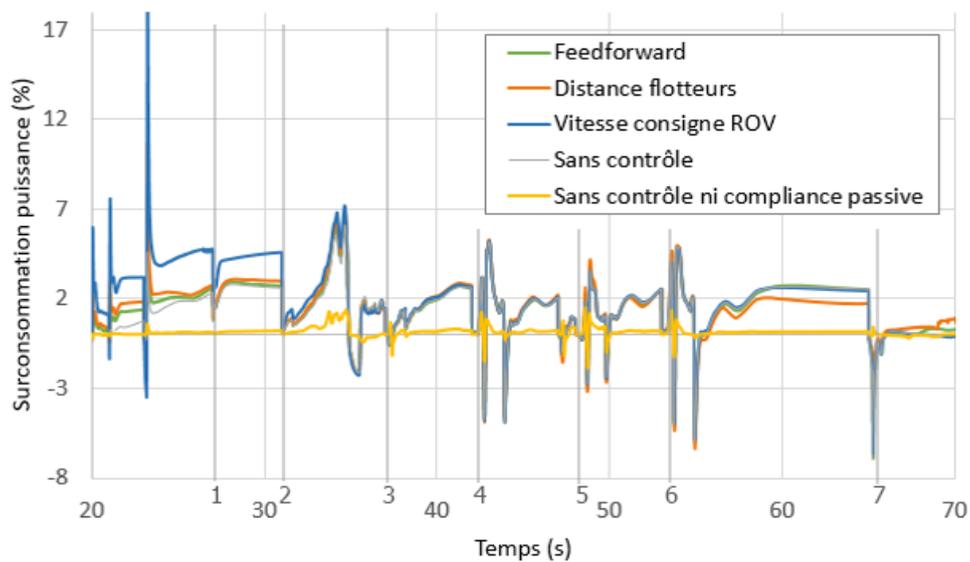


Figure V.44 – Comparaison de l'évolution de la surconsommation de puissance horizontale pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe

instrumenté et non contrôlé, pour lequel elle est beaucoup plus faible, et pour le contrôle en fonction de la consigne en vitesse du ROV, pour lequel elle est beaucoup plus importante quand le ROV est en faible profondeur (0,5 m de profondeur, avant le point 2).

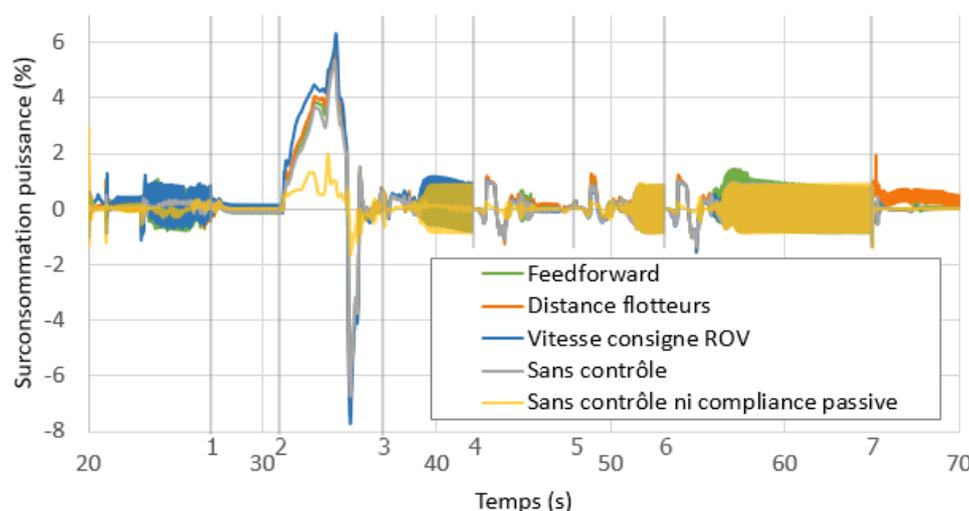


Figure V.45 – Comparaison de l'évolution de la surconsommation de puissance verticale pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe

Dans le plan vertical, cette surconsommation est beaucoup moins importante que dans le plan horizontal. Toutefois, elle est parfois assez bruitée.

Le tableau V.3 récapitule les valeurs moyennes et maximales des surconsommations dans le plan horizontal et le plan vertical, en fonction de ces différents modes. On constate

| Mode de contrôle | Horizontale | | Verticale | |
|--|-------------|---------|-----------|--------|
| | Moyenne | Max | Moyenne | Max |
| Feedforward | 1,27 % | 7,82 % | 0,19 % | 6,14 % |
| Distance entre les flotteurs | 1,4 % | 10,69 % | 0,27 % | 6,09 % |
| Vitesse consigne du ROV | 1,88 % | 18,58 % | 0,23 % | 6,31 % |
| Non contrôlé, avec système amorti et mou | 1,00 % | 6,12 % | 0,13 % | 5,98 % |
| Non contrôlé, sans instrumentation, avec mou | 0,14 % | 1,51 % | 0,05 % | 5,99 % |

Tableau V.3 – Surconsommation de puissance pour différents modes de contrôle ou non du câble par rapport à un ROV sans câble

que le contrôle en feedforward est le plus efficace en terme de surconsommation. Les modes non contrôlés ont une surconsommation beaucoup plus faible étant donné qu'ils ont beaucoup de mou.

Finalement, on observe la forme du câble au cours de cette trajectoire en fonction des différents modes. Cette forme est illustrée sur la figure V.46 à deux instants caractéristiques de cette trajectoire (au point 5, à la fin de l'avancée du BR2 puis après le point 7, après son retour vers l'enrouleur). On observe que pour le contrôle en feedforward, le câble semble très bien se comporter, hormis un léger surplus de câble formant un lobe lorsque le BR2 se rapproche de l'enrouleur. Le câble semble avoir une longueur bien trop importante pour le contrôle en fonction de la vitesse consigne du ROV. En revanche, elle est très ajustée pour

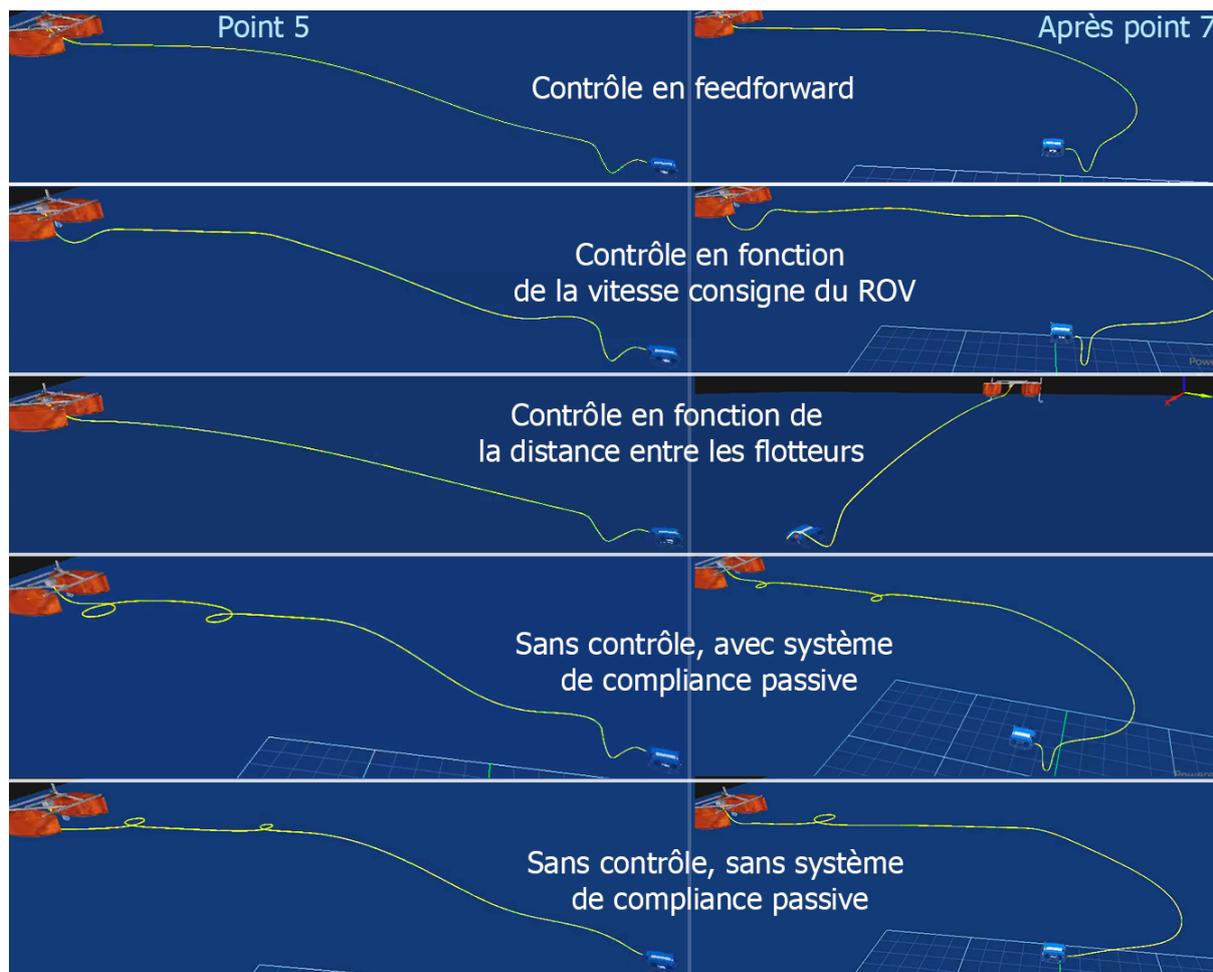


Figure V.46 – Vues de la configuration du système pour différents modes de contrôle du câble à deux instants de la trajectoire complexe. (Vidéo disponible à ce lien : <https://youtu.be/77FhFrkM-y4>.)

le contrôle en fonction de la distance entre les flotteurs et le câble passe même sur le côté du ROV à la fin de sa trajectoire. Enfin, lorsque le câble n'est pas contrôlé, des boucles se forment à la surface de l'eau avant que le ROV ne commence à s'éloigner, la longueur de câble étant bien trop importante. Ces boucles sont alors conservées tout au long de la trajectoire, générant un risque important d'accroche ou d'emmêlement du câble.

V.4 Conclusion du chapitre

Suite à la conception de la solution de gestion automatique du câble basée sur son instrumentation par un système de compliance passive et à la définition de différents modes de contrôle de l'enrouleur actif, le comportement du système global a été évalué sur un démonstrateur physique et en simulation.

Le système réel est composé d'un BR2 connecté à un ordinateur de contrôle par l'intermédiaire de son câble *Fathom Slim* géré par un enrouleur actif. Une carte *Arduino* a été ajoutée à l'intérieur du BR2 afin d'effectuer les acquisitions du capteur de courbure instrumentant le câble. Des scripts de contrôle automatique du ROV ont été développés afin de contrôler le BR2 en profondeur et de définir plusieurs trajectoires répétables qui sont utilisées pour comparer les différentes configurations et modes de contrôle du câble. Le système complet est contrôlé sous ROS.

Un système de suivi de mouvements *Qualisys* a été employé lors des expériences en bassin pour fournir une vérité terrain pour l'évaluation du système, d'une part par le comportement de son système de compliance passive, et d'autre part par l'observation des trajectoires réelles réalisées par le BR2.

Le système complet, composé d'un USV embarquant un enrouleur, du BR2, et du câble instrumenté, a été modélisé sous *Vortex®*. Le capteur de courbure n'a pas été modélisé, la distance entre les flotteurs étant directement disponible en simulation. Différents scripts ont été développés sous *Vortex®* afin de contrôler le système complet de façon automatique, de définir différentes trajectoires du BR2 et d'évaluer différents modes de contrôle du câble.

La figure V.47 illustre le BR2 avec son câble instrumenté, en photo du système réel, à partir d'une vue du système de suivi de mouvements et en simulation.

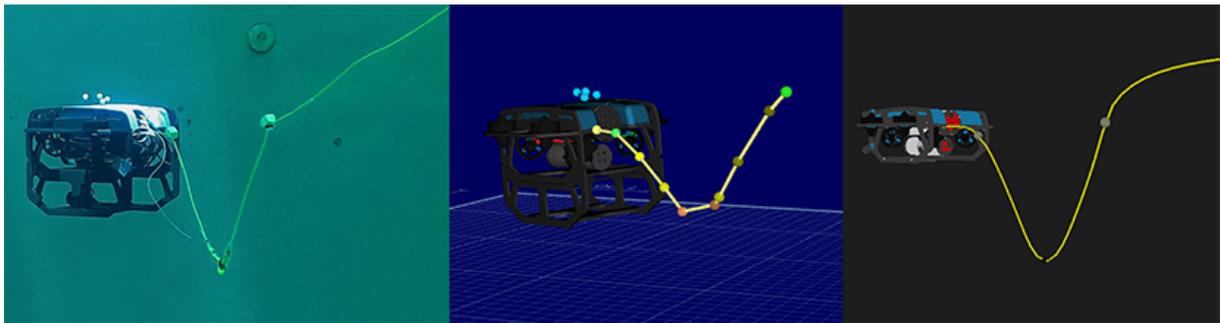


Figure V.47 – Vues du ROV avec son câble instrumenté en réel, avec le système de suivi de trajectoire et en simulation

Le système de compliance passive a d'abord été évalué sans contrôle du câble. Ce système présente un comportement d'amortisseur (dû à la traînée de ses flotteurs), il a été observé qu'il se stabilise à un écart entre les flotteurs de 0,42 m après avoir été tendu (à 1,19 m), avec un temps de réponse à 5% de 2,85 s. Le capteur de courbure fournit une bonne image de l'état de la tension du câble, réactive et sans dérive. L'enrouleur est assez réactif et permet la mesure et le contrôle de la longueur de câble sans dérive.

Les modes de contrôle basés sur la configuration du système de compliance passive sont efficaces pour maintenir le câble en configuration semi-tendue. Ceci génère une légère tension dans le câble, qui est transmise au ROV sous forme d'efforts et de moments. Cet impact s'illustre par une déviation mineure des trajectoires du système réel et par une surconsommation de puissance des propulseurs en simulation (la trajectoire n'étant pas impactée en simulation grâce à un contrôle en boucle fermée de la vitesse du ROV). En particulier, le câble étant accroché à l'arrière gauche du BR2, on observe principalement une déviation vers la gauche du ROV lorsqu'il se déplace en ligne droite. En revanche, le système de compliance passive semble améliorer la stabilité du maintien en profondeur du ROV. Ce léger impact négatif sur les efforts transmis au ROV par le câble instrumenté est compensé par la bonne gestion de la longueur délivrée, qui prévient la formation de boucles du câble (largement observées lorsque le câble n'est pas contrôlé) et réduit donc les risques d'accroches et de nœuds.

On constate que le mode de contrôle basé uniquement sur la distance entre les flotteurs est celui qui ajuste au mieux la longueur de câble déroulé à la distance entre les deux véhicules. La prise en compte de la consigne de vitesse envoyée au ROV en plus de la distance entre les flotteurs dans un contrôleur en *feedforward* présente de meilleures performances vis-à-vis de la limitation de l'impact du câble sur le ROV.

La modélisation sous Vortex® , faisant office de jumeau numérique du système, permet alors d'aller plus loin dans la simulation de situations complexes afin d'anticiper le comportement du système et d'optimiser ses modes de contrôle.

Conclusion générale

Bilan des contributions apportées

Cette thèse avait pour objectif principal la gestion active d'un câble reliant un ROV de petite taille à un USV. L'exploration sous-marine est un domaine suscitant un grand intérêt mais soulevant des problématiques délicates. L'utilisation de robots sous-marins est en pleine expansion. Mais les robots autonomes manquent encore de fiabilité, c'est pourquoi les robots téléopérés (ROV) sont largement utilisés dans ce domaine. L'utilisation d'ombilicaux reliant les ROV à leur station de contrôle est nécessaire à la communication sous-marine dans des conditions adaptées aux systèmes téléopérés. Cependant, ce lien physique se révèle être un frein à la mobilité du ROV, sur lequel il exerce des actions mécaniques indésirables dues entre autres à sa traînée, en plus d'augmenter les risques d'accroches du système. Les solutions de gestion des ombilicaux reliés aux ROV sont encore peu développées, la plupart des câbles étant gérés de façon manuelle.

Une modélisation du câble est proposée dans cette thèse afin d'estimer son influence sur le système et d'envisager son contrôle autonome. Le modèle de la chaînette fournit une première approximation de la forme du câble et des efforts qu'il transmet au ROV en fonction de sa configuration. Cependant, ce modèle se limite aux câbles pesants et sans raideur. Une modélisation plus adaptée au milieu sous-marin est alors proposée pour tous types de câbles, sous Matlab Simulink® puis sous Vortex®. Celle-ci prend en compte différents paramètres physiques du câble, et, en particulier, ses raideurs en flexion et en torsion. Un protocole expérimental simplifié est proposé pour estimer ces deux paramètres sur des câbles réels, sans équipement complexe. Les paramètres déterminés et les modèles utilisés sont validés en les confrontant à la réalité. L'influence sur les efforts transmis au ROV des paramètres du câble (raideur et densité) et de sa configuration (longueur du câble et positions respectives de ses extrémités) a été étudiée grâce à la modélisation du câble. Elle met en évidence l'intérêt d'une configuration semi-tendue du câble. En effet, un câble tendu exercerait une grande tension sur le ROV alors qu'un câble trop lâche risquerait de s'accrocher ou de former des nœuds.

On propose donc de contrôler le câble dans une configuration proche de cette configuration semi-tendue. Cependant, la frontière entre le mode semi-tendu et le mode tendu étant assez mince, une certaine compliance est nécessaire à la gestion optimale du câble. Le câble est alors instrumenté d'un système de compliance passive qui a aussi pour rôle d'apporter une mesure de son état, nécessaire à son contrôle. La compliance passive est constituée d'une masse et deux flotteurs qui imposent une forme de V au câble et se comporte comme un amortisseur. Un capteur de courbure, fixé au câble au niveau de

la masse, complète ce système afin d'en mesurer l'état. Un enrouleur actif a été conçu pour contrôler le déroulement du câble à partir de consignes en longueur ou en vitesse. Ce système mécatronique, qui offre une gestion compliante de l'ombilical, a été conçu et fabriqué pour être utilisé lors d'expériences. La compliance passive, en plus de fournir des informations sur l'état du câble, a l'avantage de compenser les éventuels retards du contrôle de sa longueur. L'ensemble du système (incluant le ROV, son câble instrumenté et son enrouleur) est interfacé avec ROS pour gérer le système de manière globale et faciliter les communications entre les différents éléments (acquisition des données et envoi des commandes).

Ce système amène à proposer une gestion automatique du câble en déchargeant le ROV de cette tâche. Plusieurs modes de contrôle reposant sur les données des différents capteurs sont envisagés. Leur faisabilité est évaluée en fonction de la disponibilité des paramètres sur lesquels ils se basent. Par exemple, les contrôleurs basés sur la tension du câble, le couple de l'enrouleur ou la position et vitesse réelles du ROV sont écartés, en l'absence de capteurs appropriés pour mesurer ces paramètres. La distance entre les flotteurs est utilisée comme image du niveau de tension du câble et différents contrôleurs basés sur cette donnée sont proposés. On constate que la prise en compte de la vitesse consigne envoyée au ROV dans un contrôleur en *feedforward* prenant aussi en compte la configuration du système de compliance passive (par la distance entre les flotteurs) offre des performances intéressantes.

Le comportement du système global a été évalué de façon expérimentale en bassin avec un contrôleur simple basé sur la distance entre les flotteurs lors de différentes trajectoires, rectilignes ou curvilignes, du BR2. Le modèle du système global sous Vortex® a alors été utilisé comme jumeau numérique pour comparer le comportement de différents modes de contrôle dans des conditions identiques.

En résumé, les contributions principales de cette thèse sont les suivantes :

- Modélisation du câble par le modèle de la chaînette puis en simulation sous Matlab Simulink et Vortex, en prenant en compte ses paramètres de raideur.
- Estimation expérimentale simple des paramètres de raideur en flexion et en torsion de câbles réels.
- Évaluation de l'impact du câble sur le ROV, en simulation et de manière expérimentale.
- Conception mécatronique d'une solution de gestion du câble basée sur son instrumentation par un système de compliance passive et sur un enrouleur actif autonome.
- Proposition de différents modes de contrôle du câble.
- Évaluation de la solution proposée en simulation et lors d'expériences en bassin.

Par ailleurs, une liste des valorisations scientifiques effectuées dans le cadre de la thèse est présentée en annexe F.

Perspectives

Améliorations du système

Le système conçu dans cette étude constitue un démonstrateur satisfaisant pour justifier de la pertinence du contrôle du câble à partir de son instrumentation avec une compliance passive. Il nécessiterait cependant quelques améliorations avant d'être implanté sur un système réel utilisable en mer par exemple. D'autres expériences et simulations, évaluant le comportement du système dans des conditions différentes, seraient aussi utiles. Cette section développe différentes pistes d'améliorations à court terme, qui n'ont pas pu être traitées dans le cadre de la thèse.

Tout d'abord, la conception du système de compliance passive pourrait être améliorée en concevant des flotteurs et un lest plus hydrodynamiques, par exemple en les moulant directement autour du câble. Pour réduire l'encombrement vertical de ce système, le motif de V (flotteurs + masse) pourrait être répété, en diminuant la distance entre ces éléments. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il va engendrer des efforts de trainée, ainsi que l'inertie additionnelle par la présence de lest. La piste de l'utilisation d'autres capteurs serait à poursuivre. Il avait été envisagé d'utiliser des accéléromètres fixés au câble mais ils n'ont pas pu être testés. Ceux-ci pourraient détecter à la fois quand tout le système amorti se déplace et quand il s'étire ou se rétracte. La distance entre les flotteurs pourrait aussi être mesurée de façon directe. Un capteur d'élongation avait été testé mais il n'offrait pas une plage de déformation suffisante. Une fusion de différents capteurs est aussi envisageable.

L'enrouleur fabriqué dans le cadre de cette thèse est un prototype qui ne peut pas être embarqué tel quel sur un véhicule. Seule la partie gérant la longueur de câble a été fabriquée. Il faudrait lui associer un tambour pour stocker le surplus de câble (nécessitant l'utilisation d'un collecteur tournant). Celui-ci pourrait éventuellement trancaner le câble afin d'optimiser son enroulement, de limiter ses torsions et d'offrir un enroulement et déroulement souple du câble (à l'image de l'enrouleur qui avait été développé précédemment au sein du laboratoire, décrit en section III.1.2). L'ensemble devrait être marinisé en protégeant le mécanisme et l'électronique dans un caisson étanche.

Il faudrait aussi mener des expériences et simulations pour évaluer le comportement du système dans d'autres types de situations. En particulier, il faudrait étudier le comportement de la solution proposée pour des grandes longueurs de câble. Dans ce cas, on s'attend à ce que la force de trainée du câble devienne prépondérante par rapport aux forces dues à sa raideur par exemple. L'optimisation de la longueur de câble en deviendrait d'autant plus importante. Il serait aussi intéressant d'effectuer les expériences avec des câbles ayant des propriétés physiques très différentes (plus raide, pesant ou flottant par exemple). Le système de compliance passive proposé dans cette étude pourrait tout à fait s'adapter à différents types de câbles, en ajustant sa flottabilité et sa raideur (paramétrés par les dimensions et densités des flotteurs et de la masse). Lors des expériences présentées dans cette étude, les variations de profondeur et de vitesse étaient grandement limitées par les dimensions des bassins d'essais. Des tests en pleine mer permettraient de tester le système dans un champ de travail beaucoup plus grand. Son comportement en présence

de courants et de turbulences (comme dans la zone de surf) pourrait alors être observé. Ces essais seraient aussi possibles en simulation, en complément d'essais en mer, grâce à l'environnement océanique simulé sous Vortex®. On imagine que le système de compliance passive, qui se comporte comme un amortisseur, aura un impact positif dans la limitation de la transmission du pilonnement de l'USV (dû à la houle) au ROV. Mais il est encore nécessaire d'effectuer des simulations ou expériences pour confirmer ces hypothèses.

Perspectives générales

Au delà du simple contrôle automatique du câble limitant sa traînée et ses risques d'accroche, la solution proposée dans cette étude a de multiples applications.

Tout d'abord, bien que cette solution ait été présentée pour des ROV de petite taille et pour de faibles profondeurs, elle pourrait tout à fait être adaptée à des systèmes plus encombrants et pour de grandes profondeurs. Dans de tels cas, ce système pourrait s'intégrer à un Tether Management System (TMS) en profondeur. En effet, si l'enrouleur reste embarqué à bord d'un bateau en surface et que le ROV est très éloigné de celui-ci, les actions de déroulement et d'enroulement du câble se feront ressentir avec un délai trop important au niveau du ROV.

Une application envisagée concerne la cordée de robots (introduite par la thèse de Moreira (2019)), ou plus largement aux flottilles de robots. Au-delà de la gestion mécanique de l'ombilical, on souhaite par ce câble offrir un moyen de communication haut débit de sorte à pouvoir distribuer les informations en temps réel au niveau de chaque ROV. Ainsi déployée selon un motif souhaité, la cordée pourrait se comporter comme une antenne de grande envergure à l'écoute des fonds marins (domaine qui exige une excellente synchronisation entre les différents points de mesure). Enfin, pour compléter les recherches en cours au sein du laboratoire sur l'asservissement visuel des robots selon une forme souhaitée d'ombilical, la maîtrise de la longueur variable de câble entre deux robots contribuera à améliorer la mesure de leur positionnement relatif.

Ce dernier point mène à une autre application principale envisagée pour ce système, qui concerne la localisation sous-marine des robots. En effet, les transmissions électromagnétiques ne sont pas utilisables sous l'eau aux fréquences des technologies de navigation par le Global Positioning System (GPS). La visibilité limitée, due à la réduction de la luminosité en profondeur et à la turbidité dans les zones côtières, ne permet pas non plus de se reposer sur des technologies de localisation basées sur la vision. La position du ROV pourrait, en revanche, être estimée à partir de la connaissance de la configuration du câble. En maintenant le câble en configuration semi-tendue, il est possible d'avoir une estimation de la distance entre ses deux extrémités. La profondeur du ROV est connue grâce à son capteur de profondeur. La direction du câble pourrait être obtenue en instrumentant l'enrouleur de façon à mesurer la direction de départ du câble. On supposerait alors, qu'en configuration semi-tendue, le ROV se trouve dans le prolongement du départ du câble. Des techniques telles que le calcul ensembliste par intervalles pourraient être utilisées (Louédec et Jaulin 2021) pour estimer la position du ROV par rapport à l'USV à partir de ces trois éléments (distance entre les deux véhicules, direction du ROV par rapport à l'USV et profondeur du ROV).

On envisage par ailleurs des stratégies de contrôle global du système, basées sur le contrôle de la longueur de câble mais aussi sur le contrôle des déplacements de l'USV et du ROV. La commande pourrait être adaptée en fonction de l'environnement du système. En particulier, les courants agissant sur le câble pourraient être estimés à l'aide d'un modèle et d'une mesure de la houle à la surface de l'eau. Pour cela, l'USV pourrait être équipé d'une centrale inertielle dédiée à la mesure de la houle. Les stratégies de contrôle global pourraient offrir une répartition réfléchie de l'actionnement du système pour optimiser différents critères suivant le type de mission, tels que la consommation d'énergie du système. Des scénarios de contrôle du câble pourraient aussi être mis en place. Par exemple : au début de sa mission, le ROV part en plongée avec une grande longueur de câble disponible, puis la longueur est contrôlée automatiquement à la configuration courante du ROV au cours de la mission, pour enfin être réduite complètement en treuillant le ROV lors de son retour. Le système pourrait être contrôlé par intermittence dans une configuration semi-tendue plus ajustée, de façon à estimer la localisation du ROV, par exemple lorsqu'il atteindrait une zone d'intérêt au cours de la mission. Le contrôle du système global et de son câble dépendant alors de nombreux paramètres, il pourrait être optimisé, en fonction de la mission, par des méthodes telles que la logique floue, une fonction d'optimisation ou une commande robuste.

Annexe A

Modélisation du câble

A.1 Script Matlab de calcul de la chaînette

```
1 function chainette
2 clear all;clear classes;clear java;
3 %% ----- PARAMETRES -----
4 xa = 0; % Abscisse du point A (USV)
5 ya = 0; % Ordonnée du point A (USV, forcément au dessus)
6 xb = 1.3; % Abscisse du point B (ROV)
7 yb = 0; % Ordonnée du point B (ROV forcément sous drone)
8 L = 1.6; % Longueur de câble
9 mu = 0.1; % Masse linéique
10 g = 9.81; % Accélération de la pesanteur
11
12 semi_tendu = 0; % Activation mode semi_tendu
13
14 %% ----- CALCULS -----
15 L_droit = sqrt((xb-xa)^2+(yb-ya)^2) % Longueur ligne droite
16
17 if ya==yb % CAS 1 : même hauteur
18     x0 = (xb-xa)/2;
19     fun = @(a) 2*a*sinh(x0/a)-L; % Equation sur la ...
20         longueur
21     a0 = [0.01 100]; % Plage de solutions
22     a = fzero(fun,a0); % Résolution equation
23     deltaY = yb-a*cosh(x0/a); % Changement repère
24     deltaX = (xb-xa)/2-xb; % Changement repère
25
26 else
27     if semi_tendu == 1
28         fun = @(a) a*cosh((xa-xb)/a)-(ya-yb)-a;
29         a0 = [0.1 100]; % Plage de solutions
30         a = fzero(fun,a0) % Résolution equation
```

```

30         L_semiTendu = a*sinh((xb-xa)/a)      % Longueur semi-tendue
31         deltaY      = yb-a;                  % Changement repère
32         deltaX      = -xb;                  % Changement repère
33         L = L_semiTendu;
34     else
35         fun = @(a) L^2-(ya-yb)^2-4*a^2*(sinh((xa-xb)/(2*a)))^2;
36         a0   = [0.1 50];                    % Plage de solutions
37         a     = fzero(fun,a0);               % Résolution equation
38         xm   = a*atanh((ya-yb)/L)+(xa+xb)/2; % Point le plus bas
39         deltaX = -xm;                       % Changement repère
40         deltaY = ya-a*cosh((xa-xm)/a);     % Changement repère
41     end
42 end
43
44 % Tension
45 Th = a*mu*g
46 Tv = @(x) Th*sinh((x+deltaX)/a);
47 s = sign(xb-xa);
48
49 %% ----- TRACE -----
50 x = min(xa,xb):0.01:max(xa,xb);
51 y = a*cosh((x+deltaX)/a)+deltaY;
52 clf; axis([-0.1,1.4,-1,0.4]); axis square; hold on;
53 plot(x,y);
54 quiver(xb,yb,-s*Th,-s*Tv(xb));
55 quiver(xa,ya,s*Th,s*Tv(xa));
56 plot(xa,ya,'+red');
57 plot(xb,yb,'+red');
58
59 % Annotations :
60 Tva = Tv(xa);
61 Tvb = Tv(xb);
62 sa = strcat('A (',string(xa),',',string(ya),') [m]');
63 sb = strcat('B (',string(xb),',',string(yb),') [m]');
64 sl = strcat('L = ',string(L),' [m]');
65 sp = strcat('a = ',string(a),' [m]');
66 smu= strcat('mu = ',string(mu),' [kg/m]');
67 sta= strcat('Ta (',string(Th),',',string(Tva),') [N]');
68 stb= strcat('Tb (',string(-Th),',',string(-Tvb),') [N]');
69 str = {sa,sb,sl,sp,smu,sta,stb};
70 annotation('textbox','String',str,'FitBoxToText','on');
71
72 end

```

A.2 Script Matlab associé au modèle Simulink du câble

```

1
2 clear all;clf;
3 %% Paramètres mécaniques de l'ombilical;
4 % La gravité est suivant -Y et l'axe X des rotules correspond à ...
   l'axe du
5 % câble
6
7 dl          = 0.05;           %Longueur maillon (m)
8 R           = 2e-3;          %Rayon cable (m)
9 CL_stiff_x  = 3.2e-4/dl;     %Raideur torsion/maillon (N.m/deg)
10 CL_stiff_y  = 1.43e-4/dl;   %Raideur courbure/maillon (N.m/deg)
11 CL_stiff_z  = CL_stiff_y;   %Raideur courbure/ maillon (N.m/deg)
12 CL_damper_x = CL_stiff_x/10; %Amortissement torsion/maillon ...
   (N.m/(deg/s))
13 CL_damper_y = CL_stiff_y/2; %Amortissement courbure/maillon ...
   (N.m/(deg/s))
14 CL_damper_z = CL_stiff_z/2; %Amortissement courbure/maillon ...
   (N.m/(deg/s))
15 PE_x       = 0;             %Position équilibre maillon (deg)
16 PE_y       = 0;             %Position équilibre maillon (deg)
17 PE_z       = 0;             %Position équilibre maillon (deg)
18 Dv         = 1100;         % Densité volumique du câble (kg/(m^3))
19 V          = pi*R^2*dl;     % Volume maillon (m3)
20
21
22 %% Paramètres des points d'attache
23 Xa = 0; %Coordonnées du point d'attache A;
24 Ya = 0;
25 Za = 0;
26
27 Xb = 1.2; %Coordonnées du point d'attache B;
28 Yb = -0.5;
29 Zb = 0;
30
31 %% Forces extérieures
32 g = -9.80665; % Dans l'air
33 rho = 1000; % Densité volumique de l'eau
34 fx = 0; % Force horizontale
35 fy = -rho*V*g; % Poussee d'Archimede
36 fz = 0;
37
38 % Simulink
39 sim('Cable3D_forces_ext');
40

```

```
41 %% Recuperation positions
42 P=zeros(32,3);
43 N=size(x1,1);
44 for i=1:32
45     x=eval(sprintf('%s%d','x',i));
46     P(i,1)=x(N);
47     y=eval(sprintf('%s%d','y',i));
48     P(i,2)=y(N);
49     z=eval(sprintf('%s%d','z',i));
50     P(i,3)=z(N);
51 end
52
53 %% Recuperation forces
54 N=size(Force_A,1);
55 ForceA = [Force_A(N,1) Force_A(N,2) Force_A(N,3)];
56 ForceB = [Force_B(N,1) Force_B(N,2) Force_B(N,3)];
57 TorqueA = [Torque_A(N,1) Torque_A(N,2) Torque_A(N,3)];
58 TorqueB = [Torque_B(N,1) Torque_B(N,2) Torque_B(N,3)];
```

Annexe B

Mesure expérimentale de la raideur en torsion

B.1 Détails calculs raideur en torsion

Cette annexe détaille le calcul de la raideur en torsion linéique d'un câble réel à partir du protocole expérimental décrit en section II.2.4 et illustré sur le schéma de la figure B.1.

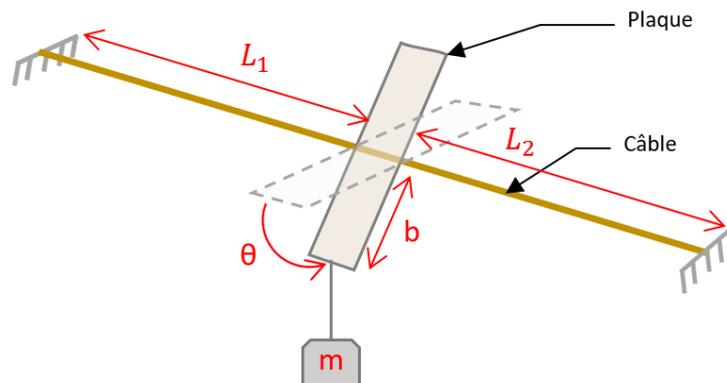


Figure B.1 – Schéma de la détermination expérimentale de la raideur en torsion d'un câble

La masse m , suspendue à la plaque de demi-longueur b , génère un moment τ . Ce moment s'exprime comme produit de la force due à la masse, F et du bras de levier, d (distance b projetée dans le plan horizontal) :

$$\begin{aligned}\tau &= F \cdot d \\ &= M \cdot g \cdot b \cdot \cos(\theta),\end{aligned}\tag{B.1}$$

avec θ l'angle de la plaque, qui correspond à la torsion du câble.

Par ailleurs, la raideur en torsion d'un élément est définie par le rapport entre le moment nécessaire pour tordre cet élément et l'angle de torsion. D'où :

$$\tau = K \cdot \theta,\tag{B.2}$$

avec K la raideur globale de l'élément de longueur L .

Le moment est inversement proportionnel à la longueur déformée. En effet, plus la longueur de câble est courte, plus il est dur de la déformer. On a donc, avec K_t la raideur linéique en torsion du câble :

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{K_t \cdot \theta}{L} \\ \implies K_t &= K \cdot L\end{aligned}\tag{B.3}$$

De plus, lorsque les deux extrémités du câble sont fixées, le moment au niveau de la plaque correspond à la somme du moment nécessaire à tordre la partie gauche τ_g et du moment nécessaire à tordre la partie droite τ_d . En notant L_1 et L_2 les longueurs de câble respectivement à gauche et à droite de la plaque, on a, d'une manière générale :

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_g + \tau_d \\ &= \frac{K_t \cdot \theta}{L_1} + \frac{K_t \cdot \theta}{L_2} \\ &= K_t \cdot \theta \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2} \right)\end{aligned}\tag{B.4}$$

D'où :

$$K_t = \frac{\tau}{\theta} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}\tag{B.5}$$

A partir des équations B.1 et B.5, on obtient donc l'expression de la raideur en torsion intrinsèque du câble, par unité de longueur, rappelée ici (équation II.18 du chapitre II) :

$$K_t = \frac{m \cdot g \cdot b \cdot \cos \theta}{\theta} \cdot \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Dans le cas particulier où la plaque générant le couple se situe au milieu du câble, on a $L_1 = L_2 = L/2$. On obtient donc :

$$K_t = \frac{M \cdot g \cdot b \cdot \cos(\theta) \cdot L}{4 \cdot \theta}\tag{B.6}$$

B.2 Calcul incertitude et pondération

Les expériences de mesure en torsion ont été conduites plusieurs fois, pour plusieurs valeurs de masses et de tension du câble et pour plusieurs positions du plateau le long du câble (pas forcément au centre). On détaille maintenant la méthode de détermination de la raideur en torsion K_t de façon à obtenir un résultat le plus précis possible à partir de différentes mesures.

On dispose de plusieurs mesures K_{t_i} , $i = 1, \dots, I$, supposées indépendantes et non biaisées, mais caractérisées par des incertitudes de mesure différentes. En effet, les incertitudes de mesure de K_t dépendent de l'incertitude de mesure de chacun des termes apparaissant dans l'équation II.18. Pour prendre en compte l'incertitude de mesure, on considère que chaque paramètre j a une valeur comprise entre j_{i-} et j_{i+} , pour l'observation i . D'après l'équation, K_t est monotone croissante par rapport à chacune des variables, à part θ , pour lequel elle est décroissante (le problème étant symétrique, on considère $L_1 \leq l_2$). On a donc :

$$\begin{cases} K_{t_{i-}} &= \frac{m_{i-} \cdot g \cdot b_{i-} \cdot \cos \theta_{i+}}{\theta_{i+}} \frac{L_{1i-} \cdot L_{2i-}}{L_{1i-} + L_{2i-}} \\ K_{t_{i+}} &= \frac{m_{i+} \cdot g \cdot b_{i+} \cdot \cos \theta_{i-}}{\theta_{i-}} \frac{L_{1i+} \cdot L_{2i+}}{L_{1i+} + L_{2i+}} \end{cases}$$

On note $\Delta_{K_{t_i}}$ la largeur de la fourchette de chaque mesure K_{t_i} , avec $\Delta_{K_{t_i}} = K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}$. Il est à noter que la valeur de la mesure K_{t_i} n'est pas nécessairement centrée par rapport à cette fourchette.

On cherche la meilleure façon de combiner les différentes mesures K_{t_i} pour obtenir une estimation de K_t qui soit simple (on se limite à des moyennes pondérées des K_{t_i}) et de variance minimale. Les mesures K_{t_i} ont des variances $\mathbb{V}(K_{t_i}) = \sigma_i^2$ différentes, l'écart-type σ_i étant proportionnel à $\Delta_{K_{t_i}}$, comme justifié plus bas.

On cherche les poids ω_i , $i = 1, \dots, I$, avec $\sum_{i=1}^I \omega_i = 1$, tels que la moyenne pondérée $\overline{K_{t_\omega}} = \sum_{i=1}^I \omega_i \cdot K_{t_i}$ ait une variance minimale.

Comme les K_{t_i} sont indépendantes,

$$\mathbb{V}(\overline{K_{t_\omega}}) = \sum_{i=1}^I \omega_i^2 \cdot \mathbb{V}(K_{t_i}) = \sum_{i=1}^I \omega_i^2 \cdot \sigma_i^2$$

D'après la méthode du Lagrangien, si $\mathbb{V}(\overline{K_{t_\omega}})$ (fonction du vecteur $\omega = \omega_{i \in [1;I]}$) est minimale en $\omega^* = \omega_{i \in [1;I]}^*$, sous la contrainte $g(\omega) = 1 - \sum_{i=1}^I \omega_i = 0$, alors il existe une constante λ , appelée multiplicateur de Lagrange, telle que le Lagrangien du problème défini par $L_\lambda(\omega) = \mathbb{V}(\overline{K_{t_\omega}}) + \lambda g(\omega)$ a toutes ses dérivées partielles nulles au point (ω^*, λ) . On en déduit le système :

$$\begin{cases} \frac{\partial L_\lambda(\omega^*)}{\partial \omega_i} = \frac{\partial \mathbb{V}(\overline{K_{t_\omega}})(\omega^*)}{\partial \omega_i} + \lambda \frac{\partial g(\omega^*)}{\partial \omega_i} = 2\omega_i \cdot \sigma_i^2 - \lambda = 0 \quad \forall i = 1, \dots, I \\ \frac{\partial L_\lambda(\omega^*)}{\partial \lambda} = g(\omega^*) = 0 \end{cases}$$

équivalent à :

$$\begin{cases} \omega_i^* = \frac{\lambda}{2\sigma_i^2} \quad \forall i = 1, \dots, I \\ \sum_{i=1}^I \omega_i^* = 1 = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^I \frac{1}{\sigma_i^2} \end{cases}$$

ce qui donne $\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{\sigma_i^2}}$ et

$$\omega_i^* = \frac{\frac{1}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad \forall i = 1, \dots, I.$$

Ce qui est équivalent à :

$$\omega_i^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{\Delta_{K_{t_i}}^2}} \cdot \frac{1}{\Delta_{K_{t_i}}^2} \quad \forall i = 1, \dots, I$$

car $\Delta_{K_{t_i}}$ est supposé proportionnel à σ_i .

Les poids optimaux sont donc inversement proportionnels à la variance de la largeur de la fourchette de mesure.

B.2.1 Justification de la proportionnalité entre l'écart-type et la largeur de la fourchette de mesure

L'écart-type de l'erreur de mesure est généralement proportionnel à la largeur de la fourchette de mesure $\Delta_{K_{t_i}} = K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-$.

Par exemple, si on suppose que K_{t_i} suit une loi uniforme sur l'intervalle $[K_{t_i}^-; K_{t_i}^+]$, alors sa densité vaut $\frac{1}{K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-}$,

son espérance vaut :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(K_{t_i}) &= \int_{K_{t_i}^-}^{K_{t_i}^+} x \frac{1}{K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-} dx \\ &= \frac{1}{K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-} \int_{K_{t_i}^-}^{K_{t_i}^+} x dx \\ &= \frac{1}{K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-} \left[\frac{x^2}{2} \right]_{K_{t_i}^-}^{K_{t_i}^+} \\ &= \frac{1}{K_{t_i}^+ - K_{t_i}^-} \left[\frac{K_{t_i}^2}{2} - \frac{K_{t_i}^2}{2} \right] \\ &= \frac{K_{t_i}^+ + K_{t_i}^-}{2} \end{aligned}$$

et sa variance vaut :

$$\begin{aligned}
\mathbb{V}(K_{t_i}) &= \mathbb{E}(K_{t_i}^2) - (\mathbb{E}(K_{t_i}))^2 \\
&= \frac{1}{K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}} \int_{K_{t_{i-}}}^{K_{t_{i+}}} x^2 dx - \left(\frac{K_{t_{i+}} + K_{t_{i-}}}{2} \right)^2 \\
&= \frac{1}{K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{K_{t_{i-}}}^{K_{t_{i+}}} - \left(\frac{K_{t_{i+}} + K_{t_{i-}}}{2} \right)^2 \\
&= \frac{1}{K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}} \frac{K_{t_{i+}}^3 - K_{t_{i-}}^3}{3} - \left(\frac{K_{t_{i+}} + K_{t_{i-}}}{2} \right)^2 \\
&= \frac{1}{K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}} \frac{(K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}) [K_{t_{i+}}^2 + K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + K_{t_{i-}}^2]}{3} - \frac{K_{t_{i+}}^2 + 2K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + K_{t_{i-}}^2}{4} \\
&= \frac{K_{t_{i+}}^2 + K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + K_{t_{i-}}^2}{3} - \frac{K_{t_{i+}}^2 + 2K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + K_{t_{i-}}^2}{4} \\
&= \frac{4K_{t_{i+}}^2 + 4K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + 4K_{t_{i-}}^2 - 3K_{t_{i+}}^2 - 6K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} - 3K_{t_{i-}}^2}{12} \\
&= \frac{K_{t_{i+}}^2 - 2K_{t_{i+}}K_{t_{i-}} + K_{t_{i-}}^2}{12} \\
&= \frac{(K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}})^2}{12} \\
&= \frac{\Delta_{K_{t_i}}^2}{12}.
\end{aligned}$$

D'où, avec $\mathbb{V}(K_{t_i}) = \sigma_i^2$:

$$\sigma_i = \frac{\Delta_{K_{t_i}}}{\sqrt{12}}$$

L'écart-type de K_{t_i} est donc bien proportionnel à la largeur de la fourchette de mesure $\Delta_{K_{t_i}} = K_{t_{i+}} - K_{t_{i-}}$.

B.3 Résultats expérimentaux

B.3.1 Câble Fathom Slim de BlueRobotics

La figure B.2 illustre la mesure expérimentale de la raideur en torsion pour le câble Fathom Slim décrite en section II.2.4.

Les données mesurées lors de cette expérience sont présentées dans le tableau B.1.

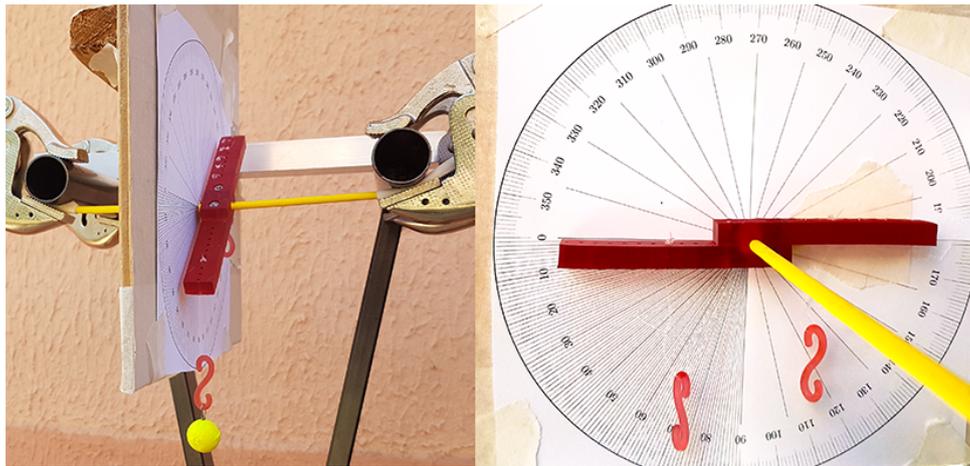


Figure B.2 – Photo de la mesure expérimentale de la raideur en torsion pour le câble Fathom Slim

Tableau B.1 – Valeurs expérimentales pour la mesure de la raideur en torsion du câble Fathom slim de BlueRobotics

| $\epsilon - >$ | 0.005 | 0.005 | 0.5 | 0.0005 | 0.5 | | | | |
|----------------|--------|--------|-------|--------|----------------|---------|----------|-------------|--|
| N° | L1 (m) | L2 (m) | m (g) | b (m) | θ (deg) | Couple | Kt | Pondération | |
| 1 | 0.15 | 0.724 | 26 | 0.04 | 59 | 5.3E-03 | 6.34E-04 | 0.036 | |
| 2 | 0.15 | 0.724 | 32 | 0.04 | 63 | 5.7E-03 | 6.44E-04 | 0.037 | |
| 3 | 0.15 | 0.724 | 45 | 0.04 | 71 | 5.7E-03 | 5.76E-04 | 0.043 | |
| 4 | 0.15 | 0.724 | 63 | 0.04 | 75 | 6.4E-03 | 6.07E-04 | 0.035 | |
| 5 | 0.15 | 0.724 | 75 | 0.04 | 77 | 6.6E-03 | 6.12E-04 | 0.032 | |
| 6 | 0.3 | 0.575 | 26 | 0.03 | 51 | 4.8E-03 | 1.07E-03 | 0.018 | |
| 7 | 0.3 | 0.575 | 32 | 0.03 | 54 | 5.5E-03 | 1.16E-03 | 0.017 | |
| 8 | 0.3 | 0.575 | 45 | 0.03 | 60 | 6.6E-03 | 1.25E-03 | 0.015 | |
| 9 | 0.3 | 0.575 | 63 | 0.03 | 64 | 8.1E-03 | 1.43E-03 | 0.012 | |
| 10 | 0.3 | 0.575 | 75 | 0.03 | 66 | 9.0E-03 | 1.54E-03 | 0.010 | |
| 11 | 0.438 | 0.438 | 26 | 0.03 | 50 | 4.9E-03 | 1.23E-03 | 0.015 | |
| 12 | 0.438 | 0.438 | 32 | 0.03 | 54 | 5.5E-03 | 1.29E-03 | 0.015 | |
| 13 | 0.438 | 0.438 | 45 | 0.03 | 60 | 6.6E-03 | 1.38E-03 | 0.014 | |
| 14 | 0.438 | 0.438 | 63 | 0.03 | 65 | 7.8E-03 | 1.51E-03 | 0.011 | |
| 15 | 0.438 | 0.438 | 75 | 0.03 | 66 | 9.0E-03 | 1.71E-03 | 0.009 | |
| 16 | 0.438 | 0.438 | 99 | 0.03 | 69 | 1.0E-02 | 1.90E-03 | 0.007 | |
| 17 | 0.133 | 0.477 | 26 | 0.03 | 39 | 5.9E-03 | 9.09E-04 | 0.016 | |
| 18 | 0.133 | 0.477 | 32 | 0.03 | 44 | 6.8E-03 | 9.17E-04 | 0.017 | |
| 19 | 0.133 | 0.477 | 45 | 0.03 | 51 | 8.3E-03 | 9.74E-04 | 0.017 | |
| 20 | 0.133 | 0.477 | 63 | 0.03 | 57 | 1.0E-02 | 1.06E-03 | 0.015 | |
| 21 | 0.133 | 0.477 | 75 | 0.03 | 59 | 1.1E-02 | 1.15E-03 | 0.013 | |
| 22 | 0.133 | 0.477 | 99 | 0.03 | 63 | 1.3E-02 | 1.25E-03 | 0.011 | |
| 23 | 0.207 | 0.402 | 26 | 0.03 | 44 | 5.5E-03 | 9.79E-04 | 0.018 | |
| 24 | 0.207 | 0.402 | 32 | 0.03 | 48 | 6.3E-03 | 1.03E-03 | 0.018 | |
| 25 | 0.207 | 0.402 | 45 | 0.03 | 55 | 7.6E-03 | 1.08E-03 | 0.018 | |

Suite sur la page suivante

Table B.1 – Suite de la page précédente

| N° | L1 (m) | L2 (m) | m (g) | b (m) | θ (deg) | Couple | Kt | Pondération |
|----|--------|--------|-------|-------|----------------|---------|----------|-------------|
| 26 | 0.207 | 0.402 | 63 | 0.03 | 59 | 9.5E-03 | 1.27E-03 | 0.014 |
| 27 | 0.207 | 0.402 | 75 | 0.03 | 61 | 1.1E-02 | 1.37E-03 | 0.012 |
| 28 | 0.207 | 0.402 | 99 | 0.03 | 64 | 1.3E-02 | 1.56E-03 | 0.009 |
| 29 | 0.305 | 0.305 | 26 | 0.03 | 44 | 5.5E-03 | 1.09E-03 | 0.016 |
| 30 | 0.305 | 0.305 | 32 | 0.03 | 49 | 6.2E-03 | 1.10E-03 | 0.018 |
| 31 | 0.305 | 0.305 | 45 | 0.03 | 56 | 7.4E-03 | 1.16E-03 | 0.018 |
| 32 | 0.305 | 0.305 | 63 | 0.03 | 60 | 9.3E-03 | 1.35E-03 | 0.013 |
| 33 | 0.305 | 0.305 | 75 | 0.03 | 62 | 1.0E-02 | 1.46E-03 | 0.012 |
| 34 | 0.305 | 0.305 | 99 | 0.03 | 64 | 1.3E-02 | 1.74E-03 | 0.008 |
| 35 | 0.074 | 0.255 | 26 | 0.03 | 29 | 6.7E-03 | 7.58E-04 | 0.013 |
| 36 | 0.074 | 0.255 | 32 | 0.03 | 34 | 7.8E-03 | 7.55E-04 | 0.015 |
| 37 | 0.074 | 0.255 | 45 | 0.03 | 40 | 1.0E-02 | 8.33E-04 | 0.013 |
| 38 | 0.074 | 0.255 | 63 | 0.03 | 49 | 1.2E-02 | 8.16E-04 | 0.015 |
| 39 | 0.074 | 0.255 | 75 | 0.03 | 52 | 1.4E-02 | 8.59E-04 | 0.014 |
| 40 | 0.074 | 0.255 | 99 | 0.03 | 57 | 1.6E-02 | 9.15E-04 | 0.012 |
| 41 | 0.074 | 0.255 | 124 | 0.03 | 60 | 1.8E-02 | 9.99E-04 | 0.010 |
| 42 | 0.164 | 0.165 | 26 | 0.03 | 34 | 6.3E-03 | 8.79E-04 | 0.017 |
| 43 | 0.164 | 0.165 | 32 | 0.03 | 38 | 7.4E-03 | 9.20E-04 | 0.018 |
| 44 | 0.164 | 0.165 | 46 | 0.03 | 47 | 9.2E-03 | 9.26E-04 | 0.020 |
| 45 | 0.164 | 0.165 | 63 | 0.03 | 54 | 1.1E-02 | 9.51E-04 | 0.019 |
| 46 | 0.164 | 0.165 | 75 | 0.03 | 57 | 1.2E-02 | 9.94E-04 | 0.018 |
| 47 | 0.164 | 0.165 | 99 | 0.03 | 61 | 1.4E-02 | 1.09E-03 | 0.015 |
| 48 | 0.164 | 0.165 | 124 | 0.03 | 64 | 1.6E-02 | 1.18E-03 | 0.012 |
| 49 | 0.085 | 0.085 | 26 | 0.03 | 25 | 6.9E-03 | 6.75E-04 | 0.016 |
| 50 | 0.085 | 0.085 | 32 | 0.03 | 30 | 8.2E-03 | 6.62E-04 | 0.018 |
| 51 | 0.085 | 0.085 | 46 | 0.03 | 38 | 1.1E-02 | 6.84E-04 | 0.019 |
| 52 | 0.085 | 0.085 | 63 | 0.03 | 45 | 1.3E-02 | 7.09E-04 | 0.019 |
| 53 | 0.085 | 0.085 | 75 | 0.03 | 49 | 1.4E-02 | 7.20E-04 | 0.019 |
| 54 | 0.085 | 0.085 | 99 | 0.03 | 54 | 1.7E-02 | 7.72E-04 | 0.016 |
| 55 | 0.085 | 0.085 | 124 | 0.03 | 59 | 1.9E-02 | 7.76E-04 | 0.016 |
| 56 | 0.085 | 0.085 | 26 | 0.05 | 40 | 9.8E-03 | 5.95E-04 | 0.025 |
| 57 | 0.085 | 0.085 | 32 | 0.05 | 45 | 1.1E-02 | 6.01E-04 | 0.026 |
| 58 | 0.085 | 0.085 | 46 | 0.05 | 53 | 1.4E-02 | 6.24E-04 | 0.026 |

Les valeurs de la raideur calculées pour chacune de ces mesures, avec leurs valeurs maximales et minimales, dues à l'incertitude de mesure (trait vertical autour du point), sont tracées sur la figure B.3. Les paramètres (longueur de câble et masse) correspondants à chacun de ces points de mesure, ainsi que l'angle mesuré, sont représentés sur ce même graphique.

On observe que les mesures sont plus précises (longueur du trait vertical plus courte) lorsque L_1 est petite et qu'un angle important est obtenu avec une masse assez grande. En effet, l'angle mesuré est limité à 90° à cause de la configuration du système (torsion

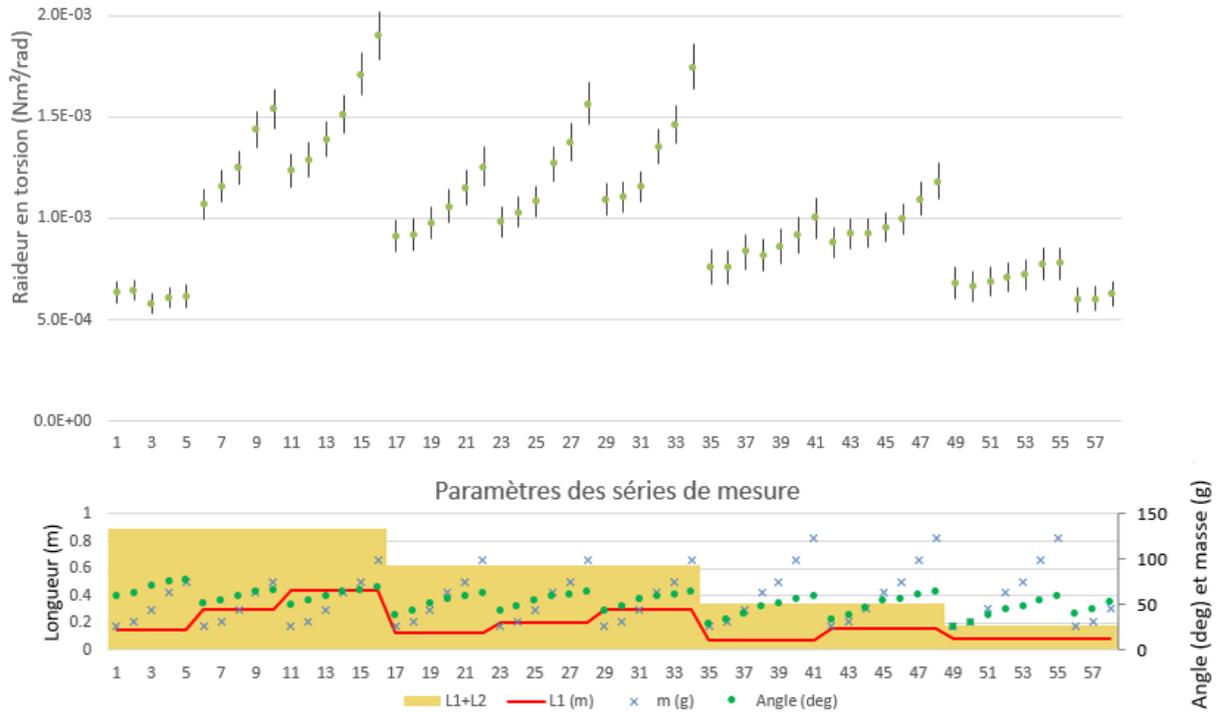


Figure B.3 – Points de mesure avec leurs incertitudes de la raideur en torsion du câble Fathom Slim

générée par la pesanteur) et une longueur de câble trop importante impose d'utiliser des masses plus petites pour conserver un angle inférieur à 90° . Par ailleurs, on observe aussi que pour certaines séries de mesures (lorsque la longueur est plus importante), la raideur du câble (supposée constante) augmente avec la masse ainsi qu'avec la longueur. Cependant, les points qui s'éloignent le plus de la moyenne des mesures sont ceux qui possèdent l'incertitude de mesure la plus importante.

La valeur de la raideur en torsion obtenue à partir de la moyenne pondérée de ces valeurs est de $8,8 \times 10^{-4} \text{ N m}^2/\text{rad} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ N m}^2/\text{deg}$.

A partir de ces données, on trace la courbe du couple normalisé C^* en fonction de l'angle normalisé θ^* , définis par :

$$\begin{cases} C^* &= \frac{C}{L_1 + L_2} \\ \theta^* &= \frac{\theta}{L_1 \cdot L_2} \end{cases}$$

D'après l'équation II.18, la pente de cette courbe doit donc correspondre à la raideur en torsion du câble. L'ensemble des points de mesure ainsi que la courbe correspondant au coefficient déterminé par les calculs sont représentés sur la figure B.4.

B.3.2 Câble Tortuga de SubseaTech

Une expérience similaire avait été réalisée pour le câble Tortuga de SubseaTech. Les valeurs des mesures sont récapitulées dans le tableau B.2.

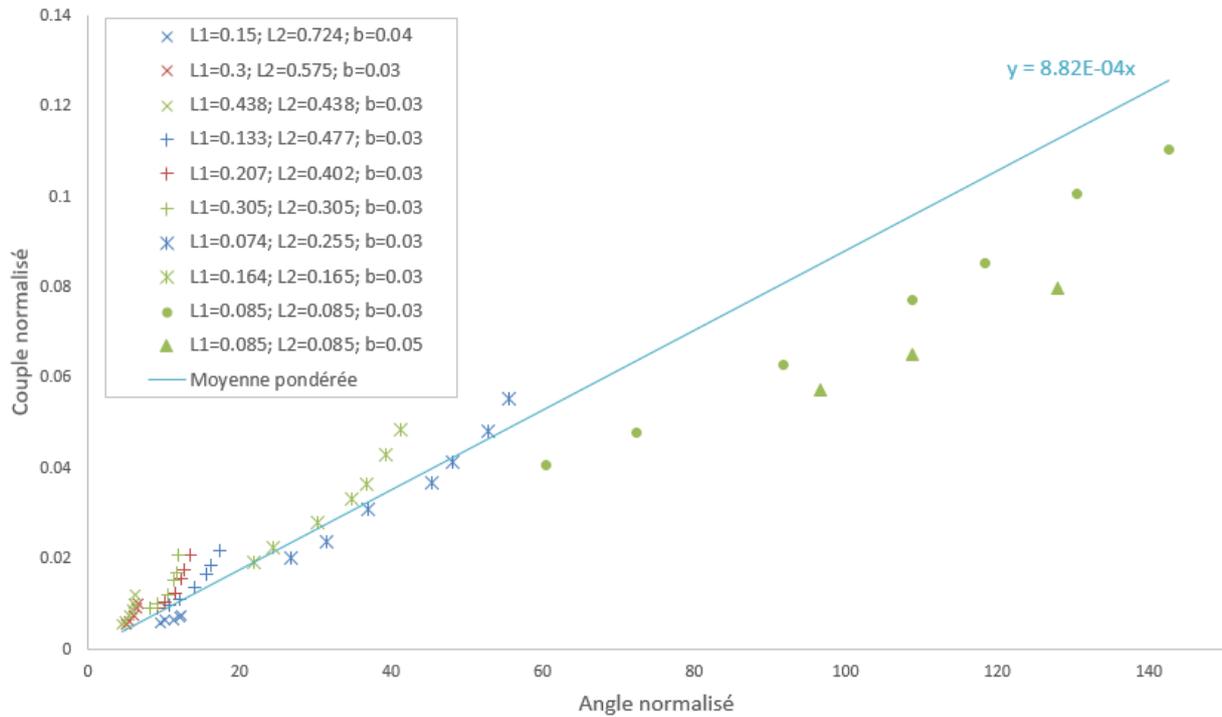


Figure B.4 – Courbe représentant le couple normalisé en fonction de l’angle normalisé pour le câble Fathom Slim

Tableau B.2 – Valeurs expérimentales pour la mesure de la raideur en torsion du câble Tortuga de SubseaTech

| $\epsilon \rightarrow$ | 0.005 | 0.005 | 0.2 | 0.0005 | | | | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------------|---------|-----------|-------------|--|
| N° | L1 (m) | L2 (m) | m (g) | b (m) | T (kg) | θ (°) | Couple | Kt | Pondération | |
| 1 | 0.63 | 0.63 | 4 | 0.12 | 8 | 3.82 | 4.7E-03 | 2.218E-02 | 0.004 | |
| 2 | 0.63 | 0.63 | 8 | 0.12 | 8 | 8.63 | 9.3E-03 | 1.948E-02 | 0.019 | |
| 3 | 0.63 | 0.63 | 12 | 0.12 | 8 | 15.47 | 1.4E-02 | 1.589E-02 | 0.061 | |
| 4 | 0.63 | 0.63 | 16 | 0.12 | 8 | 19.47 | 1.8E-02 | 1.646E-02 | 0.079 | |
| 5 | 0.63 | 0.63 | 20 | 0.12 | 8 | 24.62 | 2.1E-02 | 1.569E-02 | 0.109 | |
| 6 | 0.63 | 0.63 | 24 | 0.12 | 8 | 30.55 | 2.4E-02 | 1.437E-02 | 0.145 | |
| 7 | 0.63 | 0.63 | 28 | 0.12 | 8 | 34.52 | 2.7E-02 | 1.420E-02 | 0.154 | |
| 8 | 0.63 | 0.63 | 36 | 0.12 | 8 | 42.45 | 3.1E-02 | 1.329E-02 | 0.162 | |
| 9 | 0.315 | 0.945 | 4 | 0.12 | 8 | 2.87 | 4.7E-03 | 2.221E-02 | 0.003 | |
| 10 | 0.315 | 0.945 | 8 | 0.12 | 8 | 3.82 | 9.4E-03 | 3.327E-02 | 0.003 | |
| 11 | 0.315 | 0.945 | 12 | 0.12 | 8 | 4.78 | 1.4E-02 | 3.986E-02 | 0.003 | |
| 12 | 0.315 | 0.945 | 16 | 0.12 | 8 | 7.18 | 1.9E-02 | 3.523E-02 | 0.007 | |
| 13 | 0.315 | 0.945 | 20 | 0.12 | 8 | 9.11 | 2.3E-02 | 3.454E-02 | 0.011 | |
| 14 | 0.315 | 0.945 | 24 | 0.12 | 8 | 13.00 | 2.8E-02 | 2.866E-02 | 0.025 | |
| 15 | 0.315 | 0.945 | 28 | 0.12 | 8 | 13.98 | 3.2E-02 | 3.096E-02 | 0.024 | |
| 16 | 0.315 | 0.945 | 32 | 0.12 | 8 | 15.96 | 3.6E-02 | 3.071E-02 | 0.028 | |
| 17 | 0.315 | 0.945 | 36 | 0.12 | 8 | 17.96 | 4.0E-02 | 3.039E-02 | 0.033 | |
| 18 | 0.63 | 0.63 | 4 | 0.12 | 4 | 3.34 | 4.7E-03 | 2.537E-02 | 0.003 | |

Suite sur la page suivante

Table B.2 – Suite de la page précédente

| N° | L1 (m) | L2 (m) | m (g) | b (m) | T (kg) | θ (°) | Couple | Kt | Pondération |
|----|--------|--------|-------|-------|--------|--------------|---------|-----------|-------------|
| 19 | 0.63 | 0.63 | 8 | 0.12 | 4 | 6.22 | 9.4E-03 | 2.717E-02 | 0.007 |
| 20 | 0.63 | 0.63 | 12 | 0.12 | 4 | 8.63 | 1.4E-02 | 2.922E-02 | 0.011 |
| 21 | 0.63 | 0.63 | 16 | 0.12 | 4 | 10.08 | 1.9E-02 | 3.321E-02 | 0.012 |
| 22 | 0.63 | 0.63 | 20 | 0.12 | 4 | 12.51 | 2.3E-02 | 3.315E-02 | 0.017 |
| 23 | 0.63 | 0.63 | 24 | 0.12 | 4 | 13.98 | 2.7E-02 | 3.538E-02 | 0.018 |
| 24 | 0.63 | 0.63 | 28 | 0.12 | 4 | 15.96 | 3.2E-02 | 3.583E-02 | 0.020 |
| 25 | 0.63 | 0.63 | 32 | 0.12 | 4 | 17.46 | 3.6E-02 | 3.715E-02 | 0.021 |
| 26 | 0.63 | 0.63 | 36 | 0.12 | 4 | 18.46 | 4.0E-02 | 3.930E-02 | 0.020 |

Les valeurs de la raideur calculées pour chacune de ces mesures, avec leurs valeurs maximales et minimales, dues à l'incertitude de mesure (trait vertical autour du point), sont tracées sur la figure B.5. Les paramètres (longueur de câble et masse) correspondants à chacun de ces points de mesure, ainsi que l'angle mesuré, sont représentés sur ce même graphique.

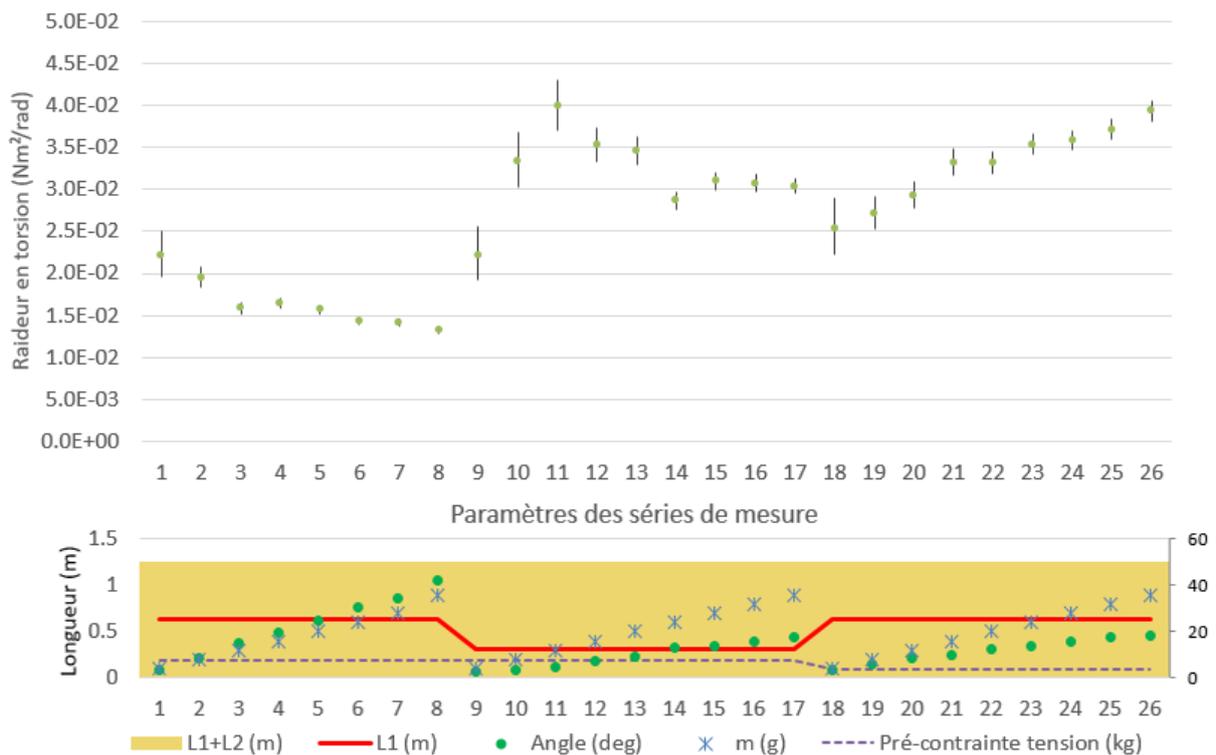


Figure B.5 – Points de mesure avec leurs incertitudes de la raideur en torsion du câble Tortuga

Enfin, les points de mesure sont aussi représentés sur la figure B.6, avec le couple normalisé en ordonnée et l'angle normalisé en abscisse.

La valeur de la raideur en torsion obtenue à partir de la moyenne pondérée de ces valeurs est de $1,96 \times 10^{-2} \text{ N m}^2/\text{rad} = 3,42 \times 10^{-4} \text{ N m}^2/\text{deg}$ et sa droite est tracée sur la figure B.6.

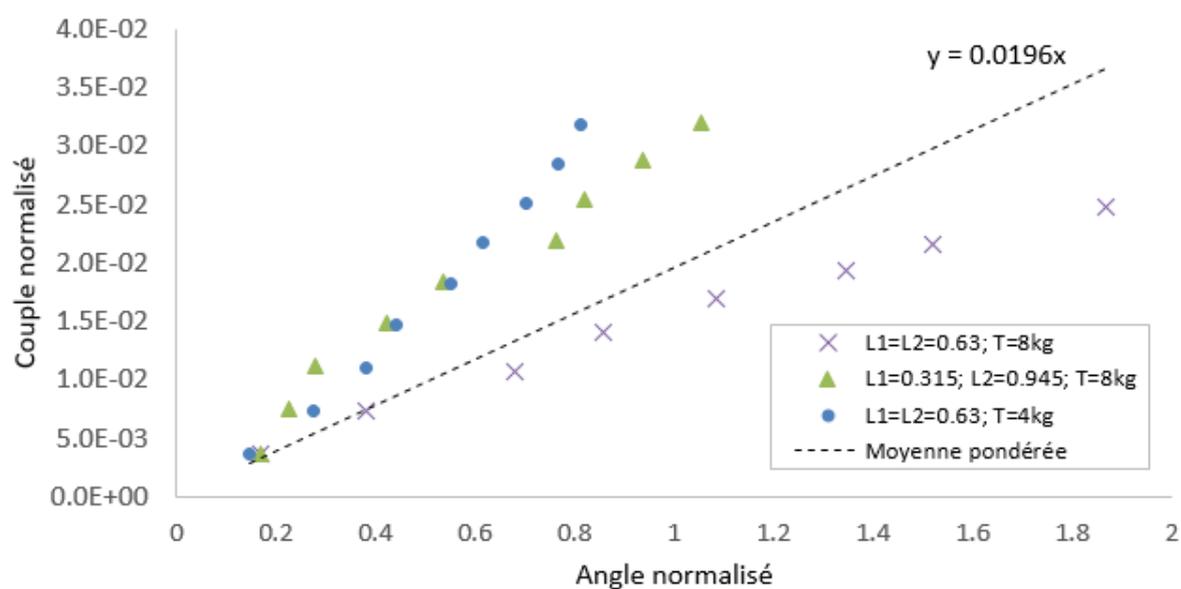


Figure B.6 – Courbe représentant le couple normalisé en fonction de l'angle normalisé pour le câble Tortuga

Annexe C

Simulation et contrôle du BR2 Heavy sous Vortex

C.1 Modèle physique du BR2 Heavy

C.1.1 Référentiels

Sous Vortex, il n'est pas possible d'utiliser le référentiel classiquement utilisé en robotique sous marine. Le référentiel a nécessairement son axe \vec{Z} orienté vers le haut. Les référentiels utilisés pour la simulation du ROV sous Vortex sont donc les suivants :

- Le référentiel global, fixé à la terre, noté \mathcal{R}_0 , avec l'axe \vec{Z}_0 orienté vers le haut, son origine au centre du bassin au niveau du sol et l'axe \vec{X}_0 parallèle aux côtés du bassin.
- Le référentiel lié au ROV, noté \mathcal{R}_R , dont l'origine est située au centre de gravité du ROV, l'axe \vec{X}_R orienté vers l'avant du ROV et l'axe \vec{Z}_R orienté vers le haut du ROV.

C.1.2 Centre de gravité

On détermine la position du centre de gravité du BR2 Heavy à partir de sa maquette 3D, fournie par BlueRobotics. Après avoir assigné les matériaux aux différentes pièces, on mesure la position du centre de gravité à $147,7 \text{ mm}$ du bas du châssis du ROV, sans batterie, et à $145,8 \text{ mm}$ avec une batterie de 259 g placée dans le tube du bas. Pour simplifier, on positionne le centre de gravité à 146 mm . Le ROV étant par ailleurs conçu de façon symétrique dans le plan XY, on peut donc supposer que son centre de gravité se situe au centre du ROV dans ce plan.

C.1.3 Configuration des propulseurs

Dans le but de déterminer les forces et moments appliqués sur le ROV par les 8 propulseurs dans le repère du ROV, il faut connaître l'orientation et la position de chacun des propulseurs.

Sur le modèle BR2 Heavy, avec 8 propulseurs, il est possible de monter les propulseurs

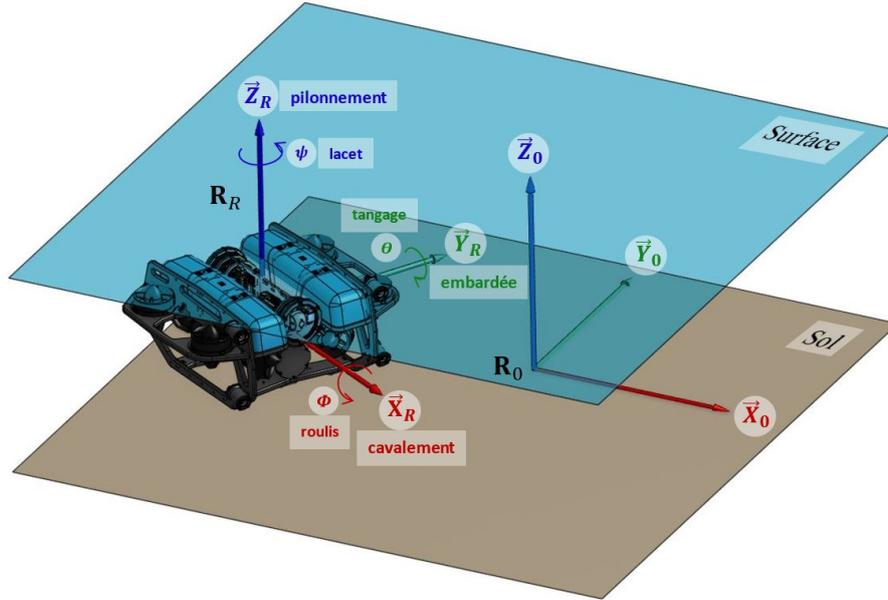


Figure C.1 – Positions du repère global et du repère du ROV

horizontaux soit à environ 45° par rapport à l'avant, pour une propulsion uniforme dans toutes les directions, soit à environ 30° pour une meilleure efficacité sur le cavalemt que sur l'emardée. Dans notre cas, nous avons choisi le montage à environ 45° .

On mesure la position des centres des propulseurs par rapport au centre de gravité du ROV. Le centre de poussée peut être pris n'importe où sur l'axe des propulseurs. Pour les propulseur verticaux (5 à 8), on choisit arbitrairement la coordonnée sur l'axe \vec{Z} au même niveau que le centre de gravité. Pour les propulseurs horizontaux, on choisit aussi des valeurs arbitraires dans le plan XY de façon que les 4 centres de poussée forment un rectangle symétrique par rapport à l'axe \vec{X} .

Les bras de leviers $l_i = [l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}]^T$ pour chacun des propulseurs, ainsi que leurs orientations, par rapport à l'axe \vec{X} pour les propulseurs horizontaux et par rapport à l'axe \vec{Z} pour les propulseurs verticaux, sont indiqués dans le tableau C.1 et la figure C.2.

| P_i | l_{xi} (mm) | l_{yi} (mm) | l_{zi} (mm) | Angle ($^\circ$) |
|-------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| P_1 | 130 | -102.57 | -31.03 | 42 |
| P_2 | 130 | 102.57 | -31.03 | -42 |
| P_3 | -146.81 | -102.57 | -31.03 | 132 |
| P_4 | -146.81 | 102.57 | -31.03 | 228 |
| P_5 | 120 | -218.025 | 0 | 0 |
| P_6 | 120 | 218.025 | 0 | 0 |
| P_7 | -120 | -218.025 | 0 | 0 |
| P_8 | -120 | 218.025 | 0 | 0 |

Tableau C.1 – Allocation des propulseurs

Le torseur τ_i de chaque propulseur P_i est défini à l'origine du repère du ROV en fonction de sa force $\vec{F}_i = [F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}]^T$ et de son bras de levier $l_i = [l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}]^T$ de cette

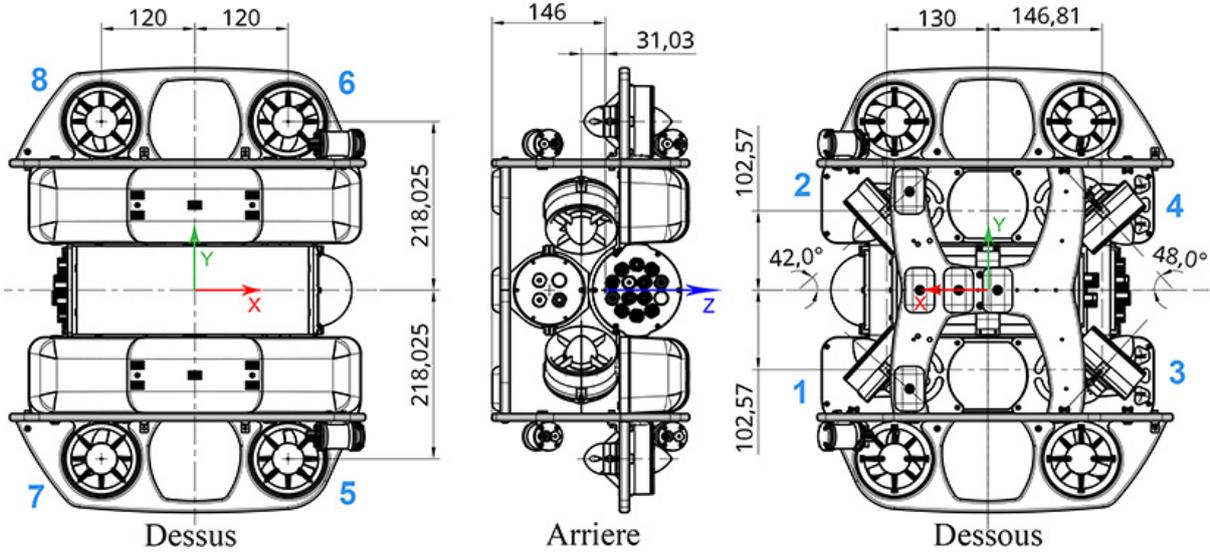


Figure C.2 – Plan du BR2 2 Heavy indiquant les positions de ses propulseurs et de son centre de gravité

façon :

$$\tau_i = \begin{bmatrix} \vec{F}_i \\ \mathbf{l}_i \wedge \vec{F}_i \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_R} = \begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \\ l_{yi}F_{zi} - l_{zi}F_{yi} \\ l_{zi}F_{xi} - l_{xi}F_{zi} \\ l_{xi}F_{yi} - l_{yi}F_{xi} \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_R} \quad (\text{C.1})$$

Pour le propulseur P_1 , avec $\forall i, F_i = \|\vec{F}_i\|$, on a par exemple :

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} F_1 \cdot \cos(42^\circ) \\ F_1 \cdot \sin(42^\circ) \\ 0 \\ 0.03103 \cdot F_1 \cdot \sin(42^\circ) \\ -0.03103 \cdot F_1 \cdot \cos(42^\circ) \\ 0.130 \cdot F_1 \cdot \sin(42^\circ) + 0.10257 \cdot F_1 \cdot \cos(42^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.74315 \\ 0.66913 \\ 0 \\ 0.02076 \\ -0.02306 \\ 0.16321 \end{bmatrix} F_1, \quad (\text{C.2})$$

Le torseur des actions combinées des propulseurs $\tau \in \mathbb{R}^6$ peut donc s'écrire sous la forme :

$$\tau = T \cdot F \quad (\text{C.3})$$

Avec, $T \in \mathbb{R}^{6 \times 8}$ la matrice de configuration des propulseurs et $F \in \mathbb{R}^8$ le vecteur des poussées de chacun des propulseurs.

$$T = \begin{bmatrix} 0.74315 & 0.74315 & -0.66913 & -0.66913 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.66913 & -0.66913 & 0.74315 & -0.74315 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0.02076 & -0.02076 & 0.02306 & -0.02306 & -0.21803 & -0.21803 & 0.21803 & 0.21803 \\ -0.02306 & -0.02306 & 0.02076 & 0.02076 & -0.12 & 0.12 & -0.12 & 0.12 \\ 0.16321 & -0.16321 & -0.17773 & 0.17773 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

Cette matrice va être utile pour le pilotage du ROV comme présenté en section C.3.

C.2 Modélisation sous Vortex

C.2.1 Texture et géométrie

La maquette 3D du BR2 est insérée sous Vortex à partir de son fichier COLLABorative Design Activity (COLLADA) dans un fichier galerie. Il s'agit alors uniquement d'un fichier graphique et de texture n'ayant pas de propriétés physiques. Pour les prendre en compte, il faut créer une pièce puis une géométrie de collision à partir de la galerie. Celle-ci est modélisée par une géométrie de base (cube, cylindre,...) ou par un maillage plus ou moins précis. Dans le cas du ROV on a choisi un maillage convexe. On a alors une pièce, à partir de laquelle toute la dynamique est calculée, liée à une galerie, qui permet de visualiser le ROV, comme on peut le voir sur la figure C.3.

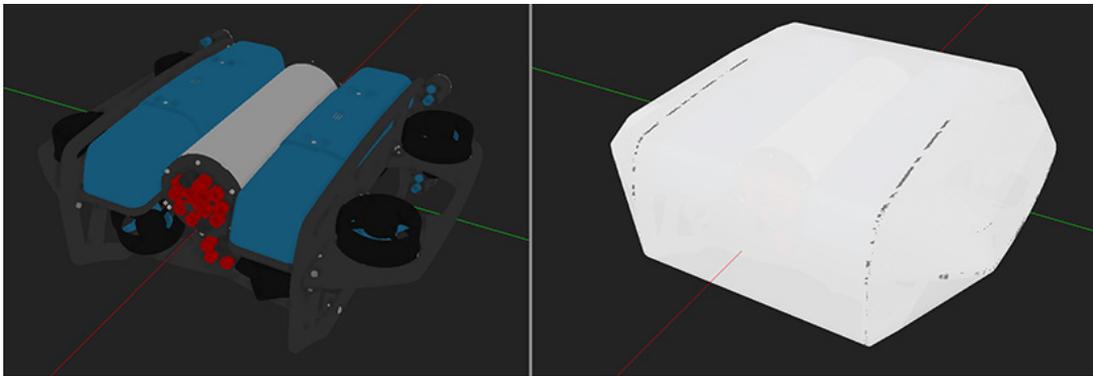


Figure C.3 – Vue 3D de la texture (gauche) et de la géométrie de collision (droite) du BR2 Heavy

C.2.2 Paramètres physiques

- La masse du BR2 Heavy est définie à $11,5 \text{ kg}$, telle que fournie par BlueRobotics.
- Le centre de gravité se trouve au centre de la pièce 3D, par construction.
- La matrice d'inertie est déterminée automatiquement à partir de la 3D, en imposant des produits d'inertie nuls étant donné que l'on considère que le BR2 est symétrique suivant les plans (XZ) et (YZ). En effet, il a été conçu de façon à rester horizontal lorsqu'il est à l'équilibre dans l'eau.
- Le centre de flottaison se situe juste au dessus du centre de gravité (pour assurer l'équilibre horizontal). Celui-ci a été déterminé à $2,7 \text{ cm}$ au dessus du centre de gravité dans (Lack 2017) pour le BR2 classique.
- La documentation du BR2 indique une flottabilité relative de $0,2 \text{ kg}$. En considérant que sa masse est de $11,5 \text{ kg}$, on en déduit que son volume déplacé est de $11,7 \text{ litres}$ ($0,0117 \text{ m}^3$).
- On choisit arbitrairement d'appliquer un coefficient de traînée de 1 suivant les axes \vec{X} , \vec{Y} et \vec{Z} .

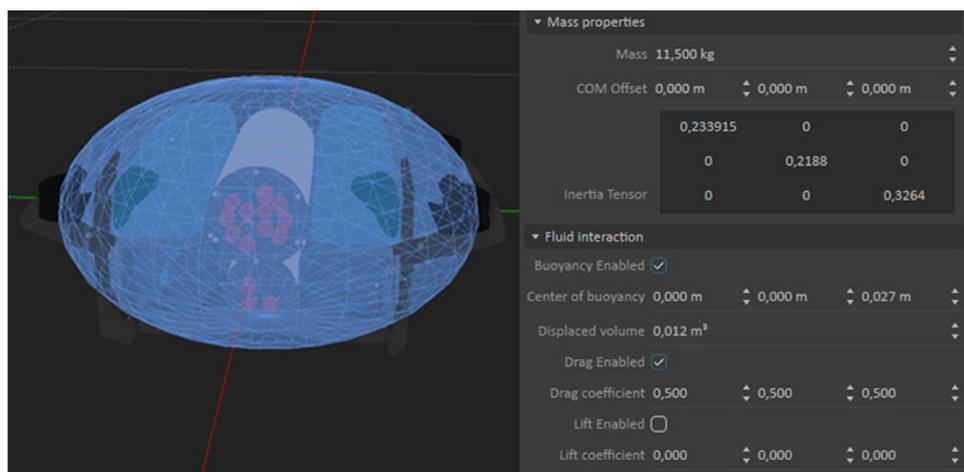


Figure C.4 – Paramètres physiques du BR2 Heavy sous Vortex

C.2.3 Propulseurs

Pour faire avancer le ROV dans l'eau dans Vortex, on simule ses propulseurs dans l'assemblage. Pour cela, chaque propulseur (modélisé par un simple cylindre) est fixé au ROV en respectant sa position et son orientation réelles. L'objet "Thruster" (propulseur, déjà implémenté par Vortex) est alors associé à chacune des pièces correspondantes dans le mécanisme. Un fichier .csv (Fig. C.6) correspondant à la loi reliant la poussée en Newton à la vitesse en tours par minute (RPM) est créé et lié à ces propulseurs. Ces données sont fournies par BlueRobotics pour le propulseur T200 (`bluerobotics_t200_nodate`).

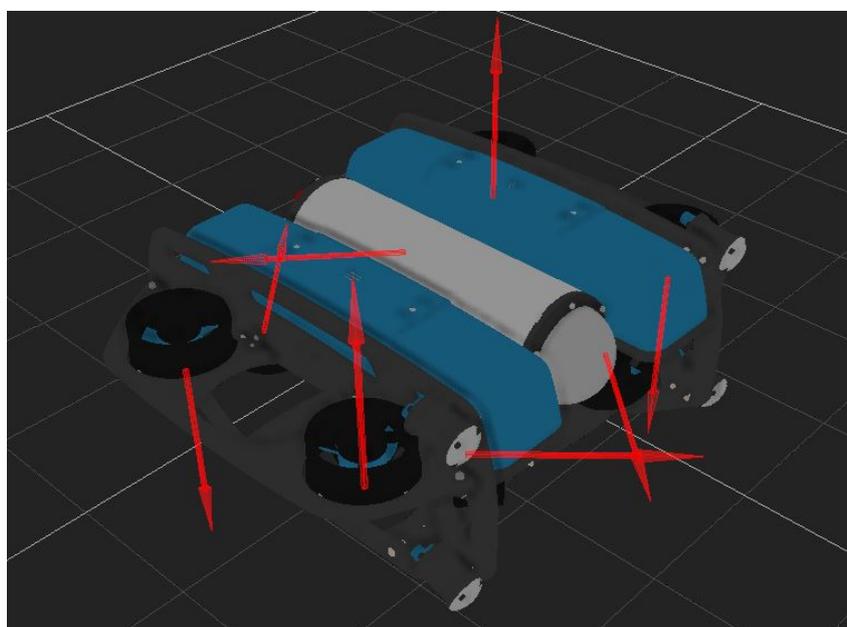


Figure C.5 – Vecteurs des forces des huit propulseurs du BR2 Heavy

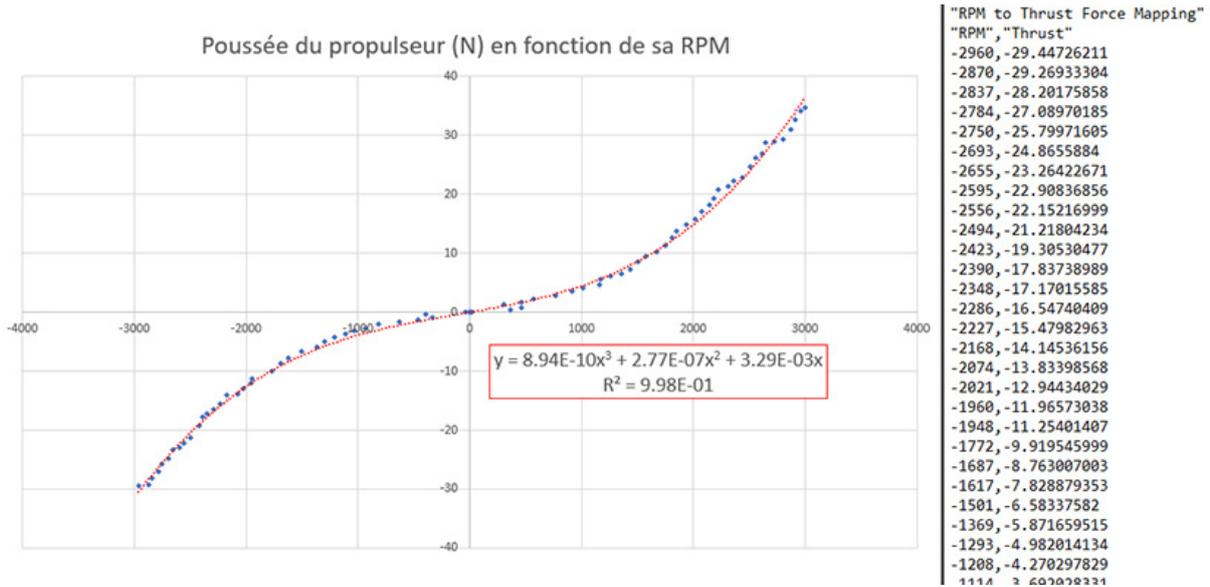


Figure C.6 – Courbe de la poussée des propulseurs T200 en fonction de leur vitesse de rotation en RPM avec courbe de tendance (gauche) - extrait du fichier .csv de ces valeurs (droite)

C.3 Asservissement du ROV sous Vortex

C.3.1 Théorie

Dans cette partie, on cherche à déterminer la consigne à envoyer aux propulseurs en fonction du comportement souhaité du ROV. Les propulseurs T200 utilisés sur le BR2 sont pilotés par Pulse Width Modulation (PWM) : Un signal analogique correspondant à une tension est envoyé au propulseur, cette tension génère une rotation du propulseur qui est transformée en force de poussée par l'intermédiaire de ses hélices. Dans Vortex, le propulseur passe directement d'une commande en vitesse (RPM) à une force de poussée en N grâce au fichier .csv (Fig. C.6). On ignore donc l'étape de passage de la PWM à la vitesse RPM ce qui donne la relation suivante pour chacun des propulseurs :

$$F_i = k(c_i), \quad (\text{C.5})$$

avec c_i la commande en RPM envoyée au propulseur P_i .

On définit alors le vecteur $K(C) \in \mathbb{R}^8$ dont chaque élément $i \in [1; 8]$ vaut $k(c_i)$, avec $C \in \mathbb{R}^8$ le vecteur regroupant la consigne envoyée à chacun des propulseurs. D'où :

$$F = K(C) \quad (\text{C.6})$$

On peut donc écrire :

$$C = K^{-1}(F), \quad (\text{C.7})$$

avec $K^{-1}(F)$ le vecteur ayant pour coordonnées $k_i^{-1} = k^{-1}(F_i) \forall i \in [1; 8]$.

D'où, en reprenant l'équation C.3 :

$$C = K^{-1}(T^{-1} \cdot \tau) \quad (\text{C.8})$$

Cependant, la matrice T n'étant pas carrée et donc non inversible, on utilise sa pseudo-inverse de Moore-Penrose, notée T^+ :

$$T^+ = T^T(TT^T)^{-1} \quad (\text{C.9})$$

Ce qui donne enfin la valeur de la commande à envoyer aux propulseurs en fonction des efforts souhaités sur le ROV :

$$C = K^{-1}(T^+ \cdot \tau) \quad (\text{C.10})$$

A partir de la valeur de la matrice T (Eq. C.4), on détermine la matrice T^+ :

$$T^+ = \begin{bmatrix} 0.3716 & 0.3699 & 0 & 0 & 0 & 1.5468 \\ 0.3716 & -0.3699 & 0 & 0 & 0 & -1.5468 \\ -0.3346 & 0.3397 & 0 & 0 & 0 & -1.3928 \\ -0.3346 & -0.3397 & 0 & 0 & 0 & 1.3928 \\ -0.0646 & 0.0356 & 0.2500 & -1.1466 & -2.0833 & 0 \\ 0.0646 & 0.0356 & -0.2500 & -1.1466 & 2.0833 & 0 \\ -0.0646 & -0.0356 & -0.2500 & 1.1466 & -2.0833 & 0 \\ 0.0646 & -0.0356 & 0.2500 & 1.1466 & 2.0833 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

Par ailleurs, la fonction k^{-1} , inverse de la fonction k , est définie sur $[-30; 35]$ par l'équation C.12 obtenue par régression linéaire de la vitesse sur la poussée (polynôme de degré 4 différent pour les poussées négatives et positives) ; voir figure C.7.

$$\begin{cases} k^{-1}(x) = 0,016x^4 + 1,1527x^3 + 29,863x^2 + 386,22x & \text{pour } x \leq 0 \\ k^{-1}(x) = -0,0085x^4 + 0,7092x^3 - 21,011x^2 + 314,57x & \text{pour } x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{C.12})$$

C.3.2 Algorithme de contrôle sous Vortex

Afin de contrôler le BR2, on utilise un script Python intégré à la simulation Vortex. Ce script a pour entrées les différentes consignes (position, orientation et vitesse) envoyées au ROV et a pour sorties les commandes RPM à envoyer à chaque propulseur. Ces variables sont directement connectées à l'entrée en RPM des objets propulseurs créés précédemment (voir section C.2.3). D'autres sorties sont utilisées à des fins informatives, comme la position globale du ROV, sa vitesse, les poussées minimale et maximale, la puissance totale du ROV et le booléen indiquant si la position souhaitée est atteinte. L'ensemble des entrées-sorties de ce script sont récapitulées sur la figure C.8.

Un script MAIN (principal) gère l'enchaînement des consignes envoyées au BR2 et un autre script traite ces consignes pour piloter le BR2. Ce script est structuré en différentes parties, visibles sur la figure C.9. A partir de l'orientation souhaitée du ROV, sa vitesse angulaire souhaitée est déterminée. La vitesse désirée peut soit être directement entrée en tant que consigne, soit être calculée à partir d'un bloc d'asservissement en position optionnel qui dépend d'une position consigne. La vitesse désirée est alors lissée avant d'être prise en compte par l'asservissement en vitesse qui combine la vitesse angulaire et la vitesse linéaire. Ce dernier asservissement repose sur les vitesses du ROV dans son propre référentiel \mathcal{R}_R qui sont déterminées par transformation des vitesses globales.

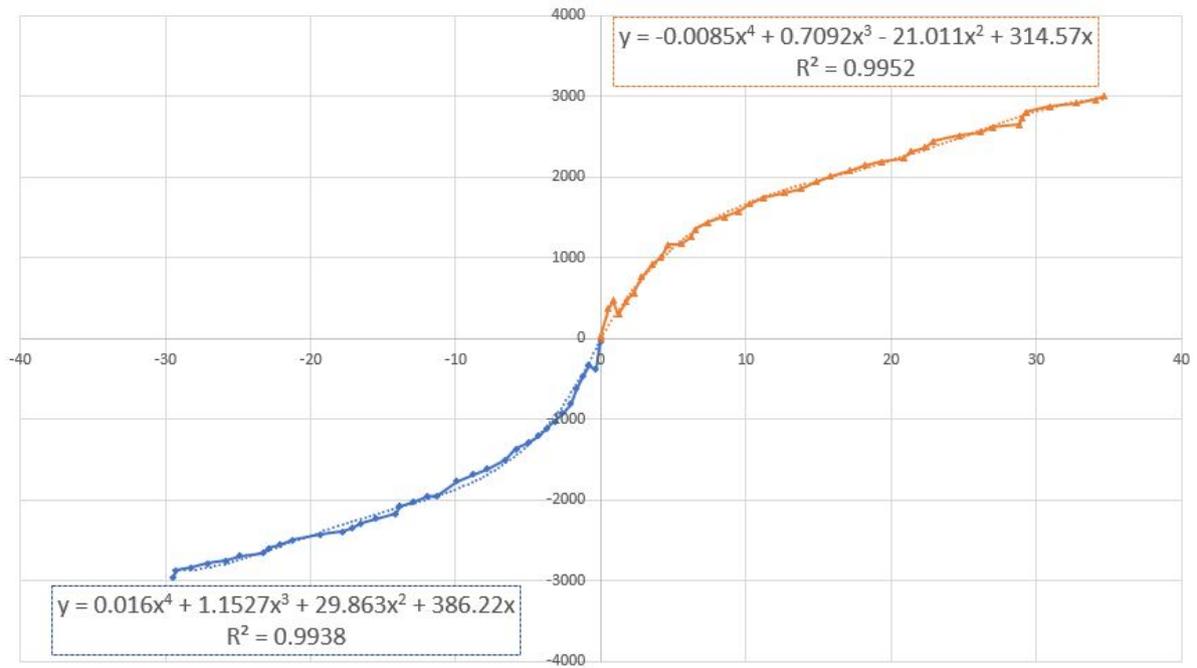


Figure C.7 – Courbe de la vitesse de rotation en RPM des propulseurs T200 en fonction de leur poussée avec courbe de tendance

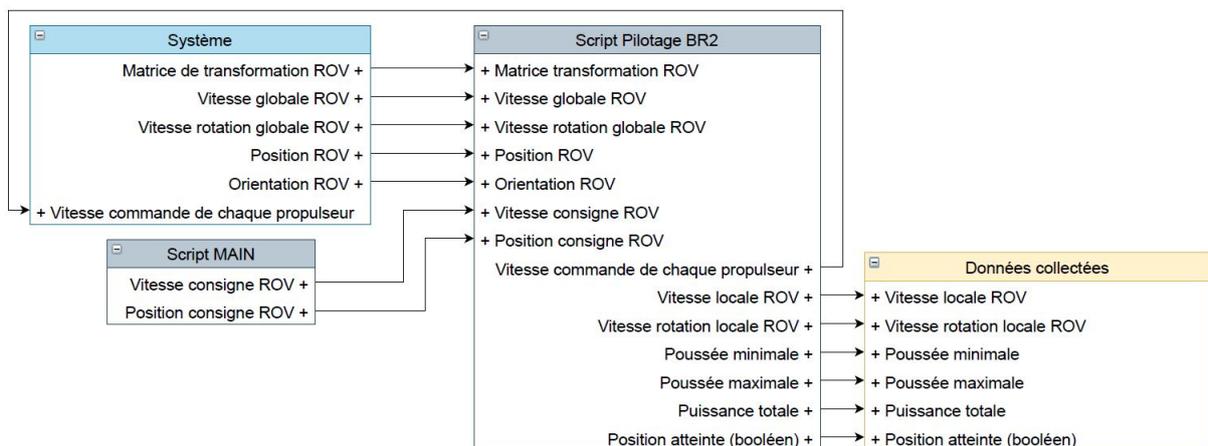


Figure C.8 – Entrées-Sorties du script Python pour le pilotage du BR2

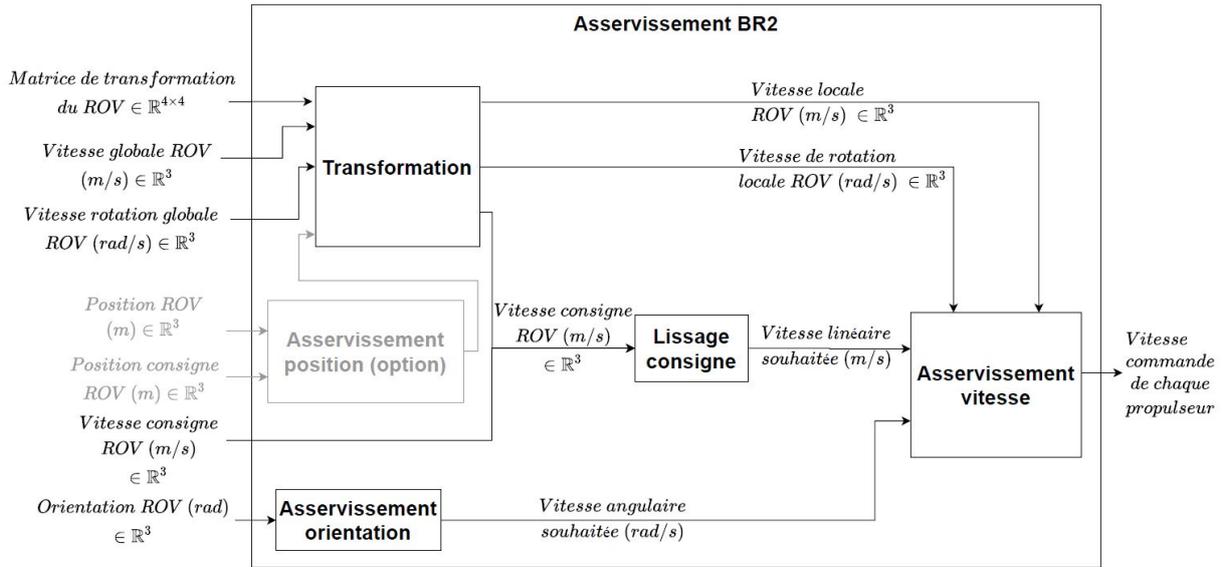


Figure C.9 – Structure du script Python pour le pilotage du BR2

Transformation

Vortex permet de connaître les position et vitesse globales (dans le repère \mathcal{R}_0) de chaque objet à tout instant. L'asservissement en vitesse du ROV se fait dans son repère propre \mathcal{R}_R . Il est donc nécessaire de connaître les vitesses du ROV dans ce repère. Pour les obtenir, il faut passer par la matrice de rotation du ROV. La matrice de transformation de chaque objet est calculée directement par Vortex. Ces matrices $\in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ sont constituées de l'inverse de la matrice rotation de l'objet $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, du vecteur position de l'objet $\in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ et d'un vecteur $[0, 0, 0, 1]$ qui rend la matrice carrée. La matrice $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ supérieure gauche de la matrice de transformation est extraite puis inversée dans le script pour obtenir la matrice de rotation du ROV. Le vecteur vitesse linéaire du BR2 est alors obtenu par transposée du produit de la matrice de rotation par le vecteur vitesse linéaire globale du ROV. Il en est de même pour le vecteur de vitesse de rotation locale. Cette transformation est résumée sur la figure C.10.

La matrice de rotation du ROV va aussi être utilisée pour l'asservissement en position et en orientation.

Asservissement orientation

Le BR2 est en théorie naturellement à l'équilibre horizontal mais il possède tout de même un contrôleur bas niveau pour le maintenir à l'horizontale en cas de déséquilibre. La simulation prend donc en compte cet asservissement à 0 pour le roulis et le tangage. Concernant le lacet, il est possible de choisir l'angle souhaité manuellement dans le script.

Les angles de roulis, tangage et lacet sont extraits de l'orientation du ROV calculée par Vortex dans le référentiel global \mathcal{R}_0 . Les erreurs par rapport aux consignes sur chacun des trois angles sont calculées dans le référentiel global \mathcal{R}_0 avant d'être transposées dans le référentiel du ROV, \mathcal{R}_R , en transposant le produit de la matrice de rotation par le vecteur

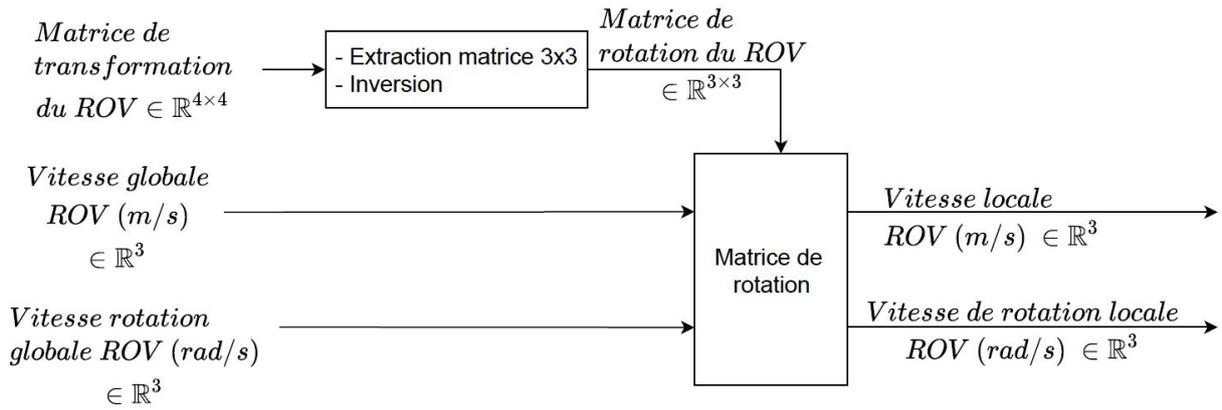


Figure C.10 – Partie Transformation du script Python pour le pilotage du BR2

de l'erreur angulaire globale. Trois correcteurs proportionnels simples permettent alors de déterminer les vitesses angulaires souhaitées sur chacun des trois axes du ROV, comme on peut le voir sur la figure C.11.

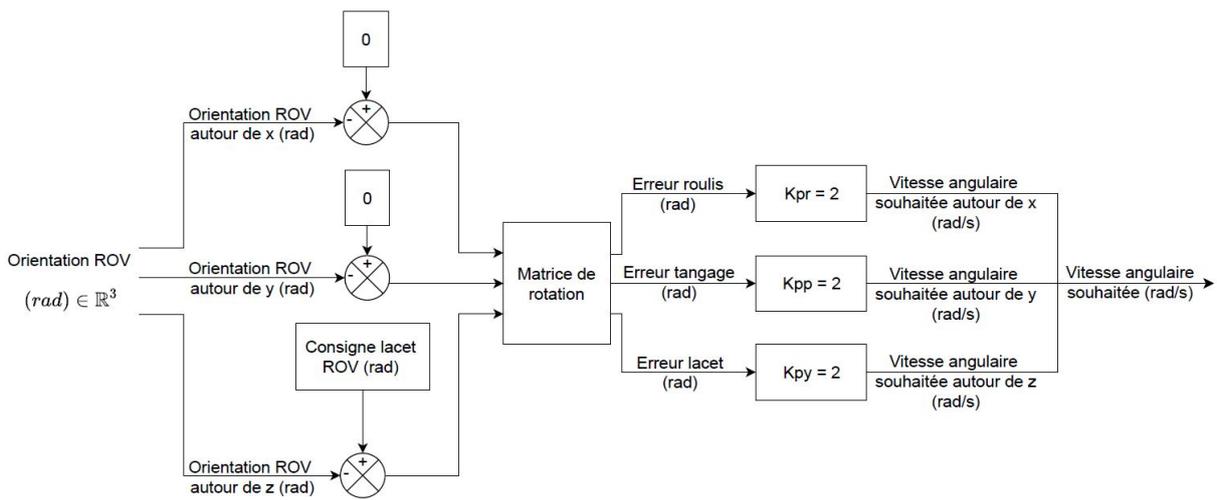


Figure C.11 – Partie Orientation du script Python pour le pilotage du BR2

Asservissement position

Les ROV sont généralement pilotés en vitesse par un opérateur, de plus, il est compliqué de connaître leur position exacte sous l'eau. Ils ne sont donc habituellement pas munis d'asservissement en position. Cependant, afin de pouvoir répéter des simulations de missions avec des trajectoires du ROV identiques pour comparer l'impact de différents paramètres, il peut être intéressant d'implémenter un asservissement en position dans le pilotage du ROV sous Vortex. Il a donc été prévu dans le script de pouvoir contrôler la position en 3D du ROV dans le repère \mathcal{R}_0 ou bien uniquement sa profondeur. Cette seconde option s'approche plus de la réalité dans le sens où le BR2 est muni d'un capteur de profondeur et qu'un asservissement en profondeur est tout à fait envisageable lors de missions.

Cet asservissement en position, résumé sur la figure C.12, est un asservissement

directement proportionnel à l'erreur entre la position actuelle du ROV dans le repère \mathcal{R}_0 , fournie par Vortex, et la position consigne déterminée par l'utilisateur. Pour passer de la vitesse souhaitée dans le repère global \mathcal{R}_0 à la vitesse souhaitée dans le repère du ROV \mathcal{R}_R , on utilise à nouveau la matrice de rotation en la multipliant par le vecteur de la vitesse globale. Lorsque la norme de l'erreur en position est inférieure à $0,01\text{ m}$, il est considéré que le ROV a atteint sa position consigne et la variable booléenne associée est donc vraie.

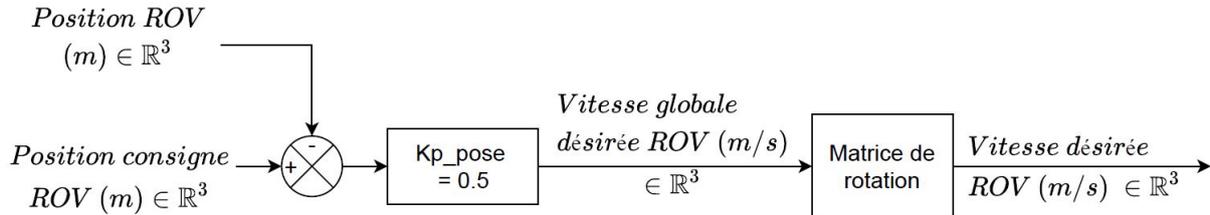


Figure C.12 – Partie Position du script Python pour le pilotage du BR2

Asservissement vitesse

Le script d'asservissement en vitesse prend en compte les vitesses souhaitées ainsi que les vitesses actuelles, linéaires et angulaires, dans le repère du ROV \mathcal{R}_R pour déterminer les commandes à envoyer à chacun des huit propulseurs du BR2. La structure de cet asservissement s'appuie sur l'équation C.10 et est décrite sur la figure C.13.

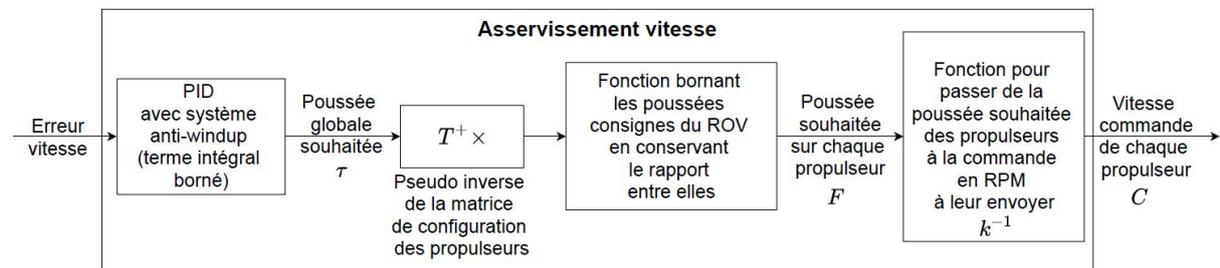


Figure C.13 – Partie asservissement en vitesse du script Python pour le pilotage du BR2

Le script calcule à chaque instant l'erreur, la somme des erreurs et le différentiel des erreurs sur la vitesse pour y appliquer un correcteur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID). En sortie de correcteur, on obtient les poussées globales souhaitées sur chacun des axes du ROV (translations et rotations). Les coefficients ont été réglés indépendamment les uns des autres pour chacun des axes du BR2. Pour cela, un échelon de vitesse linéaire a été envoyé en consigne sur l'axe x. Le coefficient proportionnel K_p a progressivement été augmenté jusqu'à obtenir une juste oscillation de la vitesse du BR2. Les coefficients dérivé K_d et intégral K_i ont alors été déterminés par la méthode de Ziegler et Nichols puis ajustés manuellement afin de réduire le dépassement. L'opération a alors été répétée pour les vitesses linéaires sur les axes y et z ainsi que pour les vitesses de rotation autour des axes x, y et z. On obtient alors les coefficients $K_p = [960, 800, 680, 200, 200, 300]$, $K_d = [10, 9, 25, 2, 2, 0.1]$ et $K_i = [10, 20, 20, 10, 5, 0.1]$. On peut voir sur la figure C.14 les réponses aux échelons de vitesse sur chacun des axes du BR2 après réglage des coefficients

du PID de façon indépendante ainsi que les réponses lors de la combinaison de deux mouvements.

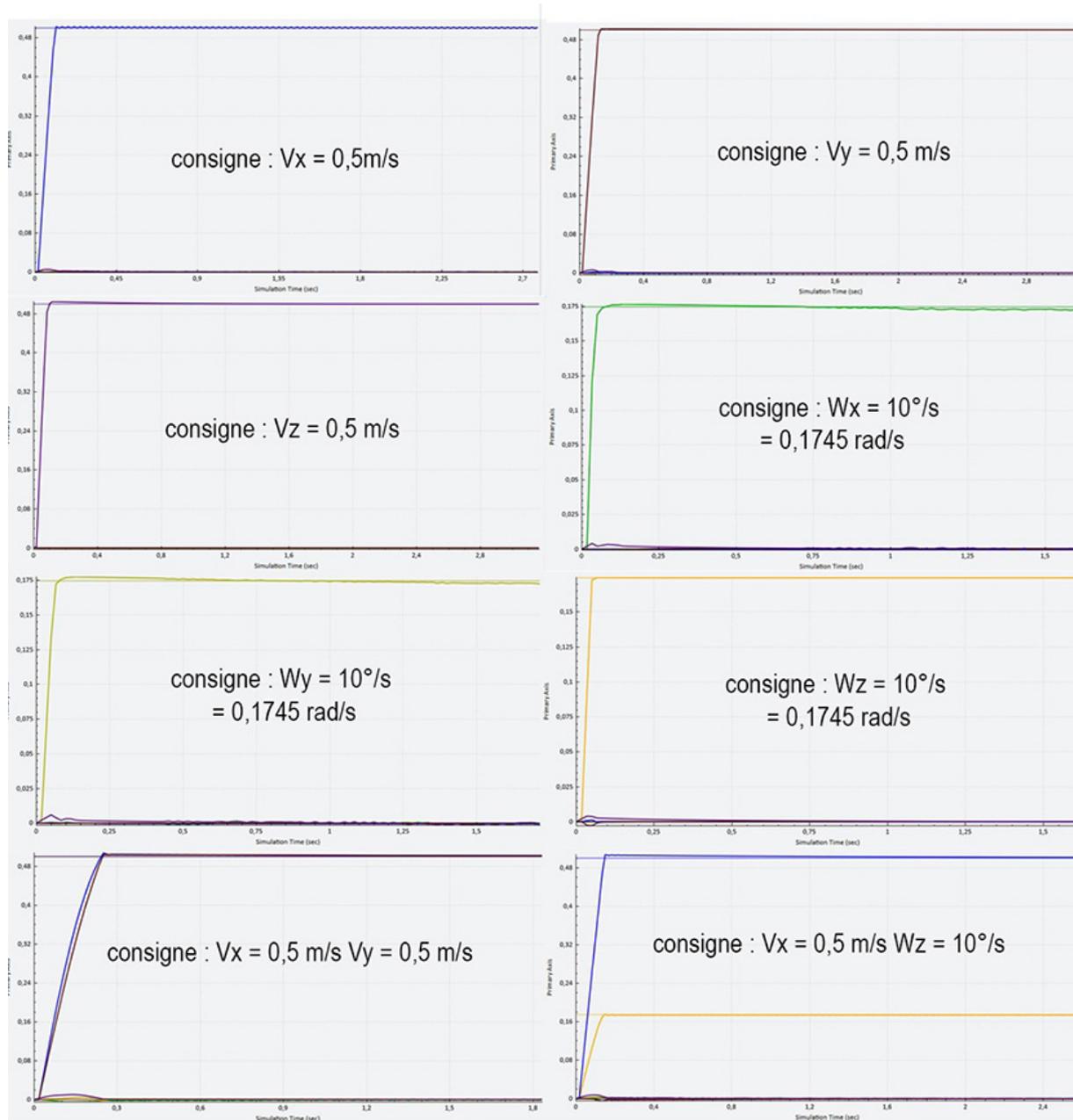


Figure C.14 – Réponses à des échelons de vitesse sur chacun des axes du ROV avec réglage des coefficients correspondants pour le PID

Le terme intégral est ensuite limité à l'aide d'un système anti-windup (Bohn et Atherton 1995) qui borne la somme des erreurs sur chacun des axes par les poussées limites du BR2 divisées par les coefficients intégraux correspondants. Ceci permet de limiter le dépassement et le retard de l'asservissement.

La matrice pseudo inverse de la matrice de configuration des propulseurs T^+ (C.11) est multipliée par le vecteur des poussées souhaitées sur le ROV τ pour obtenir le vecteur

F des poussées souhaitées sur chacun des propulseurs. Cependant, les poussées souhaitées calculées pour chaque propulseur peuvent dépasser les capacités physiques de ces propulseurs. Il est donc nécessaire de borner ces valeurs.

La configuration des propulseurs du BR2 fait que leur utilisation est couplée lorsque plusieurs axes sont contrôlés. Par exemple, le propulseur 1 (voir schéma C.2) permet au BR2 d'avancer suivant l'axe x , de se déplacer latéralement suivant l'axe y et de tourner autour de l'axe z . Cela implique que certains propulseurs peuvent être rapidement saturés. La vitesse souhaitée pourra donc ne pas être atteinte dans certains cas. Mais il est aussi possible que le ROV ne se comporte pas du tout comme souhaité. En effet, la direction qu'il prend dépend du rapport de la poussée de chacun des propulseurs. De cette façon, si un propulseur se retrouve borné alors que d'autres ne le sont pas, le rapport ne sera pas conservé et le mouvement ne sera pas correct. Pour garantir la direction souhaitée du ROV il est important de conserver le rapport des commandes envoyées à chaque propulseur. Il faut donc les borner en respectant le ratio entre les différentes commandes et non de manière indépendante. La fonction de limite implémentée ici commence par déterminer la poussée minimale et la poussée maximale parmi les poussées souhaitées sur chacun des 8 propulseurs. Elles sont ensuite respectivement comparées aux limites inférieure et supérieure de capacité des propulseurs du BR2 (qui ne sont pas symétriques par rapport à 0, les propulseurs étant plus performants dans un sens que dans l'autre). Pour déterminer si le dépassement est plus important dans les valeurs positives ou négatives, le rapport des erreurs positives, $(valeur\ max - borne\ max)/borne\ max$, est comparé au rapport des erreurs négatives, $(valeur\ min - borne\ min)/borne\ min$. La plus grande de ces deux valeurs est conservée pour déterminer le ratio à appliquer à chacune des poussées souhaitées sur les propulseurs $ratio = 1/(1 + erreur\ maximale)$. De cette façon, la poussée souhaitée la plus contraignante est réduite à la valeur de la borne positive ou négative correspondante et toutes les autres poussées sont réduites avec la même proportion.

Une fois que les poussées souhaitées sur chaque propulseur ont été déterminées dans des limites acceptables, il faut déterminer les consignes en RPM à envoyer à chacun des propulseurs. Pour cela, on applique la fonction k^{-1} (Eq. C.12) à chacune des poussées déterminées précédemment.

Lissage consigne

Afin d'éviter d'envoyer une consigne en vitesse sous forme d'échelon, ce qui pourrait être trop brutal pour le ROV, on lisse la consigne avant de l'envoyer en tant que commande au ROV.

Pour cela, on incrémente la vitesse envoyée précédemment par la différence entre la vitesse consigne et la vitesse envoyée précédemment, multipliée par un facteur f , comme décrit sur le schéma C.15. Ceci correspond à une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps $\approx 0,08\ s$ appliquée à la vitesse consigne du ROV.

On constate sur la figure C.16 que la vitesse envoyée au contrôleur après lissage a bien la forme d'une fonction de transfert du premier ordre par rapport à l'échelon de vitesse consigne. La vitesse actuelle mesurée du ROV est retardée. En revanche, on observe le même pic de puissance des propulseurs du BR2 à environ 800 W avec ou sans lissage de la

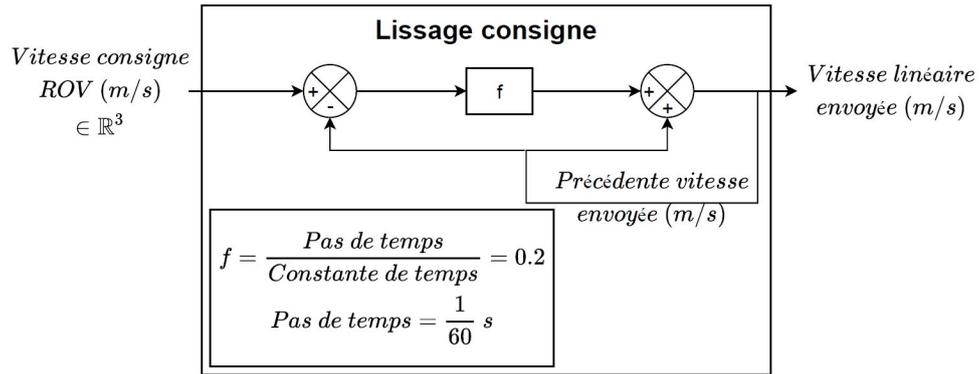


Figure C.15 – Partie lissage de la consigne en vitesse du script Python pour le pilotage du BR2

consigne en vitesse. Avec le lissage, la puissance commence par diminuer après ce pic pour atteindre un minimum avant de remonter légèrement, alors qu'elle ne remonte pas sans lissage.

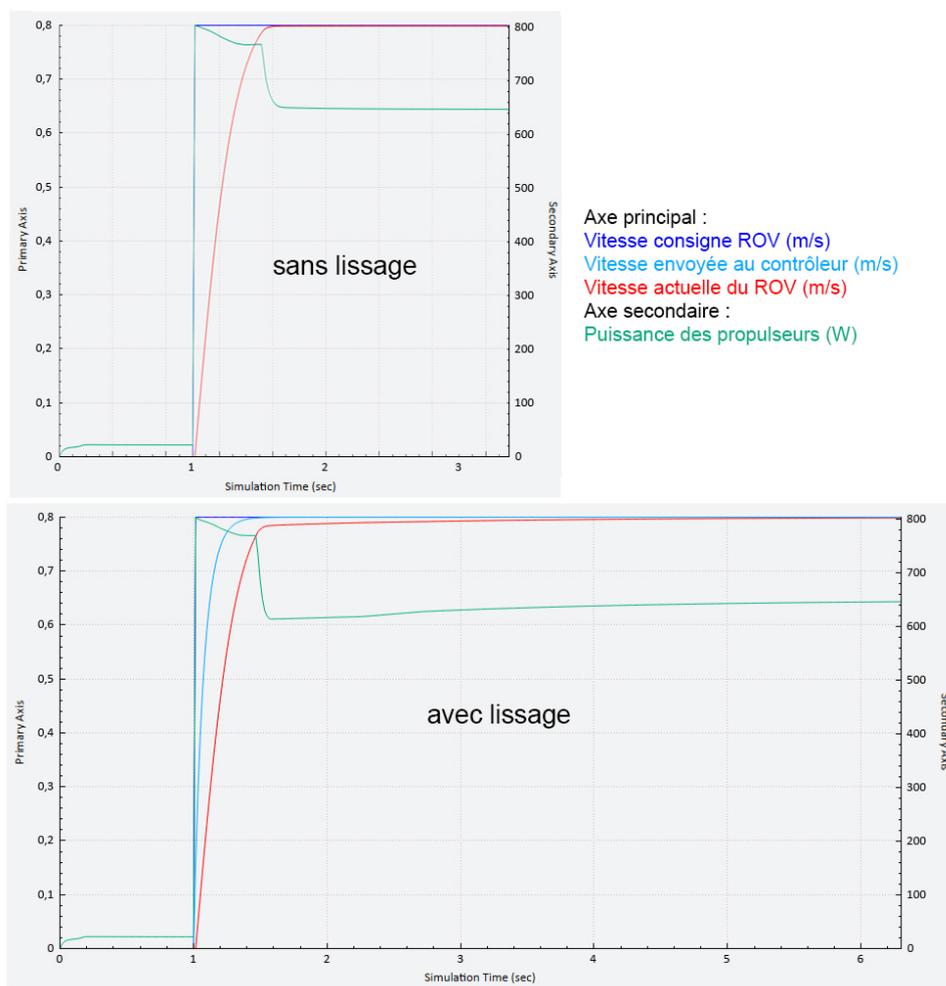


Figure C.16 – Courbes comparant les vitesses du ROV ainsi que sa puissance avec ou sans lissage de la consigne en vitesse

Annexe D

Systeme amorti

D.1 Dimensionnement du pont diviseur de tension pour le capteur de courbure

La résistance de charge a été dimensionnée pour maximiser la plage de mesure. La tension mesurée étant une fonction monotone décroissante de la résistance variable, on a :

$$\Delta V_m = V_{mmax} - V_{mmin} = \left(\frac{R_0}{R_0 + R_{cmin}} - \frac{R_0}{R_0 + R_{cmax}} \right) \cdot V_{cc} \quad (D.1)$$

En dérivant cette fonction par rapport à R_0 , on en déduit que ΔV_m est maximal pour $R_0 = \sqrt{R_{cmin} \cdot R_{cmax}}$.

En conditions réelles (capteur monté sur le câble *Fathom Slim* dans l'eau), sa résistance varie entre 21 k Ω (tendu) et 70 k Ω (courbé). La tension d'entrée V_{cc} est de 5 V. La plage maximale de mesure (1,46 V) est obtenue pour une résistance de charge de 37 k Ω . Pour des raisons matérielles, la résistance utilisée pour les expériences est de 22 k Ω , offrant une plage de mesure de 1,36 V.

L'incertitude de mesure de distance liée à la quantification de l'entrée analogique dépend de la résistance de charge R_0 . Elle est représentée sur la figure D.1 en fonction de la distance, pour différentes valeurs de R_0 . L'incertitude est maximale (5,6 mm avec $R_0 = 22$ k Ω) à la borne inférieure de la plage de mesure des distances. Cette incertitude ne serait réduite que de 1,4 mm par l'utilisation d'une résistance de 37 k Ω , offrant la plus grande plage de mesure comme déterminé plus haut.

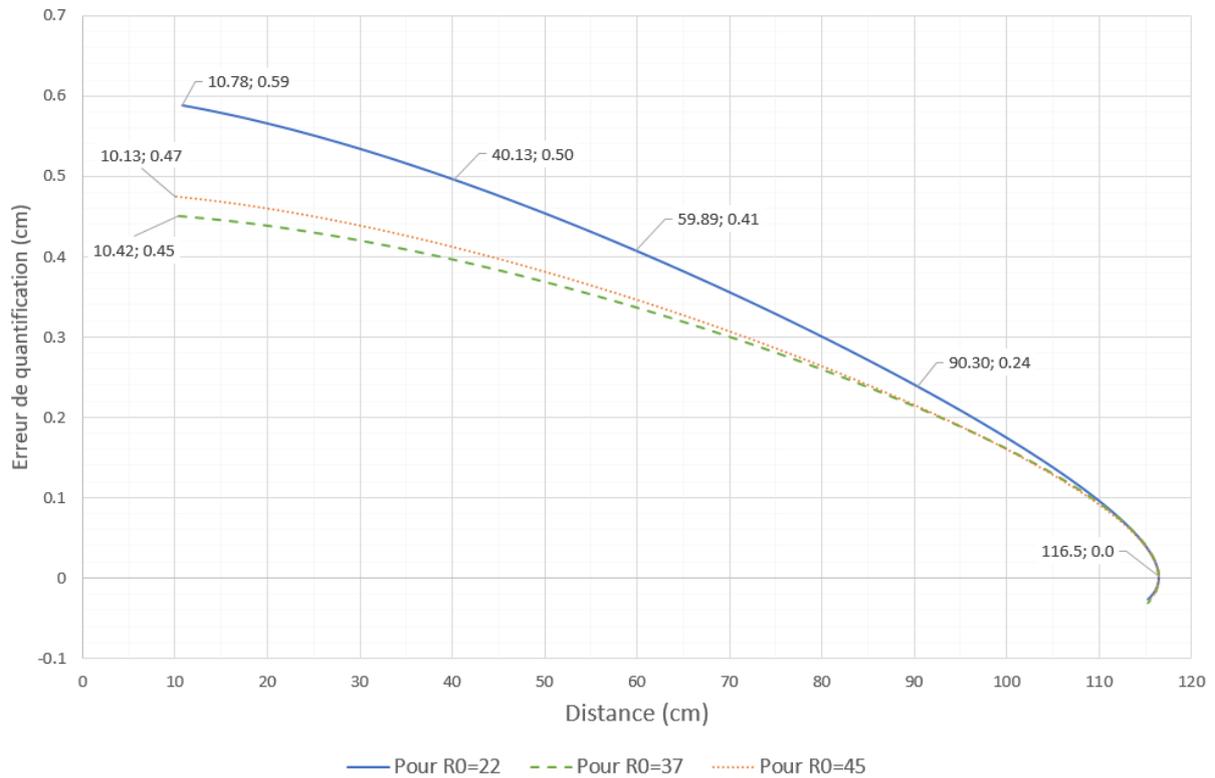


Figure D.1 – Erreur de quantification en fonction de la distance entre les flotteurs

D.2 Programme Arduino d'acquisition bas niveau du capteur de courbure

```

1 #define PIN A0 // Curvature sensor connected to A0 pin
2
3 #include <ros.h>
4 #include <ros/time.h>
5 #include <std_msgs/Float32.h>
6 #include <SimpleTimer.h> // ...
   http://arduino.cc/playground/Code/SimpleTimer
7
8 ros::NodeHandle nh;
9
10 std_msgs::Float32 msg_rawData;
11 ros::Publisher pub_raw("curve_sensor_raw", &msg_rawData);
12 std_msgs::Float32 msg_filteredRc;
13 ros::Publisher pub_Rcfiltered("curve_sensor_Rc", ...
   &msg_filteredRc);
14 std_msgs::Float32 msg_derivateRC;
15 ros::Publisher pub_derivateRc("curve_sensor_Rc_derivate", ...
   &msg_derivateRC);

```

```
16
17 float sensor_value[3] = {0,0,0};
18 SimpleTimer timer;
19 float f = 250.0; // Frequency
20 SimpleTimer timer_pub;
21 float f_pub = 25.0;
22 float filtered_value[3] = {0.0,0.0,0.0};
23 float A[3] = ...
    {0.0006098547187173,0.001219709437435,0.0006098547187173};
24 float B[3] = {1,-1.92894226325203,0.931381682126903};
25 int N = 2; // filter order
26 float Rc = 0.0;
27 float Rcderivate = 0.0;
28
29 void setup()
30 {
31   pinMode(PIN, INPUT); // Declare PIN as input
32   nh.initNode();
33   nh.advertise(pub_raw);
34   nh.advertise(pub_Rcfiltered);
35   nh.advertise(pub_derivateRc);
36   timer.setInterval(1000/f, sensor);
37   timer_pub.setInterval(1000/f_pub, pub);
38 }
39
40 void loop()
41 {
42   timer.run();
43   timer_pub.run();
44   nh.spinOnce();
45 }
46
47 void sensor()
48 {
49   for (int n=0; n<N; n++){
50     sensor_value[N-n] = sensor_value[N-n-1];
51     filtered_value[N-n] = filtered_value[N-n-1];
52   }
53   sensor_value[0] = analogRead(PIN);
54   filtered_value[0] = A[0]*sensor_value[0];
55   for (int n=0; n<N; n++){
56     filtered_value[0] += ...
        A[n+1]*sensor_value[n+1]-B[n+1]*filtered_value[n+1];
57   }
58   Rc = 22.0*((1024.0/filtered_value[0])-1); // Sensor ...
    resistance
```

```
59 Rcderivate = (Rc-22.0*((1024.0/filtered_value[1])-1))*f;
60 }
61
62 void pub()
63 {
64     msg_rawData.data = sensor_value[0];
65     pub_raw.publish(&msg_rawData);
66     msg_filteredRc.data = Rc;
67     pub_Rcfiltered.publish(&msg_filteredRc);
68     msg_derivateRC.data = Rcderivate;
69     pub_derivateRc.publish(&msg_derivateRC);
70 }
```

D.3 Programme ROS d'interprétation des données capteur

```

1
2 #!/usr/bin/env python
3
4 import rospy
5 # ----- Types de messages echanges -----
6 from std_msgs.msg import Float32          # sub curve_sensor
7 from std_msgs.msg import Empty           # sub init_control
8 from winch.msg import CurveSensor        # pub curve_sensor_computed
9
10 # ----- Variables globales -----
11 global raw_data
12 raw_data = 0.0
13 global Rc
14 Rc = 93.0
15 global Rc_init
16 Rc_init = 93.0
17 global speed_V_gap
18 speed_V_gap = 0.0
19 global f_pub
20 f_pub = 25.0 # frequence du publisher
21 global timer
22 global t_last
23 t_last = 0
24 # ----- Callbacks Subscribers -----
25 def callback_curve_sensor_raw(raw): # Recuperation valeur brute
26     global t_last
27     t_last = rospy.get_time() # Temps en secondes depuis epoch
28     global raw_data
29     raw_data = raw.data
30
31 def callback_curve_sensor_Rc(sensor): # Recuperation valeur ...
32     # filtree resistance bornes capteur courbure
33     global t_last
34     t_last = rospy.get_time() # Temps en secondes depuis epoch
35     global Rc
36     Rc = sensor.data
37
38 def callback_curve_sensor_speed(speed): # Recuperation derivee ...
39     # resistance capteur courbure
40     global t_last
41     t_last = rospy.get_time() # Temps en secondes depuis epoch
42     global speed_V_gap
43     speed_V_gap = -0.0234*speed.data

```

```

43 def callback_init(empty_msg): # Initialisation des valeurs a la ...
    demande de l'utilisateur
44     global Rc_init
45     Rc_init = Rc # Resistance capteur de courbure pour ecartement ...
        impose a l'initialisation (60cm)
46
47 # ----- Fonctions -----
48 def compute_V_opening(): # Calcul de l'ecartement du systeme V
49     D_Rc = Rc - Rc_init # Delta de resistance par rapport a ...
        l'ecart a l'initialisation (60cm)
50     D_Rc_min = -33.0 # pour air -3.71195 # pour eau #
51     D_Rc_max = 16.0 # pour air 3.71195 # pour eau #
52     if D_Rc < D_Rc_min:
53         D_Rc = D_Rc_min
54     elif D_Rc > D_Rc_max:
55         D_Rc = D_Rc_max
56     V_gap = 0.00000785556738791412*D_Rc**3 - ...
        0.000187650019306*D_Rc**2 - 0.031514246433048*D_Rc+0.6
57     return V_gap
58
59 def publish(timer_event):
60     if (rospy.get_time() - t_last < 2):
61         pub_curve_sensor = rospy.Publisher('curve_sensor', ...
            CurveSensor, queue_size=1)
62         curve_sensor_computed = CurveSensor()
63         curve_sensor_computed.header.stamp = rospy.get_rostime()
64         curve_sensor_computed.raw_value = raw_data
65         curve_sensor_computed.filtered_resistance = Rc
66         curve_sensor_computed.buoy_distance = compute_V_opening()
67         curve_sensor_computed.opening_speed = speed_V_gap
68         pub_curve_sensor.publish(curve_sensor_computed)
69     else:
70         rospy.logwarn("No curve sensor data for more than 2s")
71
72 if __name__ == '__main__':
73     rospy.loginfo("main")
74     rospy.init_node('curve_sensor_compute')
75
76     rospy.Subscriber("/br2/curve_sensor_raw", Float32, ...
        callback_curve_sensor_raw)
77     rospy.Subscriber("/br2/curve_sensor_Rc", Float32, ...
        callback_curve_sensor_Rc)
78     rospy.Subscriber("/br2/curve_sensor_Rc_derivate", Float32, ...
        callback_curve_sensor_speed)
79     rospy.Subscriber("/winch/init_control", Empty, callback_init)
80
81     global timer
82     timer = rospy.Timer(rospy.Duration(1.0/f_pub), publish)
83

```

84 `rospy.spin()`

Annexe E

Enrouleur

E.1 Partie mécanique de l'enrouleur

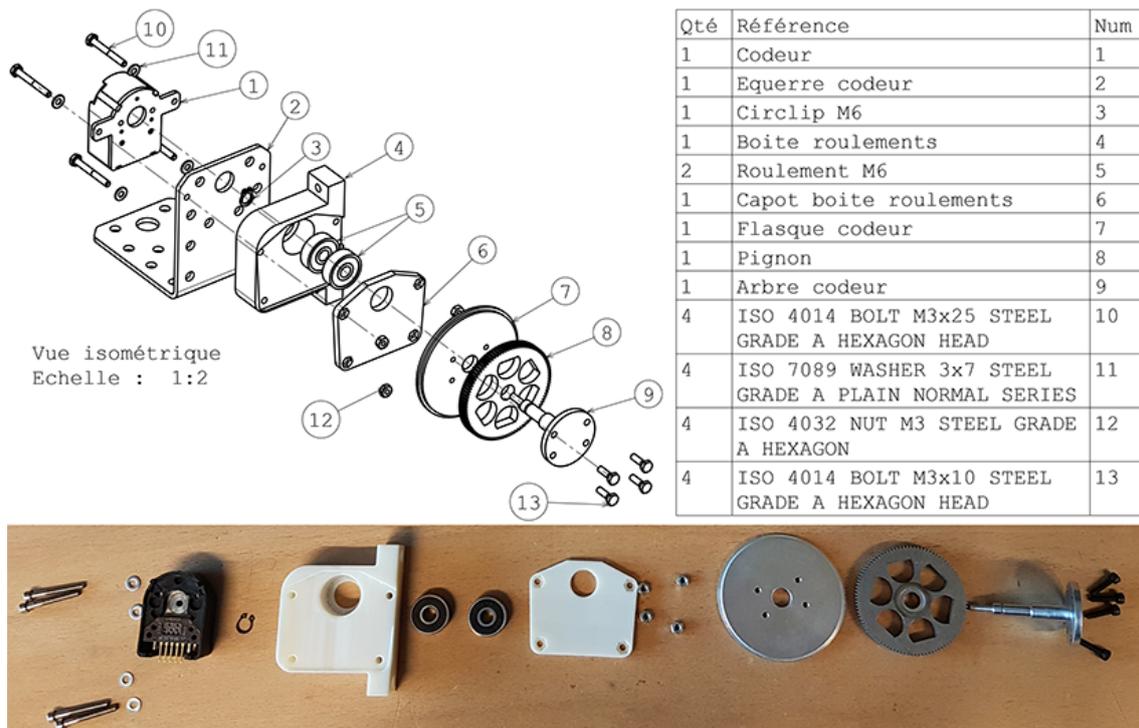


Figure E.1 – Vue éclatée de la partie codeur de l'enrouleur

La partie moteur de l'enrouleur (figure E.2) se constitue du moteur (1 sur la figure E.2), dont le corps est fixé à une équerre (3 sur la figure E.2) et l'axe est fixé à un ensemble roue motrice (5 sur la figure E.2), et d'une entretoise moteur (2 sur la figure E.2) qui englobe le corps du moteur et permet de régler l'entraxe avec la partie codeur.

Des guides pour le câble (figure E.3) ont par la suite été rajoutés à la sortie et à l'entrée de l'enrouleur pour le guider dans l'axe entre les roues afin d'éviter qu'il ne se coince en arrivant de travers. Ces guides ont été fabriqués en prototypage rapide. Ils ont une forme hélicoïdale pour permettre le montage du câble par le milieu sans nécessiter de l'enfiler.

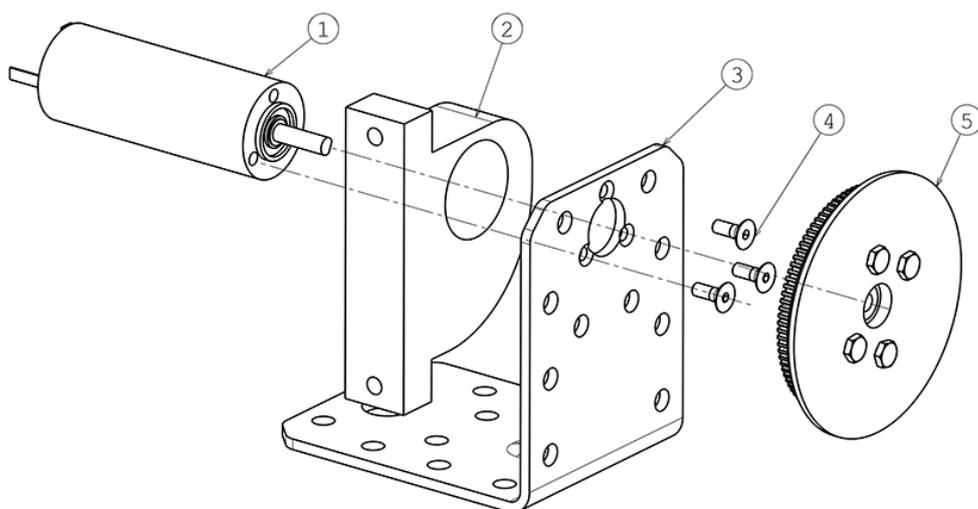


Figure E.2 – Vue éclatée de la partie moteur de l'enrouleur

Cela est nécessaire étant donné que le câble du ROV a des connecteurs soudés aux deux extrémités.

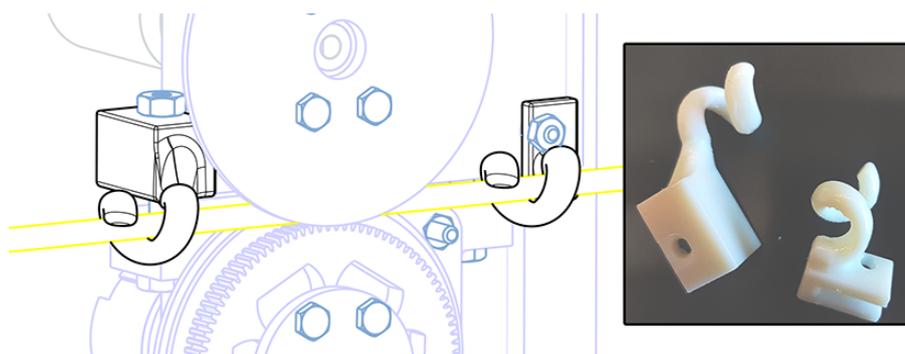


Figure E.3 – Guides pour la câble à l'entrée et à la sortie de l'enrouleur

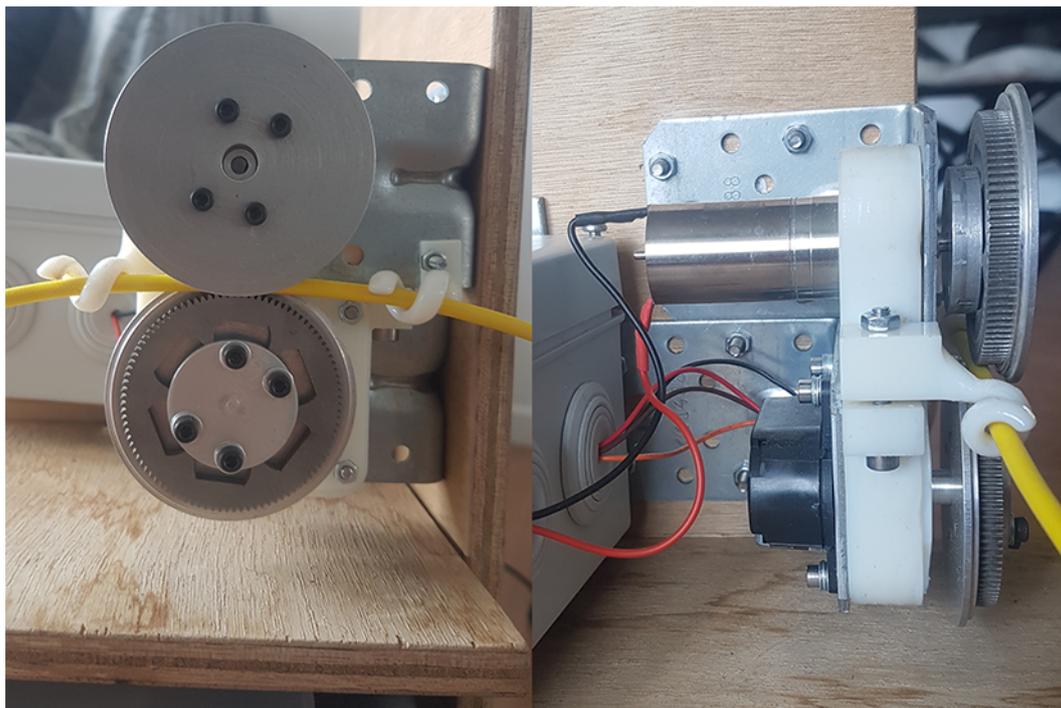


Figure E.4 – Vue globale de l'enrouleur

E.2 Programme Arduino de contrôle bas niveau de l'enrouleur

E.2.1 Structure du programme

La structure globale de l'asservissement bas niveau codé sur l'Arduino a été décrite dans la section III.4.2 et sur la figure III.32. Les fonctions de ce programme sont détaillées ici et le code complet est disponible dans la partie E.2.2.

- La fonction *stop_callback* est exécutée dès qu'un message d'arrêt est publié manuellement par l'utilisateur. Cette fonction désactive l'asservissement et arrête le moteur en réinitialisant toutes les variables.
- La fonction *speed_callback* est exécutée dès qu'une vitesse consigne est publiée sur le *topic send_speed*. Elle mémorise la vitesse consigne reçue, active le contrôle de l'enrouleur et désactive le contrôle en longueur. Le temps auquel la commande a été reçue est aussi enregistré pour désactiver le contrôle par sécurité lorsque la dernière commande est trop ancienne.
- La fonction *length_callback* est exécutée dès qu'une longueur consigne est publiée sur le *topic send_length*. Elle mémorise la longueur consigne reçue, active le contrôle de l'enrouleur et le contrôle en longueur. Le temps auquel la commande a été reçue est aussi enregistré pour désactiver le contrôle par sécurité lorsque la dernière commande est trop ancienne.
- La fonction *init_callback* permet d'initialiser la longueur de câble au début d'une manipulation. Elle est exécutée dès qu'une valeur de longueur initiale est publiée sur

le topic *send_length*. Elle mémorise cette valeur et réinitialise la valeur du compteur. Le temps auquel la commande a été reçue est aussi enregistré pour désactiver le contrôle par sécurité lorsque la dernière commande est trop ancienne. La valeur de la longueur initiale de câble est par ailleurs enregistrée dans le code et est égale à la valeur minimale de câble. Si le programme est démarré alors que le câble est bien positionné avec sa longueur minimale déroulée, il n'est pas nécessaire de réinitialiser celle-ci manuellement avec cette fonction.

- La fonction *loop* est la boucle principale du programme, elle tourne en permanence. C'est cette fonction qui démarre les timers pour exécuter de manière périodique la publication du feedback, l'asservissement en vitesse et l'asservissement en longueur, si ce dernier est activé. C'est aussi cette fonction qui exécute le gestionnaire de communication des nœuds ROS.
- La fonction *counter* est activée sur interruption montante du signal CHA. C'est à dire qu'à chaque fois que l'entrée digitale sur laquelle le signal CHA du codeur est connectée génère un front montant, le programme pause instantanément l'action qu'il était en train de faire pour exécuter la fonction *counter*. Cette fonction a pour effet d'incrémenter la valeur du compteur lorsque la valeur de CHA est vraie et que celle de CHB est fausse ou de décrémenter le compteur si les valeurs de CHA et de CHB sont vraies. Une fois que cette action est réalisée, le programme reprend son cours là où il s'était arrêté.
- La fonction *asserv* gère l'asservissement en vitesse de l'enrouleur, comme détaillé dans la partie III.4.2. Elle est exécutée de façon périodique grâce au timer *timer_asserv* à une fréquence de 25 Hz. Elle n'est jamais désactivée. Elle commence par calculer la longueur actuelle de câble à partir de la valeur du compteur comme le montre l'équation E.1.

$$L = L_{init} + \frac{2 * \pi * R * ticks}{N}, \quad (E.1)$$

avec L la longueur de câble actuelle, L_init la longueur initiale de câble, R le rayon des roues de l'enrouleur et N le nombre de ticks par tour pour le codeur.

Puis, la vitesse du câble est calculée avec l'équation E.2.

$$vitesse = \frac{2 * \pi * f * \Delta ticks}{N}, \quad (E.2)$$

avec f la fréquence de l'asservissement.

Si la dernière commande reçue est trop ancienne, l'asservissement est désactivé, le moteur est arrêté et toutes les variables sont réinitialisées.

Si le contrôle du câble a été activé, la commande en PWM est calculée grâce à un correcteur PI (proportionnel-intégral) à partir de l'erreur sur la vitesse du câble et la somme des erreurs. Cette dernière est bornée pour stabiliser le système. On appelle cette méthode *anti-windup*. Avant d'être envoyée au moteur, la commande en PWM est bornée et lissée à l'aide d'une fonction de transfert du premier ordre de constante de temps 0,1 s.

Si la commande en vitesse est dans le sens du déroulement (respectivement enroulement) alors que la longueur maximale (respectivement minimale) de câble est atteinte, le moteur est arrêté et un message d'erreur est affiché, sinon, la commande en PWM souhaitée est envoyée au moteur.

- La fonction *length_control* est exécutée de façon régulière par le *timer timer_length* qui est activé uniquement si une consigne en longueur de câble est reçue par le programme. Ce *timer* a une fréquence de 25 Hz. La fonction *length_control* détermine la vitesse désirée avec un correcteur proportionnel, en multipliant l'erreur entre la longueur désirée et la longueur actuelle par un coefficient d'une valeur de 150. Elle borne alors cette vitesse désirée par la vitesse maximale du moteur, que nous avons déterminée à 54 rad/s.
- La fonction *pub* permet de publier le *topic* contenant les retours d'informations sur le fonctionnement de l'enrouleur. Ce *topic* contient la longueur de câble déroulée, la vitesse mesurée de l'enrouleur, la commande en PWM envoyée au moteur, la vitesse désirée de l'enrouleur, la longueur désirée de l'enrouleur et la valeur booléenne de l'état actif ou non du contrôle en vitesse d'une part et du contrôle en longueur d'autre part. Cette fonction est gérée par un *timer* d'une fréquence de 25 Hz. Ce *topic* n'est pas utilisé pour le contrôle du système mais uniquement à titre d'information pour l'utilisateur.

E.2.2 Programme de contrôle bas niveau de l'enrouleur

```

1 // HEDS-5640-A06 : 500 cpr (count per revolution) 3 channel ...
  (2 utilisées)
2
3 #define USE_USBCON
4 #define CHA 2 // 2 digital pin with interrupt for codor ...
  channel A
5 #define CHB 3 // 3 digital pin for codor channel B
6 #define PWM 9 // for motor PWM
7 #define DIRA 8 // for motor direction
8
9 #include <ros.h>
10 #include <ros/time.h>
11 #include <std_msgs/Float32.h>
12 #include <std_msgs/Empty.h>
13 #include <winch/WinchFeedback.h>
14 #include <SimpleTimer.h> // ...
  http://arduino.cc/playground/Code/SimpleTimer
15
16 // ----- VARIABLES -----
17 // Codeur
18 volatile int codor_count = 0; // Volatile: variables in ...
  static RAM and can be changed and read by all ...
  subroutines, interrupt service routines, and the main ...
  program loop
19 static const float R = 0.02585; // Rayon d'entrainement du ...
  câble en m

```

```
20 static const int N = 500; // Pas codeur
21 float L_init = 1.7; // Longueur initiale du câble en m
22 float L = 1.7; // Longueur du câble en m
23 float measured_speed = 0.0; // Vitesse enroulement en rad/s
24 int prev_count = 0;
25 // Asserv moteur
26 SimpleTimer timer_asserv; // Timer pour l'asservissement
27 static const int f_asserv = 25; // Fréquence de ...
    l'asservissement en Hertz
28 float desired_speed = 0.0; // La vitesse désirée du moteur ...
    en rad/s
29 int cmd_PWM = 0; // PWM envoyée au moteur
30 static const float Kp = 4.0; // Coeff proportionnel ...
    asservissement
31 static const float Ki = 2.0; // Coeff intégral asservissement
32 float sum_error_speed = 0.0;
33 bool active_control = 0;
34 static const float max_speed = 54.0;
35 // Controle longueur
36 SimpleTimer timer_length; // Timer pour l'asservissement en ...
    longueur
37 float desired_length = 0.0;
38 static const float L_min = 1.7;
39 static const float L_max = 25.0;
40 static const float Kp_l = 150.0;
41 bool L_control = 0;
42 // Pub
43 SimpleTimer timer_pub;
44 static const int f_pub = 25;
45
46 // ----- INSTANCIATION MESSAGES ROS ...
    -----
47 ros::NodeHandle<ArduinoHardware, 10, 10, 280, 280> nh; // ...
    gestionnaire de noeuds
48
49 // Message "feedback_msg" de type WinchFeedback envoyé au ...
    topic "feedback" par le publisher "feedback_pub":
50 winch::WinchFeedback feedback_msg;
51 ros::Publisher feedback_pub("feedback", &feedback_msg);
52
53 // Subscriber "stop_sub" qui s'abonne au topic "stop" pour ...
    récupérer le message "winch_stop" de type Empty qui ...
    exécute la fonction stop_callback
54 void stop_callback( const std_msgs::Empty& winch_stop){
55     active_control = 0;
56     L_control = 0;
```

```
57 desired_speed = 0.0;
58 desired_length = 0.0;
59 cmd_PWM = 0.0;
60 sum_error_speed = 0.0;
61 digitalWrite(PWM, LOW); // disable
62 }
63 ros::Subscriber<std_msgs::Empty> stop_sub("stop", ...
    &stop_callback );
64
65 float timeLastHeartbeatReceived = 0.0;
66 // Subscriber "speed_sub" qui s'abonne au topic ...
    "send_speed" pour récupérer le message "winch_cmd_speed" ...
    de type Float32 qui exécute la fonction speed_callback
67 void speed_callback( const std_msgs::Float32& winch_cmd_speed){
68     timeLastHeartbeatReceived = millis();
69     desired_speed = winch_cmd_speed.data;
70     active_control = 1;
71     L_control = 0;
72 }
73 ros::Subscriber<std_msgs::Float32> speed_sub("send_speed", ...
    &speed_callback );
74
75 // Subscriber "length_sub" qui s'abonne au topic ...
    "send_length" pour récupérer le message ...
    "winch_cmd_length" de type Float32 qui exécute la ...
    fonction length_callback
76 void length_callback( const std_msgs::Float32& ...
    winch_cmd_length){
77     timeLastHeartbeatReceived = millis();
78     desired_length = winch_cmd_length.data;
79     active_control = 1;
80     L_control = 1;
81 }
82 ros::Subscriber<std_msgs::Float32> ...
    length_sub("send_length", &length_callback );
83
84 // Subscriber "init_sub" qui s'abonne au topic "L_init" ...
    pour récupérer le message "winch_L_init" de type Float32 ...
    qui exécute la fonction init_callback
85 void init_callback( const std_msgs::Float32& winch_L_init){
86     timeLastHeartbeatReceived = millis();
87     codor_count = 0;
88     L_init = winch_L_init.data;
89     L = L_init;
90 }
91 ros::Subscriber<std_msgs::Float32> init_sub("L_init", ...
```

```
    &init_callback );
92
93
94 void setup() {
95     // Codeur :
96     pinMode(CHA, INPUT);
97     pinMode(CHB, INPUT);
98     // Moteur :
99     pinMode(PWM, OUTPUT);
100    pinMode(DIRA, OUTPUT);
101    delay(1000);
102    attachInterrupt (digitalPinToInterrupt(CHA), counter, ...
        RISING); // Interruption : lance la fonction ...
        "counter" dès que le pin 2 (interrup 0) a un front montant
103    timer_asserv.setInterval(1000/f_asserv, asserv); // ...
        Interruption pour asservissement
104    timer_length.setInterval(1000/f_asserv, length_control); ...
        // Interruption pour asservissement
105    timer_pub.setInterval(1000/f_pub, pub);
106    //ROS
107    nh.initNode();
108    nh.advertise(feedback_pub);
109    nh.subscribe(stop_sub);
110    nh.subscribe(speed_sub);
111    nh.subscribe(length_sub);
112    nh.subscribe(init_sub);
113 }
114
115 void loop() {
116     timer_asserv.run();
117     timer_pub.run();
118     if (L_control){
119         timer_length.run();
120     }
121     nh.spinOnce();
122 }
123
124 void counter() { // Interruption sur tick de la roue codeuse
125     bool etatA = digitalRead(CHA);
126     bool etatB = digitalRead(CHB);
127     if (etatA && !etatB){
128         codor_count++;
129     }
130     if (etatA && etatB){
131         codor_count--;
132     }
```

```
133 }
134
135 void asserv() // Asservissement effectué à la fréquence ...
    f_asserv
136 {
137   L = L_init + 2.0 * PI * R * codor_count/N;
138   measured_speed = (((float)codor_count - ...
    (float)prev_count)/(float)N)*(float)f_asserv*2.0*PI; ...
    // rad/s
139   prev_count = codor_count;
140   if (millis()- timeLastHeartbeatReceived > 500) { // ...
    Derniere commande trop vieille
141     active_control = 0;
142     L_control = 0;
143     desired_speed = 0.0;
144     desired_length = 0.0;
145     cmd_PWM = 0.0;
146     sum_error_speed =0.0;
147     digitalWrite(PWM,LOW); // disable
148   }
149   if (active_control){
150     if(desired_speed>max_speed) desired_speed=max_speed; ...
    if(desired_speed<-max_speed) ...
    desired_speed=-max_speed; // Limite la vitesse désirée
151     float error_speed = desired_speed - measured_speed;
152     sum_error_speed += error_speed;
153     if (sum_error_speed > 255/Ki) sum_error_speed = 255/Ki; ...
    if (sum_error_speed < -255/Ki) sum_error_speed = ...
    -255/Ki; // anti-windup
154     float prev_PWM = cmd_PWM;
155     cmd_PWM = Kp*error_speed + Ki*sum_error_speed;
156     if (cmd_PWM>255) cmd_PWM=255; if (cmd_PWM<-255) ...
    cmd_PWM=-255;
157     float a = 1/(f_asserv*0.1);
158     cmd_PWM = a * cmd_PWM + (1-a) * prev_PWM; // lissage
159     if (cmd_PWM >0 and L<L_max) {
160       digitalWrite(DIRA,LOW); //delivers cable
161       analogWrite(PWM,cmd_PWM);
162     }
163     else if (cmd_PWM <0 and L>L_min) {
164       digitalWrite(DIRA,HIGH); //retrieve cable
165       analogWrite(PWM,-cmd_PWM);
166     }
167     else {
168       digitalWrite(PWM,LOW); // disable
169     }

```

```

170     if (L<L_min or L>L_max){
171         nh.logwarn("Longueur limite atteinte");
172         cmd_PWM = 0;
173     }
174 }
175 }
176
177 void length_control() // Asservissement effectué à la ...
    fréquence f_asserv
178 {
179     float error_length = desired_length - L;
180     desired_speed = Kp_l*error_length;
181 }
182
183 void pub()
184 {
185     feedback_msg.header.stamp = nh.now();
186     feedback_msg.cable_length = L;
187     feedback_msg.winch_speed = measured_speed;
188     feedback_msg.winch_PWM = cmd_PWM;
189     feedback_msg.cmd_speed = active_control;
190     feedback_msg.desired_speed = desired_speed;
191     feedback_msg.cmd_length = L_control;
192     feedback_msg.desired_length = desired_length;
193     feedback_pub.publish(&feedback_msg);
194 }

```

E.3 Programme de commande de l'enrouleur

```

1
2 #!/usr/bin/env python
3
4 import rospy
5 # ----- Types de messages echanges -----
6 from std_msgs.msg import Bool
7 from std_msgs.msg import Float32
8 from std_msgs.msg import Float64
9 from std_msgs.msg import Empty
10 from geometry_msgs.msg import Twist
11 from geometry_msgs.msg import Vector3
12 from geometry_msgs.msg import Quaternion
13 from sensor_msgs.msg import FluidPressure
14 from winch.msg import WinchFeedback
15 from winch.msg import CurveSensor
16 from winch.msg import WinchDebug
17

```

```
18 # ----- Variables globales -----
19 global rov_enable
20 rov_enable = 0
21 global rov_speed # m/s
22 rov_speed = Vector3(0.0,0.0,0.0)
23 global rov_yaw
24 rov_yaw = 0.0
25 global yaw0
26 yaw0 = 0.0
27 global pressure
28 pressure = 10300
29 global P0
30 P0 = 10300
31 global V_gap # distance flotteurs en m
32 V_gap = 0.6
33 global speed_V_gap # vitesse ouverture flotteurs en m/s
34 speed_V_gap = 0.0
35 global f # frequence de la boucle en Hz
36 f = 25.0
37 global control_mode
38 control_mode = 1 # 1 pour vitesse 0 pour longueur
39 global t_cmd_vel
40 t_cmd_vel = 0
41 global t_curve_sensor
42 t_curve_sensor = 0
43 global timer_speed
44 global timer_length
45 global debug
46 debug = 1
47
48 # ----- Callbacks Subscribers -----
49 def callback_stop(empty_msg):
50     rospy.loginfo("Stop control")
51     try:
52         timer_speed.shutdown()
53         timer_length.shutdown()
54     except:
55         pass
56
57 def callback_hazard_enable(hazard_enable): # Recuperation de ...
58     l'etat arm / disarm envoye par le joystick
59     global rov_enable
60     rov_enable = hazard_enable.data
61
62 def callback_cmd_vel(cmd_vel): # Recuperation de la vitesse ...
63     souhaitee du ROV envoyee par le Joystick
64     global t_cmd_vel
65     t_cmd_vel = rospy.get_time() # Temps en secondes depuis epoch
66     global rov_speed
```

```

65     if rov_enable:
66         scale_x = 1.5
67         scale_y = 1.5
68         scale_z = 1.5
69         rov_speed = Vector3(scale_x*cmd_vel.linear.x, ...
70                             scale_y*cmd_vel.linear.y, scale_z*cmd_vel.linear.z)
71     else:
72         rov_speed = Vector3(0.0,0.0,0.0)
73 #def callback_linear_acceleration(linear_acceleration):
74
75 def callback_compass(compass): # Recuperation de l'orientation du ROV
76     global rov_yaw
77     rov_yaw = compass.data
78
79 def callback_pressure(fluid_pressure): # Recuperation de la ...
80     pression autour du ROV
81     global pressure
82     pressure = fluid_pressure.fluid_pressure
83
84 def callback_curve_sensor(sensor): # Recuperation valeur du ...
85     capteur de courbure sur le cable
86     global t_curve_sensor
87     t_curve_sensor = rospy.get_time() # Temps en secondes depuis ...
88     epoch
89     global V_gap
90     V_gap = sensor.buoy_distance
91     global speed_V_gap
92     speed_V_gap = sensor.opening_speed
93
94 #def callback_orientation(orientation):
95
96 def callback_init(empty_msg): # Initialisation des valeurs a la ...
97     demande de l'utilisateur
98     rospy.loginfo("Init")
99     global P0
100    P0 = pressure # Pression a la surface
101    global yaw0
102    yaw0 = rov_yaw # Orientation initiale
103    global stop
104    stop = 0
105    if (control_mode == 1):
106        global timer_speed
107        timer_speed = rospy.Timer(rospy.Duration(1/f), control_speed)
108    elif (control_mode == 0):
109        global timer_length
110        timer_length = rospy.Timer(rospy.Duration(1/f), ...
111                                    control_length)

```

```

108 #def callback_feedback(feedback):
109 #     cable_length = feedback.cable_length
110
111 # ----- Fonctions -----
112 def compute_depth(p): # Calcul de la profondeur actuelle du ROV
113     rho = 1.0 # 1.025 pour eau de mer
114     g = 9.80665
115     depth = (p-P0)/(rho*g)
116     return depth
117
118 def relative_speed(): #TODO
119 #     rov_yaw
120 #     depth = compute_depth(pressure)
121 #     relative_pos
122     if (rospy.get_time() - t_cmd_vel < 4):
123         rov_winch_relative_speed = rov_speed.x
124     else:
125         rov_winch_relative_speed = 0.0
126         #rospy.loginfo("No new cmd_vel for more than 4s")
127     return rov_winch_relative_speed
128
129 def control_speed(timer_event):
130     if (rospy.get_time() - t_curve_sensor > 2):
131         rospy.logwarn("No curve sensor compute data for more than ...
132                        2s")
133         try:
134             timer_speed.shutdown()
135             timer_length.shutdown()
136         except:
137             pass
138     pub_speed = rospy.Publisher('send_speed', Float32, queue_size=1)
139     R = 0.02585 # Rayon roues enrouleur
140     # ---- Terme ROV speed ----
141     rov_winch_relative_speed = relative_speed()
142     Kv = 0.0
143     desired_speed_terme_ROVspeed = Kv * (1.0/R) * ...
144     rov_winch_relative_speed
145     # ---- Terme V -----
146     # Ecartement souhaite adapte en fonction de la vitesse du ROV
147     # if rov_winch_relative_speed <= 0.2:
148     #     V_gap_desired = 0.6
149     # elif rov_winch_relative_speed > 0.8:
150     #     V_gap_desired = 1.12
151     # else:
152     #     V_gap_desired = 2.3333 * rov_winch_relative_speed ** 3 - ...
153     #     5.0464 * rov_winch_relative_speed ** 2 + 3.9135 * ...
154     rov_winch_relative_speed + 0.0239
155     V_gap_desired = 0.5
156     if V_gap > 0.7:

```

```

153     error_V_gap = 0.7 - V_gap
154 elif V_gap < 0.5:
155     error_V_gap = 0.5 - V_gap
156 else:
157     error_V_gap = 0
158 Kp = -50.0 # signe negatif car si distance trop grande il ...
159         # faut derouler du cable
160 Kd = 0.0
161 desired_speed_terme_v = Kp * error_V_gap + Kd * speed_V_gap
162 #TODO : Differents cas fonction acceleration
163 # ---- Combinaison ----
164 desired_winch_speed = desired_speed_terme_v + ...
165     desired_speed_terme_ROVspeed
166 pub_speed.publish(desired_winch_speed)
167 if (debug == 1):
168     pub_debug = rospy.Publisher('debug', WinchDebug, ...
169         queue_size=1)
170     debug_msg = WinchDebug()
171     debug_msg.header.stamp = rospy.get_rostime()
172     debug_msg.rov_speed = rov_speed
173     debug_msg.relative_speed.data = rov_winch_relative_speed
174     debug_msg.desired_winch_speed_rov.data = ...
175         desired_speed_terme_ROVspeed
176     debug_msg.desired_V_gap.data = V_gap_desired
177     debug_msg.V_gap.data = V_gap
178     debug_msg.speed_V_gap.data = speed_V_gap
179     debug_msg.desired_winch_speed_Vgap.data = ...
180         desired_speed_terme_v
181     debug_msg.desired_winch_speed.data = desired_winch_speed
182     pub_debug.publish(debug_msg)
183 #def control_length(timer_event): #TODO
184 #    rospy.Subscriber("/winch/feedback", WinchFeedback, ...
185 #        callback_feedback)
186 #    pub_length = rospy.Publisher('send_length', Float32, ...
187 #        queue_size=1)
188 if __name__ == '__main__':
189     rospy.init_node('cmd_winch')
190     rospy.Subscriber("/br2/hazard_enable", Bool, ...
191         callback_hazard_enable)
192     rospy.Subscriber("/br2/cmd_vel", Twist, callback_cmd_vel)
193     rospy.Subscriber("/br2/mavros/global_position/compass_hdg", ...
194         Float64, callback_compass)
195     rospy.Subscriber("/br2/mavros/imu/water_pressure", ...
196         FluidPressure, callback_pressure)
197     rospy.Subscriber("/winch/curve_sensor", CurveSensor, ...
198         callback_curve_sensor)

```

```
191     rospy.Subscriber("/winch/init_control", Empty, callback_init)
192     rospy.Subscriber("/winch/stop", Empty, callback_stop)
193 #     rospy.Subscriber("/br2/mavros/imu/data/linear_acceleration", ...
    Vector3, callback_linear_acceleration)
194 #     rospy.Subscriber("/br2/mavros/imu/data/orientation", ...
    Quaternion, callback_orientation)
195
196     rospy.spin()
```


Annexe F

Valorisation scientifique : publications, présentations et dissémination

Publications

- O. Tortorici, C. Anthierens, V. Hugel, et H. Barthelemy, (2019) "[Towards active self-management of umbilical linking ROV and USV for safer submarine missions](#)", IFAC-PapersOnLine, vol. 52, n 21, p. 265-270, déc. 2019, doi : 10.1016/j.ifacol.2019.12.318.

Présentations dans des conférences, séminaires et workshops

- [MOQESM'2020](#) workshop de la conférence Sea Tech Week, Brest, 13-15 octobre 2020 : "[Using Vortex Simulator to validate the control of a tethered ROV](#)"
- Webinar GT2 Véhicules autonomes, Groupe de recherche robotique, 7 juillet 2020 : "[Compliant control of a Remotely Operated Vehicle \(ROV\) and its instrumented cable](#)"
- Journée d'inauguration du programme de master Erasmus Mundus MIR (Marine and Maritime Intelligent Robotics), Toulon, 8 novembre 2019 : Démonstration du contrôle d'un robot sous-marin dans un bassin.
- [Doctoriades "Journées de la Jeune Recherche de l'Université de Toulon"](#), Toulon, 17-18 octobre 2019 : "[Gestion des câbles reliant les robots marins et sous-marins](#)"
- [Conférence IFAC CAMS](#), Daejeon, Corée du Sud, 18-20 septembre 2019 : "[Towards Active Self-Management of Umbilical Linking ROV and USV for Safer Submarine Missions](#)"
- [27èmes journées Manufacturing'21](#), Toulon, 23-25 janvier 2019 : Poster de présentation.
- [Rencontres Académiques/Industriels sur le thème des Sciences et Technologies de la Mer](#), Pôle Mer Méditerranée, Toulon, 24 janvier 2019 : Présentation sur les doctorats comme possibilité de partenariat entre académiques et industriels.
- [Séminaire COSMER](#), Toulon, 29 mars 2018 : "[Conception et pilotage synchronisé d'ombilicaux actionnés communicants : application à l'interconnexion de robots marins et sous-marins.](#)"

Dissémination

- 12ème édition de la Fête de la Science universitaire à l'Université de Toulon, présentation à un public scolaire, 10 octobre 2019
- Concours ma thèse en 180s, mars 2019
- Mines de la réussite : Accompagnement de deux groupes de lycéens pour leurs Travaux Personnels Encadrés pour l'épreuve du baccalauréat, 2017-2018

Bibliographie

- Ajwad, Syed Ali et Jamshed Iqbal (2014). « Recent Advances and applications of tethered robotic systems ». In : *Science International*. T. 26.
- Ali, Mohammad Furqan et al. (nov. 2020). « Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications ». en. In : *Archives of Computational Methods in Engineering* 27.5, p. 1379-1412. ISSN : 1886-1784. DOI : [10.1007/s11831-019-09354-8](https://doi.org/10.1007/s11831-019-09354-8).
- Antonelli, Gianluca (2018). *Underwater Robots*. en. 4^e éd. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer International Publishing. ISBN : 978-3-319-77898-3. DOI : [10.1007/978-3-319-77899-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0).
- Banerjee, Arun K. et Van N. Do (1994). « Deployment control of a cable connecting a ship to an underwater vehicle ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 17.6, p. 1327-1332. ISSN : 0731-5090. DOI : [10.2514/3.21351](https://doi.org/10.2514/3.21351).
- Bevilacqua, L., W. Kleczka et E. Kreuzer (sept. 1991). « On the Mathematical Modeling of ROV'S ». In : *IFAC Proceedings Volumes*. 3rd IFAC Symposium on Robot Control 1991 (SYROCO'91), Vienna, Austria, 16-18 September 1991 24.9, p. 51-54. ISSN : 1474-6670. DOI : [10.1016/S1474-6670\(17\)51031-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)51031-9).
- Blintsov, Oleksandr (fév. 2017). « Development of the mathematical modeling method for dynamics of the flexible tether as an element of the underwater complex ». In : *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 1.7 (85). Section : Applied mechanics, p. 4-14. DOI : [10.15587/1729-4061.2017.90291](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90291).
- BlueRobotics (juin 2019a). *BlueROV2 Technical Specifications*. En. URL : https://bluerobotics.com/wp-content/uploads/2020/02/br_bluerov2_datasheet_rev6.pdf (visité le 27/04/2021).
- BlueRobotics (sept. 2019b). *T200 Thruster for ROVs, AUVs, and marine robotics*. en-US. URL : <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/> (visité le 27/04/2021).
- Bohn, C. et D.P. Atherton (avr. 1995). « An analysis package comparing PID anti-windup strategies ». In : *IEEE Control Systems Magazine* 15.2. Conference Name : IEEE Control Systems Magazine, p. 34-40. ISSN : 1941-000X. DOI : [10.1109/37.375281](https://doi.org/10.1109/37.375281).
- Bourget, P. -L. et D. Marichal (jan. 1990). « Remarks about variations in the drag coefficient of circular cylinders moving through water ». In : *Ocean Engineering* 17.6, p. 569-585. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/0029-8018\(90\)90024-Z](https://doi.org/10.1016/0029-8018(90)90024-Z).
- Brantner, Gerald et Oussama Khatib (jan. 2021). « Controlling Ocean One : Human-robot collaboration for deep-sea manipulation ». en. In : *Journal of Field Robotics* 38.1, p. 28-51. ISSN : 1556-4959, 1556-4967. DOI : [10.1002/rob.21960](https://doi.org/10.1002/rob.21960).

- Brierley, Andrew S. et al. (mars 2002). « Antarctic Krill Under Sea Ice : Elevated Abundance in a Narrow Band Just South of Ice Edge ». en. In : *Science* 295.5561. Publisher : American Association for the Advancement of Science Section : Report, p. 1890-1892. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : [10.1126/science.1068574](https://doi.org/10.1126/science.1068574).
- Brignone, L. et al. (mai 2015). « First sea trials of HROV the new hybrid vehicle developed by IFREMER ». In : DOI : [10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271682](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271682).
- Buckham, Bradley J (1997). « Dynamics Modelling of Low-Tension Tethers for Submerged Remotely Operated Vehicles ». DOCTOR OF PHILOSOPHY. University of Victoria.
- Caiti, A., V. Calabrò et A. Munafò (jan. 2012). « AUV team cooperation : emerging behaviours and networking modalities ». en. In : *IFAC Proceedings Volumes*. 9th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft 45.27, p. 342-347. ISSN : 1474-6670. DOI : [10.3182/20120919-3-IT-2046.00058](https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00058).
- Capocci, Romano et al. (mars 2017). « Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review ». en. In : *Journal of Marine Science and Engineering* 5.1. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 13. DOI : [10.3390/jmse5010013](https://doi.org/10.3390/jmse5010013).
- Christ, Robert et Robert Wernli (2014). *The ROV Manual A User Guide for Remotely Operated Vehicles - Second Edition*. en. Elsevier. ISBN : 978-0-08-098288-5. DOI : [10.1016/C2011-0-07796-7](https://doi.org/10.1016/C2011-0-07796-7).
- Clarke, Tom (jan. 2003). « Robots in the deep ». en. In : *Nature* 421.6922. Number : 6922 Publisher : Nature Publishing Group, p. 468-470. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/421468a](https://doi.org/10.1038/421468a).
- Coyne, J. (avr. 1990). « Analysis of the formation and elimination of loops in twisted cable ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15.2. Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 72-83. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/48.50692](https://doi.org/10.1109/48.50692).
- Creuze, Vincent (2014). « Robots marins et sous-marins - Perception, modélisation, commande ». fr. In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783. Publisher : Editions T.I. Type : base documentaire _eprint : base documentaire : TIB623DUO., p. 32. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/automatique-robotique-th16/applications-en-robotique-42623210/robots-marins-et-sous-marins-s7783/>.
- De, Marliave Guilhem, Olivier Dubois et Timothee Penet (déc. 2016). « Systeme Filaire Securise Pour Drone ». FR3037448A1.
- Delany, Noel K et Norman E Sorensen (nov. 1953). « LOW-SPEED DRAG OF CYLINDERS OF VARIOUS SHAPES ». en. In : p. 23.
- Dreyer, T. P. et Jan H. Van Vuuren (juill. 1999). « A comparison between continuous and discrete modelling of cables with bending stiffness ». en. In : *Applied Mathematical Modelling* 23.7, p. 527-541. ISSN : 0307-904X. DOI : [10.1016/S0307-904X\(98\)10097-5](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10097-5).
- Drogou, Jean-Francois, Vincent Rigaud et Laurent Artzner (avr. 2012). « System Comprising an Underwater Vehicle and a Base Situated at the Surface ». WO2012042177 (A1). URL : https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20120405&DB=&locale=fr_EP&CC=WO&NR=2012042177A1&KC=A1&ND=4 (visité le 08/06/2021).

- Drumond, Geovana et al. (jan. 2018). « Pipelines, risers and umbilicals failures : A literature review ». en. In : *Ocean Engineering* 148, p. 412-425. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2017.11.035](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.035).
- Duncan, Roger G. et al. (avr. 2007). « High-accuracy fiber-optic shape sensing ». In : sous la dir. de Kara J. Peters. San Diego, California, 65301S. DOI : [10.1117/12.720914](https://doi.org/10.1117/12.720914).
- Fang, Ming-Chung, Chang-Shang Hou et Jih-Hong Luo (juin 2007). « On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect ». In : *Ocean Engineering* 34.8, p. 1275-1289. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.014).
- Feng, Z. et R. Allen (juin 2004). « Evaluation of the effects of the communication cable on the dynamics of an underwater flight vehicle ». In : *Ocean Engineering* 31.8, p. 1019-1035. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2003.11.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.11.001).
- Ferreira, Cristiano Zacarias et al. (2014). « UNDERWATER ROBOTIC VEHICLE FOR SHIP HULL INSPECTION : CONTROL SYSTEM ARCHITECTURE ». en. In : *Mobile Robotics* 6, p. 11.
- Frank, Jeremy E. et al. (mai 2013). « Smart tether system for underwater navigation and cable shape measurement ». en. US8437979B2. URL : <https://patents.google.com/patent/US8437979B2/en> (visité le 23/04/2019).
- Gartner, Nicolas (juin 2020). « Identification de paramètres hydrodynamiques par simulation avec Smoothed Particle Hydrodynamics ». fr. These de doctorat. Toulon. URL : <https://www.theses.fr/2020TOUL0004> (visité le 12/05/2021).
- Gay Neto, Alfredo et Clóvis de Arruda Martins (déc. 2013). « Structural stability of flexible lines in catenary configuration under torsion ». en. In : *Marine Structures* 34, p. 16-40. ISSN : 0951-8339. DOI : [10.1016/j.marstruc.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.07.002).
- Ifremer (2021). *À la découverte des grands fonds*. fr-FR. URL : https://wwz.ifremer.fr/grands_fonds/ (visité le 04/06/2021).
- Irvine, H. M (1981). *Cable structures*. English. OCLC : 636377570. Cambridge - Mass. & London : MIT Press. ISBN : 978-0-262-09023-0.
- Katara, Pushkal et al. (avr. 2019). « Open Source Simulator for Unmanned Underwater Vehicles using ROS and Unity3D ». In : *2019 IEEE Underwater Technology (UT)*. ISSN : 2573-3796, p. 1-7. DOI : [10.1109/UT.2019.8734309](https://doi.org/10.1109/UT.2019.8734309).
- Kaushal, Hemani et Georges Kaddoum (2016). « Underwater Optical Wireless Communication ». In : *IEEE Access* 4. Conference Name : IEEE Access, p. 1518-1547. ISSN : 2169-3536. DOI : [10.1109/ACCESS.2016.2552538](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538).
- Kermorgant, Olivier (2014). « A Dynamic Simulator for Underwater Vehicle-Manipulators ». en. In : *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*. T. 8810. Series Title : Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, p. 25-36. ISBN : 978-3-319-11899-4 978-3-319-11900-7. DOI : [10.1007/978-3-319-11900-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11900-7_3).
- Khatib, Oussama et al. (2016). « Ocean one : A robotic avatar for oceanic discovery ». In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23.4. tex.publisher= IEEE, p. 20-29. DOI : [10.1109/MRA.2016.2613281](https://doi.org/10.1109/MRA.2016.2613281).
- Koenig, N. et A. Howard (sept. 2004). « Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator ». In : *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*. T. 3, 2149-2154 vol.3. DOI : [10.1109/IROS.2004.1389727](https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727).

- Lack, Sven (sept. 2017). « Aufbau, Erprobung und Einsatzvorbereitung eines ROVs ». de. Thèse de doct.
- Laranjeira, Matheus, Claire Dune et Vincent Hugel (mars 2020). « Catenary-based visual servoing for tether shape control between underwater vehicles ». en. In : *Ocean Engineering* 200, p. 107018. ISSN : 0029-8018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107018](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107018).
- Li, Guorui et al. (mars 2021). « Self-powered soft robot in the Mariana Trench ». en. In : *Nature* 591.7848. Number : 7848 Publisher : Nature Publishing Group, p. 66-71. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/s41586-020-03153-z](https://doi.org/10.1038/s41586-020-03153-z).
- Lichte, H. (sept. 1919). « On the influence of horizontal temperature layers in sea water on the range of underwater sound signals ». en. In : *Physikalische Zeitschrift* 17, p. 385-389. URL : <https://darchive.mblwhoilibrary.org/handle/1912/3021>.
- Louédec, Morgan et Luc Jaulin (mai 2021). « Interval Extended Kalman Filter—Application to Underwater Localization and Control ». en. In : *Algorithms* 14.5. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 142. DOI : [10.3390/a14050142](https://doi.org/10.3390/a14050142).
- Marco, D.B. et A.J. Healey (sept. 2000). « Current developments in underwater vehicle control and navigation : the NPS ARIES AUV ». In : *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158)*. T. 2, 1011-1016 vol.2. DOI : [10.1109/OCEANS.2000.881732](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2000.881732).
- McLain, T W et S M Rock (juin 1992). « Experimental Measurement of ROV Tether Tension ». en. In : *Proceedings of ROV '92*. San Diego, California : IEEE, p. 6. URL : <https://web.stanford.edu/group/ar1/publications/experimental-measurement-rov-tether-tension>.
- Moreira, Matheus Laranjeira (avr. 2019). « Visual servoing on deformable objects : an application to tether shape control ». en. Thèse de doct. Université de Toulon. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02534996>.
- Niu, Hanlin et al. (jan. 2016). « Efficient Path Planning Algorithms for Unmanned Surface Vehicle ». en. In : *IFAC-PapersOnLine*. 10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems CAMS 2016 49.23, p. 121-126. ISSN : 2405-8963. DOI : [10.1016/j.ifacol.2016.10.331](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.331).
- Paifelman, Elena (juin 2017). « A comparison between mathematical models of stationary configuration of an underwater towed system with experimental validations for oceans'17 MTS/IEEE Aberdeen conferences ». In : *OCEANS 2017 - Aberdeen*, p. 1-7. DOI : [10.1109/OCEANSE.2017.8084854](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084854).
- Palmeiro, Alejandro et al. (juin 2011). « Underwater radio frequency communications ». In : *OCEANS 2011 IEEE - Spain*, p. 1-8. DOI : [10.1109/Oceans-Spain.2011.6003580](https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003580).
- Pham, Hoang Anh et al. (jan. 2020). « Distributed Adaptive Neural Network Control Applied to a Formation Tracking of a Group of Low-Cost Underwater Drones in Hazardous Environments ». en. In : *Applied Sciences* 10.5. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1732. DOI : [10.3390/app10051732](https://doi.org/10.3390/app10051732).
- Prats, Mario et al. (oct. 2012). « An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions ». In : *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. ISSN : 2153-0866, p. 2577-2582. DOI : [10.1109/IROS.2012.6385788](https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385788).

- Quan, Wei-cai et al. (avr. 2015). « A geometrically exact formulation for three-dimensional numerical simulation of the umbilical cable in a deep-sea ROV system ». en. In : *China Ocean Engineering* 29.2, p. 223-240. ISSN : 0890-5487, 2191-8945. DOI : [10.1007/s13344-015-0016-0](https://doi.org/10.1007/s13344-015-0016-0).
- Quigley, Morgan et al. (mai 2009). « ROS : an open-source Robot Operating System ». en. In : *ICRA workshop on open source software* 3.3.2, p. 5.
- Ramp, S. R. et al. (fév. 2009). « Preparing to predict : The Second Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN-II) experiment in the Monterey Bay ». en. In : *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*. AOSN II : The Science and Technology of an Autonomous Ocean Sampling Network 56.3, p. 68-86. ISSN : 0967-0645. DOI : [10.1016/j.dsr2.2008.08.013](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.08.013).
- Raugel, E. et al. (2019). « Operational and scientific capabilities of Ariane, Ifremer's hybrid ROV ». In : *OCEANS 2019 - Marseille*. DOI : [10.1109/OCEANSE.2019.8867102](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867102).
- Robotics, IQUA (2021). *Girona 500 AUV - IQUA Robotics*. en-US. URL : <https://iquarobotics.com/girona-500-auv> (visité le 27/06/2021).
- Rudnick, Daniel L. et al. (mai 2017). « A climatology of the California Current System from a network of underwater gliders ». en. In : *Progress in Oceanography* 154, p. 64-106. ISSN : 0079-6611. DOI : [10.1016/j.pocean.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.03.002).
- Sherman, J. et al. (oct. 2001). « The autonomous underwater glider "Spray" ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26.4. Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 437-446. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/48.972076](https://doi.org/10.1109/48.972076).
- Sladen, A. et al. (déc. 2019). « Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables ». en. In : *Nature Communications* 10.1. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group, p. 5777. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-019-13793-z](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z).
- Song, B. et W.-Y. Lu (juin 2015). « An Improved Experimental Technique to Characterize Micro-Diameter Copper Wires in Torsion ». en. In : *Experimental Mechanics* 55.5, p. 999-1004. ISSN : 0014-4851, 1741-2765. DOI : [10.1007/s11340-014-9978-8](https://doi.org/10.1007/s11340-014-9978-8).
- Soylu, S., B. J. Buckham et R. P. Podhorodeski (sept. 2010). « Dynamics and control of tethered underwater-manipulator systems ». In : *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, p. 1-8. DOI : [10.1109/OCEANS.2010.5664366](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664366).
- Suzuki, Hiroyoshi et al. (juill. 2017). « Numerical Analysis of the Motion of ROV Applying ANC Method to the Motion of Tether Cable ». Anglais. In : International Society of Offshore et Polar Engineers. ISBN : 978-1-880653-97-5. URL : <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-17-205> (visité le 08/03/2019).
- Suzuki, Hiroyuki et al. (juill. 2018). « Numerical Motion Analysis of ROV Applying ANCF to Tether Cable Considering Its Mechanical Property ». Anglais. In : International Society of Offshore et Polar Engineers. ISBN : 978-1-880653-87-6. URL : <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-18-272> (visité le 08/03/2019).
- Sward, Darryn, Jacquomo Monk et Neville Barrett (2019). « A Systematic Review of Remotely Operated Vehicle Surveys for Visually Assessing Fish Assemblages ». English. In : *Frontiers in Marine Science* 6. Publisher : Frontiers. ISSN : 2296-7745. DOI : [10.3389/fmars.2019.00134](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00134).
- Tempel, Philipp (2019). « Dynamics of cable-driven parallel robots with elastic and flexible, time-varying length cables ». en. Accepted : 2020-03-31T12 :52 :40Z Journal Abbre-

- viation : Dynamik paralleler Seilroboter mit elastisch-flexiblen, langenveranderlichen Seilen. These de doct. Stuttgart : Fraunhofer Verlag. DOI : [10.18419/opus-10818](https://doi.org/10.18419/opus-10818).
- Tempel, Philipp, Felix Trautwein et Andreas Pott (2019). « Experimental Identification of Stress-Strain Material Models of UHMWPE Fiber Cables for Improving Cable Tension Control Strategies ». en. In : *Advances in Robot Kinematics 2018*. Sous la dir. de Jadran Lenarcic et Vincenzo Parenti-Castelli. Springer Proceedings in Advanced Robotics. Cham : Springer International Publishing, p. 258-265. ISBN : 978-3-319-93188-3. DOI : [10.1007/978-3-319-93188-3_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93188-3_30).
- Vaz, Murilo et al. (jan. 1998). « EXPERIMENTAL DETERMINATION OF AXIAL, TORSIONAL AND BENDING STIFFNESS OF UMBILICAL CABLES ». In : Lisbon, Portugal : New York, NY : American Society of Mechanical Engineers, 1998., p. 7. URL : https://www.researchgate.net/publication/209625355_EXPERIMENTAL_DETERMINATION_OF_AXIAL_TORSIONAL_AND_BENDING_STIFFNESS_OF_UMBILICAL_CABLES.
- Walton, Thomas S. et Harry Polachek (1960). « Calculation of transient motion of submerged cables ». en. In : *Mathematics of Computation* 14.69, p. 27-46. ISSN : 0025-5718, 1088-6842. DOI : [10.1090/S0025-5718-1960-0116470-5](https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1960-0116470-5).
- Whitcomb, Louis L. et al. (mai 2010). « Navigation and control of the Nereus hybrid underwater vehicle for global ocean science to 10,903 m depth : Preliminary results ». In : *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. ISSN : 1050-4729, p. 594-600. DOI : [10.1109/ROBOT.2010.5509265](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509265).
- Wnuk, Markus et al. (nov. 2017). « Concept for a simulation-based approach towards automated handling of deformable objects — A bin picking scenario ». In : *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, p. 1-6. DOI : [10.1109/M2VIP.2017.8211452](https://doi.org/10.1109/M2VIP.2017.8211452).
- Xu, Chunying, Jiawang Chen et al. (mars 2016). « Review of Underwater Cable Shape Detection ». EN. In : *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 33.3. Publisher : American Meteorological Society Section : Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, p. 597-606. ISSN : 0739-0572, 1520-0426. DOI : [10.1175/JTECH-D-15-0112.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0112.1).
- Xu, Chunying, Ke Wan et al. (2016). « Underwater cable shape detection using ShapeTape ». In : *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. tex.organization= IEEE, p. 1-4.
- Yann, HELLO (2021). « SEAFOOD_II cruise, Tethys II R/V ». In : Publisher : Sismar. DOI : [10.17600/18001676](https://doi.org/10.17600/18001676).
- Yu, Son-Cheol, Junku Yuh et Jinwhan Kim (2013). « Armless underwater manipulation using a small deployable agent vehicle connected by a smart cable ». In : *Ocean Engineering* 70, p. 149-159. ISSN : 0029-8018. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.06.006>.

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1 | Illustration de la problématique du câble trop tendu ou trop lâche, imagée par une laisse de chien - présentée au concours MT180 - Graphisme : Ark. Us. - Julia Bénard | 2 |
| I.1 | Exemples de missions océanographiques | 9 |
| I.2 | Exemples de missions sous-marines civiles | 10 |
| I.3 | Plongeur démineur de l'US Navy en exercice (gauche) - Mines échouées sur le littoral de Naissaar en Estonie (droite) | 11 |
| I.4 | Référentiel lié aux robots sous-marins | 12 |
| I.5 | USV Multiboat d'Escadrone | 14 |
| I.6 | USV Droneo de Robotics Industry | 14 |
| I.7 | USV Cat-surveyor de Subsea Tech | 14 |
| I.8 | Wave glider de Liquid Robotics : photo en mission - Leigh Martin (en haut à gauche) et schémas de description du fonctionnement (bas et droite) . . | 14 |
| I.9 | USV C-Enduro d'ASV | 15 |
| I.10 | USV C-Sweep d'ASV | 15 |
| I.11 | Exemples de sous-marins | 16 |
| I.12 | Bathysphère exposée au musée National Geographic de Washington DC . | 17 |
| I.13 | Bathyscaphe Trieste (1958-1963) | 17 |
| I.14 | Exemples de sous-marins légers | 18 |
| I.15 | Exemples d'AUV | 20 |
| I.16 | Illustration des profils en dents de scie effectués par les planeurs | 20 |
| I.17 | Exemples de planeurs | 21 |
| I.18 | Robot biomimétique développé à l'université de Zhejiang (Li et al. 2021) . | 22 |
| I.19 | Exemples de ROV | 23 |
| I.20 | ROV Ocean One en méditerranée en interaction avec un plongeur (Khatib et al. 2016) - Crédit photo : Frederic Osada et Teddy Seguin, DRASSM/Stanford University, avec l'aimable autorisation du DRASSM | 25 |
| I.21 | Exemples de ROV d'inspection | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| I.22 | Comparaison des débits en fonction de la portée pour différents types de communications sans fil dans l'eau | 28 |
| I.23 | Comparaison du diamètre de différents câbles en fonction du poids du ROV auxquels ils sont reliés | 31 |
| I.24 | Boucle formée à la surface de l'eau par le câble d'un BlueROV | 33 |
| I.25 | Boucles conservées par un câble Fathom slim resté sur une bobine plusieurs mois | 33 |
| I.26 | Câble d'un OpenROV Trident proches d'obstacles naturels | 34 |
| I.27 | Cordelette aspirée par un propulseur du robot Seasam lors d'essais de cordées de robots | 34 |
| I.28 | Exemples de trajectoires de rov pour l'étude visuelle de poissons ((Sward, Monk et Barrett 2019)) | 34 |
| I.29 | Enrouleur proposé par BlueRobotics | 36 |
| I.30 | Système de gestion du câble du HROV Ariane | 37 |
| I.31 | Illustration d'une cordée de robots (Moreira 2019) | 38 |
| I.32 | Illustration d'un ombilical reliant un ROV à un USV représentant le cas d'étude | 40 |
| II.1 | Courbe d'une chaînette | 43 |
| II.2 | Courbe de la chaînette dans un repère associé au câble | 44 |
| II.3 | Exemples de chaînettes pour différents paramètres | 46 |
| II.4 | Illustration de la modélisation d'un câble par masses ponctuelles (Walton et Polachek 1960) | 49 |
| II.5 | Illustration de la modélisation du câble par masses-ressorts-amortisseurs (Bradley J Buckham 1997) | 49 |
| II.6 | Différents modèles de systèmes ressorts-amortisseurs (Tempel 2019) | 50 |
| II.7 | Schéma de la section du câble Fathom de Blue Robotics | 54 |
| II.8 | Exemple d'abaque du coefficient de traînée pour un cylindre (Delany et Sorensen 1953) | 54 |
| II.9 | Schéma d'un montage expérimental pour la mesure de la raideur axiale d'un câble (Tempel, Trautwein et Pott 2019) | 55 |
| II.10 | Banc d'essai utilisé pour la raideur axiale, en torsion et en flexion de câbles sous-marins (Vaz et al. 1998) | 56 |
| II.11 | Illustration d'une expérience de mesure expérimentale de la raideur en courbure d'un câble (Vaz et al. 1998) | 57 |
| II.12 | Illustration de l'évaluation de la raideur en flexion d'un câble proposée par Bradley J Buckham (1997) | 57 |
| II.13 | Mise en place de la mesure expérimentale de raideur en flexion du câble du Tortuga | 57 |

| | | |
|-------|---|----|
| II.14 | Illustration de la méthode de mesure expérimentale de la raideur en torsion d'un fil proposée par Song et Lu (2015) | 60 |
| II.15 | Schéma de la détermination expérimentale de la raideur en torsion d'un câble | 60 |
| II.16 | Illustration du modèle du câble réalisé sous Simulink | 64 |
| II.17 | Comparaison de la simulation d'une chaîne sous Matlab Simulink avec le modèle analytique de la chaînette | 65 |
| II.18 | Validation du modèle et de la raideur en flexion par comparaison avec un câble réel suspendu dans l'air | 66 |
| II.19 | Superposition du modèle du Fathom Slim au câble réel suspendu dans l'air | 67 |
| II.20 | Schéma de la structure générale des simulations Vortex® | 68 |
| II.21 | Modélisation sous Vortex du câble Tortuga suspendu en l'air entre ses deux extrémités | 70 |
| II.22 | Comparaison de la forme du câble Tortuga entre le modèle Simulink, le modèle Vortex et le câble réel | 70 |
| II.23 | Efforts transmis par une chaînette au niveau du point d'attache du ROV en fonction de sa longueur | 73 |
| II.24 | Illustration de l'impact de la raideur du câble sur sa forme | 74 |
| II.25 | Forces (gauche) et moments (droite) transmis par le câble au ROV en fonction de sa raideur en flexion (noter l'échelle logarithmique de la raideur). Les points ayant une abscisse correspondant à la raideur respective des câbles Fathom Slim et Tortuga sont indiqués comme points de repères. . . | 75 |
| II.26 | Détail des forces et moments transmis par le câble au ROV pour des raideurs variant autour de celle du câble Fathom Slim (courbes de gauche) et du câble du Tortuga (courbes de droite) | 76 |
| II.27 | Illustration de la variation de distance entre les extrémités du câble | 76 |
| II.28 | Forces et moments transmis par le câble au ROV en fonction de la distance entre les extrémités pour une longueur donnée de câble | 77 |
| II.29 | Forme du câble pour des masses volumiques de 1000 et 1500 kg/m ³ | 78 |
| II.30 | Forces et moments transmis par le câble au ROV en fonction de sa masse volumique | 78 |
| III.1 | Exemples de détection de câbles par vision présentés dans (Moreira 2019) | 83 |
| III.2 | Illustration de la segmentation d'un câble pour sa détection dans Wnuk et al. (2017) | 84 |
| III.3 | Illustration du capteur de tension développé dans McLain et Rock (1992) | 85 |
| III.4 | Capteur ShapeTape™ fixé à un petit ROV (Yu, Yuh et Kim 2013) | 85 |
| III.5 | Capteur ShapeTape™ monté sur un câble (Bradley J Buckham 1997) . . | 85 |

| | | |
|--------|--|-----|
| III.6 | Photo du système de gestion de câble proposé par Brignone et al. (2015) et comprenant une partie de mesure de la tension et un enrouleur motorisé (IFREMER) | 86 |
| III.7 | Schémas et photo du système d'enrouleur automatique pour drone aérien proposé par Elistair | 87 |
| III.8 | Illustration de l'enrouleur développé précédemment au sein du laboratoire | 88 |
| III.9 | Schéma de la solution de gestion du câble proposée | 89 |
| III.10 | Système d'amortissement passif monté sur le câble | 90 |
| III.11 | Photo du capteur de courbure utilisé (référence FS-L-0095-103-ST) | 91 |
| III.12 | Illustration de la forme de V souhaitée (gauche) comparée à la forme en goutte d'eau à éviter (droite) | 92 |
| III.13 | Simulation du système de compliance passive sous Matlab Simulink pour le dimensionnement de la masse. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/eb1qrultUcA .) | 92 |
| III.14 | Fixation du système amorti et du capteur au câble | 93 |
| III.15 | Schéma du pont diviseur de tension pour la mesure du capteur de courbure | 94 |
| III.16 | Implantation électronique du capteur de courbure | 94 |
| III.17 | Effet du filtre sur le signal analogique brut du capteur de courbure lorsque celui-ci est statique puis déformé | 95 |
| III.18 | Schéma de l'acquisition du capteur de courbure | 96 |
| III.19 | Caractéristique du capteur de courbure en fonction de la distance d'écartement des flotteurs | 96 |
| III.20 | Modèle de la distance entre les flotteurs en fonction de la résistance du capteur de courbure | 97 |
| III.21 | Mise en évidence des interférences sur les mesures du capteur de courbure | 98 |
| III.22 | Écartement et vitesse d'écartement des flotteurs lorsque le ROV avance à une vitesse constante à différentes profondeurs | 99 |
| III.23 | Comportement du système de compliance passive pour différentes masses | 100 |
| III.24 | Étude de la distance entre les flotteurs et de leur vitesse d'écartement en fonction de la vitesse consigne du ROV | 101 |
| III.25 | Écart entre les flotteurs en fonction de la vitesse consigne du ROV | 102 |
| III.26 | Comparaison de l'impact du câble sur la vitesse et la puissance du ROV sans ou avec système amorti non contrôlé | 102 |
| III.27 | Comparaison des efforts transmis par le câble au ROV sans ou avec système amorti non contrôlé | 103 |
| III.28 | Comparaison du couple transmis à l'enrouleur sans ou avec système amorti non contrôlé | 103 |

| | | |
|--------|--|-----|
| III.29 | Vue globale de l'enrouleur décomposé en une partie moteur et une partie codeur | 106 |
| III.30 | Implantation électronique de l'enrouleur | 108 |
| III.31 | Schéma bloc de l'enrouleur | 108 |
| III.32 | Schéma de structure du code de contrôle bas niveau de l'enrouleur. Les croix rouges illustrent le fait que les fonctions "stop callback" et "speed callback" arrêtent respectivement les fonctions "asserv" et "length control". | 110 |
| III.33 | Schéma de structure du contrôle bas niveau de l'enrouleur | 111 |
| III.34 | Vitesse de rotation de l'enrouleur en fonction de la PWM | 111 |
| III.35 | Réponse à un échelon en vitesse de la boucle d'asservissement en vitesse de l'enrouleur | 112 |
| III.36 | Réponse à un échelon en longueur de la boucle d'asservissement en longueur de l'enrouleur | 112 |
| IV.1 | Comparaison des différents paramètres lorsque le câble entre sous tension | 118 |
| IV.2 | Schéma de commande du câble à une longueur consigne | 118 |
| IV.3 | Courbe de réponse du câble à un échelon sur la consigne en longueur . . . | 119 |
| IV.4 | Schéma logique de la commande en tension du câble | 120 |
| IV.5 | Courbes de comportement de l'asservissement en tension | 120 |
| IV.6 | Schéma logique de la commande en couple du câble | 121 |
| IV.7 | Couple de l'enrouleur lorsque le câble est enroulé à 0,8 m/s | 122 |
| IV.8 | Couple et vitesse mesurés de l'enrouleur lors de la commande du câble en fonction du couple | 123 |
| IV.9 | Comportement du système lors de la commande du câble en fonction du couple de l'enrouleur | 123 |
| IV.10 | Comportement de la commande de câble en longueur semi-tendue lorsque le ROV avance | 124 |
| IV.11 | Comparaison des efforts sur le câble avec et sans contrôle en longueur semi-tendue lorsque le ROV recule | 125 |
| IV.12 | Schéma de commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV | 126 |
| IV.13 | Comportement de la commande du câble en fonction de la vitesse consigne du ROV | 126 |
| IV.14 | Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en fonction de la vitesse consigne du ROV | 127 |
| IV.15 | Schéma de commande du câble en fonction de la distance entre les flotteurs | 127 |
| IV.16 | Comportement de la commande du câble en fonction de la distance entre les flotteurs | 128 |

| | | |
|-------|--|-----|
| IV.17 | Evolution de la distance entre les flotteurs lorsque le câble est contrôlé en fonction de cette distance | 128 |
| IV.18 | Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en fonction de la distance entre les flotteurs | 129 |
| IV.19 | Test de la commande de l'enrouleur à partir du système de compliance passive. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/_MQ6_1XwIXE) | 130 |
| IV.20 | Schéma de commande du câble combinant le V et la vitesse consigne du ROV | 131 |
| IV.21 | Comportement de la commande du câble en feedforward | 132 |
| IV.22 | Evolution de la distance entre les flotteurs lorsque le câble est contrôlé en feedforward | 132 |
| IV.23 | Forces transmises par le câble au ROV lorsque le câble est contrôlé en feedforward | 133 |
| IV.24 | Comparaison du comportement du câble entre les commandes en fonction de la distance des flotteurs, en fonction de la vitesse consigne du ROV et en feedforward | 133 |
| IV.25 | Schéma logique global du contrôle du câble basé sur le système de compliance passive | 135 |
| V.1 | Schéma d'implémentation globale du système | 138 |
| V.2 | Graphique de l'architecture ROS de contrôle global | 139 |
| V.3 | Bassins d'expérimentations | 140 |
| V.4 | Marqueurs pour suivi de mouvement placés sur le ROV et sur le câble | 141 |
| V.5 | Vue 3D dans QTM des marqueurs du BR2, du câble et de la position des caméras de mesure | 142 |
| V.6 | Comportement du système amorti passif observé par vidéo et par suivi de ses marqueurs avec le système Qualisys. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/bryO1E7HKZU) | 144 |
| V.7 | Courbe de l'écart entre les flotteurs et de la résistance du capteur de courbure du système amorti passif | 144 |
| V.8 | Trajectoires du ROV définies pour les expériences de mai 2021 | 145 |
| V.9 | Trajectoire réelle d'aller-retour du ROV vue de dessus avec le câble non instrumenté et le câble équipé du système de compliance passive. (Vidéos disponibles à ces liens : https://youtu.be/jca4o0Sd6zM , pour le câble instrumenté et https://youtu.be/mH-efBfEvvI , pour le câble non instrumenté.) | 147 |
| V.10 | Trajectoires réelles du ROV vues de dessus avec le câble non instrumenté et le câble équipé du système de compliance passive | 148 |
| V.11 | Trajectoires du ROV définies pour les expériences de juin 2021 | 149 |
| V.12 | Consigne de propulsion envoyée au ROV pour la trajectoire d'avance-recul | 150 |

| | | |
|------|--|-----|
| V.13 | Comportement du contrôle du câble et du système de compliance pour la trajectoire d'avance-recul du ROV | 150 |
| V.14 | Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire d'avance-recul lorsque le câble est contrôlé. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/owekUkN_UtM) | 151 |
| V.15 | Positions et vitesses du BR2 au cours de la trajectoire d'avance-recul lorsque le câble est contrôlé | 152 |
| V.16 | Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non | 153 |
| V.17 | Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire d'avance-recul lorsque le câble n'est pas contrôlé avec un départ tendu. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/1RTT23-USDY .) | 153 |
| V.18 | Vue du système à la fin de la marche arrière du ROV lorsque le câble est lâche (non contrôlé). (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/FG5iyNfjzck .) | 154 |
| V.19 | Trajectoires réelles d'avance-recul du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu | 155 |
| V.20 | Trajectoires réelles d'avance-recul du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu | 155 |
| V.21 | Consigne de propulsion envoyée au ROV pour la trajectoire en S | 156 |
| V.22 | Comportement du contrôle du câble et du système de compliance pour la trajectoire en S du ROV | 157 |
| V.23 | Vues du système global à différentes étapes de la trajectoire en S lorsque le câble est contrôlé. Les flèches rouges indiquent le sens d'avancée du ROV. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/fy-JTc8PvIY) | 158 |
| V.24 | Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non. (Vidéos disponibles à ces liens : https://youtu.be/LR4BKefRSnM , pour le passif lâche et https://youtu.be/74p5Bzee9kY , pour le passif départ tendu.) | 159 |
| V.25 | Comparaison du comportement du système de compliance passive lorsque le câble est contrôlé ou non | 159 |
| V.26 | Trajectoires réelles de S du ROV vues de dessus avec contrôle du câble et avec câble passif mou ou tendu | 160 |
| V.27 | Illustration des ondulations des flotteurs et du câble à l'arrière du ROV | 161 |
| V.28 | Courbes représentant le problème d'interférences entre les propulseurs et le capteur de courbure et comportement de l'enrouleur associé | 162 |
| V.29 | Photo illustrant le problème d'équilibrage du système amorti lors des premiers essais de contrôle. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/wr_tSbhOieU .) | 163 |
| V.30 | Comportement du système lorsqu'il n'est pas équilibré | 163 |

| | | |
|------|--|-----|
| V.31 | Illustration de la simulation du système d'instrumentation du câble sous Vortex | 165 |
| V.32 | Illustration de l'USV simulé sous Vortex | 166 |
| V.33 | Illustration de l'éditeur de connections entre les différents scripts et objets Vortex | 168 |
| V.34 | Trajectoire complexe définie pour les simulations Vortex | 169 |
| V.35 | Schéma du contrôle feedforward amélioré du câble | 170 |
| V.36 | Comportement du câble et du système de compliance lors d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/zN4ueoqEZhs .) | 171 |
| V.37 | Comportement de l'enrouleur lors d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré | 171 |
| V.38 | Évolution des forces et moments que le câble transmet au ROV lors d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré | 172 |
| V.39 | Évolution du couple de l'enrouleur d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré | 173 |
| V.40 | Évolution du couple de l'enrouleur d'une trajectoire complexe avec le mode de contrôle en feedforward amélioré | 173 |
| V.41 | Comparaison de l'évolution de la marge de câble pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe | 174 |
| V.42 | Comparaison de l'évolution de la distance entre les flotteurs pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe | 175 |
| V.43 | Comparaison de l'évolution de la vitesse de l'enrouleur pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe | 176 |
| V.44 | Comparaison de l'évolution de la surconsommation de puissance horizontale pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe | 176 |
| V.45 | Comparaison de l'évolution de la surconsommation de puissance verticale pour différents modes de contrôle avec une trajectoire complexe | 177 |
| V.46 | Vues de la configuration du système pour différents modes de contrôle du câble à deux instants de la trajectoire complexe. (Vidéo disponible à ce lien : https://youtu.be/77FhFrkM-y4 .) | 178 |
| V.47 | Vues du ROV avec son câble instrumenté en réel, avec le système de suivi de trajectoire et en simulation | 179 |
| B.1 | Schéma de la détermination expérimentale de la raideur en torsion d'un câble | 191 |
| B.2 | Photo de la mesure expérimentale de la raideur en torsion pour le câble Fathom Slim | 196 |
| B.3 | Points de mesure avec leurs incertitudes de la raideur en torsion du câble Fathom Slim | 198 |

| | | |
|------|--|-----|
| B.4 | Courbe représentant le couple normalisé en fonction de l'angle normalisé pour le câble Fathom Slim | 199 |
| B.5 | Points de mesure avec leurs incertitudes de la raideur en torsion du câble Tortuga | 200 |
| B.6 | Courbe représentant le couple normalisé en fonction de l'angle normalisé pour le câble Tortuga | 201 |
| C.1 | Repères BR2 | 204 |
| C.2 | Schéma des propulseurs | 205 |
| C.3 | Texture et géométrie de collision du BR2 | 207 |
| C.4 | Paramètres physiques du BR2 Heavy sous Vortex | 208 |
| C.5 | Vecteurs forces propulseurs | 208 |
| C.6 | Poussée en fonction de la vitesse de rotation | 209 |
| C.7 | Vitesse de rotation en fonction de la poussée | 211 |
| C.8 | Entrées-Sorties du script Python pour le pilotage du BR2 | 211 |
| C.9 | Structure du script Python pour le pilotage du BR2 | 212 |
| C.10 | Partie Transformation du script Python pour le pilotage du BR2 | 213 |
| C.11 | Partie Orientation du script Python pour le pilotage du BR2 | 213 |
| C.12 | Partie Position du script Python pour le pilotage du BR2 | 214 |
| C.13 | Partie asservissement en vitesse du script Python pour le pilotage du BR2 | 214 |
| C.14 | Réponses à des échelons de vitesse sur chacun des axes du ROV avec réglage des coefficients correspondants pour le PID | 215 |
| C.15 | Partie lissage de la consigne en vitesse du script Python pour le pilotage du BR2 | 217 |
| C.16 | Courbes comparant les vitesses du ROV ainsi que sa puissance avec ou sans lissage de la consigne en vitesse | 218 |
| D.1 | Erreur de quantification en fonction de la distance entre les flotteurs . . . | 220 |
| E.1 | Vue éclatée de la partie codeur de l'enrouleur | 227 |
| E.2 | Vue éclatée de la partie moteur de l'enrouleur | 228 |
| E.3 | Guides pour la câble à l'entrée et à la sortie de l'enrouleur | 228 |
| E.4 | Vue globale de l'enrouleur | 229 |

Ornella Tortorici

COncption de Systèmes Mécaniques et Robotiques, Université de Toulon

Conception et contrôle automatique d'un ombilical instrumenté pour robots sous-marins.

Les robots sous-marins téléopérés (ROV) sont reliés par un ombilical pour communiquer avec leur station de contrôle en surface. Cet ombilical présente un avantage de sécurité en tant que lien physique du robot mais impacte aussi le système en transmettant des efforts et perturbations au ROV, en augmentant le risque d'accroches et en limitant son champ de travail. Cette thèse porte sur la gestion active des ombilicaux reliés aux ROV de petite taille en vue de limiter leur impact sur le système.

Les efforts transmis par le câble au ROV sont étudiés en fonction de différents paramètres grâce au modèle de la chaînette puis grâce à la construction d'un modèle par solides finis sous Matlab Simulink. Une méthode simple d'estimation des coefficients de raideur en torsion et de raideur en flexion du câble est proposée pour paramétrer ces modèles.

Une solution de contrôle de la distribution de câble par un enrouleur basé sur son instrumentation avec un système de compliance passive et un capteur de courbure est alors proposée. Cette solution est évaluée grâce à des simulations du système complet sous Vortex et à des essais en bassin du ROV avec son câble instrumenté et contrôlé par l'enrouleur. Les expériences ont montré la faisabilité du contrôle automatique du câble à une longueur raisonnable adaptée aux déplacements du ROV grâce à son instrumentation.

mots clés : Robotique sous-marine, Mécatronique, Conception, Simulation, Modèle numérique, Contrôle, Câble, Raideur, Enrouleur, ROV, Système compliant, ROS

Design and control of actuated tether for underwater robots

Remotely operated vehicles in underwater (ROV) are connected by an umbilical to communicate with their control unit on the surface. This umbilical has a safety advantage as a physical link to the robot but also impacts the system by transmitting forces and disturbances to the ROV, thus increasing the risk of snags and limiting its working range. This thesis focuses on the active management of umbilicals connected to small ROVs in order to limit their impact on the system.

The forces transmitted by the cable to the ROV are studied as a function of different parameters using the catenary model and the construction of a finite solids model under Matlab Simulink. A simple method to estimate the torsional stiffness and bending stiffness coefficients of the cable is proposed in order to parameterize these models.

A solution to control the cable distribution by a winch using its instrumentation which is composed of a passive compliance system and a bending sensor is then proposed. This solution is evaluated through simulations of the complete system under Vortex and tank tests of the ROV with its instrumented cable controlled by the reel. The experiments showed the feasibility of the automatic control of the cable at a length adapted to the movements of the ROV thanks to its instrumentation.

keywords: Marine systems, Robotics, Mechatronics, Systems design, Simulation, Cables, Control, Stiffness, Winch, ROV, Compliant system, ROS

