



**HAL**  
open science

# Contributions à l'Estimation et à la Commande de Robots Mobiles Autonomes

Guillaume Allibert

► **To cite this version:**

Guillaume Allibert. Contributions à l'Estimation et à la Commande de Robots Mobiles Autonomes. Robotique [cs.RO]. Université Côte d'Azur, 2020. tel-03483890v1

**HAL Id: tel-03483890**

**<https://theses.hal.science/tel-03483890v1>**

Submitted on 16 Dec 2021 (v1), last revised 5 Jan 2022 (v2)

**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.

# HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

## Contributions à l'Estimation et à la Commande de Robots Mobiles Autonomes

Soutenue le 13/10/2020 par

**Guillaume ALLIBERT**

Laboratoire I3S, Université Côte d'Azur, CNRS

Isabelle FANTONI  
Nicolas ANDREFF  
Nicolas MARCHAND  
Cédric DEMONCEAUX  
Philippe MARTINET

DR CNRS, LS2N  
PR, FEMSTO-ST  
DR CNRS, GIPSA-Lab  
PR, ERL Vibot  
DR INRIA

Rapportrice  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur



# Sommaire

<b>Notations</b>	<b>I</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Activités pédagogiques, scientifiques et administratives</b>	<b>3</b>
1.1 État Civil	3
1.2 Parcours Universitaire et Professionnel	4
1.2.1 Parcours Universitaire	4
1.2.2 Parcours Professionnel	4
1.3 Activités d'enseignement	5
1.3.1 Enseignement à l'IUT GEII	5
1.3.2 Enseignement à l'EPU	6
1.3.3 Vulgarisation scientifique	6
1.4 Activités de recherche	6
1.4.1 Asservissement visuel prédictif	6
1.4.2 Observation d'état pour la robotique aérienne	6
1.4.3 Commande des robots mobiles sous-marin	7
1.4.4 Couplage <i>model-driven</i> et <i>data-driven</i> pour la Robotique	7
1.4.5 Encadrement Doctoral	7
1.4.6 Encadrement de Masters	9
1.4.7 Encadrements divers	10
1.4.8 Encadrement à venir dont le financement est déjà obtenu	11
1.4.9 Production scientifique	11
1.5 Activités scientifiques et administratives	14
1.5.1 Invitation dans des universités étrangères	14
1.5.2 Organisation de congrès nationaux/internationaux	15
1.5.3 Membre de Conseil/Comité d'expertise nationale	16
1.5.4 Participation à des suivis et des jurys de thèse	17
1.5.5 Activités de relecture	17
1.5.6 Membre élu/nommé de Conseil d'établissement	18
1.5.7 Responsabilité d'équipes de recherche	19
1.5.8 Contrats publics	19
<b>2 Commande Prédictive pour l'Asservissement Visuel</b>	<b>21</b>
2.1 Cadre général de la Commande Prédictive Visuelle	22
2.1.1 Structure de contrôle	22
2.1.2 Définition des contraintes	23
2.1.3 Formulation mathématique et résolution	24
2.1.4 Modèles de prédiction	24

2.1.5	Discussions autour de l'approche générale . . . . .	25
2.2	Stratégies de commandes prédictives rapides . . . . .	28
2.2.1	Model Predictive Path Integral . . . . .	28
2.2.2	Paramétrage de la commande . . . . .	30
2.3	Conclusion du chapitre . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Observation d'état pour la robotique aérienne</b>	<b>43</b>
3.1	Modélisation et formulation du problème . . . . .	45
3.2	Observateurs proposés . . . . .	48
3.3	Validation expérimentale . . . . .	50
3.3.1	Mesure des vitesses linéaires dans le repère corps . . . . .	51
3.3.2	Cas d'étude 1 : observateur seul . . . . .	53
3.3.3	Cas d'étude 2 : observateur couplé et contrôle en vitesse d'un drone . . . . .	55
3.4	Conclusion du chapitre . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Commande référencée vision de sous-marins</b>	<b>69</b>
4.1	Modélisation du sous-marin . . . . .	70
4.1.1	Repères de référence . . . . .	70
4.1.2	Modélisation cinématique . . . . .	71
4.1.3	Modélisation dynamique . . . . .	71
4.1.4	Couples et forces extérieures . . . . .	73
4.1.5	Modèle non linéaire complet . . . . .	75
4.1.6	Modèle utilisé pour le contrôle . . . . .	75
4.2	Poursuite de trajectoire linéaire par asservissement visuel . . . . .	76
4.2.1	Formulation du problème . . . . .	76
4.2.2	Description des contrôleurs . . . . .	78
4.2.3	Validation des résultats . . . . .	80
4.3	Stabilisation par asservissement visuel basé homographie . . . . .	86
4.3.1	Rappels sur la matrice homographie et son utilisation en contrôle . . . . .	87
4.3.2	Stabilisation avec mesure des vitesses linéaires . . . . .	90
4.3.3	Stabilisation sans mesure des vitesses linéaires . . . . .	103
4.3.4	Validation des résultats . . . . .	110
4.3.5	Conclusion du chapitre . . . . .	118
<b>5</b>	<b>Bilan et Perspectives</b>	<b>125</b>
5.1	Commande Prédictive pour les systèmes rapides . . . . .	125
5.2	Couplage <i>model-driven</i> et <i>data-driven</i> pour la Robotique . . . . .	126
5.2.1	Du point de vue contrôle . . . . .	126
5.2.2	Du point de vue perception . . . . .	127
5.3	L'Informatique Quantique pour la Robotique . . . . .	128
	<b>Références</b>	<b>136</b>

# Notations et abréviations

Tout au long de ce document, les scalaires sont notés en minuscules. Les caractères en gras sont utilisés pour les vecteurs et les matrices. Les matrices sont notées en majuscules. De plus, les notations suivantes sont utilisées :

## Opérateurs et fonctions

$ \cdot $	la norme euclidienne dans $\mathbb{R}^n$
$\ \cdot\ $	la norme de Frobenius dans $\mathbb{R}^{n \times n}$
$(\cdot)^\top$	l'opérateur transposé d'une matrice ou d'un vecteur
$\mathbf{v}_\times$	la matrice du pré-produit vectoriel associée au vecteur $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ , $\mathbf{v}_\times = \begin{pmatrix} 0 & -v_3 & v_2 \\ v_3 & 0 & -v_1 \\ -v_2 & v_1 & 0 \end{pmatrix}$ , $\mathbf{v}_\times \mathbf{w} = \mathbf{v} \times \mathbf{w}$ , $\forall \mathbf{w} \in \mathbb{R}^3$
$\pi_{\mathbf{x}}$	$\pi_{\mathbf{x}} = \mathbf{I}_3 - \mathbf{x}\mathbf{x}^\top$ est la projection sur l'espace tangent de la sphère $S^2$ d'un point $\mathbf{x} \in S^2$
$\text{sat}^\delta(\cdot) \in \mathbb{R}^n$	la fonction saturation définie par $\text{sat}^\delta(\mathbf{x}) \triangleq \mathbf{x} \min(1, \delta/ \mathbf{x} )$ , $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$
$\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	la matrice diagonale dont les valeurs dans la diagonale sont données par les arguments, $\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}$

## Constantes, variables et symboles

$\mathbf{I}_3$	matrice identité de dimension $3 \times 3$ , $\mathbf{I}_3 = \text{diag}(1, 1, 1)$
$\{\mathcal{A}\}$	repère inertiel
$\{\mathcal{B}\}$	repère corps
$\{\mathcal{C}\}$	repère caméra
$\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$	base canonique de $\mathbb{R}^3$
$\mathbf{R}$	matrice de rotation, $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$
$\mathbf{V}$	vitesses linéaires, $\mathbf{V} = [V_x, V_y, V_z]^\top$
$\mathbf{\Omega}$	vitesses angulaires, $\mathbf{\Omega} = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]^\top$
$m$	masse
$g$	gravité

## Abréviations

AP	<i>Data-Driven</i> , Approche Basée Apprentissage Profond
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicles</i> , Véhicule Sous-marin Autonome
CB	<i>Center of Buoyancy</i> , Centre de Flottabilité
CG	<i>Center of Gravity</i> , Centre de Gravité
CP	<i>Model Predictive Control</i> , Commande Prédictive
DVL	<i>Doppler Velocity Log</i> , Capteur de Vitesse par effet Doppler
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> , Filtre de Kalman Étendu
ESC	<i>Electronic Speed Controler</i> , Contrôleur de Moteur sans Balais
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Système de Positionnement Global
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> , Centrale Inertielle
MB	<i>Model-Driven</i> , Approche Basée Modèle
MOCAP	<i>MOtion CAPture</i> , Système de Capture de Mouvement
MPPI	<i>Model Predictive Path Integral</i> , Commande Prédictive basée sur les Intégrales de Chemin
PF	<i>Particule Filter</i> , Filtre Particulaire
ROS	<i>Robot Operating System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> , Véhicule Aérien sans Pilote
VAAE	<i>Velocity-Aided Attitude Estimation</i> , Estimation d'Attitude Basée Vitesse

# Introduction

Ce mémoire a vocation à présenter le bilan de mes travaux de recherche depuis dix ans en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Après un master de recherche obtenu en 2005 à Amiens au laboratoire CREA (maintenant devenu le laboratoire MIS) et une thèse soutenue à l'institut PRISME en 2008 à Orléans, j'ai été recruté en qualité de Maître de Conférences en 2009 à l'Université Côté d'Azur. J'effectue depuis mes activités de recherche au laboratoire I3S (UMR 7271) dans l'équipe SIS (Signal, Images, Systèmes) et plus particulièrement dans le projet *Systèmes Autonomes*. Depuis deux ans, je suis également impliqué en tant que collaborateur extérieur de l'équipe Inria ACENTAURI<sup>1</sup>, anciennement équipe projet CHORALE.

Tous mes travaux de recherche ont pour objectif d'améliorer l'autonomie des robots mobiles, qu'ils soient aériens, terrestres ou sous-marins. Cet objectif a d'abord été traité du point de vue du contrôle et s'est étendu depuis peu à la perception.

Ce manuscrit fait donc la synthèse de mes travaux de recherche et présente quelques perspectives que je souhaite conduire dans les années à venir. Il est structuré en deux parties :

- la première reprend les grandes lignes de mon parcours et détaille mes différentes activités scientifiques, administratives et pédagogiques. Elle expose de manière succincte les projets auxquels j'ai participé, les étudiants que j'ai encadrés ainsi que les publications associées ;
- la deuxième présente mes activités de recherche en Robotique, sous la forme des champs applicatifs étudiés. Il est composé de trois chapitres allant du contrôle référencé vision à l'observation d'état. Ce choix volontaire de structuration permet de mettre en avant la pluridisciplinarité de mes activités de recherche, dont le fil conducteur est d'améliorer l'autonomie des robots mobiles. Les développements théoriques ayant vocation à être appliqués, toutes les contributions présentées dans ce document ont été validées expérimentalement, que ce soit sur des plateformes aériennes ou sous-marines.

Ainsi, le **chapitre 2** présente le cadre général de la commande prédictive visuelle pour des tâches d'asservissement visuel 2D (AV2D). L'approche présentée est générique et ne dépend ni du capteur visuel utilisé, ni du système robotique considéré. Une discussion autour des limitations de l'approche est ensuite proposée, suivie de plusieurs pistes possibles pour les lever. Deux axes de travail en cours sont ensuite développés et quelques résultats préliminaires sont présentés.

Le **chapitre 3** est consacré à l'observation d'état pour la robotique aérienne. La position, l'orientation et la vitesse d'un corps rigide commandable évoluant dans l'espace 3D (qu'il soit aérien ou sous-marin) sont des connaissances indispensables qu'il est nécessaire de mesurer ou d'estimer pour implémenter de manière efficace une stratégie de contrôle. Ce chapitre

---

1. <https://team.inria.fr/acentaury>

présente quelques contributions pour des observateurs d'attitude basés sur une mesure de vitesse. Plusieurs observateurs non-linéaires ayant des résultats de stabilité quasi-globale sont présentés. Ils ont tous été validés expérimentalement sur un drone aérien, notamment lors de vols comportant des manœuvres agressives.

Le **chapitre 4** est dédié à la commande référencée vision des robots sous-marins. La robotique sous-marine est un terrain de jeu idéal pour ce genre de défis, du fait d'une dynamique fortement non linéaire et des effets hydrodynamiques complexes. Ce chapitre présente donc une synthèse des travaux réalisés en asservissement visuel de drones sous-marins. Deux applications sont présentées. La première est consacrée au suivi de structures linéaires tandis que la deuxième s'intéresse à la stabilisation en une image fixe. Tous ces travaux reposent sur l'exploitation de la dynamique complète du système avec des résultats de stabilité asymptotique quasi-globale. Toutes les solutions proposées ont été validées expérimentalement, que ce soit en piscine ou en environnement naturel.

Enfin, le **chapitre 5** présentera les perspectives de recherche que je souhaite développer dans les années à venir. Parmi celles-ci, l'accent sera mis sur :

1. l'implémentation temps réel des stratégies de commande prédictive pour les systèmes rapides. La commande prédictive (CP) est incontestablement l'une des stratégies de commande avancée les plus performantes. Néanmoins, son implémentation est source de difficultés car elle nécessite des moyens de calculs importants pour résoudre le problème d'optimisation en temps réel et à chaque période d'échantillonnage. C'est d'autant plus vrai lorsqu'on souhaite l'utiliser pour piloter des systèmes robotiques avec des dynamiques rapides, voire très rapides et à l'aide de contrôleurs embarqués. Nous souhaitons donc développer deux pistes de travail dans cet axe. La première s'intéresse aux techniques appelés *MPPI* (*Model Predictive Path Integral*) tandis que la deuxième concerne la paramétrisation de la commande afin de découpler les horizons de commande et de prédiction.
2. le couplage entre les méthodes basées Apprentissage Profond (AP, *data-driven*) et les méthodes Basées Modèle (MB, *model-driven*). Les méthodes AP sont de plus en plus présentes dans le monde de la robotique. Ces dernières ont montré leurs intérêts que ce soit dans le domaine de la perception ou celui du contrôle. Cependant, elles ne profitent pas des outils d'analyse et des résultats théoriques obtenus depuis plusieurs années par les méthodes MB. Nous souhaitons donc nous intéresser à la manière dont on peut coupler ces deux approches afin d'en tirer tous les avantages. Cette piste de travail sera abordée sous les aspects du contrôle et de la perception.
3. la dernière perspective, à plus long terme, concerne l'utilisation de l'informatique quantique pour la robotique. Il est clair que cette nouvelle technologie va révolutionner, dans les années à venir, de nombreux domaines technologiques et la robotique devrait sans aucun doute en bénéficier. Il semble donc dès à présent pertinent d'identifier des directions de recherche prometteuses telles que le quantum pour la perception, le quantum pour l'optimisation, le quantum pour l'intelligence artificielle, etc.



## 1.2 Parcours Universitaire et Professionnel

### 1.2.1 Parcours Universitaire

2008 Doctorat de l'Université d'Orléans, *mention très honorable*

**Titre :** *Commande Prédictive Visuelle : Contributions à l'Asservissement Visuel 2D sous Contraintes*

**Directeurs de thèse :** Mme Estelle Courtial, Pr Youssoufi Touré

**Examineurs :** Dr François Chaumette (Rapporteur)  
Pr Didier Dumur (Rapporteur)  
Pr Frédéric Rotella (Président du jury)  
Pr Emmanuel Trélat

**Résumé :** L'asservissement visuel (AV) regroupe un ensemble de stratégies permettant de commander des systèmes robotiques à l'aide d'un ou plusieurs capteurs de vision. Parmi les approches existantes, on peut citer entre autres, les asservissements visuels 3D, hybride et 2D. Si ce dernier est connu pour sa robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et aux bruits de mesure, il est sujet à certaines difficultés comme la prise en compte de contraintes dans les espaces 2D et 3D, ainsi que la non-admissibilité des trajectoires par le système robotique. Dans mon travail de thèse, nous avons proposé de formuler le problème d'asservissement visuel 2D en un problème d'optimisation dans le plan image à la manière d'une commande prédictive. Les contraintes de visibilité (2D) et d'admissibilité des trajectoires (3D) peuvent alors, aisément et de manière explicite, s'ajouter à ce problème d'optimisation. Des résultats de simulation sur un bras manipulateur à trois degrés de liberté ont été présentés et mettent en évidence le potentiel de la stratégie développée, notamment en présence de contraintes de visibilité et lors de configurations difficiles. La navigation d'un robot mobile non holonome par AV2D a ensuite été étudiée. Dans un premier temps, la poursuite de trajectoire dans le plan image avec une caméra perspective déportée a été analysée. Puis, la stabilisation en une image fixe par caméra omnidirectionnelle embarquée a été abordée. Les diverses expérimentations illustrent les performances, la flexibilité et l'adaptabilité de la Commande Prédictive Visuelle aux différentes configurations et problématiques considérées.

2005 Master GEII double cursus (rang 1/5, mention bien, parcours recherche et professionnel avec bourse au mérite), Amiens, Université Picardie Jules Verne (UPJV)

2004 Maîtrise GEII (rang 2/38, mention bien) et titre d'ingénieur Maître, Amiens, UPJV

2003 Licence GEII (rang 1/79), Amiens, UPJV

2002 DEUG GEII (rang 3/23), Amiens, UPJV

2001 DUT GEII, Saint-Etienne, Université Jean Monnet

### 1.2.2 Parcours Professionnel

2009-... Maître de Conférences (61<sup>ième</sup> section) de l'Université Côte d'Azur, I3S UMR 7271, équipe Signal, Images, Systèmes (SIS)  
Enseignement à l'IUT de Nice, Département GEII

2008-2009 ATER à l'École Polytechnique de l'Universitaire d'Orléans (EPU)

2005-2008 Bourse ministérielle et Moniteur de l'Université d'Orléans (enseignement à l'EPU)  
Suivi de formations du Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (CIES) :  
Prise de parole en public à but pédagogique ; Structures des Universités ;  
Déontologie de l'enseignement supérieur ; Pratique de la pédagogie interactive ;  
Atelier projet de diffusion de la culture scientifique ; Psychologie de l'évaluation ;  
Animation de réunions et de groupes de travail ;

## 1.3 Activités d'enseignement

J'ai commencé à enseigner durant ma première année de thèse à l'Université d'Orléans en 2005. Jusqu'en 2008, j'ai effectué un monitorat dont les enseignements étaient adossés à l'Ecole Polytechnique Universitaire (EPU) d'Orléans. Ce monitorat m'a permis d'effectuer un service de 64h ETD par an jusqu'en 2008. De 2008 à 2009, j'ai effectué une année d'ATER avec un service complet (192h ETD) dans le même établissement. J'ai ensuite été recruté en octobre 2009 au Département GEII de l'IUT de Nice Cote d'Azur. Les enseignements que je dispense au sein du Département sont variés et couvrent tous les domaines du GEII. De 2013 à 2017, j'ai également assuré des enseignements à l'EPU de Sophia-Antipolis. Dans la suite de cette section sont présentées succinctement mes principales activités.

### 1.3.1 Enseignement à l'IUT GEII

#### 1.3.1.1 Informatique (60H/étudiant)

Après avoir enseigné les TDs d'informatique depuis 2009, je suis devenu le responsable de la matière en 2012 et je dirige une équipe pédagogique de 5 enseignants titulaires (PR, MCF et PRAG).

J'ai créé un nouveau support de cours comprenant de nouveaux TDs et TPs *plus adaptés* au public étudiant dont les mécanismes d'apprentissage ne cessent d'évoluer. Cet enseignement complet (170 pages de cours, 34 pages de TDs et 39 pages de TPs) permet l'apprentissage de base du langage C aux étudiants de première année du DUT GEII (algorithmes, type de données, structures de contrôle, tableaux et structures, fonctions, fichiers). J'ai écrit de nombreux exercices traitant des cas simples (exercices pédagogiques) jusqu'à des problèmes réels plus complexes (étude d'un électrocardiogramme : détection des tensions minimales et maximales, détermination de la fréquence cardiaque, puis initiation aux traitements des images : effet miroir, inversion, binarisation, détection de contours, compression sans perte de données et enfin initiation aux machines à états sur carte MBED/Arduino).

#### 1.3.1.2 Automatique (45H/étudiant)

J'ai pris en 2015 la responsabilité du cours d'automatique en deuxième année au Département GEII. L'objectif de ce module est de présenter et d'approfondir les notions suivantes : modélisation, identification, fonction de transfert, correction, stabilité, précision et rapidité. Je partage cet enseignement avec un collègue MCF du Département.

De la même manière qu'en informatique, j'ai créé un nouveaux supports de cours et de TDs (193 pages de cours et 42 pages de TDs). Concernant les TPs, de nouveaux sujets sont en cours de rédaction à la suite à l'acquisition, cette année, de nouvelles maquettes pédagogiques (bille sur un rail, pendule inversé, régulation de niveau dans une cuve).

### 1.3.1.3 Autres enseignements

En plus des matières évoquées précédemment que je coordonne, je dispense également (ou j'ai dispensé au cours de ces 5 dernières années) pendant le cycle du DUT GEII des enseignements divers tels que les TDs de mathématiques (fonctions, intégrales, équations différentielles, etc), les TDs et TPs d'électronique (traitement et transmission de l'information), les TDs et TDs d'automatismes (automatique séquentielle, GRAFCET, électronique numérique) et également les TPs d'études et réalisations (projets encadrés).

## 1.3.2 Enseignement à l'EPU

### 1.3.2.1 Asservissements et Automatismes (32H/étudiant)

De 2013 à 2017, j'étais le responsable du module Asservissements et Automatismes à l'EPU dans la filière *Bâtiments Durables et Intelligents*. Les objectifs de ce cours sont proches de ceux du module d'automatique enseigné à l'IUT. Toutefois, j'ai adapté le contenu théorique et la façon de l'enseigner du fait du public différent. J'ai assuré l'ensemble des cours, les TDs et les TPs de la totalité de la promotion (24 étudiants de 2013 à 2015 puis 48 étudiants de 2016 à 2017).

## 1.3.3 Vulgarisation scientifique

Parallèlement à mes activités d'enseignement, je suis très actif dans les activités de vulgarisation scientifique. Ainsi je participe très régulièrement au nom du laboratoire aux fêtes de la science, j'ai la responsabilité d'élèves de quatrième pour des stages de découverte d'entreprise chaque année, je participe à des encadrements de TIPE, je prends part à la journée d'accueil d'élèves de CE2 organisée au sein du Département GEII à l'IUT pour les sensibiliser à la science en proposant des activités ludiques, etc.

## 1.4 Activités de recherche

Mes principales thématiques de recherche sont brièvement énoncées ici. Elles sont reprises en détail dans les prochains chapitre du manuscrit.

### 1.4.1 Asservissement visuel prédictif

Les travaux cités ici ont été menés après ma thèse. Ils avaient pour but de formaliser et de généraliser l'approche de commande prédictive pour des tâches d'asservissement visuel. Ils ont donné lieu à une revue de référence et un chapitre de livre : **R1**, **L1**. Les travaux en cours, développés dans le chapitre 2, visent à étendre ces résultats pour les asservissements visuel rapides. Une collaboration avec Franco Fusco<sup>1</sup>, étudiant en thèse au LS2N à Nantes est en cours sur le sujet.

### 1.4.2 Observation d'état pour la robotique aérienne

Ces recherches sont le fruit d'une collaboration avec Robert Mahony de *l'Australian National University*. Elles ont porté sur l'estimation d'attitude pour la robotique aérienne. Les

---

1. encadré par Philippe Martinet et Olivier Kermorgant

observateurs non linéaires développés sont de type *Velocity-Aided*. Ils possèdent des propriétés de convergence quasi-globale et ont tous été validés expérimentalement. Les publications associées sont : [R3](#), [CI15](#), [CI17](#), [CI18](#), [CI21](#), [CI22](#) ;

### 1.4.3 Commande des robots mobiles sous-marin

Les recherches portées dans cette thématique concernent la commande référencée vision des robots sous-marins totalement actionnés pour des tâches de suivi de structures linéaires et des tâches de stabilisation en une image fixe. Deux thèses ont été encadrées sur ces thématiques, avec de nombreux résultats : [R2](#), [R4](#), [R5](#), [CI14](#), [CI16](#), [CI20](#) ;

### 1.4.4 Couplage des méthodes basées apprentissage profond (AP, *data-driven*) et des méthodes basées modèle (MB, *model-driven*) pour la robotique

Le couplage entre les méthodes basées sur l'apprentissage profond et les méthodes basées sur les modèles est un axe de travail actuellement développé. Cela concerne aussi bien le côté perception que le côté commande. Pour la perception, deux thèses ont démarré récemment avec pour objectif d'introduire des paramètres physiques (*model-driven*) dans les réseaux neuronaux convolutifs (CNN). Côté contrôle, une thèse est en cours sur la façon dont des modèles dynamiques obtenus par des méthodes d'identification basées sur l'apprentissage profond (*data-driven*) peuvent être utilisés par des stratégies de commande avancées. Publications soumises : [CI23](#), [CI24](#), [CI25](#).

### 1.4.5 Encadrement Doctoral

#### 1.4.5.1 Tableau récapitulatif des encadrements (passés et en cours)

Nature	% d'encadrement	Dates
Charles-Olivier <b>ARITZZU</b>	50%	PhD en cours <sup>2</sup> , débuté en janvier 2020
Zonwgei <b>WU</b>	50%	PhD en cours, débuté en octobre 2019
Ihab <b>MOHAMED</b>	60%	PhD en cours, débuté en novembre 2018
Lam Hung <b>NGUYEN</b>	30%	PhD soutenu en novembre 2019
Szymon <b>KRUPÍNSKI</b>	40%	PhD soutenu en juillet 2014
Steve <b>MALALEL</b>	50%	Master en cours, débuté en mars 2020
Yanis <b>MARCHAND</b>	50%	Master soutenu en septembre 2019
Haozhou <b>ZHANG</b>	50%	Master soutenu en septembre 2019
Mohit <b>AHUJA</b>	50%	Master soutenu en août 2018
Clément <b>PERROUSSET</b>	100%	Master soutenu en août 2015

#### 1.4.5.2 Thèses en cours

- 01/2020 - ... : Charles-Olivier **ARTIZZU** (Directeur de thèse à 50% avec Cédric Demonceaux 50% co-directeur -ERL VIBOT-) : *Optical Flow Estimation Using Deep Learning in Spherical Images* (Financement ANR CLARA) ;  
Publication soumise sur la période : [CI24](#) ;  
Charles-Olivier s'intéresse au calcul du flux optique dans les images sphériques par des

---

2. En tant que Directeur de thèse

méthodes basées sur l'apprentissage profond. L'objectif et l'originalité de son travail est de prendre en compte des informations basées modèles (les particularités physiques du capteur de vision sphérique) dans l'architecture des réseaux.

- 11/2019 - ... : **Zongwei WU** (Encadrement à 50% avec Cédric Demonceaux 25% et Christophe Slotz 25% -ERL VIBOT-) : *New convolution for spherical images using depth information* (Financement région Bourgogne-Franche-Comté);  
Publication soumise sur la période : **CI25**;

Les filtres de convolution utilisés aujourd'hui prennent en compte un voisinage régulier de pixels, sur l'ensemble de l'image. Ce voisinage pixélique correspond donc à un voisinage physique non régulier. L'objectif du travail de Zongwei est d'adapter les filtres de convolution en tenant compte de l'information de profondeur, disponible maintenant grâce aux capteurs RGB-D, pour effectuer les convolutions sur un voisinage physique régulier.

- 11/2018 - ... : **Ihab MOHAMED** (Encadrement à 60% avec Philippe Martinet 40% - INRIA-) : *Coupling Deep Learning and Advanced Control in UAV navigation* (Financement Ecole Doctorale STIC);  
Publication soumise sur la période : **CI23**;

Ihab s'intéresse au couplage entre les méthodes de commandes avancées basées modèles (*Model Predictive Control -MPC-*, *Model Predictive Path Integral -MPPI-*) et les méthodes de contrôle basées sur l'apprentissage profond (*End to End -E2E-*). Le cadre d'étude concerne la navigation autonome d'un drone aérien dans des environnements denses et non structurés.

### 1.4.5.3 Thèses soutenues

- 2015 - 2019 : **Lam Hung NGUYEN** (Encadrement à 30% en collaboration avec Tarek Hamel 30% et Minh Duc Hua 40%) : *Nonlinear control of Autonomous Underwater Vehicles* (Financement Ambassade Vietnamiennne);  
Actuellement en post-doctorat à l'I3S, UMR 7271.  
Publications sur la période : **R5, CI20**;

**Soutenue le 28 novembre 2019** devant Carlos J.F. Silvestre (rapporteur), Pascal Morin (rapporteur), Vincent Creuze, Tarek Hamel, Minh Duc Hua et Guillaume Allibert.

Dans son travail de thèse, Lam s'est intéressé à la navigation de véhicules sous-marins complètement actionnés dans des environnements encombrés et à proximité d'obstacles sans positionnement précis par rapport à l'environnement. L'originalité de ses travaux réside dans le fait que le problème de contrôle est réalisé sans mesure des vitesses linéaires. Ceci se justifie par le fait que les capteurs de vitesses linéaires pour les sous-marins (Doppler) sont généralement coûteux et fournissent des informations de très mauvaise qualité lorsque qu'ils sont utilisés à proximité des structures et à basse vitesse. Cette absence de mesure constitue alors un challenge d'un point de vue commande car les robots sous-marins possèdent une dynamique fortement non linéaire et sont soumis à des effets hydrodynamiques complexes et imprécis.

Deux nouveaux schémas de contrôle par asservissement visuel prenant en compte la dynamique complète du sous-marin ont été proposés et validés via des simulations et des expérimentations en environnement naturel (lac St Cassien dans le Var). Les propriétés de stabilité et de robustesse ont été théoriquement démontrées grâce à des approches de type Lyapunov.

- 2010 - 2014 : **Szymon KRUPÍNSKI** (Encadrement à 40% en collaboration avec Tarek Hamel 30% et Minh Duc Hua 30%) : *Offshore structure following by means of sensor servoing and sensor fusion* (Financement CIFRE).

Actuellement docteur ingénieur chez Cybernetix.

Publications sur la période : **R2, R4, CI11, CI14, CI16** ;

**Soutenue le 7 juillet 2014** devant Luc Jaulin (rapporteur), Philippe Soueres (rapporteur), Vincent Creuze, Tarek Hamel, Minh Duc Hua, Alain Fidani et Guillaume Allibert.

Dans son travail de thèse, Szymon s'est intéressé à la commande d'un robot sous-marin autonome complètement actionné pour la surveillance d'infrastructures en grande profondeur. Deux approches de commande référencée capteurs (vision avec centrale inertielle et capteur de vitesse de type Doppler) ont été proposées :

1. la première pour des tâches de suivi de structures linéaires (pipelines, câbles, etc). Les informations visuelles considérées sont des droites modélisées en utilisant la représentation de Plücker ;
2. la deuxième pour des tâches de stabilisation (tête de puits par exemple). La matrice homographie, qui encode la transformation entre la pose courante et la pose désirée, est utilisée comme information visuelle.

L'architecture de contrôle développée se base sur la structure en cascade de la dynamique, incluant deux niveaux de commande imbriqués : une boucle externe destinée à calculer la vitesse désirée du véhicule à partir des informations visuelles et une boucle interne visant à asservir la vitesse du véhicule vers la valeur de consigne. L'originalité de ces travaux réside dans l'exploitation de la dynamique complète du système, contrairement aux commandes proposées jusqu'à présent qui étaient de type cinématique et qui étaient exploitées comme des consignes en vitesse. Des perturbations constantes, modélisant des courants marins et/ou des erreurs sur les paramètres du modèle, sont compensées grâce à des intégrateurs bornés. Les propriétés de stabilité et de robustesse sont théoriquement démontrées grâce à des approches de type Lyapunov. Les deux tâches, stabilisation et suivi de structures linéaires, ont été validées expérimentalement en piscine.

## 1.4.6 Encadrement de Masters

### 1.4.6.1 Master en cours

- 03/2020 : **Steve MALALEL** (Encadrement à 50% avec Marie Pelleau -I3S/MDSC-) : *Interval analysis : application for localization of underwater robotics* ;

L'objectif du stage de Steve est d'étudier les méthodes de SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) en utilisant le concept de la programmation par contraintes. Cette dernière a récemment été utilisée et a montré des performances intéressantes<sup>3</sup>. Nous souhaitons donc étendre ces travaux en utilisant les domaines abstraits qui sont plus expressifs que les intervalles.

### 1.4.6.2 Masters soutenus

- 2019 : **Yanis MARCHAND** (Encadrement à 50% avec Cédric Demonceaux) : *New convolution using depth information for perspective images* ;

Actuellement en thèse à l'IGN.

Dans son travail de Master, Yanis s'est intéressé à la façon dont les informations de profondeur, mesurées par les capteurs RGB-D, pouvaient être utilisées afin d'améliorer le calcul

---

3. S. Rohou, *Localisation fiable de robots : une approche de programmation par contraintes sur des systèmes dynamiques*, Thèse de Doctorat, 2017

des convolutions pour des images perspectives.

Ce travail exploratoire a permis d'obtenir les premiers résultats théoriques nécessaires qui servent de base pour le travail de thèse de Zongwei.

- 2019 : **Haozhou ZHANG** (Encadrement à 50% avec Cédric Demonceaux) : *Deep Learning Methods for optical flow estimation in spherical images* ;  
Actuellement en CDI en Chine.

Haozhou a travaillé sur l'adaptation des méthodes d'estimation de flux optique, basées sur des méthodes d'apprentissage profond et développées initialement pour les images perspectives, aux images sphériques. En effet, bien que les solutions proposées jusqu'à présent pour les images perspectives puissent être utilisées directement pour des images sphériques, les fortes distorsions présentes dans ces dernières réduisent drastiquement les performances obtenues.

Dans son travail de Master, Haozhou a proposé une solution originale afin de prendre en compte les distorsions présentes dans les images sphériques dans le calcul des convolutions. Le principal avantage de son approche est de pouvoir entraîner les réseaux sur des images perspectives à partir des bases de données existantes et de les utiliser sur des images sphériques.

- 2018 : **Mohit AHUJA** (Encadrement à 50% avec Cédric Demonceaux) : *Vision based control using deep learning for UAV* ;

Actuellement en thèse à l'Université d'Oslo, Norvège.

Dans son travail de Master, Mohit s'est intéressé à la modélisation de systèmes dynamiques en utilisant des réseaux de neurones. L'objectif final était de modéliser et de prédire les trajectoires d'une boule de billard après un impact. L'évolution dynamique du système (position et vitesse des boules) était obtenue à partir des informations visuelles issues d'une caméra observant la scène. La finalité était de pouvoir appliquer les méthodes d'asservissement visuel prédictif pour contrôler les mouvements des boules sur la table de billard.

- 2015 : **Clément PERROUSSET** (Encadrement à 100%) : *State Estimation for Aerial Robotics* ;

Actuellement ingénieur R&D chez Sweepin.

Dans son travail de Master, Clément s'est intéressé aux algorithmes d'estimation d'état pour la robotique aérienne. Il a établi un état de l'art exhaustif et a implémenté, sur un drone aérien du laboratoire, le filtre de Kalman et le filtre complémentaire sur l'auto-pilote *open-source* PX4.

#### 1.4.7 Encadrements divers

- 2020 : **Léo CHEVRIER**, encadrement de son stage de DUT : *Construction et contrôle d'un pendule inverse*
- 2018 : **Edwin CHASIGUANO**, encadrement de son stage de DUT : *Génération d'environnement virtuel 3D sous Unreal Engine 4 pour la robotique aérienne*
- 2016 : **Benoit MODERIANO**, encadrement de son stage de DUT : *Traitement et affichage d'informations sous python à partir d'une base de données*
- 2015 : **Carolina PEDROSO**, encadrement de son stage de DUT : *Mesure de flux optique avec la bibliothèque OPENCV en C++*
- 2015 : **Jules Corre**, encadrement de son TIPE : *Génération de trajectoire pour les robots mobiles*

## 1.4.8 Encadrement à venir dont le financement est déjà obtenu

Dans le cadre de l'ANR CLARA que je coordonne, je participerai :

- à un encadrement de post-doctorat de 2 ans avec le LITIS qui débutera fin 2020. La phase de recrutement commencera à la rentrée 2020 ;
- à l'encadrement à plein temps d'un ingénieur de recherche pendant un an à l'I3S.

Par ailleurs, des financements de doctorant et post-doctorants ont été récemment obtenus dans le cadre d'appels à projets locaux (laboratoire I3S, UCA Idex, EUR DS4H) :

- un financement (I3S) de post-doctorat de 12 mois pour étudier la paramétrage de la commande pour les stratégies prédictives. **Franco FUSCO**, actuellement doctorant au LS2N, commencera en décembre 2020 ;
- un financement (EUR DS4H) de doctorat et un financement (EUR DS4H) de 18 mois de post-doctorat dans le cadre du projet IBRID que je coordonne. **Sardor ISRAILOV** commencera sa thèse en septembre 2020 et la phase de recrutement du post-doctorant commencera à la rentrée 2020.

## 1.4.9 Production scientifique

La totalité de ma production scientifique est publiée soit dans des revues internationales à comité de lecture d'excellents niveaux<sup>4</sup>, soit dans les conférences internationales à comité de lecture très sélectives<sup>4</sup>.

Sur les 5 dernières années :

- 100% de mes publications dans des revues internationales à comité de lecture (référéncées dans le JCR) sont en premier nom ou juste derrière un ou deux étudiants que j'encadre (ou que j'ai participé à encadrer sur un travail précis) ;
- 50% de mes publications dans des conférences internationales avec comité de lecture sont en premier nom ou en deuxième après un étudiant que j'encadre (ou que j'ai participé à encadrer sur un travail précis) ;

Dans la liste ci-dessous, toutes mes publications sont listées. Les noms soulignés sont ceux d'étudiants que j'ai encadrés officiellement pendant leur thèse (c'est le cas de S. Krupinski et de L.H. Nguyen) ou d'étudiants d'autres chercheurs avec qui j'ai travaillé dans un cadre précis (J.M. Kai, directeurs de thèse : Tarek Hamel (I3S) et Claude Samson (I3S) et M. Bangura, F. Kuipers, X. Hou et D. Abeywardena encadrés par Robert Mahony (Australian National University)).

### 1.4.9.1 Articles dans des revues internationales à Comité de lecture référencées dans le JCR

**[R5 Conditionally accepted as full paper]** L.H. Nguyen, M.D. Hua, G. Allibert, T. Hamel. *A homography-based dynamic control approach applied to station keeping of autonomous underwater vehicles without linear velocity measurements.* Submitted in January 2019, Conditionnaly accepted in november 2019, in third round of review, in IEEE Transactions on Control Systems Technology  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02069350>

---

4. Publications en Robotique, Version 2015, Document du GDR Robotique pour le CNRS

[R4] G. Allibert, M.D. Hua, S. Krupínski, T. Hamel. *Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles*. In Control Engineering Practice, Regular Paper, 82 :151-160, January 2019  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01920255>

[R3] M. Bangura, X. Hou, G. Allibert, R. Mahony, N. Michael. *Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions using Inertial Measurements*, IEEE Trans. on Robotics, 34(6) :1490-1501, Regular Paper, December 2018  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01920269>

[R2] S. Krupínski, G. Allibert, M.D. Hua, T. Hamel, *An inertial-aided homography-based visual servoing control approach for (almost) fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles*, IEEE Transactions on Robotics, 33(5) :1041-1060, Regular Paper, October 2017  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01544726>

[R1] G. Allibert, E. Courtial, F. Chaumette, *Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing*, IEEE Transactions on Robotics, 26(5) :933-939, Short Paper, October 2010  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00530203>

#### 1.4.9.2 Conférences internationales avec actes et Comité de lecture

[CI25, Submitted] Z Wu, G. Allibert, C. Stolz, C. Démonceaux, *Depth-Adapted CNN for RGB-D cameras*, submitted to Asian Conference on Computer Vision (ACCV20), Kyoto, Japon, December 2020

[CI24, Submitted] C.O. Artizzu, H. Zhang, G. Allibert, C. Démonceaux, *OmniFlowNet : a Neural Network Adaptation for Optical Flow Estimation in Spherical Images*, submitted to IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR20), Milano, Italia, January 2021

[CI23, Submitted] I.S. Mohamed, G. Allibert, P. Martinet, *Model Path Predictive Integral for Quadrotors in cluttered environments*, submitted to International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV20), Chine, December 2020

[CI22] M.D. Hua, G. Allibert, *Riccati Observer Design for Pose, Linear Velocity and Gravity Direction Estimation using Landmark Position and IMU Measurements*, IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCAT18), Copenhagen, Denmark, August 2018  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01799278>

[CI21] M.D. Hua, T. Hamel, R. Mahony, G. Allibert, *Explicit Complementary Observer Design on Special Linear Group  $SL_3$  for Homography Estimation using Conic Correspondences*, IEEE Conference on Decision and Control (CDC17), Melbourne, Australia, December 2017  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01628177>

[CI20] L.H. Nguyen, M.D. Hua, G. Allibert, T. Hamel, *Inertial-aided Homography-based Visual Servo Control of Autonomous Underwater Vehicles without Linear Velocity Measurements*, IEEE International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC17), Sinaia, Romania, October 2017  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01627666>

- [CI19] J.M. Kai, **G. Allibert**, M.D. Hua, T. Hamel, *Nonlinear Feedback Control of Quadrotors Exploiting First-Order Drag Effects*, IFAC World Congress (IFAC WC17), Toulouse, France, July 2017  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01544740>
- [CI18] **G. Allibert**, R. Mahony, M. Bangura, *Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling*, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA16), Stockholm, Sweden, May 2016  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01308027>
- [CI17] M. Bangura, F. Kuipers, **G. Allibert**, R. Mahony, *Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors*, 16th Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA15), ANU Canberra, December 2015  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01307968>
- [CI16] S. Krupinski, R. Desouche, N. Palomeras, **G. Allibert**, M.D. Hua, *Pool testing of AUV visual servoing for autonomous inspection*, 4th IFAC Workshop on Navigation Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV15), Girona, Spain, April 2015  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01230498>
- [CI15] **G. Allibert**, D. Abeywardena, M. Bangura, R. Mahony, *Estimating Body-Fixed Frame Velocity and Attitude from Inertial Measurements for a Quadrotor Vehicle*, IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC14), Antibes, France, October 2014  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01075041>
- [CI14] M.D. Hua, **G. Allibert**, S. Krupinski, T. Hamel, *Homography-based Visual Servoing for Autonomous Underwater Vehicles*, IFAC World Congress (IFAC WC14), Cape Town, South Africa, August 2014  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01075038>
- [CI13] **G. Allibert**, E. Courtial. *Switching controller for efficient IBVS*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS12), Vilamoura, Portugal, October 2012  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00751520>
- [CI12] **G. Allibert**, E. Courtial. *Contrôleur à commutation pour l'asservissement visuel 2D*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA12), Grenoble, France, July 2012  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716771>
- [CI11] S. Krupinsky, **G. Allibert**, M.D. Hua, T. Hamel. *Pipeline tracking for fully-actuated autonomous underwater vehicle using visual servo control*. In American Control Conference (ACC12), Montreal, Canada, June 2012  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716751>
- [CI10] E. Courtial, M. Fruchard, **G. Allibert**. *Predictive Control of Chained Systems : a Necessary Condition on the Control Horizon*. In International Conference on Robotics and Automation (ICRA12), Saint Paul, United States, May 2012  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716756>
- [CI9] M. Fruchard, **G. Allibert**, E. Courtial. *Choice of the control horizon in an NMPC strategy for the full-state control of nonholonomic systems*. In American Control Conference (ACC12), Montreal, Canada, 2012  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716744>

[CI8] D. Brulin, E. Courtial, **G. Allibert**. *Position Estimation and Fall Detection using Visual Receding Horizon Estimation*. In 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference (CDC09 and CCC09), Shanghai, China, December 2009  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994105>

[CI7] **G. Allibert**, E. Courtial. *What can Prediction Bring to Image-Based Visual Servoing?* IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS09), Saint Louis, USA, October 2009  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994125>

[CI6] D. Brulin, E. Courtial, **G. Allibert**. *Visual Receding Horizon Estimation for human presence detection*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA09), Kobe, Japan, May 2009  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994114>

[CI5] **G. Allibert**, E. Courtial, Y. Touré. *Real-time visual predictive controller for image-based trajectory tracking of a mobile robot*. 17th IFAC World Congress (IFAC WC08), Seoul, South Korea, July 2008  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994078>

[CI4] **G. Allibert**, E. Courtial, Y. Touré. *Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA08), Pasadena, United States, May 2008  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994143>

[CI3] **G. Allibert**, E. Courtial, Y. Touré. *A Flat Model Predictive Controller For Trajectory Tracking In Image Based Visual Servoing*. IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS07), pages 993–998, Pretoria, South Africa, August 2007  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01994137>

[CI2] **G. Allibert**, E. Courtial, Y. Touré, *Visual predictive control*, IFAC Workshop on Nonlinear Predictive Control for Fast Systems (IFAC NMPC06), Grenoble, France, November 2006.

[CI1] **G. Allibert**, E. Courtial, Y. Touré, *La commande prédictive visuelle*, IEEE Conférence Internationale Francophone d’Automatique (CIFA06), Bordeaux, France, Juin 2006

### 1.4.9.3 Chapitre d’ouvrage

[L1] **G. Allibert**, E. Courtial, F. Chaumette. *Visual servoing via Nonlinear Predictive control*. In Chesi, G., Hashimoto, and K., editors, *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods*, pages 375–394. LNCIS 401, Springer-Verlag, 2010.  
<https://hal.inria.fr/inria-00548935>

## 1.5 Activités scientifiques et administratives

### 1.5.1 Invitation dans des universités étrangères

#### 1.5.1.1 University of Kuala Lumpur - UniKL (16/04/2018 au 27/04/2018)

J’ai été invité pendant 15 jours dans le cadre d’une collaboration recherche au Malaysian French Institute (MFI). Durant ce séjour, j’ai dispensé un séminaire autour de mes

thématiques scientifiques et plusieurs tutoriels autour de la robotique (les tutoriaux étaient composés d'une matinée théorique puis d'une après-midi de travaux pratiques).

- **Séminaire** : Modeling and Control of Aerial and Underwater Vehicles ;
- **Tutorial 1** : Robot Operating System -ROS- (introduction, compiling and package management system, publication/subscription, record and playback and the tools rviz, rosbag, rqt) ;
- **Tutorial 2** : OpenCV for robotics (object detection, real time tracking, feature matching), Robotics and Machine Vision toolbox (Peter Corke) ;
- **Tutorial 3** : Visual servoing (introduction to sensor based control, image based and position based control, ViSP) ;
- **Tutorial 4** : Open source autopilot PX4 (architecture overview, flight stack, flight mode, custom application)

### 1.5.1.2 Australian National University - ANU (01/01/2014 au 30/06/2014)

Le professeur Robert Mahony m'a invité durant les six premiers mois de l'année 2014 dans son laboratoire à Canberra à l'Australian National University. Notre collaboration s'est concrétisée sur les observateurs basés vitesse pour la robotique aérienne (Velocity Aided Attitude Estimation). Ce travail m'a donné l'opportunité de travailler et de collaborer avec son équipe et ses étudiants et nous avons obtenu de nombreux résultats qui ont été publiés dans une revue et des conférences internationales : [R3](#), [CI15](#), [CI17](#), [CI18](#).

## 1.5.2 Organisation de congrès nationaux/internationaux

### 1.5.2.1 Train de la robotique 2020

Le train de la robotique est une manifestation de vulgarisation scientifique composée de séries de conférences données dans toute la France par des chercheurs et qui a pour premier objectif de faire la promotion des activités de robotique dans l'hexagone auprès du grand public. Le deuxième objectif visé est de faire la promotion de ICRA 2020 (la plus importante conférence internationale de robotique) et de la Robocup 2020 (coupe du monde de robotique autonome) qui auront lieu toutes les deux en France cette même année. Je fais partie du Comité de pilotage de l'organisation de cette manifestation.

### 1.5.2.2 IROS Workshop on PPNIV 2019, PPNIV 2020

Depuis l'édition 2019 qui s'est tenue à Macau pendant la conférence IROS, je fais partie du Comité de Programme International (*IPC*) du Workshop annuel PPNIV (*Planning, Perception, Navigation for Intelligent Vehicle*). La prochaine édition aura lieu à Las Vegas durant la conférence IROS 2020.

### 1.5.2.3 Co-organisateur de la première école d'hiver Robotics Principia à l'INRIA Sophia Antipolis du 21 au 25 janvier 2019

Vingt huit étudiants de première année de doctorat se sont vus enseigner les fondamentaux de la robotique. Organisée dans le cadre du GdR Robotique du CNRS, c'est la première école de ce type lancée à l'initiative des projets CHORALE et HEPHAISTOS de l'INRIA. Les bases de la robotique ont été enseignées par des sommités nationales et internationales et tous les cours ont été dispensés en langue anglaise. J'ai participé activement à l'organisation de la semaine, au montage financier et à toutes les tâches administratives afférentes.

*Liste des orateurs* : Roland Chapuis (IP, Clermont-Ferrand), François Chaumette (IRISA,

Rennes), Cédric Demonceaux (ERL VIBOT, Le Creusot), Manfred Husty (University of Innsbrück, Austria), Florent Lamiroux (LAAS, Toulouse), Frédéric Précioso (I3S, Sophia-Antipolis), Bruno Siciliano (Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy), Olivier Simonin (INSA/Inria, Lyon), Olivier Stasse (LAAS, Toulouse), Catherine Tessier (ONERA, Toulouse).

#### **1.5.2.4 Co-organisateur du premier Workshop Robotique en région PACA à l'INRIA Sophia Antipolis le 25 et 26 juin 2018.**

Ce workshop s'inscrit dans une initiative globale de structuration de l'activité robotique en région PACA pour en améliorer la visibilité externe, favoriser les collaborations locales entre les industriels / académiques / utilisateurs et éventuellement identifier des domaines et sujets qui sont d'intérêts pour la région. Un des objectifs de ce premier workshop a donc été de dresser un état des lieux de l'activité en robotique sur la région PACA que ce soit du point de vue de l'expertise académique, de l'offre industrielle ou des besoins des utilisateurs finaux.

J'ai participé activement à l'organisation du workshop et au montage financier. J'ai également été chairman de la session *Robotique Aérienne* composé d'une part de 4 exposés scientifiques et d'autre part d'une table ronde.

#### **1.5.2.5 Co-organisateur de la Conférence Internationale Computing in Cardiology a Nice en 2015**

La conférence CINC, sponsorisée par IEEE, a été organisée à Nice en 2015 par Olivier Meste. Elle a regroupé une centaine de chercheurs internationaux. J'ai participé activement à l'organisation locale de cette conférence (gestion des salles de présentation et du parc informatique, encadrement durant les événements locaux, etc.).

### **1.5.3 Membre de Conseil/Comité d'expertise nationale**

#### **1.5.3.1 Membre nommé du Comité d'évaluation scientifique de l'ANR "CES 33 : Robotique et Interaction" depuis 2019 (APPG 2019, APPG 2020)**

Le travail du Comité se déroule en deux phases. La première a lieu en début d'année et consiste à évaluer les pré-propositions. Elle est suivie d'une réunion physique de deux jours à Paris afin d'établir un classement.

La seconde phase consiste à évaluer la proposition complète au travers d'experts extérieurs au Comité tout en assurant une expertise personnelle. Elle est suivie d'une réunion physique de deux jours à Paris afin de présenter la synthèse des évaluations, d'établir un classement final et de rédiger un rapport par projet avant validation par le Bureau.

#### **1.5.3.2 Participation au jury du Prix de Thèse 2019 du GDR Robotique**

Je fais partie, pour cette édition 2020, du jury de sélection du GDR Robotique pour l'élection de la meilleure thèse soutenue en 2019. Le processus de sélection se déroule en deux phases. La première consiste à évaluer les travaux de thèse d'un candidat suivant plusieurs critères. La deuxième étape permet de désigner le ou les lauréats du prix de thèse 2019.

### 1.5.3.3 Expert auprès du ministère pour l'évaluation des dossiers *Crédit Impôt Recherche* de 2012 à 2015

Durant ces trois années, j'ai expertisé 18 dossiers dans les thématiques de la robotique et du contrôle afin de valider ou non les activités ayant un caractère de recherche fondamentale ou appliquée ou à caractère de développement expérimental.

## 1.5.4 Participation à des suivis et des jurys de thèse

### 1.5.4.1 Suivi de thèse

- 2016 - 2019 : Suivi de thèse de **Matheus LARANJEIRA MOREIRA**, Cosmer Lab (Encadrants : Vincent Hugel & Claire Dune)

Le Comité du suivi de thèse était composé de Patrick Rives (DR INRIA), Jean Pierre Merlet (DR INRIA), Vincent Creuze (MCF HDR, LIRMM) et moi même. Nous nous sommes réunis tous les ans avec Matheus, Vincent Hugel et Claire Dune afin de faire le point sur l'avancée de la thèse et les directions futures. Nous avons établi un rapport annuel sur l'état d'avancement avec avis motivé pour la suite de son doctorat.

### 1.5.4.2 Jurys de thèse

J'ai participé à plusieurs jurys de thèse en tant qu'examineur extérieur :

- 26/06/2019 : Examineur de la thèse de Jose Juan Tellez **GUZMAN**, GIPSA-Lab, Grenoble;  
*Présidente* : PR Michelle Rombault ;  
*Rapporteurs* : DR Isabelle Fantoni, PR Cédric Demonceaux ;  
*Directeurs de thèse* : DR Nicolas Marchand, Pedro Castillo, Ernesto Gomez Balderas, Amaury Negre.
- 06/12/2019 : Examineur de la thèse de David **PÉREZ-MORALES**, LS2N, Nantes ;  
*Présidente* : DR Isabelle Fantoni ;  
*Rapporteurs* : DR Florent Lamiroux, DR Roland Lenain ;  
*Directeurs de thèse* : DR Philippe Martinet, Olivier Kermorgant, Salvador Domínguez Quijada.
- 16/12/2019 : Examineur de la thèse de Thibaut **TEZENAS**, GIPSA-Lab, Grenoble ;  
*Président* : PR Cédric Demonceaux ;  
*Rapporteurs* : PR Cédric Demonceaux, DR Isabelle Fantoni ;  
*Directeurs de thèse* : DR Nicolas Marchand, Ernesto Gomez Balderas, Amaury Negre.
- 18/12/2019 : Examineur de la thèse de Kevin **GIRAUD ESCLASSE**, LAAS, Toulouse ;  
*Président* : DR Philippe Souères ;  
*Rapporteurs* : DR Christine Chevallereau, Andrea Cherubini ;  
*Directeur de thèse* : DR Olivier Stasse.

## 1.5.5 Activités de relecture

Je suis sollicité régulièrement et depuis de nombreuses années pour des relectures de journaux et de conférences internationaux (ICRA, IROS, ACC, CDC, IFAC World Congress). Je dresse ici une liste des principaux journaux sur les cinq dernières années :

- IEEE RAL (2015, 2019 × 2, 2020 × 2);
- IEEE TRO (2015 × 2);
- IEEE TAC (2015, 2018);
- AUTOMATICA (2015, 2016 × 2, 2017);
- Trans. MECHATRONICIS (2016 × 2, 2017 × 2, 2018 × 2, 2019 × 2).

J'ai également participé à la relecture de projets nationaux dans le cadre de l'ANR (seconde phase en 2014) et dans le cadre des projets étendards du LabEx NUMEV de l'Université de Montpellier en 2016.

## 1.5.6 Membre élu/nommé de Conseil d'établissement

### 1.5.6.1 Établissement d'enseignement - Département GEII de l'IUT de Nice

— **Membre élu du Conseil de Département de 2011 à 2018.**

Le Conseil de Département est composé de 11 membres enseignants (sur 24) dont 2 membres parmi le personnel administratif et technique. Le Conseil se réunit au moins deux fois par an et a pour objectif de coordonner les activités pédagogiques, administratives et techniques du Département. Il est également en charge de valider les modifications locales des programmes pédagogiques nationaux (PPN).

### 1.5.6.2 Établissement de recherche - Laboratoire I3S UMR7271

— **Membre de droit<sup>5</sup> du Conseil de direction du laboratoire depuis 2017.**

Le Conseil de direction se réunit une fois par mois et a pour objectif de faire des propositions au Conseil de laboratoire pour améliorer la vie du laboratoire en terme de stratégie scientifique, de gestion des ressources (matérielles et financières) et d'organisation du fonctionnement de l'I3S.

— **Membre nommé du Conseil de laboratoire de 2012 à 2016 puis membre de droit<sup>5</sup> depuis 2017.**

Le Conseil de laboratoire se réunit en moyenne quatre fois par an et à pour objectif de valider les décisions prises en Conseil de direction.

### 1.5.6.3 Université Côte d'Azur

— **Membre élu du Comité de sélection de l'Université Côte d'Azur pour la 61<sup>ème</sup> section de 2012 à 2016.**

Le Comité de sélection est composé de Professeurs des Universités, de Directeurs de Recherche, de Maîtres de conférences et de Chargés de Recherche. Seulement quatre MCF ont été élu parmi les 26 de l'Université en 61<sup>ème</sup> section.

Durant mon mandat, j'ai participé activement aux tâches du Comité de sélection. Les nombreuses missions du Comité avaient pour but de programmer les recrutements, de faire émerger les demandes de postes, de préparer les Comités de sélections, de proposer des Comités pour les nominations d'ATER, PRAG et PRCE, d'émettre un avis sur la titularisation des MCF recrutés et sur les recrutements de PAST et professeurs invités. Le Comité de sélection se réunissait au moins deux fois par an.

---

5. À la suite de mon élection au poste de responsable adjoint de l'équipe SIS de l'I3S UMR7271- voir section 1.5.7.1

## 1.5.7 Responsabilité d'équipes de recherche

### 1.5.7.1 Responsable adjoint de l'équipe SIS du laboratoire I3S UMR7271

J'ai été élu, début 2017, responsable adjoint de l'équipe SIS (Signal, Images, Systèmes) du laboratoire. Cette équipe est composée de 57 personnes (18 enseignants chercheurs, 11 chercheurs, 6 ATERs & post docs, 3 professeurs émérites et 19 doctorants). Je participe à l'animation scientifique de l'équipe (organisation de séminaires, mise au vert 1 journée par an) ainsi qu'à la préparation et à la validation du budget de l'équipe (25K€).

### 1.5.7.2 Responsable I3S de l'axe "Robotique Aérienne" du projet TIRREX (EquipEx+)

Depuis janvier 2020, je suis le correspondant du laboratoire pour l'axe *Robotique Aérienne* du projet TIRREX. Ce projet national, porté par le CNRS, a pour ambition de créer des plateformes partagées pour la recherche en robotique. Il permet une mise en réseau des infrastructures, des équipements techniques et des expertises scientifiques.

## 1.5.8 Contrats publics

### 1.5.8.1 Coordinateur du projet IBRID

Je suis coordinateur du projet IBRID<sup>6</sup> (2020-2023) dont le budget global s'élève aux alentours des 200k€, soit une bourse environnée de doctorat et un financement environné pour un post-doctorant de dix-huit mois. Ce projet, dont le partenaire associé est le laboratoire de physique de Nice (INPHYNI, UMR 7010), a pour objectif de contrôler les mouvements d'un poisson par asservissement visuel en utilisant des modèles obtenus par apprentissage. Les modèles seront obtenus dans un premier temps à partir d'images de déformation de la queue du poisson et dans un second temps à partir d'images de flux optique obtenues à partir de la visualisation de l'écoulement autour du poisson par vélocimétrie par images de particules (*PIV*).

### 1.5.8.2 Coordinateur de l'ANR CLARA

Je suis coordinateur du projet ANR CLARA (2018-2022). Il s'agit d'un PRC dont les partenaires sont I3S/INRIA, ERL VIBOT et le LITIS. Le budget global est de 473 K€.

**Résumé du projet :** les drones aériens sont désormais des robots très utilisés pour des tâches de surveillance, de prévention ou d'analyse de lieux. Dans le cas d'un espace libre d'obstacles, la navigation autonome est alors envisageable par un asservissement sur une trajectoire de points de passage GPS comme dans le cas d'un relevé hydrique sur une parcelle agricole par exemple. Pour des situations plus complexes comme le contrôle d'ouvrages d'art, un pilote est alors souvent nécessaire pour assurer la sécurité pendant le vol. Dans des environnements encore plus complexes tels que l'intérieur d'une forêt, les pilotages autonome et humain deviennent tout aussi impossibles l'un que l'autre de par les multiples contraintes rencontrées :

- la perte des signaux GPS est classique dans ce genre d'environnement difficile rendant la navigation par points de passage très compliquée voire impossible ;

---

6. de l'Identification Basée appRentIssage au contRôle basé moDèle

- l’environnement dense et non structuré (branches, broussailles, ...) rend la visualisation, par écran interposé ou lunettes d’immersion, très difficile pour un pilote qui ne pourra pas sécuriser totalement le vol.

Néanmoins, l’usage des drones aériens dans ce genre d’environnement est d’un intérêt primordial et peut se décliner en de multiples applications de prévention et/ou de surveillance telles que la détection préventive d’incendie, la recherche de personnes, la cartographie pour l’entretien forestier, etc. Dans ce projet, nous proposons donc de relever le défi de la navigation autonome d’un drone aérien au sein d’une forêt dans l’objectif d’une cartographie 3D. Pour cela, nous distinguons trois verrous scientifiques à résoudre pour permettre de réussir ce défi :

1. La commande du drone dans un environnement complexe et inconnu ;
2. La perception et la représentation d’un environnement complexe et non structuré pour l’évitement d’obstacles et l’étude de la traversabilité ;
3. La reconstruction 3D et la localisation d’un robot volant dans un environnement où les objets sont peu discriminants/différentiables.

Dans le projet CLARA, pour répondre aux contraintes et aux verrous scientifiques identifiés, nous supposons que le drone ne dispose ni de carte de l’environnement, ni de GPS et qu’il doit reconstruire une cartographie frustre tout en se déplaçant de manière autonome vers une position prédéfinie. Pour cela, le drone sera équipé d’une centrale inertielle et d’un système de vision stéréoscopique composé de deux caméras à 360 degrés.

#### **1.5.8.3 Coordinateur d’un projet UCA Idex, Academie 2**

Ce projet, accepté en 2018 et dont le budget global était de 10K€, m’a permis en tant que coordinateur de renforcer la collaboration au travers de 3 réunions physiques entre les équipes CHORALE de l’INRIA, le laboratoire ERL VIBOT et le laboratoire LITIS dont l’aboutissement a été l’acceptation de l’ANR CLARA. J’ai également pu investir dans l’achat du premier matériel nécessaire au démarrage du projet.

#### **1.5.8.4 Membre du consortium du projet PEPS CNRS CONGRE**

Ce projet PEPS 2013-2015 d’un budget de 16K€ visait à développer de nouvelles techniques de commandes non-linéaires et génériques pour la navigation autonome des robots sous-marins indépendamment de leur mode d’actionnement. Il a permis de supporter financièrement le début de la thèse de Lam Hung NGUYEN.

# Commande Prédicative pour l'Asservissement Visuel

Le principe de l'Asservissement Visuel (AV) consiste à utiliser des informations visuelles issues d'une ou plusieurs caméras dans la boucle de commande d'un robot afin d'en contrôler le mouvement. Les schémas d'asservissement visuel peuvent être divisés en trois catégories selon la nature des informations utilisées dans le contrôleur [WSN87]. La première est l'Asservissement Visuel en 3D (ou AV3D). Dans cette approche, les données issues du (ou des) capteur(s) visuel(s) sont exploitées pour estimer des informations tridimensionnelles. Ces dernières sont alors combinées avec des valeurs de référence afin de générer un signal d'erreur. À l'inverse, l'AV2D se base une erreur qui est directement calculée dans le plan image, entre des primitives géométriques mesurées dans l'image et des primitives de référence. Il existe également des approches hybrides, qui combinent à la fois des informations visuelles et des informations tridimensionnelles. C'est le cas notamment des asservissements visuels basés sur la matrice homographie, mais également ceux qui utilisent des informations telles que la disparité, la profondeur, etc.

Nous n'allons pas établir ici un état de l'art exhaustif des asservissements visuels. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers les deux tutoriels récents qui font référence actuellement [CH06 ; CH07]. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'AV2D. Son principal avantage réside dans le fait qu'aucune étape de reconstruction n'est nécessaire, ce qui le rend plus robuste face aux erreurs de modélisation de la caméra. En contrepartie, il souffre de quelques inconvénients dont les principaux sont a) de connaître un paramètre 3D ou pouvoir l'estimer, b) de ne pas pouvoir garantir la faisabilité des trajectoires 3D associées à la commande calculée et c) de ne pas pouvoir assurer la visibilité des informations visuelles durant les mouvements de la caméra.

Du point de vue du contrôle, la problématique de l'AV2D peut être résumée comme étant la résolution d'un problème de minimisation d'erreur dans le plan image. À chaque nouvelle mesure disponible, une nouvelle erreur est calculée et une nouvelle commande dépendante de cette erreur est appliquée au système robotique. Dans le cas idéal, la commande appliquée au système doit garantir que les cibles restent dans le champ de vision limitée de la caméra à la prochaine acquisition et que la trajectoire 3D associée à la commande est réalisable pour le système robotique.

Énoncée de la façon suivante, la commande prédictive semble particulièrement bien adaptée pour résoudre ce problème de commande. Son extension à l'asservissement visuel est donc naturelle. Contrairement à certains travaux proposés dans la littérature, la génération de trajectoires est implicite dans le cas de la Commande Prédicative Visuelle (CPV). Elles sont obtenues en résolvant le problème d'optimisation non linéaire dans le plan image, auquel sont ajoutées des contraintes 2D et 3D. Cela garantit implicitement la convergence de l'asservissement visuel, même dans le cas de grands déplacements avec un espace de travail limité. Dans

ce chapitre, la première section sera dédiée à la généralisation de l’approche de la commande prédictive à des tâches d’asservissement visuel dans l’image. L’approche présentée se veut générique et ne dépend ni du capteur visuel utilisé, ni du système robotique à contrôler. Après avoir présenté quelques limitations et des pistes de travail intéressantes permettant de les contourner, deux perspectives en cours d’étude seront détaillées. Elles concernent l’utilisation de la commande prédictive pour les systèmes rapides et pour lesquels le temps alloué pour le calcul de la commande est fortement contraint. Deux applications différentes sont proposées : la première concerne l’asservissement visuel 2D et la deuxième la navigation de drones aériens. La particularité de ces deux applications est qu’elles sont susceptibles d’être réalisées dans des environnements denses et potentiellement dynamiques. Enfin, une dernière section clôt ce chapitre en résumant les activités en cours et les moyens mis en œuvre pour mener à bien les perspectives et en présentant un bilan chiffré de la production scientifique.

## 2.1 Cadre général de la Commande Prédictive Visuelle

Dans cette section, le cadre général de la commande prédictive pour des tâches d’asservissement visuel 2D est présenté. Il s’ensuit une discussion qui met en avant des difficultés de mise en œuvre et des perspectives de recherche.

### 2.1.1 Structure de contrôle

La structure de Contrôle à Modèle Interne (CMI) [MZ83] (voir Fig. 2.1) est bien adaptée pour implémenter une stratégie de commande prédictive.

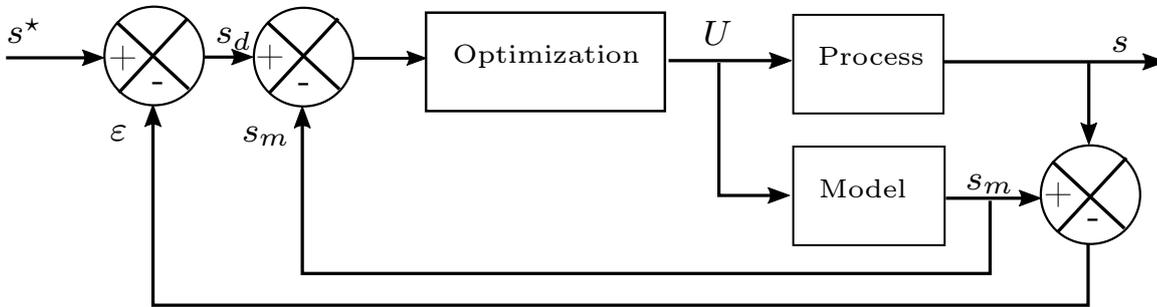


Figure 2.1 – Structure CMI

D’après le schéma de contrôle ci-dessus, on peut écrire :

$$s_d = s^* - \varepsilon = s^* - (s - s_m), \quad (2.1)$$

ce qui équivaut à :

$$s_d - s_m = s^* - s. \quad (2.2)$$

Cette relation montre qu’asservir  $s_m$  vers  $s_d$  équivaut à asservir  $s$  vers  $s^*$ . Dans le contexte prédictif, cette relation est fondamentale car la prédiction de la sortie du système à commander n’est possible que par l’intermédiaire de son modèle.

Dans le contexte de l’AV2D, on considérera dans la suite que :

- $s^*$  est la trajectoire de référence des coordonnées des primitives visuelles dans le plan image. Elle peut être variable et composée d'une suite d'image dans le cas d'une poursuite de trajectoire ou constante dans le cas de stabilisation en une image fixe ;
- le bloc *Process* est composé du système dynamique à contrôler.
- le bloc *Model* est le modèle mathématique décrivant le comportement dynamique du *Process*. Il sert à prédire l'évolution des informations visuelles sur un horizon futur.
- le bloc *Optimization* est un algorithme d'optimisation non linéaire avec contraintes qui a pour objectif, en accord avec la structure CMI, de minimiser sur un horizon futur la différence entre les grandeurs  $s_m$  vers  $s_d$ .

## 2.1.2 Définition des contraintes

La prise en compte de contraintes se révèle être indispensable lorsque l'on souhaite contrôler un système, qu'il soit robotique ou non. Ces contraintes portent généralement sur les actionneurs (saturations, butées articulaires, vitesses de variation, etc.) et/ou sur l'état ou une combinaison de l'état (limitation de l'espace de travail d'un robot, etc.). Dans le cas de l'asservissement visuel, on peut ajouter une contrainte supplémentaire afin d'assurer la visibilité des primitives dans l'image à chaque instant.

Dans le cas général, au moins trois contraintes méritent d'être formulées :

1. les contraintes portant sur le plan image. Elles permettent de définir des zones où les projections des primitives visuelles sont interdites, mais également de s'assurer qu'elles resteront visibles dans le champ de vue de la caméra durant la convergence. Cette dernière exigence est indispensable afin de pouvoir calculer le signal d'erreur à chaque instant et d'assurer ainsi le bouclage. D'un point de vue mathématique, ces contraintes de visibilité s'écrivent :

$$s_{\min} \leq s_m \leq s_{\max} \quad (2.3)$$

2. les contraintes portant sur l'espace 3D. Ces dernières permettent d'assurer que le système à contrôler reste dans les limites de son espace de travail. En effet, le problème de commande étant écrit dans l'espace image, rien ne permet de s'assurer que la trajectoire réalisée dans l'espace 3D est admissible par le système au niveau géométrique ou articulaire. D'un point de vue mathématique, ces contraintes de visibilité s'écrivent :

$$\begin{aligned} p_{\min} &\leq p \leq p_{\max} \\ q_{\min} &\leq q \leq q_{\max} \end{aligned} \quad (2.4)$$

3. les contraintes portant sur les variables de contrôle. En effet, tout actionneur possède des limitations, que ce soit sur l'amplitude et/ou sur les vitesses de variation. D'un point de vue mathématique, ces contraintes s'écrivent :

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \\ \delta_{\min} &\leq \delta u \leq \delta_{\max} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Les équations (2.3)-(2.5) définissent un domaine de contraintes  $\mathbf{K}$  et peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$C(u) \leq 0 \quad (2.6)$$

### 2.1.3 Formulation mathématique et résolution

La formulation mathématique générale de l'asservissement visuel prédictif sous forme discrète s'écrit :

$$\min_{\tilde{u} \in \mathbf{K}} J(u) \quad (2.7)$$

avec

$$J(u) = \sum_{j=k+1}^{k+N_p} [s_d(j) - s_m(j)]^T Q(j) [s_d(j) - s_m(j)] \quad (2.8)$$

et

$$s_d(j) = s^*(j) - \varepsilon(k) \quad (2.9a)$$

$$\tilde{u} = \{u(k), u(k+1), \dots, u(k+N_c), \dots, u(k+N_p-1)\}, \quad (2.9b)$$

La matrice  $Q(j)$  est une matrice de pondération symétrique définie positive pouvant varier afin de donner plus ou moins d'importance à la prédiction sur l'horizon  $N_p$ . Enfin, la quantité  $\varepsilon$  ne pouvant être mesurée qu'à l'instant courant, elle est considérée constante sur tout l'horizon de prédiction.

L'algorithme suivant est réitéré à chaque période d'échantillonnage :

1. à l'instant courant  $k$ , la sortie du système  $s(k)$  est mesurée ;
2. l'erreur  $\varepsilon(k) = s(k) - s_m(k)$  est mise à jour :

$$\varepsilon(j) = \varepsilon(k) = s(k) - s_m(k), \quad \forall j \in [k+1; k+N_p]$$

3. la trajectoire souhaitée  $s_d(j)$  est calculée  $\forall j \in [k+1; k+N_p]$  en fonction de (2.9a) ;
4. la sortie du modèle  $s_m(k)$ , nécessaire pour la prédiction, est initialisée avec la mesure  $s(k)$  ;
5. l'algorithme d'optimisation calcule la séquence de contrôle optimale (2.9b). De  $u(k+N_c+1)$  à  $u(k+N_p-1)$ , le contrôle est constant et égal à  $u(k+N_c)$  avec  $N_c$  l'horizon de contrôle.
6. la première valeur de la séquence optimale  $u(k)$  est appliquée au système réel et l'algorithme reprend à l'étape 1.

### 2.1.4 Modèles de prédiction

La connaissance d'un modèle cinématique ou dynamique est une donnée indispensable dans les stratégies de commande basées modèle. Ce modèle est utilisé pour prédire l'évolution des primitives visuelles choisies en fonction des variables de contrôle du système. Sa précision et la façon dont il reflète la réalité auront un impact direct sur la précision du contrôle et sur le respect des contraintes. Sans perte de généralité, on considère que ce modèle s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) & (2.10a) \\ s_m = g(x, \rho, t) & (2.10b) \end{cases}$$

où  $x \in \mathbb{R}^n$  est l'état du système,  $u \in \mathbb{R}^m$  est sa commande,  $\rho$  regroupe les paramètres intrinsèques de la caméra et  $s_m \in \mathbb{R}^p$  est un ensemble de primitives visuelles.

Plusieurs modèles de prédiction peuvent être pris en compte. Dans le cas général, le modèle global (2.10) est composé du modèle du système robotique (2.10a) et du modèle de projection du capteur visuel utilisé (2.10b). Ce type de modèle a été utilisé pour asservir un robot

mobile a) en position à l'aide d'une caméra omnidirectionnelle embarquée et b) le long d'une trajectoire de référence à l'aide d'une caméra perspective déportée [ACT08a].

Des modèles locaux, linéarisés autour d'un point de fonctionnement, peuvent également être utilisés. Ils sont basés sur la matrice d'interaction d'une primitive visuelle dans le plan image. Ces modèles permettent de s'affranchir d'une partie des informations tridimensionnelles requises dans le cas du modèle global. Une étude sur les avantages et inconvénients des différents modèles est donnée dans [ACC10].

## 2.1.5 Discussions autour de l'approche générale

Les résultats obtenus en simulation et en expérimentation montrent clairement les avantages de la prédiction dans les schémas d'asservissement visuel. Cette approche a été validée pour différents types de systèmes robotiques (bras manipulateur, robot mobile), pour différents objectifs de contrôle (poursuite de trajectoires ou stabilisation en une image fixe) et pour différents types de caméras (perspectives ou omnidirectionnelles) [ACT08a; ACT08b; ACC10]. La prise en compte explicite des contraintes, qu'elles soient visuelles et/ou mécaniques, est également un atout majeur. Dans la suite, quelques résultats récents obtenus en simulation et expérimentation sont présentés. Ils illustrent de manière synthétique les possibilités de l'approche avec différentes configurations du robot et de la caméra. Il s'ensuit une présentation de quelques limitations de l'approche ainsi qu'un aperçu des travaux en cours.

### 2.1.5.1 Aperçu de quelques résultats obtenus

Dans ce paragraphe, quelques résultats de simulation sont donnés pour deux configurations différentes. Dans les deux cas, l'objectif est de faire converger un ensemble de quatre primitives de type point vers des positions désirées.

Dans le premier cas, on considère une caméra perspective à six degrés de liberté. L'équation (2.10b) est remplacée par le modèle générique d'une caméra perspective. L'équation (2.10a) est donnée par un modèle d'évolution cinématique discrétisé qui dépend de la pose de la caméra et du vecteur de contrôle. Dans la figure 2.2, l'intérêt de la prédiction est clairement démontré. On constate que plus l'horizon de prédiction est grand, plus les trajectoires dans l'image sont lisses et plus les trajectoires réalisées dans l'espace 3D sont directes.

L'ajout de contraintes visuelles, de contraintes sur les amplitudes et de contraintes dans l'espace 3D illustre parfaitement les avantages d'écrire le problème de commande sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes (voir figure 2.3).

Afin de montrer le côté générique de l'approche, la caméra est à présent remplacée par une caméra omnidirectionnelle libre de tous mouvements dans le plan XY (deux translations le long des axes XY et une rotation autour de l'axe Z). L'équation (2.10b) est remplacée par le modèle générique défini pour les caméras omnidirectionnelles à point de vue central unique [GD10]. L'équation (2.10a) du modèle d'évolution, identique au cas précédent, est réduite au cas à trois degrés de liberté. La figure 2.4 montre les résultats de simulation dans le cas où des contraintes de visibilité et d'amplitude sur les actionneurs sont ajoutées au problème d'optimisation.

### 2.1.5.2 Difficultés liées aux modèles de prédiction

Les performances en boucle fermée de toutes les commandes basées sur un modèle dépendent explicitement de ce dernier. S'il semble naturel d'un point de vue théorique de

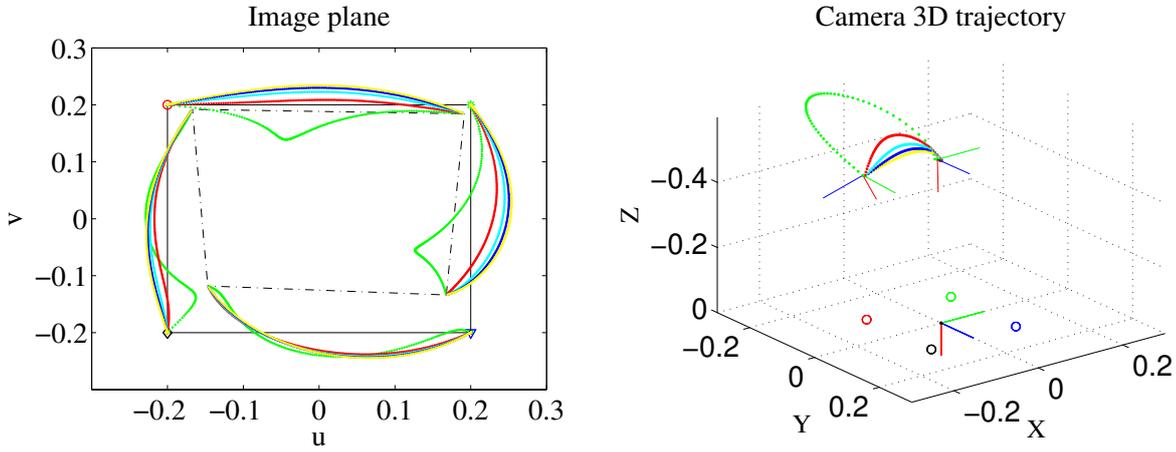


Figure 2.2 – Influence de l’horizon de prédiction :  $N_p = 1$  (vert),  $N_p = 3$  (rouge),  $N_p = 5$  (bleu),  $N_p = 7$  (noir),  $N_p = 10$  (jaune)

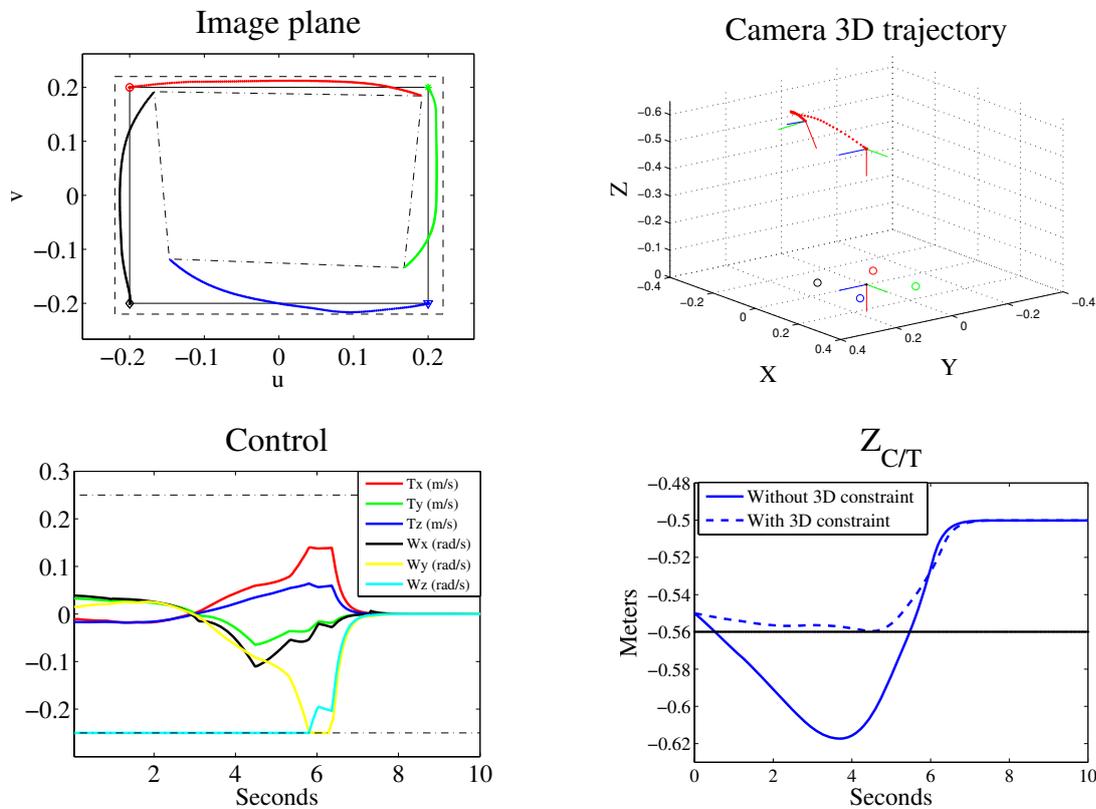


Figure 2.3 – Cas d’une *free flying* caméra perspective à 6ddl, dans le cas de contraintes visuelles, de contraintes sur les actionneurs et de contraintes 3D sur l’altitude de la caméra dans l’espace de travail.

vouloir propager dans le temps un modèle reflétant le mieux possible la réalité, on se limite généralement à un modèle simple. Plusieurs raisons justifient ce choix :

- premièrement, le système à commander est, quoi qu’il arrive, soumis à des perturbations et/ou des bruits de mesure et/ou des erreurs de modélisation qui font que les sorties prédites ne sont jamais égales aux prédictions. Il est donc nécessaire de recalculer toute la séquence de commande à chaque itération et de n’appliquer au

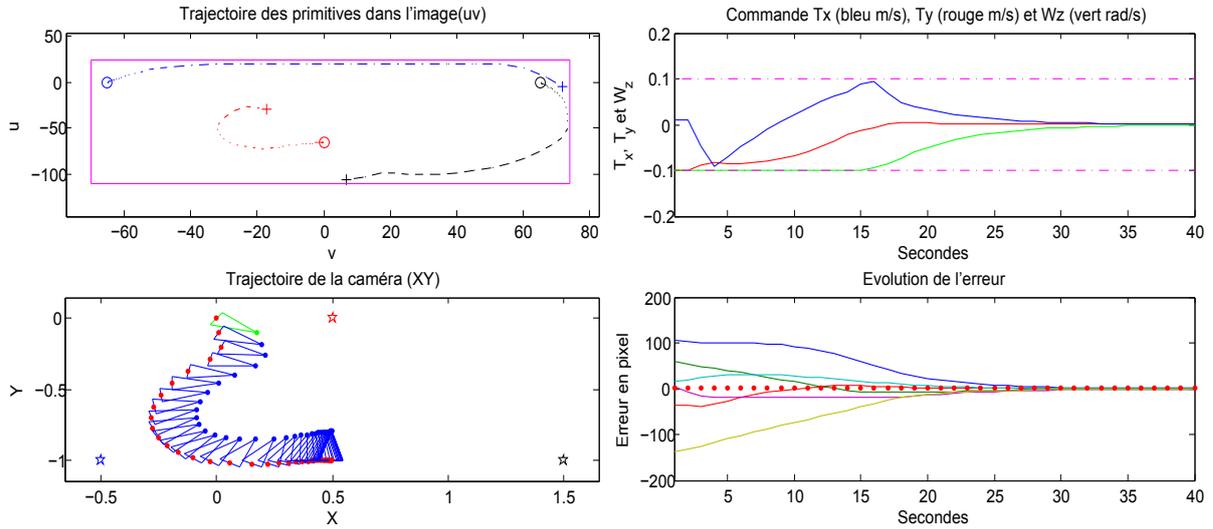


Figure 2.4 – Cas d’une *free flying* camera omnidirectionnelle à 3ddl, dans le cas de contraintes visuelles et de contraintes sur les actionneurs.

système à commander que la première. Ce constat amène alors à la conclusion qu’une prédiction “correcte” est donc largement suffisante ;

- deuxièmement, l’utilisation d’un modèle complexe va nécessiter des états supplémentaires, difficilement mesurables et/ou estimables. Un modèle local, basé sur une matrice d’interaction, permet de s’affranchir d’une partie de ces difficultés. Une partie seulement, car la profondeur relative reste toujours présente dans les modèles locaux et les problèmes liés aux minima locaux restent d’actualité.

Plusieurs pistes de travail peuvent être envisagées pour améliorer et/ou étendre les performances des modèles de prédiction :

1. la première concerne le couplage des approches basées modèle (MB) et des approches basées sur l’apprentissage profond (AP). À titre d’exemple, il est maintenant possible d’estimer de façon relativement fiable la profondeur d’une scène à partir d’une seule image [Zha+20]. L’utilisation de cette profondeur dans un modèle local, basée sur la matrice d’interaction, permettrait de s’affranchir d’un modèle complexe et de la connaissance *a priori* d’informations 3D. Les prédictions obtenues, recalculées à chaque nouvelle mesure et sur un horizon de prédiction de longueur raisonnable, devraient être suffisamment fidèles pour assurer les objectifs de contrôle tout en garantissant les contraintes visuelles. À plus long terme, le couplage de MB/AP pourrait permettre d’obtenir des tunnels dans lesquels les prédictions des indices visuels sont garanties plutôt que des prédictions déterministes généralement fausses. Là encore, l’idée est de simplifier les modèles et leur propagation dans le temps tout en ayant une information pertinente et suffisamment fidèle de la réalité.
2. jusqu’à présent, seules des caméras “usuelles” ont été utilisées (perspectives, omnidirectionnelles, etc.). La généralisation de l’approche aux nouvelles modalités sensorielles visuelles semblent clairement pertinentes. À titre d’exemple, on pourrait citer les caméras à événements pour réaliser des asservissements visuels prédictifs hétérogènes : asynchrone à partir d’informations venant d’événements pour assurer les évitements d’obstacles et synchrone à partir des images pour assurer le positionnement ou la poursuite de trajectoire dans l’image.

### 2.1.5.3 Difficultés liées aux paramètres de réglage

Une deuxième difficulté liée à la commande prédictive concerne le réglage de l'horizon de prédiction et de commande :

- l'horizon de prédiction est généralement choisi de manière à satisfaire un compromis entre la stabilité (horizon long) et la faisabilité numérique en terme de temps de calcul. Si  $N_p$  tend vers l'infini, le problème de commande devient un problème de contrôle optimal connu pour assurer la stabilité en boucle fermée. Avec l'envie de simplifier les modèles pour avoir une tendance réaliste du futur plutôt que des estimations précises avec un modèle complexe, il semblerait important d'être capable :
  1. de quantifier l'influence des erreurs de modélisation sur l'horizon de prédiction afin de valider un modèle plutôt qu'un autre ;
  2. de déterminer l'horizon de prédiction maximal pour lequel les prédictions ne sont plus réalistes.
- l'horizon de contrôle, noté  $N_c$ , permet de choisir le nombre de contrôles différents sur l'horizon de commande. Pour des raisons de faisabilité, il peut être égal à l'unité, ce qui correspond à un contrôle constant sur tout l'horizon de prédiction. Augmenter la valeur de l'horizon de commande jusqu'à la valeur de  $N_p$  permettrait théoriquement d'ajouter des degrés de liberté supplémentaires au problème d'optimisation mais conduirait inévitablement à une augmentation du temps de calcul !

### 2.1.5.4 Difficultés liées à l'implémentation et au temps de calcul

La dernière difficulté concerne le temps de calcul qui comprend à la fois les temps nécessaires a) pour prédire les sorties du modèle sur l'horizon de prédiction et b) pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire sous contraintes. Pour les systèmes qui ont une dynamique rapide voire très rapide, ce temps doit être inférieur à la période échantillonnage. Bien que ce problème du temps de calcul soit résolu un jour où l'autre uniquement avec les progrès technologiques des constructeurs de microprocesseurs, deux pistes de travail théoriques en cours sont développées dans les sections suivantes.

## 2.2 Stratégies de commandes prédictives rapides

Dans cette section, nous présentons deux axes de travail actuellement développés pour répondre aux difficultés liées au temps de calcul et à l'implémentation des stratégies prédictives.

### 2.2.1 Model Predictive Path Integral

Le premier axe s'intéresse aux stratégies de commande appelées MPPI (*Model Predictive Path Integral*). Le principe du *Path Integral* (intégrale de chemin en français), introduit dans [Kap05] pour la première fois à des fins de contrôle, permet de résoudre élégamment un problème de contrôle optimal stochastique. Les problèmes de contrôle optimaux sont généralement traités en résolvant l'équation d'Hamilton-Jobi-Bellman (HJB) (voir [Ste94] pour une introduction complète de l'équation de HJB déterministe et stochastique). Le principal inconvénient est que cette équation n'a potentiellement pas de solutions analytiques et que sa résolution numérique devient délicate en dimension élevée.

L'idée proposée par Kappen est de transformer l'équation stochastique d'Hamilton-Jacobi-Bellman à l'aide du lemme de Feynman-Kac [Kac49] en une probabilité de toutes les trajectoires possibles du système. Une approximation de la solution peut alors être obtenue en utilisant les méthodes de type Monte-Carlo en temps futur. Les avantages de cette stratégie sont nombreux. En raison de la nature de l'échantillonnage, l'algorithme ne nécessite pas d'hypothèses sur la dynamique du système et sur la fonction de coût et/ou sa dérivée, ce qui permet de traiter des dynamiques non linéaires et des fonctions de coût non lisses/non différentiables sans approximations. Les contraintes, pouvant porter sur l'état et le contrôle, peuvent également être facilement intégrées.

La principale difficulté de l'approche est liée à la nature des méthodes basées sur les échantillonnages (*sampling-based method*). Pour être efficace, ces dernières doivent calculer des milliers de trajectoires en temps réel. Si jusqu'à présent, cette étape n'était pas réalisable en ligne, les progrès récents sur les architectures des cartes vidéos permettent aujourd'hui de résoudre ces difficultés. Les GPUs (*Graphical Processing Unit*), généralement exploités pour entraîner des réseaux de neurones pour des tâches de perception, sont utilisés ici pour générer, en parallèle, un nombre important de trajectoires.

L'extension du *Path Integral* au *Model Predictive Path Integral* est directe. À la façon de la commande prédictive, l'algorithme complet consiste à générer aléatoirement un nombre fini  $N_{traj}$  de séquences de commande sur un horizon de prédiction fini, de les appliquer au modèle du système à commander et de calculer un coût moyen associé aux séquences de commande générées aléatoirement. Seule la première séquence de commande est réellement appliquée au système. La procédure est alors réitérée à chaque nouvelle période échantillonnage.

Un premier travail, présenté dans [WAT17] montre qu'il est possible de contrôler un véhicule miniature tout terrain sur un circuit ovale en temps réel, à des vitesses allant jusqu'à  $13[m.s^{-1}]$ . Bien que les hypothèses utilisées soient restrictives (connaissance parfaite de l'environnement 3D, connaissance parfaite de la position et des vitesses du véhicule, connaissance *a priori* de la carte des obstacles -statiques-), l'approche proposée est clairement efficace et implémentable en temps réel. Nous souhaitons donc étendre la stratégie du *MPPI* au cas général à six degrés de liberté. L'objectif souhaité est de généraliser l'approche à des systèmes robotiques complexes, évoluant dans un espace 3D potentiellement dynamique. Deux applications sont actuellement à l'étude :

1. la première concerne le cadre de l'asservissement visuel. S'il a été clairement montré dans [ACC10] l'intérêt de la prédiction et de la prise en compte explicite des contraintes, l'implémentation reste délicate à cause du temps de calcul. L'approche proposée ici permet de contourner cette limitation. Les premiers résultats obtenus en simulation sur un bras manipulateur montrent que le *MPPI* permet d'effectuer en temps réel des tâches d'asservissement visuel (2D ou 3D) avec des primitives géométriques basiques telles que des points, tout en respectant des contraintes visuelles. Nous souhaitons à présent aller plus loin et prendre en compte, dans la prédiction, la phase de perception qui sera associée à l'action. En effet, les contraintes visuelles imposées jusqu'à aujourd'hui sont des actions dites "correctives". Elles permettent uniquement d'assurer l'existence du retour d'informations pour le calcul de la loi de commande. Cependant, elles ne permettent pas d'anticiper et/ou de simplifier la phase de perception, généralement délicate lors d'asservissement visuel rapide. L'objectif ici est d'inclure, dans la fonction coût à minimiser, un critère permettant de simplifier la phase de traitement d'images afin de s'assurer que les cibles restent le plus proche possible du centre de l'image et que leurs variations de vitesse soient le plus faible possible (en limitant, par exemples, les phénomènes de *motion blur*). L'objectif final est de pouvoir profiter d'une commande prédictive réactive, capable de tirer profit

des capacités maximales des systèmes robotiques tout en garantissant la faisabilité du point de vue de la perception. L'évitement d'obstacle dynamique, ou la poursuite autonome d'un drone, sont les applications privilégiées en cours d'étude.

2. la deuxième application concerne le cas plus délicat de la navigation autonome d'un drone dans un environnement dense, non structuré et potentiellement dynamique. Cette problématique s'insère parfaitement dans le cadre de l'ANR CLARA. Comme évoqué précédemment, les résultats donnés dans [WAT17] considèrent le cas d'un robot mobile évoluant sur un plan et dans un environnement statique et connu. Les premiers résultats de simulation<sup>1</sup> que nous avons obtenus montrent que l'extension à la navigation d'un drone aérien est possible dans un environnement 3D statique [CI23]. Contrairement aux résultats obtenus dans [WAT17], la fonction coût considérée ici se base sur une connaissance partielle de la position des obstacles, pouvant être obtenue à partir de capteurs standards et d'algorithmes de construction de grilles d'occupation.

De ces premiers résultats découlent des perspectives intéressantes. En premier lieu, l'extension à des obstacles dynamiques semble naturelle. Une approche basique consistera à traiter les obstacles dynamiques comme des objets mobiles se déplaçant à vitesses constantes et soumis à des perturbations stochastiques. Ils pourront alors être pris en compte explicitement dans la fonction coût. L'extension au cas du multi-robots semble être également prometteuse, notamment pour les applications visées dans l'ANR CLARA.

Une deuxième perspective, rejoignant l'idée du couplage MB/AP consiste à considérer la dynamique complexe du drone dans son environnement dynamique comme une boîte noire. En raison de la nature du MPPI (*sampling-based*), aucune hypothèse sur la dynamique du système n'est nécessaire. Elle peut alors être modélisée par des réseaux de neurones et ensuite propagée dans le temps afin de prédire l'évolution dynamique du drone. L'objectif ici est d'évaluer la pertinence de ces modèles pour la prédiction et de les utiliser dans des structures de commande avancée.

De part la parallélisation des calculs et de ses capacités de prédiction, le *MPPI* devrait être en mesure de répondre à une majeure partie des difficultés liées aux scènes dynamiques et aux systèmes rapides. Bien que la puissance des GPU permette de faire un grand nombre de calculs en parallèle, il existe un nombre maximal au dessus duquel la commande ne peut plus être appliquée en temps réel. L'impact de ce nombre sur les trajectoires obtenues en boucle fermée est une question intéressante. De plus, l'étude de la stabilité du *MPPI*, non abordé jusqu'à présent dans la littérature, doit assurément être adressée.

## 2.2.2 Paramétrage de la commande

Le deuxième axe en cours d'étude pour répondre aux difficultés liées au temps de calcul est le paramétrage de la commande. Cette technique permet de diminuer de manière significative le nombre de degrés de liberté dans le problème d'optimisation, sans réduire les performances globales. Dans les schémas de commande prédictive classique, l'horizon de commande  $N_c$  est généralement choisi constant entre deux instants d'échantillonnage. Il est fonction de l'horizon de prédiction  $N_p$ , avec la relation  $N_p = N_c$ . On a donc  $N_c$  degrés de liberté. Plus l'horizon de prédiction sera grand et plus la dimension du problème d'optimisation sera élevée.

---

1. <http://www.i3s.unice.fr/~allibert/Videos/PON.mp4>

Une première solution pour réduire le nombre de degrés de liberté est d'imposer une commande constante sur tout l'horizon de prédiction, ce qui revient à choisir  $N_c = 1$ . Cette commande est ensuite réactualisée à chaque période d'échantillonnage.

Une deuxième solution, moins radicale, consiste à choisir un horizon de commande bien inférieur à  $N_p$  mais supérieur à un, et de considérer qu'entre les instants  $k > N_c$  et  $k \leq N_p$ , le contrôle est constant. Bien que ces solutions permettent de réduire la complexité du problème d'optimisation, elles ne permettent pas de profiter de la totalité des avantages de la commande prédictive, à savoir un contrôle variable sur tout l'horizon de prédiction.

Le travail que nous menons actuellement consiste à paramétrer le profil de commande sur l'horizon de prédiction. Ce paramétrage, avec un nombre de paramètres inférieur à  $N_c$ , permet d'augmenter  $N_p$  (nécessaire pour les performances et la stabilité) tout en diminuant  $N_c$  (nécessaire pour diminuer le nombre de degrés de liberté et le temps de résolution du problème d'optimisation). Cela revient donc implicitement à proposer une solution qui découple l'horizon de commande de l'horizon de prédiction.

Avant de présenter le formalisme et quelques résultats préliminaires sur un système linéaire, quelques travaux disponibles dans la littérature méritent d'être cités. Le premier [DBV99] s'intéresse aux systèmes linéaires dans le cas non contraint. Les auteurs proposent un paramétrage du profil de commande à partir de fonctions de base, avec un nombre de paramètres égal à l'ordre du modèle du système à contrôler. Dans [MD16], les auteurs proposent de paramétrer l'état et l'entrée du système à contrôler avec des fonctions de base et montrent clairement l'intérêt d'une telle approche. Enfin dans ses ouvrages, [Ala06; Ala13] donne quelques paramétrages possibles (constante, exponentielle, Fourier, etc.) et montre de très bons résultats expérimentaux sur des systèmes mécaniques.

Soit un système linéaire invariant dans le temps, discrétisé<sup>2</sup> et donné par :

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (2.11a)$$

$$\quad (2.11b)$$

avec  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$  et  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{q \times n}$ .

Un développement rapide de (2.11) permet de projeter l'état et la sortie du système dans le temps, et de l'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+i) = \Phi_i \mathbf{x}(k) + \Psi_i \tilde{\mathbf{u}}(k) \\ \mathbf{y}(k+i) = \mathbf{C}_r \mathbf{x}(k+i) \end{cases} \quad (2.12a)$$

$$\quad (2.12b)$$

avec  $i = [1, \dots, N_p]$ . Les matrices  $\Phi_i = [\mathbf{A}^i]$ ,  $\Psi_i = [\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{B}, \dots, \mathbf{A}\mathbf{B}, \mathbf{B}]\Pi_i$  et  $\mathbf{C}_r$  sont des matrices constantes qui ne dépendent que de  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{C}$ .  $\Pi_i$  est une matrice de sélection qui dépend de l'instant  $i$  et qui permet de sélectionner la  $i$ ème commande au temps  $k+i$  à partir de  $\tilde{\mathbf{u}}(k)$ .

La sortie  $\mathbf{y}(k+i)$  peut donc être complétement déduite de l'état initial  $\mathbf{x}(k)$  et de la séquence de commandes qui s'écrit :

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+N_p-1) \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Dans le cas du paramétrage de la commande, la séquence de commande  $\tilde{\mathbf{u}}(k)$  se décompose de la manière suivante :

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = \Pi_r p. \quad (2.14)$$

---

2. La période d'échantillonnage est implicite. La notation  $\mathbf{x}(k)$  fait référence au vecteur à l'instant  $\mathbf{x}(k\Delta t)$

Ici,  $p$  représente les degrés de liberté, c'est à dire le nombre de contrôles différents sur l'horizon de prédiction. La matrice  $\Pi_r$  permet quant à elle de faire le lien entre les degrés de liberté et les variables de commande sur la séquence complète. Un grand choix de paramétrage peut être utilisé : interpolation linéaire entre deux degrés de liberté, paramétrage exponentielle, paramétrage basée sur des fonctions de base, etc.

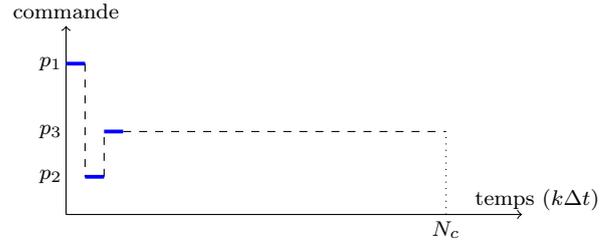
Dans la suite, nous présentons quelques résultats obtenus sur l'exemple académique du triple intégrateur,  $\ddot{x} = u$ . L'objectif de commande se résume à contrôler le premier état du système (noté  $x_1$ ) afin qu'il suive une trajectoire de référence. Celle-ci est constante et égale à 0.5 pendant dix secondes puis suit une sinusoïde d'amplitude unitaire. L'horizon de prédiction  $N_p$  est égal à 2[s] et la période d'échantillonnage  $\Delta t$  est de 0.1[s]. Diverses contraintes sont ajoutées au problème de contrôle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{u}}(k) \in [-5, +5], \\ \delta \tilde{\mathbf{u}}(k) \in [-1, +1], \\ \mathbf{x}(k+i) \in [-1.2, +1.2], \\ \delta \mathbf{x}(k+i) \in [-2, +2], \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.15a) \\ (2.15b) \\ (2.15c) \\ (2.15d) \end{array}$$

$\forall i \in [1, \dots, N_p]$ . Au total, quatre paramétrages sont proposées dans le cas où l'on considère uniquement trois degrés de liberté (i.e.  $p = 3$ ) :

1. la première, notée *classic*, est donnée par :

$$u(k+i-1) = \begin{cases} p_1, & \text{si } i = 1. \\ p_2, & \text{si } i = 2. \\ p_3, & \text{si } i > 2 \text{ et } k \leq 20. \end{cases}$$

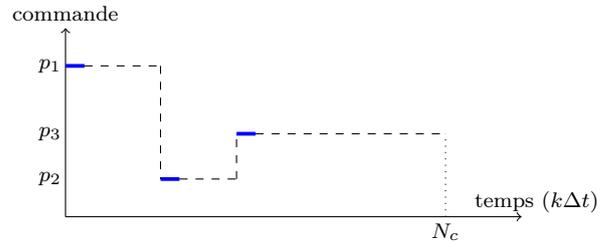


2. le seconde paramétrage, notée *zoh*, fait l'hypothèse que la commande n'est connue qu'à des instants précis sur l'horizon de prédiction, notés  $N_j$ ,  $\forall j = [1, \dots, nb]$ , avec  $N_1 = 0$  et  $N_{nb} < N_p$ . Dans le cadre de notre exemple à trois degrés de liberté ( $nb = 3$ ) pris aux instants 0, 4 et 8, on peut écrire :

$$u(k+N_1) = u(k) = p_1, \quad u(k+N_2) = u(k+4) = p_2 \text{ et } u(k+N_3) = u(k+8) = p_3.$$

La valeur des commandes aux autres instants est considérée constante et égale à la valeur précédente. Sur l'horizon de prédiction, le contrôle à chaque instant est donné par :

$$u(k+i-1) = \begin{cases} p_1, & \text{si } i = 1 \text{ et } i < 5. \\ p_2, & \text{si } i = 5 \text{ et } i < 9. \\ p_3, & \text{si } i = 9 \text{ et } i \leq 20. \end{cases}$$



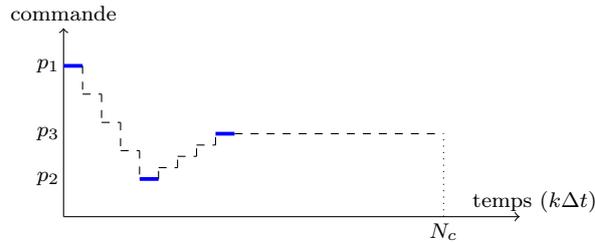
3. la troisième paramétrage, notée *lerp*, fait également l'hypothèse que la commande n'est connue qu'à des instants précis notés  $N_j$ ,  $\forall j = [1, \dots, nb]$ , avec  $N_1 = 0$  et  $N_{nb} < N_p$ . La différence se situe sur la valeur des commandes entre les instants  $N_j$ . À présent, elles sont obtenues par interpolation linéaire. De l'instant  $N_{nb}$  à  $N_p$ , le

contrôle est maintenu constant. Sous forme générale, le contrôle entre chaque instant intermédiaire  $N_j$  s'écrit :

$$u(k+i) = u(k+N_{j_i}) + \frac{(i-N_{j_i})}{N_{j_{i+1}}-N_{j_i}} \left( u(k+N_{j_{i+1}}) - u(k+N_{j_i}) \right)$$

avec  $i \in [N_{j_i}, N_{j_{i+1}}]$ ,  $j_i = \max\{j \in \{0, \dots, N_p\} \mid j < i\}$  et où  $N_{j_i}$  et  $N_{j_{i+1}}$  appartiennent à l'ensemble  $\{N_1, N_2, \dots, N_{nb}\}$ .

Dans notre exemple où l'on considère trois degrés de liberté pris au instant 0, 4, 8, la séquence de commandes se représente graphiquement de la façon suivante :



- le dernier paramétrage proposée, notée *laguerre*, est obtenue à partir des fonctions de base. Ces dernières, sommées jusqu'à l'infini, permettent de générer des classes de fonctions ayant des propriétés intéressantes. En pratique et dans le cas de l'application à la commande prédictive, seul un nombre fini  $n_b$  de fonctions de base est utilisé. Bien que limitative sur les formes de profils générés, cette hypothèse se révèle être peu restrictive en pratique. Dans l'exemple proposé, on considère trois fonctions de base issues des polynômes de Laguerre. Le contrôle à chaque instant s'écrit alors :

$$u(k) = \sum_{i=1}^{n_b} p_i \mathcal{B}_i(k)$$

avec

$$\mathcal{B}_i(k) = \sqrt{2\lambda} e^{-\lambda k} \sum_{j=0}^i \left( \frac{i!}{j!(i-j)!} \right) \frac{(-2\lambda k)^j}{j!},$$

et  $\lambda$ , un scalaire positif qui définit l'amortissement désiré.

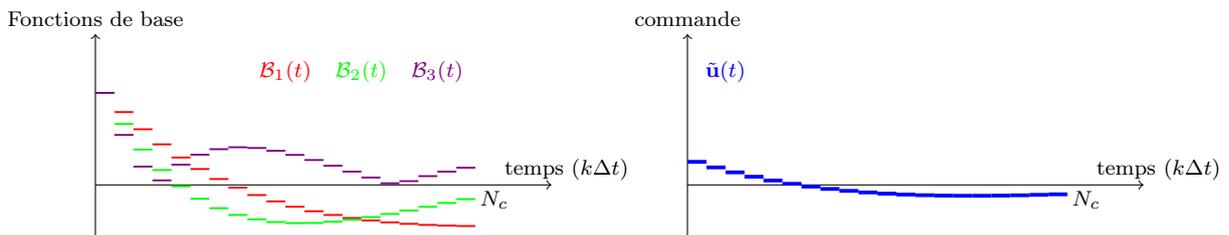


Figure 2.5 – À gauche : paramétrage avec les fonctions de bases (Polynôme de Laguerre avec  $\lambda = 0.75$  et  $n_b = 3$ ). À droite : commande obtenue avec des valeurs aléatoires pour les trois degrés de liberté ( $p_1 = 0.1, p_2 = 0.25, p_3 = -0.1$ ).

L'avantage principal de ce dernier paramétrage réside dans le fait de ne pas placer les degrés de liberté de la séquence de commande à des endroits précis sur l'horizon de prédiction.

Pour les quatre paramétrages proposés, l'écriture de la séquence de commandes sous la forme linéaire (2.14) s'obtient facilement après quelques manipulations mathématiques.

La Figure 2.6 montre l'évolution de l'état  $x_1$  au cours du temps ainsi que celle de l'erreur. Quel que soit le paramétrage choisie, toutes les contraintes définies par (2.15) sont respectées. On constate clairement que les performances obtenues dans le cas des paramétrages basés sur l'interpolation linéaire et sur les fonctions de base donnent les meilleurs résultats. Elles surpassent clairement les paramétrages classiques couramment utilisés. Le temps de calcul pour chaque paramétrage est également donné. On remarque qu'ils sont quasiment identiques pour toutes les paramétrages, ce qui confirme une fois de plus l'intérêt de cette approche<sup>3</sup>. On constate également que les commandes obtenues dans le cas des paramétrages basés sur l'interpolation linéaire et sur les fonctions de base sont plus "lisses". Les mêmes conclusions peuvent être faites en observant l'évolution des variations du signal de commande.

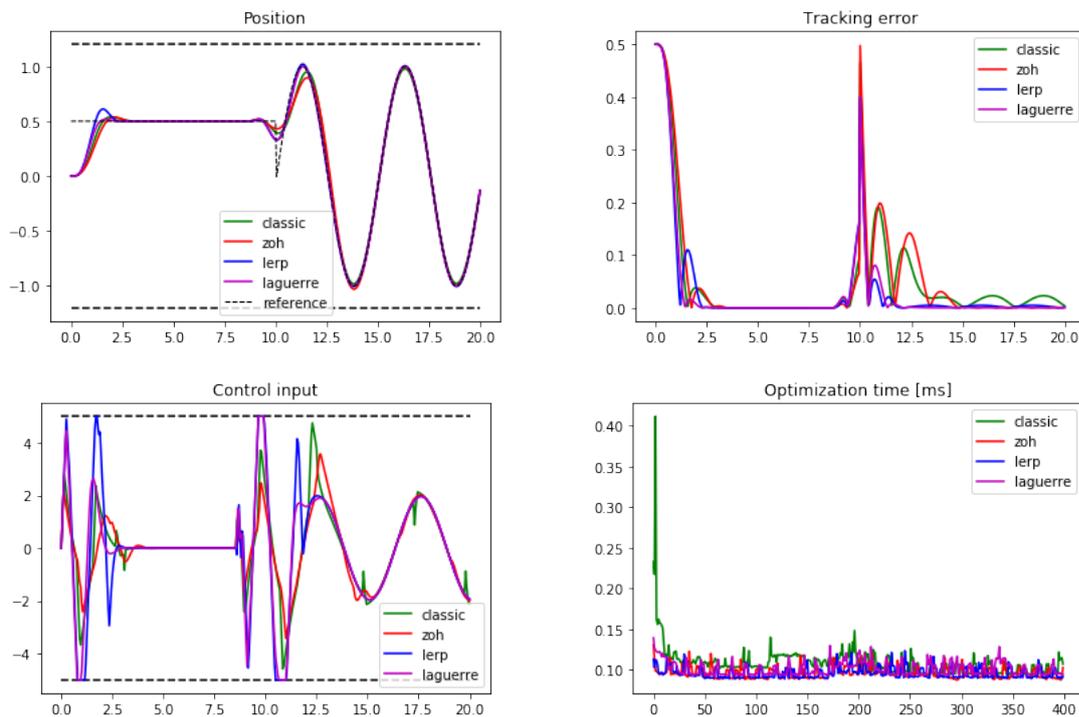


Figure 2.6 – Résultats obtenus (position, erreur de poursuite, signal de commande et temps de calcul) dans le cas de poursuite de trajectoire pour le triple intégrateur dans le cas de quatre paramétrages différents (*classic*, *zoh*, *lerp*, *laguerre*) avec trois degrés de liberté.

Les résultats préliminaires obtenus en simulation dans le cadre de l'asservissement visuel d'un drone aérien vont dans le sens des conclusions établies sur le système linéaire précédent. Le paramétrage de la commande permet de réduire drastiquement le nombre de degrés de liberté et par conséquent la complexité et donc la résolution du problème d'optimisation. En plus de son efficacité pour réduire le temps de calcul, la qualité des performances atteintes en boucle fermée est quasiment équivalente à la simulation effectuée sans paramétrage. Cette solution devrait permettre une implémentation en temps réel de la commande prédictive aux systèmes rapides là où, jusqu'à présent, les ressources matérielles ne le permettaient pas. L'étude du paramétrage, son choix, son effet sur la stabilité, sa mise en œuvre pratique

3. Il est important de noter que les simulations sont faites sous le langage de programmation Python. Une implémentation en langage C/C++ permettrait de diviser par un facteur 20 ce temps de calcul.

sur des systèmes robotiques à dynamiques rapides sont autant de directions théoriques et pratiques ouvertes sur lesquelles des actions doivent être menées avec énergie.

## 2.3 Conclusion du chapitre

Ce chapitre présente le cadre général de commande prédictive pour l’asservissement visuel 2D. Les contrôleurs prédictifs qui en découlent montrent clairement les intérêts et les avantages de l’approche, que ce soit du point de vue des trajectoires dans l’image que de la prise en compte des contraintes visuelles et mécaniques.

Ces résultats ont fait l’objet de plusieurs publications après ma thèse dont une publication de référence la revue *IEEE Trans. on Robotics* [R1], des publications exposées des conférences internationales [CI7,CI12,CI13] et dans un chapitre d’ouvrage [L1].

Quelques limitations ont ensuite été mises en avant, ainsi que des perspectives et pistes de recherche actuellement en cours. Parmi celles-ci, celle reposant sur le couplage MB/AP semble très prometteuse. Elle sera développée et détaillée dans le dernier chapitre de ce document consacré aux perspectives de recherche. Celle concernant l’étude des commandes prédictives pour les systèmes rapides est incontestablement la plus avancée. Deux axes sont actuellement explorés :

- Le premier concerne le *MPPI* avec pour cadre applicatif l’asservissement visuel et la navigation de drones aériens dans des environnements denses et dynamiques. Ihab Mohamed (doctorant en deuxième année financé par l’ANR CLARA) est focalisé sur ce sujet. Les premiers résultats pour la navigation autonome de drones ont fait l’objet d’une soumission pour une conférence internationale [CI23] et une publication dans une revue internationale est actuellement en cours sur l’asservissement visuel.
- Le second concerne la paramétrage du contrôle pour la commande prédictive. Une collaboration active que je mène avec Franco Fusco, doctorant en fin de thèse au LS2N, a déjà donné des résultats très encourageants sur un système linéaire. Des premiers résultats préliminaires ont été obtenus en simulation pour la navigation d’un drone aérien par asservissement visuel. Ce travail doit se poursuivre en priorité. Un financement d’une année de post-doctorat par le laboratoire I3S a été obtenu dans le cadre d’un appel à projets interne en juillet 2020. Franco Fusco a été retenu et il commencera son post-doctorat à I3S en décembre 2020.



# Bibliographie

- [ACC10] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et François CHAUMETTE. « Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.5 (2010), p. 933-939.
- [ACT08a] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Real-time Visual Predictive Controller for Image-based Trajectory Tracking of a Mobile Robot ». In : *IFAC World Congress*. 2008.
- [ACT08b] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
- [Ala06] Mazen ALAMIR. *Stabilization of Nonlinear Systems Using Receding-Horizon Control Schemes : a Parametrized Approach for Fast Systems*. Springer, 2006.
- [Ala13] Mazen ALAMIR. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control : Self Contained Algorithms and Cases Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN : ISBN-10 1489541349.
- [All+19] Guillaume ALLIBERT, Minh Duc HUA, Szymon KRUPÍŃSKI et Tarek HAMEL. « Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles ». In : *Control Engineering Practice, Elsevier* 82 (2019), p. 151-160.
- [AMB16] Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Moses BANGURA. « Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2016.
- [AO03] Javier ANTICH et Alberto ORTIZ. « Underwater Cable Tracking By Visual Feedback ». In : *Pattern Recognition and Image Analysis* 2652 (2003), p. 53-61.
- [Bag+11] Andrey BAGNITSKY, Alexander INZARTSEV, Alexander PAVIN, Sergey MELMAN et Morozov MOROZOV. « Side Scan Sonar Using for Underwater Cables & Pipelines Tracking By Means of AUV ». In : *IEEE Symposium on Underwater Technology (UT) and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*. 2011, p. 1-10.
- [Ban+14] Moses BANGURA, Hyon LIM, H. Jin KIM et Robert MAHONY. « Aerodynamic Power Control for Multirotor Aerial Vehicles ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2014, p. 529-536.
- [Ban+15] Moses BANGURA, Frits KUIPERS, Guillaume ALLIBERT et Robert MAHONY. « Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors ». In : *in Proc. Australasian Conf. Robotics Automation*. 2015.

- [Ban+18] Moses BANGURA, Xiaolei HOU, Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Nathan MICHAEL. « Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions Using Inertial Measurements ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.6 (2018), p. 1490-1501.
- [BB00] Sanjay P. BHAT et Dennis S. BERNSTEIN. « A Topological Obstruction to Continuous Global Stabilization of Rotational Motion and the Unwinding Phenomenon ». In : *Systems & control letters* 39.1 (2000), p. 63-70.
- [Bia+17] Jacob BIAMONTE, Peter WITTEK, Nicola PANCOTTI, Patrick REBENTROST, Nathan WIEBE et Seth LLOYD. « Quantum Machine Learning ». In : *Nature* 549.7671 (2017), p. 195-202.
- [BM07] Selim BENHIMANE et Ezio MALIS. « Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing ». In : *Int. Journal of Robotics Research* 26.7 (2007), p. 661-676.
- [BMS09] Silvère BONNABEL, Philippe MARTIN et Erwan SALAÜN. « Invariant Extended Kalman Filter : Theory and Application to a Velocity-aided Attitude Estimation Problem ». In : *48th IEEE Conference on Decision and Control with 28th Chinese Control Conference*. 2009, p. 1297-1304.
- [BO85] Itzhack Y. BAR-ITZHACK et Yaakov OSHMAN. « Attitude Determination from Vector Observations : Quaternion Estimation ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-21 (1985), p. 128-136.
- [BPV07] Lorenzo BRIGNONE, Michel PERRIER et Christophe VIALA. « A Fully Autonomous Docking Strategy for Intervention Auvs ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 2007, p. 1-6.
- [CC04] Yang CHENG et John L. CRASSIDIS. « Particle Filtering for Sequential Spacecraft Attitude Estimation ». In : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2004.
- [CH06] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13.4 (2006), p. 82-90.
- [CH07] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.1 (2007), p. 109-118.
- [Cre14] Vincent CREUZE. « Robots Marins Et Sous-marins : Perception, Modélisation, Commande ». In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783 (2014).
- [DBV99] Edwin T. van DONKELAAR, Okko H. BOSGRA et Paul M.J. VAN DEN HOF. « Model Predictive Control With Generalized Input Parametrization ». In : *European Control Conference*. 1999, p. 1693-1698.
- [FEB16] Hassen FOURATI, Djamel EDDINE et Chouaib BELKHIAT. *Multisensor Attitude Estimation : Fundamental Concepts and Applications*. Boca Raton : CRC Press LLC, Florence : Taylor & Francis Group, 2016.
- [Fos02] Thor I. FOSSEN. *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetix AS, 2002. ISBN : 82-92356-00-2.
- [Fos11] Thor I. FOSSEN. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley et Sons Ltd, 2011.

- [GD10] Christopher GEYER et Kostas DANILIDIS. « Catadioptric Projective Geometry ». In : *Int. Journal on Computer Vision* 45.3 (2010), p. 223-243.
- [Gri+12] Håvard Fjær GRIP, Thor I. FOSSEN, Tor A. JOHANSEN et Ali SABERI. « Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements With Time-Varying Reference Vectors ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), p. 1332-1338.
- [Gro13] Paul GROVES. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 2013.
- [HCO17] Inhwan HWANG, Geonho CHA et Songhwai OH. « Multi-modal Human Action Recognition Using Deep Neural Networks Fusing Image and Inertial Sensor Data ». In : *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2017.
- [HHS17] Minh Duc HUA, Tarek HAMEL et Claude SAMSON. « Riccati Nonlinear Observer for Velocity-aided Attitude Estimation of Accelerated Vehicles Using Coupled Velocity Measurements ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2017, p. 2428-2433.
- [HM13] Xiaolei HOU et Robert MAHONY. « Dynamic Kinesthetic Boundary for Haptic Teleoperation of Aerial Robotic Vehicles ». In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, p. 4549-4950.
- [Hua+19] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Feature-based Recursive Observer Design for Homography Estimation and Its Application to Image Stabilization ». In : *Asian Journal of Control* 21.4 (2019), p. 1443-1458.
- [Hua+20] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Nonlinear Observer Design on  $SL(3)$  for Homography Estimation By Exploiting Point and Line Correspondences With Application to Image Stabilization ». In : *to be published in Automatica* (2020).
- [Hua09] Minh Duc HUA. « Contributions to the Automatic Control of Aerial Vehicles ». Thèse de doct. University of Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- [Hua10] Minh-Duc HUA. « Attitude Estimation for Accelerated Vehicles using GPS/INS Measurements ». In : *Control Engineering Practice* 18 (2010), p. 723-732.
- [HZ03] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [IP09] Alexander INZARTSEV et Alexander PAVIN. *AUV Application for Inspection of Underwater Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [IY20] Daisuke INOUE et Hiroaki YOSHIDA. « Model Predictive Control for Finite Input Systems Using the D-Wave Quantum Annealer ». In : *Quantum Machine Intelligence* 10.1591 (2020).
- [Jen11] Kenneth JENSEN. « Generalized Nonlinear Complementary Attitude Filter ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.5 (2011), p. 1588-1592.
- [JU04] Simon J. JULIER et Jeffrey K. UHLMANN. « Unscented Filtering and Nonlinear Estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.
- [KA05] Thomas R. KANE et Levinson David A. *Dynamics : Theory and Applications*. McGraw-Hill, NY, 2005.

- [Kac49] Marck KAC. « On Distributions of Certain Wiener Functionals ». In : *Transactions of the American Mathematical Society* 65.1 (1949), p. 200-201.
- [Kap05] Hilbert J. KAPPEN. « Path Integrals and Symmetry Breaking for Optimal Control Theory ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 11 (2005), P11011.
- [Kru+17] Szymon KRUPÍNSKI, Guillaume ALLIBERT, Minh-Duc HUA et Tarek HAMEL. « An Inertial-Aided Homography-based Visual Servo Control Approach for (Almost) Fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.5 (2017), p. 1041-1060.
- [Kru14] Szymon KRUPÍNSKI. « Offshore Structure Following By Means of Sensor Servoing and Sensor Fusion ». Thèse de doct. Laboratoire I3S, Université de Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [LBH15] Yann LE CUN, Yoshua BENGIO et Geoffrey HINTON. « Deep learning ». In : *Nature* 521.7553 (2015), p. 436-444.
- [Leo97] Naomi Ehrich LEONARD. « Stability of a Bottom-Heavy Underwater Vehicle ». In : *Automatica* 33.3 (1997), p. 331-246.
- [LLT00] Jean-François LOTS, David LANE et Emmanuele TRUCCO. « Application of 2 1/2 D Visual Servoing to Underwater Vehicle Station-keeping ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. T. 2. 2000, p. 1257-1264.
- [Lot+01] Jean-François LOTS, David LANE, Emmanuele TRUCCO et François CHAUMETTE. « A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2001, p. 2767-2772.
- [Mah+09] Robert MAHONY, Tarek HAMEL, Jochen TRUMPF et Christian LAGEMAN. « Non-linear Attitude Observers on SO(3) for Complementary and Compatible Measurements : a Theoretical Study ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009, p. 6407-6412.
- [Mar03] Francis Landis MARKLEY. « Attitude Error Representations for Kalman Filtering ». In : *Journal of Guidance Control and Dynamics* 26 (2003), p. 311-317.
- [MCB99] Ezio MALIS, François CHAUMETTE et Sylvie BOUDET. « 2 1/2D Visual Servoing ». In : *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15.2 (1999), p. 238-250.
- [MD16] Michael MUEHLEBACH et Raffaello D'ANDREA. « Parametrized Infinite-horizon Model Predictive Control for Linear Time-Invariant Systems With Input and State Constraints ». In : *American Control Conference*. 2016, p. 2669-2674.
- [MH05] Robert MAHONY et Tarek HAMEL. « Image-based Visual Servo Control of Aerial Robotic Systems Using Linear Image Features ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21.2 (2005), p. 227-239.
- [MHP08] Robert MAHONY, Tarek HAMEL et Jean Michel PFLIMLIN. « Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.5 (2008), p. 1203-1217.
- [MHP15] Lorenz MEIER, Dominik HONEGGER et Marc POLLEFEYS. « PX4 : a Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015, p. 6235-6240.

- [MLS94] Richard M. MURRAY, Zexiang LI et S. Shankara SASTRY. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [MV07] Ezio MALIS et Manuel VARGAS. *Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-based Control*. INRIA Research report, RR-6303, 2007.
- [MV17] Matthias MÖLLER et Cornelis VUIK. « On the Impact of Quantum Computing Technology on Future Developments in High-performance Scientific Computing ». In : *Ethics and Information Technology* 19.4 (2017), p. 253-269.
- [MY95] Shigetaka MATSUMOTO et Ito YOSHIHIKO. « Real-Time Vision-Based Tracking of Submarine-cables for AUV/ROV ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 1995, p. 1997-2002.
- [MZ83] Manfred MORARI et Evangelos ZAFIRIOU. *Robust Control*. Paris, France : Dunod, 1983.
- [Ngu+20] Lam Hung NGUYEN, Minh Duc HUA, Guillaume ALLIBERT et Tarek HAMEL. « A Homography-based Dynamic Control Approach Applied to Station Keeping of Autonomous Underwater Vehicles Without Linear Velocity Measurements ». In : *To appear in IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2020).
- [Pet+19] Christina PETSCHNIGG, Mathias BRANDSTÖTTER, Horst PICHLER, Michael HOFBAUR et Bernhard DIEBER. « Quantum Computation in Robotic Science and Applications ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. 2019, p. 803-810.
- [PL01] Elena PANTELEY et Antonio LORÍA. « Growth Rate Conditions for Uniform Asymptotic Stability of Cascaded Time-varying Systems ». In : *Automatica* 37.3 (2001), p. 453-460.
- [Plü65] Julius PLÜCKER. « On a new geometry of space ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (1865), p. 725-791.
- [RB97] Patrick RIVES et Jean Jacques BORRELLY. « Underwater Pipe Inspection Task Using Visual Servoing Techniques ». In : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1997, p. 63-68.
- [Rib+12] David RIBAS, Narcis PALOMERAS, Pere RIDAO, Marc CARRERAS et Angelos MALLIOS. « Girona 500 AUV : From Survey to Intervention ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1.17 (2012), p. 46-53.
- [Sal91] Septimiu E. SALCUDEAN. « A Globally Convergent Angular Velocity Observer for Rigid Body Motion ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.12 (1991), p. 1493-1497.
- [SER91] Claude SAMSON, Bernard ESPIAU et Patrick RIVES. *Robot Control : the Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [Ste94] Robert F. STENGEL. *Optimal Control and Estimation*. Dover, 1994. ISBN : 0-486-68200-5.
- [Sto51] George Gabriel STOKES. « On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums ». In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 99.8 (1851), p. 1-10.
- [Tan+17] Prateek TANDON, Stanley LAM, Ben SHIH, Tanay MEHTA, Alex MITEV et Zhiyang ONG. *Quantum Robotics : a Primer on Current Science and Future Perspectives*. Morgan & Claypool, 2017.

- [THS69] N. F. TODA, J. L. HEISS et F. H. SCHLEE. « SPARS : the System, Algorithm, and Test Results ». In : *Proceedings of the Symposium on Spacecraft Attitude Determination*. 1969, p. 361-370.
- [TRB11] Abdelhamid TAYEBI, Andrew ROBERTS et Abdelaziz BENALLEGUE. « Inertial Measurements Based Dynamic Attitude Estimation and Velocity-free Attitude Stabilization ». In : *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. 2011, p. 1027-1032.
- [WAT17] Grady WILLIAMS, Andrew ALDRICH et Evangelos A. THEODOROU. « Model Predictive Path Integral Control : From Theory to Parallel Computation ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (2017), p. 344-357.
- [WN18] Weiyue WANG et Ulrich NEUMANN. « Depth-aware CNN for RGB-D Segmentation ». In : *ECCV*. 2018.
- [WSN87] Leland WEISS, Arthur SANDERSON et Charles P. NEUMAN. « Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 3.5 (1987), p. 404-417.
- [ZBS02] Sjoerd van der ZWAAN, Alexandre BERNARDINO et José SANTOS-VICTOR. « Visual Station Keeping for Floating Robots In Unstructured Environments ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 39 (2002), p. 145-155.
- [Zha+20] Chaoqiang ZHAO, Qiyu SUN, Chongzhen ZHANG, Yang TANG et Feng QIAN. *Monocular depth estimation based on deep learning : An overview*. Sci. China Technology, 2020.

# Observation d'état pour la robotique aérienne

La robotique mobile, qu'elle soit aérienne, terrestre ou sous-marine, a connu un intérêt croissant au cours des dernières décennies. La principale raison vient de ses remarquables capacités à aider les humains dans une variété de tâches difficiles et dangereuses. Parmi les exemples d'application en robotique aérienne (un panorama est donné pour la robotique sous-marine dans le chapitre 4), on peut citer l'espace, la surveillance et l'inspection de structures (gratte-ciel, barrage, etc.), les environnements dangereux ou toxiques (centrale nucléaire, prise d'otages, etc.), et bien d'autres. Toutes ces applications nécessitent que les véhicules aériens aient un niveau d'autonomie et de manœuvrabilité important.

Le contrôle de ces engins, qu'il soit autonome ou supervisé par un opérateur humain, nécessite de connaître de l'état du robot. Cependant, il n'existe pas de capteurs physiques permettant de mesurer directement la totalité des états. Le recours à l'observation de l'état par des capteurs logiciels devient donc indispensable pour le bon fonctionnement des drones aériens. En effet, ces systèmes sont instables en boucle ouverte. Pour les piloter facilement, *a fortiori* pour les faire fonctionner de manière optimale et autonome (pilotage manuel "assisté" à distance en retour vidéo, suivi automatique de points de passage, évitement d'obstacles, etc.), il est donc nécessaire de les stabiliser par une stratégie de commande en boucle fermée. Quelle qu'elle soit, cette stratégie de commande utilise forcément de manière directe ou indirecte une observation de l'état.

Pour calculer cette estimation, de nombreux capteurs sont susceptibles d'être utilisés, avec leurs avantages et inconvénients : capteurs inertiels (accéléromètre et gyromètre), GPS, magnétomètre, capteur de pression, télémètre, radar Doppler, système de vision, etc. Les informations provenant des différents capteurs sont ensuite fusionnées en temps réel par l'algorithme d'observation avec le modèle dynamique du système, afin de fournir une estimation de l'état du drone. Il existe une vaste littérature sur le sujet, en particulier dans le domaine aéronautique et spatial. A titre d'exemple, on peut citer les ouvrages récents [Gro13 ; FEB16]. Parmi les difficultés que soulèvent les drones aériens de petites tailles, celle qui concerne la faible autonomie énergétique est la plus contraignante. Elle impose l'utilisation de capteurs légers et de faible encombrement, qui sont généralement peu précis et délivrent des informations très bruitées. Par conséquent, les estimateurs d'état développés doivent être très performants.

La suite de cette introduction n'a pas pour objectif de faire un état de l'art complet des algorithmes d'observation d'attitude faits pour la robotique aérienne jusqu'à présent. Le lecteur intéressé pourra se tourner vers les ouvrages cités précédemment, qui font une synthèse complète. Nous nous contenterons donc de rappeler les principales classes d'observateurs d'attitude afin de situer clairement les contributions que nous avons apportées.

L'émergence de la théorie du filtrage de Kalman a conduit au développement d'une large

catégorie d’observateurs d’attitude, qui a révolutionné l’estimation d’état et l’estimation de paramètres en robotique aérienne. Les formes non-linéaires de ces filtres, connues sous le nom de filtre de Kalman étendus (EKF), permettent d’estimer avec précision l’attitude mais également la position et la vitesse de l’objet volant. Ils sont actuellement implémentés par défaut sur de nombreux auto-pilotes *open-source* (PX4, Ardupilot, etc.). Les filtres de Kalman étendus les plus populaires sont le *Multiplicative EKF* [Mar03], et l’*Additive EKF* [BO85]. Ces deux observateurs ont été appliqués aux problèmes d’estimation d’attitude, dont le plus connu est le système de référence de précision spatiale d’IBM (SPARS) [THS69] utilisé par la NASA.

Malgré la très grande popularité des filtres de Kalman étendus, leur dépendance à la linéarisation des équations du système est un inconvénient majeur qui peut entraîner des problèmes de convergence. Par conséquent, de nombreuses recherches ont été menées afin de proposer des filtres qui ne nécessitent plus cette étape de linéarisation. Plusieurs alternatives ont alors été proposées aux EKF standards, tels que les *Unscented Kalman Filter* [JU04] (UKF) et les filtres particuliers [CC04]. Les premiers, également connus sous le nom de filtres sigma-point, sont essentiellement basés sur des approximations de second ordre de fonctions non-linéaires, qui sont utilisées pour estimer la moyenne et la covariance du vecteur d’état. Bien que la moyenne et la covariance soient suffisantes pour représenter une distribution gaussienne, elles ne le sont pas pour représenter une distribution de probabilité générale. Il est alors possible de remédier à ce problème en utilisant des filtres particuliers. Récemment, de nouvelles définitions d’erreurs d’estimation ont été proposées. L’intérêt de ces nouvelles définitions est d’utiliser l’invariance du système non-linéaire vis à vis de transformations géométriques comme les rotations et les translations. Ces nouvelles erreurs invariantes sont alors utilisées dans le schéma récursif du filtre de Kalman étendu, afin d’en élargir son domaine de convergence [BMS09].

Au cours de la dernière décennie, une nouvelle classe d’estimateur d’attitude non-linéaire a également vu le jour. Ces observateurs permettent d’obtenir des preuves rigoureuses de stabilité avec un large domaine de convergence, ce qui leur confèrent un avantage considérable par rapport aux techniques classiques développées jusqu’à présent. Le premier observateur avec une structure non-linéaire a été proposé par [Sal91]. Depuis, il a inspiré un certain nombre de chercheurs et a donné naissance à une variété importante d’observateurs non-linéaires. Avec ces nouveaux algorithmes, il est possible d’estimer l’attitude mais également d’autres états tels que la position et/ou les vitesses et/ou des paramètres inconnus (biais de capteurs, etc.). En pratique, ils ont montré de très bonnes performances, même lorsque les signaux d’entrées sont fortement bruités. De plus, ils sont facilement implémentables en temps réel et nécessitent peu des ressources de calcul, contrairement aux filtres de Kalman.

L’un des plus connus est incontestablement le filtre complémentaire non-linéaire proposé dans [MHP08]. Cet observateur repose sur la connaissance d’au moins deux vecteurs non colinéaires<sup>1</sup> dans le repère inertiel et la mesure de leurs correspondants dans le repère du véhicule.

Dans la plupart des cas, le premier vecteur considéré est celui de la gravité, connue dans le repère inertiel. Un accéléromètre embarqué sur le véhicule permet, sous condition de faibles accélérations dans le repère du véhicule, de mesurer la direction de la gravité dans le repère du véhicule. Le deuxième vecteur considéré est le champ magnétique terrestre, lui aussi connu dans le repère inertiel. Dans le repère du véhicule, il est mesuré à l’aide d’un magnétomètre. Ces deux vecteurs, associés au modèle dynamique de l’engin et aux vitesses

---

1. Sous la condition d’excitation permanente, il a été montré dans [Mah+09] que la connaissance d’un seul vecteur pouvait être suffisante pour reconstruire l’attitude complète.

angulaires mesurées par un gyromètre, sont suffisants pour estimer avec précision l'attitude du drone ainsi que les biais du gyromètre. L'étude de la stabilité de ce filtre, basée sur les fonctions de Lyapunov, permet d'exhiber une convergence exponentielle du point d'équilibre pour presque toutes les conditions initiales. Ces premiers travaux ont alors donné naissance à quelques variantes [Jen11 ; Gri+12 ; TRB11].

Dans le cas où les véhicules sont soumis à de fortes accélérations (c'est le cas par exemple lors de manœuvres agressives), l'hypothèse consistant à supposer que la mesure de l'accéléromètre est une bonne estimation de la direction de la gravité n'est plus vérifiée. L'estimation de l'attitude devient alors inexacte et inutilisable dans une boucle de contrôle. Une possibilité pour compenser ce manque d'informations est alors d'ajouter une mesure supplémentaire. La plus courante et la plus facile est d'utiliser la mesure des vitesses linéaires. Cette stratégie est connue sous le nom d'estimateur d'attitude basé sur la vitesse (*Velocity-Aided Attitude Estimation*, VAAE). La mesure des vitesses linéaires peut-être faite dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  à l'aide d'un GPS par exemple, mais également dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à l'aide de capteurs standards embarqués sur le drone.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons des observateurs basés vitesse pour la robotique aérienne. Nous ferons dans un premier temps un bref rappel sur les objectifs et la modélisation. Les observateurs seront ensuite donnés et validés expérimentalement.

### 3.1 Modélisation et formulation du problème

Afin de définir le modèle non-linéaire du quadrotor qui sera utilisé par l'observateur dans la suite, nous allons considérer deux repères. Le premier  $\{\mathcal{A}\} = \{O; \vec{e}_1^a, \vec{e}_2^a, \vec{e}_3^a\}$  est fixe, attaché à la Terre, avec l'axe  $\vec{e}_3^a$  orienté vers le bas (perpendiculairement à la surface de la Terre). Le second  $\{\mathcal{B}\} = \{B; \vec{e}_1^b, \vec{e}_2^b, \vec{e}_3^b\}$  est mobile et attaché au centre de gravité du drone (cf. Figure 3.1). Il suit les conventions classiques de l'aéronautique ( $\vec{e}_1^b$  pointe vers l'avant du véhicule, l'axe  $\vec{e}_3^b$  est orienté vers le bas, et l'axe  $\vec{e}_2^b$  complète le repère direct).



Figure 3.1 – Le quadrotor ainsi que les repères de référence  $\{\mathcal{A}\}$  et  $\{\mathcal{B}\}$

En toute rigueur, bien qu'un drone aérien soit toujours constitué de plusieurs corps, l'ap-

proximation du corps rigide est néanmoins valable. Ceci se justifie par le fait que les hélices sont de masse négligeable par rapport à la masse de l'ensemble et que les parties en rotation ne modifient pas la position du centre de masse. Pour la modélisation, on considère que la Terre est plate, qu'elle ne tourne pas, et qu'elle constitue un repère galiléen. On suppose enfin que la gravité est constante. Ces hypothèses sont tout à fait justifiées dans le cadre de l'estimation de l'état d'un mini-drone aérien.

Le modèle dynamique d'un corps rigide tel qu'un véhicule aérien est composé d'une partie liée à la rotation et d'une partie liée à la translation. En fonction du choix fait pour la paramétrisation de l'attitude, l'équation cinématique de la rotation peut être écrite sous différentes formes : matrice de rotation, angles d'Euler, quaternion, etc. Si l'on note  $\boldsymbol{\Omega}$  le vecteur des vitesses angulaires du corps exprimé dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ , les équations complètes de la dynamique de rotation<sup>2</sup> sont données par :

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\boldsymbol{\Omega}_\times \quad (3.1a)$$

$$\mathbf{J}_B \dot{\boldsymbol{\Omega}} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_B \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Gamma}, \quad (3.1b)$$

où  $\mathbf{R}$  est la matrice de rotation qui définit l'orientation du repère mobile  $\{\mathcal{B}\}$  par rapport au repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$ ,  $\mathbf{J}_B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  est la matrice d'inertie du corps rigide exprimée au centre de gravité du repère  $\{\mathcal{B}\}$  et  $\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{R}^3$  est le vecteur de couple de contrôle appliqué au corps rigide. En pratique, le couple de contrôle est calculé en fonction de la stratégie de contrôle choisie et il est fonction de l'estimation de l'état du véhicule et de ses paramètres.

Soit  $\boldsymbol{\xi} \in \mathbb{R}^3$  et  $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$  respectivement la position et la vitesse du corps rigide exprimées dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Les équations complètes de la dynamique de translation sont données par :

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{v} \quad (3.2a)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = g\mathbf{e}_3 + \mathbf{R}\mathbf{a} \quad (3.2b)$$

où  $\mathbf{a}$ , exprimé dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ , est le vecteur d'accélération spécifique qui représente la somme de toutes les forces non gravitationnelles appliquées au corps rigide divisée par sa masse.  $g\mathbf{e}_3$  est l'accélération gravitationnelle exprimée dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . En utilisant les relations cinématiques (3.1a) et (3.2a), il est possible d'exprimer l'équation (3.2b) dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . On vérifie alors :

$$\dot{\mathbf{V}} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + g\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3 + \mathbf{a} \quad (3.3)$$

où  $\mathbf{V}$  est le vecteur des vitesses linéaires du corps rigide, exprimé dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Dans ce chapitre, on propose de s'intéresser aux observateurs d'attitude basés vitesse afin d'obtenir, dans un seul algorithme, une estimation de l'attitude du corps rigide ainsi que le filtrage des vitesses linéaires. Plus précisément, nous considérons ici le cas où la mesure des vitesses linéaires est donnée dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Ce choix se justifie pour plusieurs raisons. Premièrement, nous souhaitons que l'estimation de l'attitude et le filtrage des vitesses linéaires se fassent dans le cas le plus général possible. Cela nous limite donc à l'utilisation de capteurs indispensables à l'autonomie d'un drone tels qu'une centrale inertielle (combinant accéléromètre, gyromètre) ainsi qu'un magnétomètre et un baromètre. Ce choix nous permet de nous affranchir de l'utilisation d'un GPS, pas toujours disponible dans les environnements encombrés ou à l'intérieur des bâtiments, mais également des techniques de visions avancées qui nécessitent des conditions particulières d'éclairage et des environnements texturés. Deuxièmement, il est courant dans les phases d'exploration en mode télé-opéré par

---

2. La matrice de rotation est choisie comme paramétrisation de l'attitude.

exemple, que l'engin volant soit contrôlé en vitesse par un opérateur virtuellement immergé sur le drone. Le contrôleur en vitesse prend alors généralement comme entrée les vitesses estimées et les vitesses de référence fournies par le pilote, toutes deux exprimées dans le repère l'engin.

Les observateurs proposés dans la suite sont basés d'une part sur les équations de la dynamique du corps rigide données par les équations (3.1a) et (3.3) et d'autre part sur un ensemble de grandeurs physiques mesurées par des capteurs embarqués sur le véhicule. Seuls des capteurs à bas coût standard sont utilisés, dont une liste et une description succincte sont données ci-dessous. Le lecteur intéressé trouvera dans [Gro13] une étude exhaustive de ces différents senseurs.

- **Accéléromètre** : l'accéléromètre triaxial<sup>3</sup> permet de mesurer l'accélération spécifique du corps rigide dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Si l'on note  $\mathbf{a}$  l'accélération spécifique, alors la mesure du capteur est donnée par :

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}^\top (\dot{\mathbf{v}} - g\mathbf{e}_3) + \mathbf{a}_n + \boldsymbol{\beta}^a, \quad (3.4)$$

avec  $\mathbf{a}_n$  un bruit de mesure et  $\boldsymbol{\beta}^a$  un biais de mesure. Dans le cas de faibles accélérations du corps mobile dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ , la direction de la gravité dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  peut être estimée à partir de la mesure de l'accélération spécifique. De nombreux algorithmes d'estimation d'attitude sont basés sur cette hypothèse qui, associée à la mesure d'un gyromètre, permet d'estimer les angles de roulis et de tangage [MHP08]. Dans le cas où le corps rigide ne respecte pas la condition de faibles accélérations, l'hypothèse précédente n'est plus vérifiée et l'accéléromètre ne peut plus être considéré comme un capteur de direction de la gravité dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ .

- **Gyromètre** : le gyroscope triaxial permet de mesurer les vitesses angulaires d'un corps rigide par rapport au repère  $\{\mathcal{A}\}$  et exprimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Si l'on note  $\boldsymbol{\Omega}$  la vitesse angulaire, alors la mesure du capteur est donnée par :

$$\boldsymbol{\Omega}_m = \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega}_n + \boldsymbol{\beta}^\Omega \quad (3.5)$$

où  $\boldsymbol{\Omega}_n$  est un bruit de mesure et  $\boldsymbol{\beta}^\Omega$  un biais de mesure, constant ou temps variant avec une dynamique lente. Dans la plupart des cas, on considère que  $\boldsymbol{\beta}^\Omega \approx 0$ .

- **Magnétomètre** : le magnétomètre triaxial permet de mesurer la projection du champ magnétique terrestre dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Ce champ magnétique est considéré constant<sup>4</sup> dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Le champ magnétique terrestre étant relativement faible, la mesure du capteur peut être facilement perturbée par des objets ferromagnétiques. Ce capteur doit donc être utilisé avec prudence en intérieur ou à proximité des bâtiments. Si l'on note  $\mathbf{m}_B$  le champ magnétique dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ , alors la mesure du capteur est donnée par :

$$\mathbf{m}_y = \mathbf{m}_B + \mathbf{m}_n = \mathbf{R}^\top \mathbf{m}_A + \mathbf{m}_n \quad (3.6)$$

où  $\mathbf{m}_A$  est le champ magnétique terrestre constant dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  et  $\mathbf{m}_n$  un bruit de mesure.

- **Capteur de pression** : le capteur de pression permet de mesurer une estimation de l'altitude barométrique. La résolution n'est, au mieux, que d'une dizaine de centimètres ce qui en fait une mesure difficile à exploiter. De plus, la mesure de la pression peut être perturbée par la voilure tournante du drone. Ce type de capteur peut néanmoins être utilisé pour estimer de manière relativement correcte la vitesse verticale.

---

3. C'est-à-dire trois accéléromètres positionnés de manière orthogonale.

4. Il dépend néanmoins de la latitude et en moindre mesure de l'altitude.

Dans la plupart des observateurs non-linéaires classiques, l'attitude (ou une partie de l'attitude) est obtenue à partir de la mesure dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  d'un vecteur connu et constant dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . La projection de ce vecteur dans le repère du corps, qui dépend de l'orientation, permet alors d'estimer deux des trois angles de l'attitude. En pratique, c'est la direction de la gravité qui est majoritairement utilisée. En faisant l'hypothèse de faibles accélérations dans le repère inertiel, la direction de la gravité  $\gamma$  dans le repère corps se déduit facilement à partir de la mesure des données de l'accéléromètre :

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}^\top \left( \underbrace{\dot{\mathbf{v}}}_{\approx 0} - g\mathbf{e}_3 \right) + \mathbf{a}_n \approx -g\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3 \quad (3.7a)$$

$$\gamma = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \quad (3.7b)$$

Dans le cas plus complexe où l'hypothèse de faibles accélérations dans  $\{\mathcal{A}\}$  n'est plus valide, l'accélération linéaire dans le repère inertiel  $\dot{\mathbf{v}}$  devient inconnue. Il est alors nécessaire de coupler la mesure de l'accéléromètre à une mesure des vitesses linéaires du véhicule pour estimer de manière correcte l'attitude du drone. Cette stratégie est connue sous le nom d'estimation d'attitude basée vitesse. En plus d'une estimation de l'attitude à haute fréquence, ces estimateurs permettent de filtrer la mesure des vitesses linéaires afin d'éliminer les bruits de mesure, et de pouvoir utiliser ces grandeurs directement dans les boucles de contrôle.

Du point de vue pratique, la mesure des vitesses linéaires peut s'obtenir facilement à partir d'un capteur GPS<sup>5</sup>, qui fournit à une fréquence d'environ  $10[\text{Hz}]$ , la position et les vitesses du corps dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Dans le cas où les signaux GPS ne sont pas disponibles et les techniques de vision ne sont pas exploitables, il devient alors nécessaire de pré-estimer les vitesses linéaires afin de les exploiter dans le VAAE.

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons deux observateurs d'attitude et de vitesses non-linéaires avec un domaine de convergence quasi-globale. La pré-estimation des vitesses linéaires du drone dans le repère du corps est obtenue à partir des capteurs standards indispensables à l'autonomie du drone, c'est à dire un accéléromètre, un gyromètre, un magnétomètre et un baromètre.

## 3.2 Observateurs proposés

La conception des observateurs proposés ici est basée sur une relaxation de l'espace de l'état de l'observateur. On propose, plutôt que d'estimer directement la matrice  $\hat{\mathbf{R}} \in SO(3)$ , d'ajouter un degré de liberté afin d'estimer une matrice de rotation "à l'échelle", notée  $\mathbf{X} = u\hat{\mathbf{R}}$  avec  $u \in \mathbb{R}^+$  un scalaire strictement positif. Cette relaxation permet de simplifier grandement l'analyse de la stabilité des observateurs proposés par rapport aux approches données dans [Hua10] et ses références.

Un des avantages importants est que la norme de l'estimation  $\|\mathbf{X}\| = u$  converge exponentiellement vers l'unité, et l'erreur  $\|\mathbf{X}\| - 1$  devient alors une excellente mesure de la convergence de l'observateur pendant le régime transitoire. Il est bien sûr trivial de remonter à l'estimation de la "vraie" matrice de rotation estimée  $\hat{\mathbf{R}}$  à partir de  $\mathbf{X}$  :

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{X}}{\|\mathbf{X}\|}.$$

---

5. Il existe bien d'autres capteurs permettant de fournir les vitesses linéaires dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  : le LIDAR, l'estimation du flux optique, la stéréo-vision, etc.

Les observateurs proposés dans la suite sont basés sur ce degré de liberté supplémentaire avec sa dynamique associée, et permettent d’obtenir une analyse simple de la stabilité, basée sur la théorie de Lyapunov, avec des résultats de convergence quasi-globale.

**Hypothèse 1** *Considérons que la trajectoire du véhicule est suffisamment lisse pour que  $\Omega(t)$ ,  $\dot{\Omega}(t)$ ,  $\mathbf{V}(t)$  et  $\dot{\mathbf{V}}(t)$  soient bornés.*

**Hypothèse 2** *Considérons que le véhicule est équipé d’une centrale inertielle, composée d’un accéléromètre et d’un gyromètre. On considère également qu’une mesure des vitesses linéaires (pouvant être fortement bruitées et à basse fréquence) exprimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  est disponible.*

### Remarque 1

- L’hypothèse 2 n’est pas restrictive en pratique. Dans la section 3.3, plusieurs propositions sont données afin de pré-estimer ces vitesses à partir des capteurs standards embarqués sur le drone.
- Dans la suite, nous distinguerons les vitesses réelles et les vitesses mesurées du drone, entachées de bruits de mesure. Les premières sont notées  $\dot{\mathbf{V}}(t)$  tandis que les secondes sont notées  $\mathbf{V}(t)$ .

**Proposition 1** *Soit le système (3.3) avec  $\Omega$ ,  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{V}$  des signaux mesurés et  $k_1, k_2 > 0$  des scalaires positifs. Soit l’observateur suivant :*

$$\dot{\hat{\mathbf{V}}} = -\Omega_{\times} \hat{\mathbf{V}} + g\mathbf{X}^{\top} \mathbf{e}_3 + \mathbf{a} - k_1(\hat{\mathbf{V}} - \mathbf{V}), \quad \hat{\mathbf{V}}(\mathbf{0}) = \mathbf{V}(\mathbf{0}), \quad (3.8a)$$

$$\mathbf{X} = u\hat{\mathbf{R}}, \quad (3.8b)$$

$$\dot{u} = -gk_2 \tilde{\mathbf{V}}^{\top} \hat{\mathbf{R}}^{\top} \mathbf{e}_3, \quad u(\mathbf{0}) = 1, \quad (3.8c)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{R}}} = \hat{\mathbf{R}}\Omega_{\times} - \frac{gk_2}{u}(\hat{\mathbf{R}}\tilde{\mathbf{V}} \times \mathbf{e}_3)_{\times} \hat{\mathbf{R}}, \quad \hat{\mathbf{R}}(\mathbf{0}) = \mathbf{I}_3, \quad (3.8d)$$

où  $\tilde{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}} - \mathbf{V}$  et  $\mathbf{X}$  est considéré comme une matrice de rotation à l’échelle. Considérons que l’Hypothèse 1 est vérifiée. Alors, les propriétés suivantes sont vérifiées :

1. pour presque toutes les conditions initiales, l’estimation des vitesses  $\hat{\mathbf{V}}$  converge vers  $\dot{\mathbf{V}}(t)$  et l’estimation de  $\hat{\mathbf{R}}^{\top} \mathbf{e}_3$  converge vers  $\mathbf{R}^{\top} \mathbf{e}_3$  ;
2. l’équilibre  $(\tilde{\mathbf{V}}, \tilde{\mathbf{R}}^{\top} \mathbf{e}_3) = (0, \mathbf{e}_3)$ , avec  $\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{R}}^{\top}$ , est localement exponentiellement stable.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [AMB16, Theo.1]. L’analyse de stabilité est déterministe et se base sur l’hypothèse que  $\mathbf{V}(t) = \dot{\mathbf{V}}(t)$

Le résultat obtenu dans la Proposition 1 peut être amélioré en ajoutant une mesure vectorielle. En effet, si toutes les composantes des vitesses linéaires sont filtrées, seule l’attitude partielle (correspondant aux angles de roulis et de tangage) est déduite. Néanmoins, l’attitude complète peut être facilement obtenue avec l’aide d’un capteur basique supplémentaire, tel qu’un magnétomètre.

**Hypothèse 3** *Soit un vecteur unitaire connu dans le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$  et noté  $\mathbf{m} \in \mathbb{S}^2$ . Considérons que la mesure de  $\mathbf{m}$  dans  $\{\mathcal{B}\}$ , c’est-à-dire  $\mathbf{R}^{\top} \mathbf{m}$ , peut être obtenue par l’intermédiaire d’un capteur embarqué.*

**Théorème 1** *Considérons l'observateur proposé dans la Proposition 1 avec les Hypothèses 1 et 2. Soit  $\mathbf{m}_B = \mathbf{R}^\top \mathbf{m}$ , la mesure de  $\mathbf{m}$  dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  satisfaisant l'Hypothèse 3. Soit la nouvelle dynamique de  $\hat{\mathbf{R}}$  donnée par :*

$$\dot{\hat{\mathbf{R}}} = \hat{\mathbf{R}}\Omega_\times - \frac{gk_2}{u}(\hat{\mathbf{R}}\tilde{\mathbf{V}} \times \mathbf{e}_3)_\times \hat{\mathbf{R}} + k_3 \hat{\mathbf{R}}(((\mathbf{m}_B \times \hat{\mathbf{m}}_B)^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{e}_3)\mathbf{X}^\top \mathbf{e}_3)_\times, \quad \hat{\mathbf{R}}(0) = \mathbf{I}_3 \quad (3.9)$$

avec  $\hat{\mathbf{m}}_B = \hat{\mathbf{R}}^\top \mathbf{m}$  et  $k_3$  un scalaire positif. Alors, les propriétés suivantes sont vérifiées :

1. pour presque toutes les conditions initiales, les estimations de  $\hat{\mathbf{V}}(t)$  convergent vers  $\mathbf{V}(t)$  et l'estimation de  $\hat{\mathbf{R}}^\top \mathbf{e}_3$  converge vers  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$  ;
2. l'équilibre  $(\tilde{\mathbf{V}}, \tilde{\mathbf{R}}) = (0, \mathbf{I}_3)$  est localement exponentiellement stable et quasi-globalement asymptotiquement stable. Donc, pour presque toutes les conditions initiales  $(\hat{\mathbf{V}}(0), \hat{\mathbf{R}}(0))$ , les trajectoires de  $(\hat{\mathbf{V}}(t), \hat{\mathbf{R}}(t))$  convergent vers les trajectoires du système  $(\mathbf{V}(t), \mathbf{R}(t))$ .

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [AMB16, Theo.2]

Il est important de noter que pour les deux observateurs proposés, le facteur d'échelle  $u$  converge vers l'unité. Dans le cas où les estimations de vitesses sont utilisées dans une boucle de contrôle, ce facteur d'échelle peut être utilisé comme un critère de qualité des estimations. Il peut également servir de paramètre de commutation vers un contrôleur plus "sécurisé" afin d'éviter un éventuel accident.

**Remarque 2** *Les magnétomètres sont connus pour être sensibles aux matériaux ferreux ou aux champs magnétiques provoqués par les aimants ou les moteurs électriques, par exemple. Afin de ne pas propager cette erreur de mesure sur l'estimation globale de l'attitude lorsqu'un magnétomètre est utilisé pour satisfaire l'Hypothèse 3, le terme d'innovation  $k_3 \hat{\mathbf{R}}(((\mathbf{m}_B \times \hat{\mathbf{m}}_B)^\top \mathbf{X}^\top \mathbf{e}_3)\mathbf{X}^\top \mathbf{e}_3)_\times$  ajouté dans l'équation (3.9) est orthogonal à  $\hat{\mathbf{R}}^\top \mathbf{e}_3$ . Ce choix judicieux permet d'obtenir un découplage de l'estimation des angles de roulis et de tangage vis à vis de la mesure du magnétomètre.*

### 3.3 Validation expérimentale

Dans cette section, nous proposons de valider expérimentalement l'observateur donné dans la section 3.2 de deux manières différentes :

1. la première est une application directe du Théorème 1. La mesure des informations des capteurs est utilisée pour pré-estimer, dans un premier temps, les vitesses linéaires du drone dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . L'observateur est alors exécuté en temps réel pour estimer l'attitude et filtrer les vitesses linéaires du drone dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Des résultats expérimentaux et une comparaison avec des mesures obtenues par un système de capture de mouvement permettent de conclure sur les performances de l'observateur ;
2. la deuxième propose une approche plus globale. Dans un premier temps, on propose une extension de l'observateur attitude/vitesses dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  proposé dans le Théorème 1 à un observateur attitude/vitesses dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Ces deux observateurs sont alors couplés pour estimer, en plus de l'attitude et des vitesses linéaires dans les deux repères, le vent. Les estimations obtenues sont utilisées dans une boucle de contrôle. Le cas d'étude considéré ici est la téléopération d'un drone contrôlé en vitesse par un opérateur humain.

La validation de l'observateur nécessite, dans tous les cas, l'étape de pré-estimation des vitesses linéaires exprimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Le paragraphe suivant est dédié à cette étude.

### 3.3.1 Mesure des vitesses linéaires dans le repère corps

L'implémentation de l'observateur nécessite la mesure de certaines grandeurs physiques. Si les mesures des vitesses angulaires  $\boldsymbol{\Omega}$  et de l'accélération spécifique  $\mathbf{a}$  sont directes grâce à la centrale inertielle, il n'en est pas de même pour les vitesses linéaires exprimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature dont une synthèse est donnée dans [Ban+15]. Dans la suite, nous avons choisi d'effectuer cette mesure indirecte en deux étapes :

- la première consiste à utiliser les forces de traînées générées par les rotors pour estimer les vitesses de déplacement du véhicule dans le plan horizontal, notées  $\bar{V}_x$  et  $\bar{V}_y$  ;
- La deuxième utilise la mesure du baromètre pour estimer la vitesse verticale  $\bar{V}_z$ .

#### 3.3.1.1 Vitesses linéaires dans le plan horizontal

En l'absence de vent et en considérant que l'accéléromètre mesure les forces extérieures, c'est-à-dire les forces produites par les rotors et les forces de traînées, on peut écrire :

$$\mathbf{a} = -\frac{1}{m}T\mathbf{e}_3 - \frac{1}{m}\mathbf{D} = -\frac{1}{m}\begin{pmatrix} \mathbf{D}' \\ T \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

avec  $T \in \mathbb{R}$  la force totale produite par les rotors,  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^3$  les forces de traînées exprimées dans  $\{\mathcal{B}\}$  et  $\mathbf{D}'$  les deux premières ligne de  $\mathbf{D}$ . En faisant l'hypothèse réaliste que les forces de traînées n'interviennent que dans le plan horizontal, c'est-à-dire que  $\mathbf{D}^\top \mathbf{e}_3 = 0$ , on vérifie :

$$\mathbf{D} = -\sqrt{T} \begin{pmatrix} \bar{c} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \bar{\mathbf{V}} \quad (3.11)$$

où  $\bar{c} > 0$  est le coefficient de traînée. En notant  $T = -m\mathbf{a}^\top \mathbf{e}_3$ , on en déduit :

$$\mathbf{a}_x = -c'\sqrt{-\mathbf{a}_z} \bar{V}_x, \quad \mathbf{a}_z < 0, \quad (3.12a)$$

$$\mathbf{a}_y = -c'\sqrt{-\mathbf{a}_z} \bar{V}_y, \quad \mathbf{a}_z < 0, \quad (3.12b)$$

avec  $c' = \frac{\bar{c}}{\sqrt{m}}$ . À partir de la connaissance du coefficient  $\bar{c}$  et de la masse du drone  $m$ , il est donc possible d'obtenir une mesure des vitesses linéaires dans le plan horizontal.

**Remarque 3** *Le coefficient de traînée  $\bar{c}$  peut être facilement estimé à partir de (3.12), de la mesure de l'accéléromètre et de la mesure des vitesses linéaires issue d'un MOCAP [Ban+18]. Les modèles obtenus (premier et du deuxième ordre) par la méthode des moindres carrés permettent d'avoir une très bonne estimation des vitesses linéaires (voir Figures 3.2).*

*Sur la première figure, des tests en extérieur permettent de montrer que les modèles calculés sont valables pour des vitesses allant jusqu'à 15[m/s]. La seconde montre la comparaison entre les vitesses pré-estimées à partir du coefficient de traînée obtenu par le modèle linéaire et les mesures MOCAP en intérieur. S'il est clair que les estimations sont très bruitées (principalement à cause de l'utilisation de l'accéléromètre), on constate que les dynamiques coïncident parfaitement avec la vérité terrain. On en déduit que les vitesses linéaires  $\bar{V}_x$  et  $\bar{V}_y$  peuvent être utilisées comme mesures en entrée de l'observateur afin d'être filtrées et d'apporter une information supplémentaire pour l'estimation de l'attitude.*

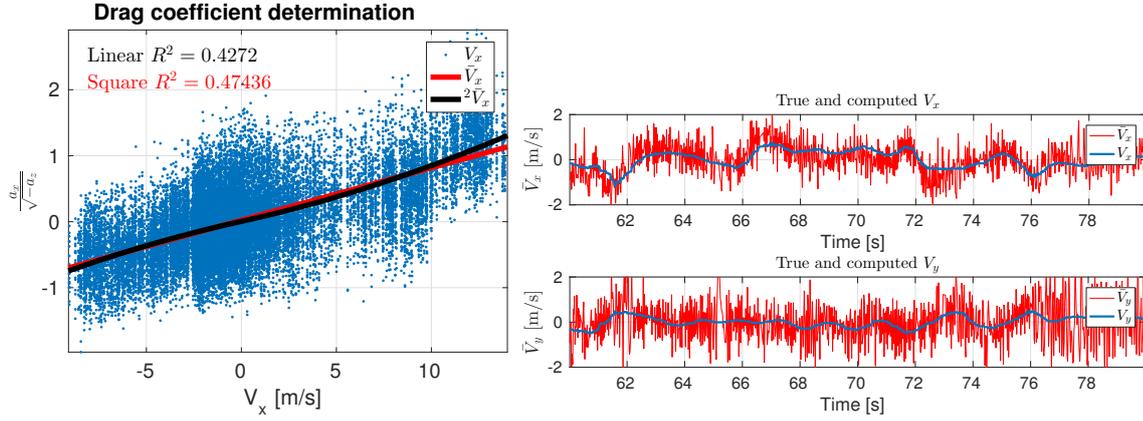


Figure 3.2 – (Gauche) Estimation du coefficient de traînée  $\bar{c}$  à partir d'un modèle linéaire et d'un modèle quadratique. Les points bleus représentent les données brutes issues du GPS, la ligne rouge celle du modèle linéaire et la ligne noire celle du modèle quadratique pour la direction  $e_1$ .

(Droite) Vitesses  $\bar{V}_x$  et  $\bar{V}_y$  pré-estimées à partir du coefficient de traînée en rouge. Vitesses réelles obtenues par le MOCAP en bleu.

### 3.3.1.2 Vitesses linéaires dans le plan vertical

Pour obtenir la mesure de la vitesse  $\bar{V}_z$  dans le plan vertical, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Parmi celles-ci, celle proposée dans [AMB16] se base sur la connaissance de la puissance aérodynamique développée dans [Ban+14]. Bien que précise, cette approche nécessite la mesure de la puissance électrique ainsi que celle de la vitesse de tous les rotors. Si la puissance électrique peut être facilement mesurée grâce aux capteurs de tension et de courant intégrés dans les ESC, il n'en est pas de même pour la vitesse de rotation. Seuls quelques ESC haut de gamme peuvent fournir cette donnée ce qui rend cette méthode peu généralisable.

Une deuxième possibilité est d'utiliser un capteur de pression barométrique qui fournit une mesure de l'altitude, à partir de laquelle une estimation de la vitesse verticale est possible. Le principal intérêt réside dans le fait que ces capteurs sont disponibles dans la plupart des autopilotes du commerce. Inutile donc d'embarquer sur le drone des capteurs supplémentaires.

**Proposition 2 : Filtre 1.** On note  $\bar{z}$  la mesure de l'altitude fournie le capteur barométrique. Soit le filtre complémentaire suivant :

$$\dot{\hat{z}} = \bar{v}_z - k_1 (\hat{z} - \bar{z}), \quad \hat{z}(0) = 0 \quad (3.13a)$$

$$\dot{\bar{v}}_z = \mathbf{e}_3^\top (\hat{\mathbf{R}}\mathbf{a}) + g - \beta^{az} - k_2 (\hat{z} - \bar{z}), \quad \bar{v}_z(0) = 0 \quad (3.13b)$$

$$\dot{\beta}^{az} = k_3 (\hat{z} - \bar{z}), \quad (3.13c)$$

où  $k_1, k_2, k_3$  sont des scalaires positifs,  $\hat{z}$  est l'estimation de l'altitude,  $\hat{\mathbf{R}}$  est la matrice de rotation estimée et  $\beta^{az} \in \mathbb{R}$  l'estimation du biais de l'accéléromètre suivant l'axe  $\mathbf{e}_3$ . Alors, l'erreur d'estimation  $\tilde{v}_z = \hat{z} - v_z$  dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  converge vers zéro.

Une comparaison de résultats, faite à partir d'un essai en vol, est donnée en Figure 3.3. Comme supposé, l'estimation de l'altitude avec le baromètre n'est pas parfaite. Il existe une dérive, classique avec ce type de capteur, bien visible sur les résultats. Malgré cela, l'estimation de la vitesse verticale  $\bar{v}_z = \dot{\hat{z}}$  est très bonne. La comparaison des estimations

d'altitude et de vitesse avec les mesures du MOCAP confirme les performances du filtre de la Proposition 2.

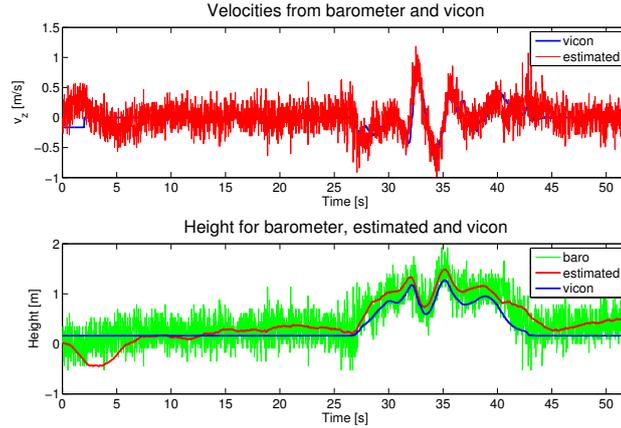


Figure 3.3 – Estimation de l’altitude et de la vitesse verticale dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ .  
(haut) : vitesse mesurée  $\bar{v}_z$  (rouge) et vérité terrain  $v_z$  (bleu) vs temps.  
(bas) : altitude mesurée  $\bar{z}$  (vert), altitude filtrée  $\hat{z}$  (rouge) et vérité terrain  $z$  (bleu) vs temps.

**Remarque 4** *Il est important de mentionner que l’estimation de la vitesse verticale telle qu’elle est proposée ici, n’est pas optimale. En effet, elle nécessite la connaissance a priori de la matrice de rotation afin d’exprimer l’estimation de la vitesse verticale  $\bar{v}_z$  dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à partir de la Proposition 2. Néanmoins, nous avons pu constater qu’une estimation même grossière de la matrice de rotation était suffisante en pratique<sup>6</sup>. Enfin, il est toujours possible de s’affranchir de la connaissance, même partielle, de la matrice de rotation en utilisant la méthode plus complexe basée sur la mesure de la puissance aérodynamique.*

En admettant qu’une estimation correcte de l’attitude du drone est disponible, on dispose alors d’une pré-estimation des vitesses linéaires données par  $\bar{\mathbf{V}} = \left( \bar{V}_x, \bar{V}_y, \hat{\mathbf{R}}^\top \bar{v}_z \right)$  pour pouvoir appliquer le Théorème 1. Comme nous avons pu le voir dans les résultats expérimentaux, les estimations des vitesses issues des mesures de l’accéléromètre et du baromètre sont très bruitées. En plus de l’estimation d’attitude, l’observateur permettra de filtrer la mesure des vitesses afin qu’elles puissent être utilisées à haute fréquence dans les boucles de contrôle.

### 3.3.2 Cas d’étude 1 : observateur seul

La plateforme utilisée est un quadrotor, équipé de l’auto-pilote *open-source* PX4 [MHP15]. Le drone est piloté en vitesse par un opérateur humain à l’aide d’une télécommande. Les consignes en vitesse sont transmises au contrôleur en vitesse proposé dans [Ban+15]. Un système de capture de mouvement mesure en temps réel et à une fréquence de 40[Hz] la position, la vitesse et l’orientation du drone dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . L’observateur proposé dans le Théorème 1 est implémenté sur le PX4 et exécuté à une fréquence de 200[Hz]. Les estimées horodatées sont envoyées par radio à une station maître en utilisant le *middleware* ROS.

6. Il est d’ailleurs intéressant de noter qu’une approche similaire a été proposée dans [HHS17], où les auteurs proposent une estimation couplée de l’attitude et des vitesses linéaires à partir de la mesure des vitesses  $V_x, V_y \in \{\mathcal{B}\}$  et  $v_z \in \{\mathcal{A}\}$ .

Les résultats obtenus sont donnés dans les Figures 3.4-3.5.

Sur la Figure 3.4, une comparaison entre les vitesses linéaires pré-estimées  $\bar{\mathbf{V}}$ , estimées  $\hat{\mathbf{V}}$  et réelles  $\mathbf{V}$  dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  est donnée.

- La vérité terrain donnée par  $\mathbf{V} = \mathbf{R}^\top \mathbf{v}$  est tracée en noire. Elle est obtenue grâce au MOCAP qui mesure les vitesses linéaires  $\mathbf{v}$  exprimées dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  ainsi que l'attitude  $\mathbf{R}$ .
- Les vitesses linéaires pré-estimées, obtenues à partir de l'accéléromètre, du baromètre, du coefficient de traînée et de la Proposition 2 sont tracées en bleu.
- Les vitesses filtrées par l'observateur, obtenues grâce au Théorème 1, sont tracées en rouge.

La première remarque concerne la pré-estimation des vitesses de translation  $\bar{\mathbf{V}}$  dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Comme nous pouvions nous y attendre, ces mesures sont très bruitées. Le filtrage de ces mesures par l'intermédiaire de l'observateur permet d'obtenir une réponse relativement lisse et conforme à celle obtenue par le système de capture de mouvement.

L'estimation de l'attitude, donnée par les angles d'Euler sur la Figure 3.5, montre clairement les performances de l'observateur. L'attitude estimée converge très rapidement vers l'attitude réelle, mesurée par le système de capture de mouvement.

La Figure 3.5 montre également l'évolution du facteur d'échelle  $u$  en fonction du temps. Comme attendu, ce dernier converge rapidement vers l'unité, confirmant la qualité de l'estimation.

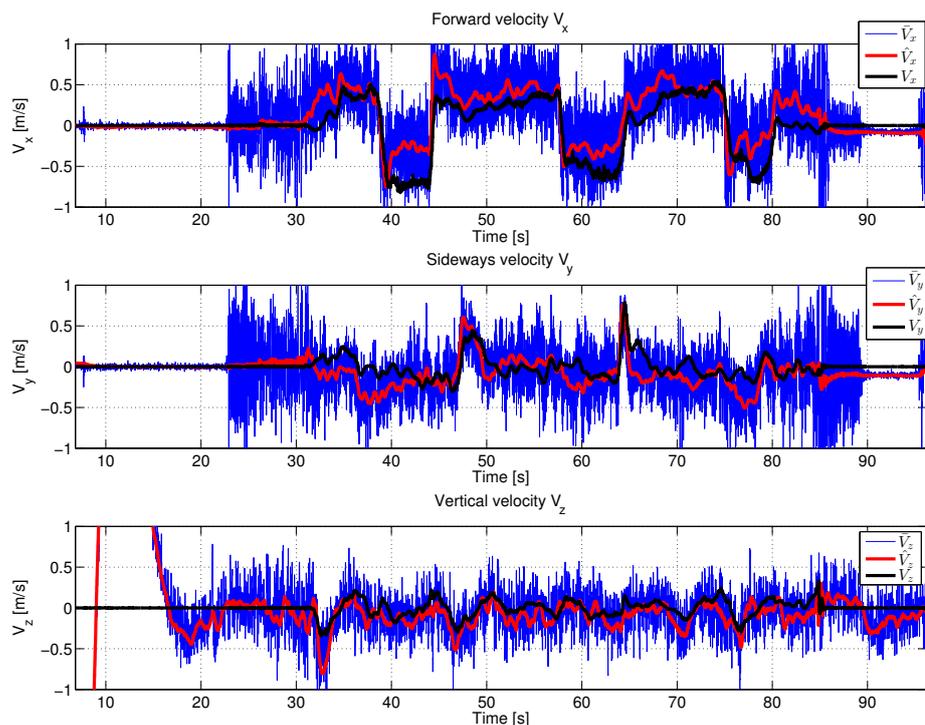


Figure 3.4 – Vitesses linéaires  $\{\mathcal{B}\}$  vs. temps. Les mesures  $\bar{\mathbf{V}}$  (bleu), les estimées  $\hat{\mathbf{V}}$  (rouge) et la vérité terrain (noir)

Les résultats expérimentaux montrent de très bonnes performances malgré les entrées très bruitées de l'observateur. Ces résultats très encourageants permettent d'envisager l'utilisation de l'estimation de l'attitude et du filtrage des vitesses dans une boucle de contrôle. Ceci fait l'objet de la section suivante.

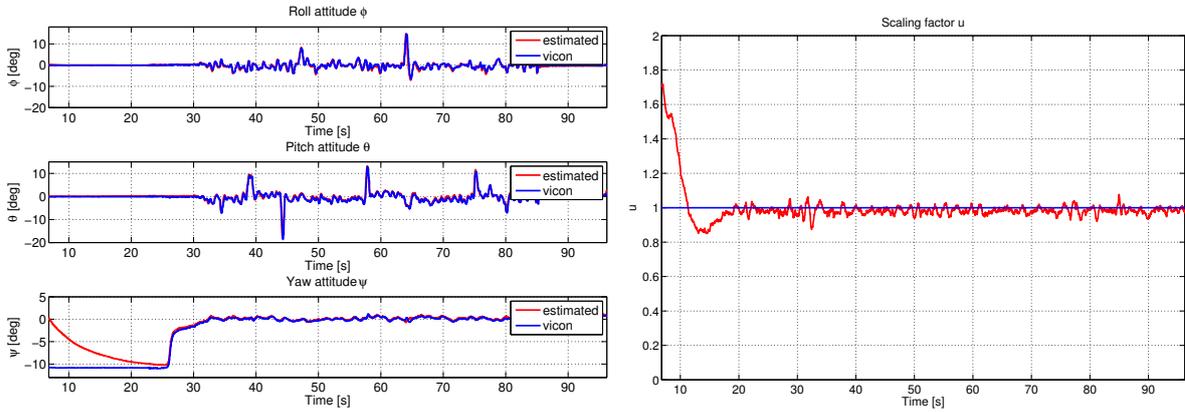


Figure 3.5 – (Gauche) L’attitude (angles d’Euler) estimée et vérité terrain obtenue par le système de capture de mouvement.

(Droite) Convergence du scalaire  $u \rightarrow 1$ .

### 3.3.3 Cas d’étude 2 : observateur couplé et contrôle en vitesse d’un drone

Dans cette section, nous proposons d’utiliser les estimations de l’attitude et des vitesses linéaires dans une boucle de contrôle. Comme mentionné précédemment, une extension de l’observateur proposé dans le Théorème 1 est d’abord présentée afin de fournir des estimations de l’attitude et des vitesses linéaires dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Les deux observateurs sont ensuite couplés pour fournir, en plus de l’estimation de l’attitude et des vitesses linéaires exprimées dans les repères  $\{\mathcal{A}\}$  et  $\{\mathcal{B}\}$ , une estimation du vent. Ces signaux sont alors utilisés pour contrôler un drone télé-opéré, à partir de vitesses de référence exprimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Bien qu’une analyse fine de la stabilité de l’observateur couplé n’ait pas été faite, de nombreux vols expérimentaux ont été réalisés et montrent clairement, et de manière pratique, les performances de l’approche.

Afin d’être le plus réaliste possible, nous proposons comme cas d’étude, un drone évoluant dans un milieu naturel soumis éventuellement à du vent et ayant accès aux données GPS. Sans considérer d’hypothèses restrictives sur l’environnement naturel, on considère que les signaux GPS sont susceptibles d’être perdus régulièrement, ce qui peut, en pratique, être le cas lors d’un passage sous un tunnel ou lors d’une navigation dans un environnement encombré.

Les entrées du filtre couplé sont les mesures issues de la centrale inertielle (accéléromètre, gyromètre), ainsi que les mesures du magnétomètre, du baromètre et celles des vitesses linéaires exprimées dans les repères  $\{\mathcal{B}\}$  et  $\{\mathcal{A}\}$ . Si les premières peuvent être obtenues à partir du coefficient de traînée et des mesures du baromètre (voir section 3.3.1 par exemple), il existe de nombreux moyens d’obtenir une mesure plus ou moins précise des secondes. Parmi celles-ci, on peut citer le GPS, la mesure du flux optique, les techniques de vision avancée, etc. Le schéma de l’architecture globale ainsi que celui du filtre couplé sont donnés en Figure 3.6.

#### 3.3.3.1 Observateur couplé

Les deux propositions données dans la suite sont validées par de nombreuses expérimentations (voir section 3.3.3.2). En plus de l’estimation de l’attitude, des vitesses linéaires dans les deux repères et du vent, l’observateur couplé permet d’estimer les biais de l’accéléro-

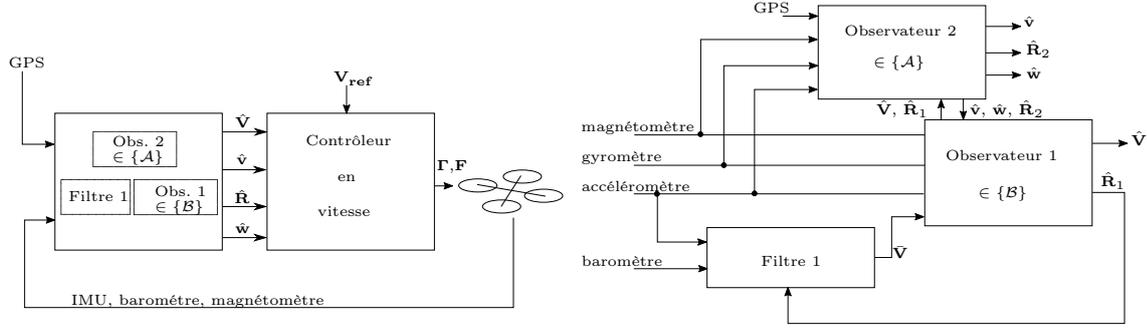


Figure 3.6 – Schéma de l'architecture globale(gauche) et schéma de l'observateur couplé (droite)

mètre et du gyromètre présents dans les équations (3.4) et (3.5). Dans la suite, les notations suivantes sont utilisées :

- les vitesses linéaires exprimées dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  (resp. dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ ) sont notées en minuscule  $\mathbf{v}$  (resp. en majuscule  $\mathbf{V}$ ) ;
- toutes les grandeurs estimées dans la Proposition 3 (resp. Proposition 4) sont indicées avec la valeur 1 (resp. valeur 2). C'est le cas pour les vitesses linéaires ( $\mathbf{V}_1$ ), l'attitude ( $\mathbf{X}_1$  et  $\mathbf{R}_1$ ), etc. (resp.  $\mathbf{v}_2$ ,  $\mathbf{X}_2$  et  $\mathbf{R}_2$ ) ;
- Les notations  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$  et  $\mathbf{R}$  sont équivalentes ;
- les biais de l'accéléromètre (resp. du gyromètre) sont notés  $\beta^a$  (resp.  $\beta^\Omega$ ) ;
- le vent, exprimé dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ , est noté  $\hat{\mathbf{w}} \in \mathbb{R}^3$  ;
- l'opérateur de projection anti-symétrique d'une matrice carré  $\mathbf{H}$  est donné par :

$$\mathbb{P}_a = \frac{1}{2}(\mathbf{H} - \mathbf{H}^\top).$$

**Proposition 3 :** *Observateur 1*  $\in \{\mathcal{B}\}$ . Soit  $k_1^{vc}, k_1^r, k_1^u, k_1^{\beta a}$  des gains scalaires positifs et  $\Omega$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\tilde{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}}$  et  $\mathbf{m}_B$  des grandeurs mesurées. Soit l'observateur suivant basé sur (3.3) :

$$\dot{\tilde{\mathbf{V}}}_1 = -(\Omega - \hat{\beta}_1^\Omega)_\times \tilde{\mathbf{V}}_1 + g\mathbf{X}_1^\top \mathbf{e}_3 + \mathbf{a} - \hat{\beta}_1^a - \Delta_1^v - k_1^{vc} \Delta_1^{vc}, \quad (3.14a)$$

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \dot{u}_1 \hat{\mathbf{R}}_1 + u_1 \dot{\hat{\mathbf{R}}}_1, \quad (3.14b)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{R}}}_1 = \hat{\mathbf{R}}_1(\Omega - \hat{\beta}_1^\Omega)_\times - k_1^r \Delta_1^r \times \hat{\mathbf{R}}_1 + \hat{\mathbf{R}}_1 \Delta_1^m - \Delta_1^{rc} \hat{\mathbf{R}}_1, \quad (3.14c)$$

$$\dot{u}_1 = -k_1^u g \tilde{\mathbf{V}}_1^\top \hat{\mathbf{R}}_1^\top \mathbf{e}_3, \quad (3.14d)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_1^a = k_1^{\beta a} \Delta_1^v - k_1^{\beta ac} (\hat{\beta}_1^a - \hat{\beta}_2^a), \quad (3.14e)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_1^\Omega = k_1^{\beta \Omega} \Delta_1^r, \quad (3.14f)$$

où  $\tilde{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}} - \mathbf{V}$ ,  $\mathbf{X} = u\hat{\mathbf{R}}$  est la matrice de rotation à l'échelle avec  $u$  un scalaire positif. Les conditions initiales sont données par  $\tilde{\mathbf{V}}_1(0) = \mathbf{V}_1(0)$ ,  $\mathbf{X}_1(0) = u_1(0)\hat{\mathbf{R}}_1(0)$ ,  $u_1(0) = 1$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_1(0) = \mathbf{I}_3$ . Les termes d'innovations  $\Delta_1^v, \Delta_1^r, \Delta_1^m$  sont définis par :

$$\Delta_1^v = k_1^v (\hat{\mathbf{V}}_1 - \mathbf{V}_1), \quad (3.15a)$$

$$\Delta_1^r = \frac{g}{u_1} \hat{\mathbf{R}}_1 \tilde{\mathbf{V}}_1 \times \mathbf{e}_3, \quad (3.15b)$$

$$\Delta_1^m = k_1^m (((\mathbf{m}_B \times \hat{\mathbf{m}}_B)^\top \mathbf{X}_1^\top \mathbf{e}_3) \mathbf{X}_1^\top \mathbf{e}_3)_\times. \quad (3.15c)$$

Les termes d'innovation couplés  $\Delta_1^{vc}$  et  $\Delta_1^{rc}$  sont donnés par :

$$\Delta_1^{vc} = \hat{\mathbf{V}}_1 - \hat{\mathbf{R}}_1^\top (\hat{\mathbf{v}}_2 - \hat{\mathbf{w}}), \quad (3.16a)$$

$$\Delta_1^{rc} = k_1^{rc} \mathbb{P}_a(\hat{\mathbf{R}}_1 \hat{\mathbf{R}}_2^\top). \quad (3.16b)$$

Alors, pour presque toutes les conditions initiales,  $\hat{\mathbf{V}}_1(t)$  converge vers  $\mathbf{V}_1(t)$  et  $\hat{\mathbf{R}}_1(t)$  converge vers  $\mathbf{R}_1(t)$ .

L'étude de la stabilité de la Proposition 3 sans les termes de couplage est donnée dans [AMB16].

La proposition suivante étend la proposition précédente au cas où l'estimateur est donné dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ .

**Proposition 4 : Observateur 2**  $\in \{\mathcal{A}\}$ . Soit le modèle donné par (3.2b) dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  avec  $\mathbf{w}$  la vitesse du vent et  $\Omega$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{m}_B$  des grandeurs mesurées. Soit  $k_2^r, k_2^u, k_2^w, k_2^{\beta a}, k_2^v$  des gains scalaires positifs. Soit l'observateur suivant :

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}}_2 = \hat{\mathbf{R}}_2(\mathbf{a} - \hat{\beta}_2^a) + g\mathbf{e}_3 - \Delta_2^v - \Delta_2^{vc}, \quad (3.17a)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_2 = \dot{u}_2 \hat{\mathbf{R}}_2 + u_2 \dot{\hat{\mathbf{R}}}_2, \quad (3.17b)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{R}}}_2 = \hat{\mathbf{R}}_2(\Omega - \hat{\beta}_2^\Omega)_\times - k_2^r \Delta_{2 \times}^r \hat{\mathbf{R}}_2 + \hat{\mathbf{R}}_2 \Delta_2^m - \Delta_2^{rc} \hat{\mathbf{R}}_2, \quad (3.17c)$$

$$\dot{u}_2 = -k_2^u g \tilde{\mathbf{v}}_2^\top \mathbf{e}_3, \quad (3.17d)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = -k_2^w \left( (\hat{\mathbf{w}} - \hat{\mathbf{v}}_2) + \hat{\mathbf{R}}_1 \hat{\mathbf{V}}_1 \right), \quad (3.17e)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_2^a = k_2^{\beta a} \Delta_2^v - k_2^{\beta ac} (\hat{\beta}_2^a - \hat{\beta}_1^a), \quad (3.17f)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_2^\Omega = k_2^{\beta \Omega} \Delta_2^r, \quad (3.17g)$$

avec les conditions initiales suivantes  $\hat{\mathbf{v}}_2(0) = \mathbf{v}_2(0)$ ,  $u_2(0) = 1$ ,  $\hat{\mathbf{w}}(0) = \mathbf{w}(0)$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_2(0) = \mathbf{I}_3$  et  $\tilde{\mathbf{v}}(t) = \hat{\mathbf{v}}(t) - \mathbf{v}(t)$ . Les termes d'innovations  $\Delta_2^v$  et  $\Delta_2^r$  sont donnés par :

$$\Delta_2^r = \frac{g}{u_2} \tilde{\mathbf{v}}_2 \times \mathbf{e}_3, \quad (3.18a)$$

$$\Delta_2^v = k_2^v (\hat{\mathbf{v}}_2 - \mathbf{v}), \quad (3.18b)$$

$$\Delta_2^m = k_2^\mu \left( ((\mathbf{m}_B \times \hat{\mathbf{m}}_B)^\top \mathbf{X}_2^\top \mathbf{e}_3) \mathbf{X}_2^\top \mathbf{e}_3 \right)_\times. \quad (3.18c)$$

Les termes d'innovations couplés  $\Delta_2^{vc}$  et  $\Delta_2^{rc}$  sont donnés par :

$$\Delta_2^{vc} = k_2^{vc} \left( (\hat{\mathbf{v}}_2 - \hat{\mathbf{w}}) - \hat{\mathbf{R}}_1 \hat{\mathbf{V}}_1 \right), \quad (3.19a)$$

$$\Delta_2^{rc} = k_2^{rc} \mathbb{P}_a \left( \hat{\mathbf{R}}_2 \hat{\mathbf{R}}_1^\top \right). \quad (3.19b)$$

Alors, pour presque toutes les conditions initiales,  $\hat{\mathbf{v}}_2(t)$  converge vers  $\mathbf{v}_2(t)$ ,  $\hat{\mathbf{w}}(t)$  converge vers  $\mathbf{w}(t)$  et  $\hat{\mathbf{R}}_2(t)$  converge vers  $\mathbf{R}_2(t)$ .

Les trois sorties de l'observateur couplé sont les vitesses linéaires exprimées dans les deux repères, l'attitude et la vitesse du vent. La qualité des estimées est également donnée par les scalaires  $u_1$  et  $u_2$  de chaque filtre, qui doivent converger vers l'unité. Le réglage des gains de chaque filtre,  $k_1^{vc}, k_1^r, k_1^u, k_1^{\beta a}$  et  $k_2^r, k_2^u, k_2^w, k_2^{\beta a}, k_2^v$ , est obtenu à partir de la théorie classique de placement de pôles sur le système linéarisé en boucle fermée.

**Remarque 5** *Comme cela a été mentionné précédemment, il est possible que signal GPS soit perdu lors d'une navigation dans un environnement encombré (tunnel ou passage à l'intérieur d'un bâtiment par exemple). Si la mesure des vitesses linéaires dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  est obtenue à partir du GPS, l'Observateur 2 ne peut plus être utilisé. Afin de prendre en compte cette situation, les termes de couplage sont mis à zéro dans l'Observateur 1 et l'équation (3.17e) est remplacée par*

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = -k_2^w \hat{\mathbf{w}}.$$

*Ce choix permet d'éviter toute discontinuité sur l'estimation du vent. Il se justifie également par le fait que dans la plupart des cas, le signal GPS est perdu lorsque le drone pénètre dans un espace clos où le vent et les perturbations externes deviennent nulles.*

### 3.3.3.2 Résultats expérimentaux pour l'observateur couplé

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur un quadrotor télé-opéré en vitesse. Il est important de noter que tous les résultats présentés dans cette section utilisent les estimations de l'attitude et des vitesses linéaires dans la boucle de contrôle en vitesse. La configuration et les détails concernant la télé-opération sont présentés dans [HM13]. Le contrôleur en vitesse non-linéaire utilisé est développé dans [Ban+15].

Dans un premier temps, on considère que la mesure des vitesses est disponible dans les deux repères. Plusieurs expérimentations sont alors menées, à des vitesses faibles puis à des vitesses élevées. Ensuite, des résultats obtenus en présence de vent sont exposés. L'objectif est de montrer les capacités de l'observateur couplé à estimer la direction et l'amplitude du vent. Enfin, des expérimentations mettent en avant la capacité du filtre à prendre en compte des interruptions du signal GPS, et par conséquent, l'absence de mesure des vitesses linéaires dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ . Ils sont présentés dans une vidéo condensée et représentative, visible à l'adresse suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=N4HejBwKTfU>.

La procédure pour pré-estimer les vitesses dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  est identique à celle présentée dans la section 3.3.1. Les vitesses linéaires dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  sont obtenues, quant elles sont disponibles, à l'aide du signal GPS.

#### 3.3.3.2.1 Observateur couplé dans le cas de vitesses faibles

Dans cette expérimentation, on propose de simuler le signal du GPS par le MOCAP en mode dégradé. Cela revient à ajouter un bruit blanc et à diminuer la fréquence de mesure à  $10[Hz]$  afin de pouvoir conduire les expérimentations à l'intérieur. L'avantage principal est de pouvoir disposer du vrai signal du MOCAP pour comparer les résultats.

Une première comparaison de l'attitude est donnée en Figure 3.7. Les résultats montrent clairement que les estimations convergent vers l'attitude réelle mesurée par le MOCAP. L'erreur est négligeable malgré des variations importantes sur les trois axes avec une dynamique rapide. Comme attendu, le facteur d'échelle  $u$  converge vers l'unité ce qui confirme la très bonne qualité de l'estimation.

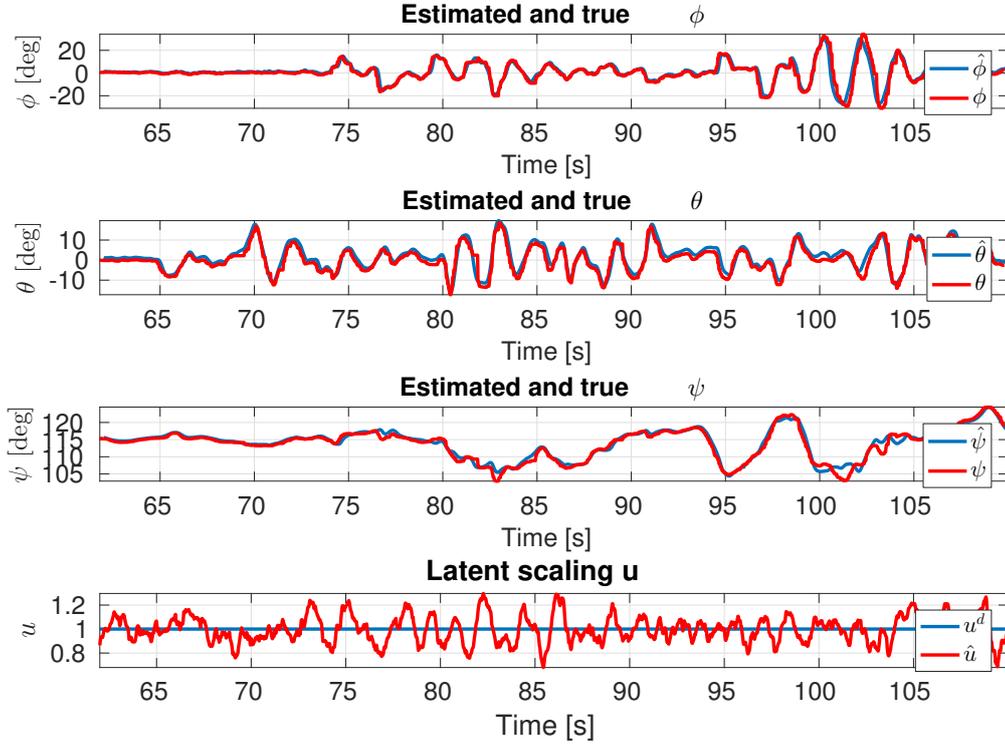


Figure 3.7 – Attitude estimée en bleu (angles d’Euler) comparée à la vérité terrain (rouge). Convergence du scalaire  $u$  autour de l’unité.

Le filtrage des vitesses linéaires de l’observateur couplé est ensuite comparé avec les mesures du MOCAP (voir Figure 3.8). Afin de pouvoir les évaluer efficacement, la comparaison s’effectue dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Ainsi, on notera dans la suite :

- $\mathbf{R}^\top \mathbf{v}$ , les vitesses mesurées par le MOCAP dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ , et ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  par l’intermédiaire de l’attitude mesurée par le MOCAP ;
- $\hat{\mathbf{R}}^\top \hat{\mathbf{v}}$ , les vitesses estimées par l’observateur couplé dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$ , et ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  par l’intermédiaire de l’attitude estimée par l’observateur couplé ;
- $\hat{\mathbf{V}}$ , les vitesses estimées par l’observateur couplé dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ .

Les résultats obtenus sont très bons, quels que soient les repères d’estimation et les axes considérés. On peut malgré tout noter une légère baisse de la qualité de l’estimation de la vitesse verticale dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Ceci s’explique par la piètre qualité de la pré-estimation basée sur la mesure du baromètre.

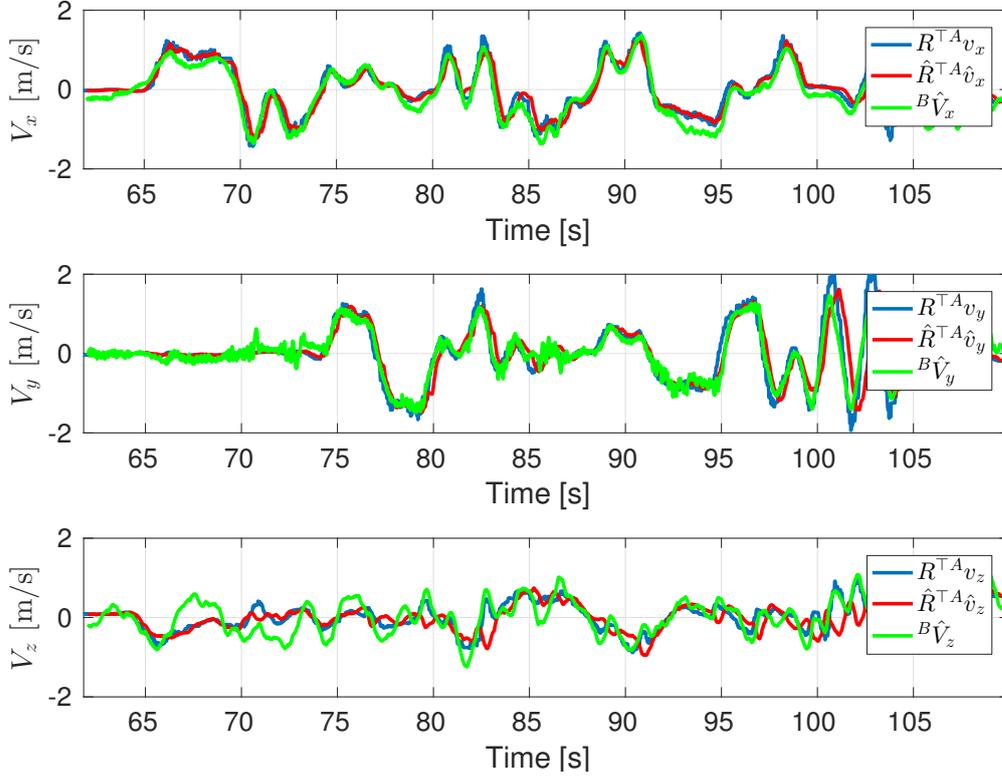


Figure 3.8 – Vitesses estimées et vitesses mesurées par le GPS dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  dans le cas de vitesses faibles. Les vitesses réelles (*i.e.*  $\mathbf{R}^\top \mathbf{v}$ ), ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à partir de la matrice de rotation réelle sont données en bleu. Les vitesses estimées dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  (*i.e.*  $\hat{\mathbf{R}}^\top \hat{\mathbf{v}}$ ), ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à partir de la matrice de rotation estimée sont données en rouge. Les vitesses estimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  (*i.e.*  $\hat{\mathbf{V}}$ ), sont données en vert.

### 3.3.3.2.2 Observateur couplé dans le cas de vitesses élevées

La même expérimentation a été menée avec des vitesses de déplacement plus élevées (jusqu'à  $14.5[m/s]$ ). Les contraintes imposées sur ces vitesses ne permettent plus d'effectuer l'expérimentation en intérieur. Le signal GPS est donc utilisé comme vérité terrain. La notation utilisée précédemment reste valable et les comparaisons s'effectuent encore dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Les résultats d'estimation de l'attitude étant aussi remarquables que dans le cas à faible vitesse, seuls les filtrages des vitesses linéaires sont donnés pour discussion (voir Figure 3.9).

Globalement les résultats sont très bons, même dans le cas de vitesses élevées. Dans le plan horizontal, la précision obtenue est presque parfaite malgré les données bruitées en entrée de l'observateur. Dans le plan vertical, les performances sont moins bonnes. Ceci s'explique par au moins deux raisons :

- comme précédemment, la mesure de la vitesse verticale à l'entrée de l'observateur couplé est basée sur la mesure du baromètre, avec les faiblesses et les inconvénients énoncés précédemment ;
- la vérité terrain est donnée par les signaux GPS, dont la précision est connue pour être limitée dans le plan vertical.

Une étude comparative de l'estimation des vitesses linéaires est présentée dans [Ban+18]. Elle montre clairement la supériorité de l'observateur couplé par rapport à l'état de l'art récent, surtout dans le cas de vitesses élevées.

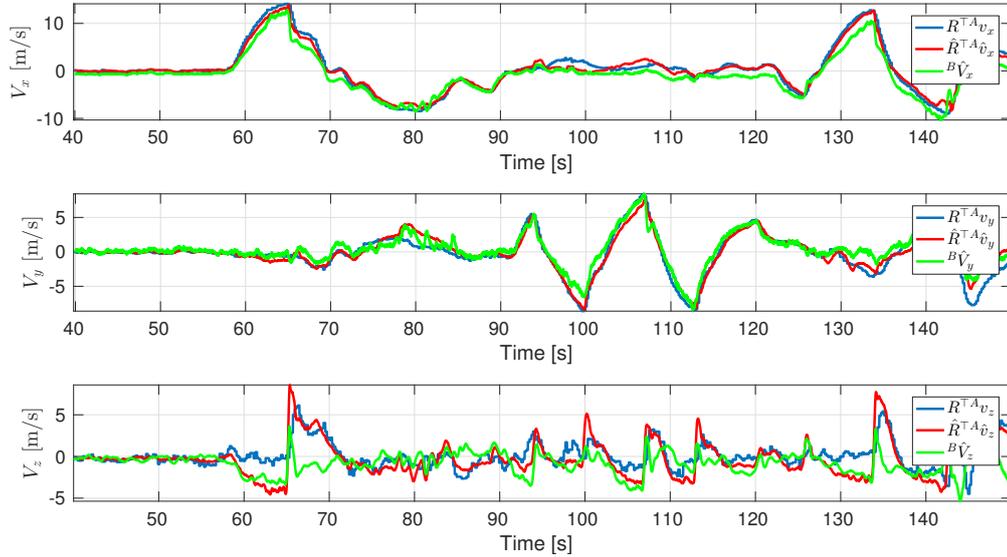


Figure 3.9 – Vitesses estimées et vitesses mesurées par le MOCAP dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  dans le cas de vitesses élevées. Les vitesses réelles (*i.e.*  $\mathbf{R}^\top \mathbf{v}$ ), ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à partir de la matrice de rotation réelle sont données en bleu. Les vitesses estimées dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  (*i.e.*  $\hat{\mathbf{R}}^\top \hat{\mathbf{v}}$ ), ramenées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  à partir de la matrice de rotation estimée sont données en rouge. Les vitesses estimées dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$  (*i.e.*  $\hat{\mathbf{V}}$ ), sont données en vert.

### 3.3.3.2.3 Observateur couplé et estimation du vent

Afin de montrer la capacité de l’observateur couplé à estimer le vent lorsque les mesures de vitesses dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  sont disponibles, un ensemble de quatre ventilateurs soufflants dans la même direction est déposé dans l’arène de vol (voir Figure 3.10). Un anémomètre, placé à divers endroits de la pièce, permet de mesurer le vent créé par les ventilateurs. Comme précédemment, des signaux GPS sont simulés à partir des données du MOCAP en ajoutant du bruit et en diminuant la fréquence des données.

Le quadrotor, contrôlé en vitesse en boucle fermée, est ensuite placé face aux flux d’air à différentes distances des ventilateurs. La vitesse du vent généré varie de  $0[m/s]$  à  $3[m/s]$ . Au total, vingt-cinq expérimentations ont été réalisées. Le Tableau 3.1 donne l’erreur moyenne et la covariance de tous les essais. Le vent produit par les ventilateurs est tourbillonnant et non uniforme. Ceci est principalement dû au volume de la pièce restreinte et aux perturbations dues au vent généré par les hélices du drone. Afin d’être le plus précis possible, la moyenne des mesures obtenues par l’anémomètre au cours des différents essais est utilisée comme vérité terrain. Comme on peut le constater sur la Figure 3.11, l’estimation du vent faite par l’observateur est cohérente avec la réalité.

Variable	Erreur moyenne [ $m/s$ ]	Covariance
$\tilde{w}_x$	0.1997	0.0724
$\tilde{w}_y$	0.0320	0.0107
$\tilde{w}_z$	0.0434	0.0021

Tableau 3.1 – Erreurs statistiques en [ $m/s$ ] de l’estimation du vent pour les vingt-cinq vols



Figure 3.10 – Drone dans son environnement artificiellement venté.

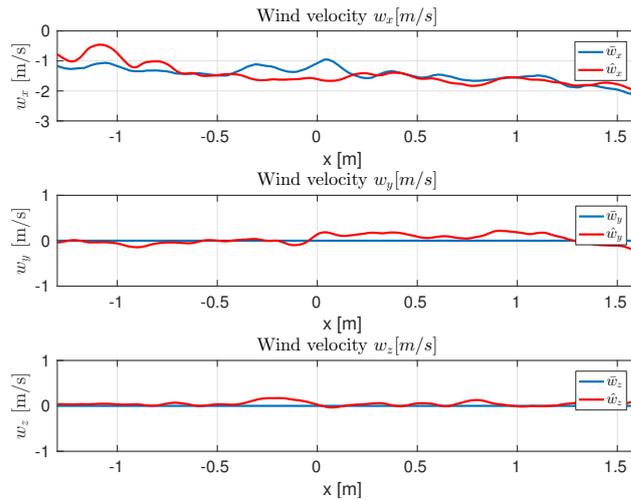


Figure 3.11 – Estimation du vent dans les trois directions. La mesure est tracée en bleu et les estimations, correspondant à la moyenne de toutes les expérimentations, est donnée en rouge.

### 3.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre propose une synthèse de quelques contributions centrées sur de l’observation d’état en robotique aérienne. Plusieurs observateurs basés vitesse ont été proposés et ont fait l’objet d’une étude de stabilité. Ils sont fondés sur la pré-estimation des vitesses linéaires, obtenue dans le repère du véhicule. Le principal intérêt est de ne plus dépendre des mesures du GPS et de ne plus se baser sur l’hypothèse forte que l’accéléromètre peut mesurer la direction de la gravité.

Une perspective directe de ce travail serait de trouver le moyen d’obtenir une estimation globale de l’état d’un système à partir d’estimations indépendantes locales, obtenues à partir de mesures hétérogènes et exprimées dans différents repères.

Les résultats obtenus en simulation et en expérimentation montrent la performance des observateurs proposés, surtout dans le cas de vitesses élevées. Ces travaux, principalement issus d’une collaboration étroite avec Robert Mahony, ont commencé en 2014. Cette collaboration fructueuse m’a permis d’encadrer plusieurs étudiants en thèse au sein de l’ANU sur des thématiques précises (M. Bangura, F. Kuipers, X. Hou et D. Abeywardena). Les résultats obtenus ont donné lieu à plusieurs publications qui ont été présentées des conférences internationales [CI15,CI17,CI18,CI21,CI22] ainsi que dans la revue internationale *IEEE Trans. on Robotics* [R3].

# Bibliographie

- [ACC10] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et François CHAUMETTE. « Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.5 (2010), p. 933-939.
- [ACT08a] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Real-time Visual Predictive Controller for Image-based Trajectory Tracking of a Mobile Robot ». In : *IFAC World Congress*. 2008.
- [ACT08b] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
- [Ala06] Mazen ALAMIR. *Stabilization of Nonlinear Systems Using Receding-Horizon Control Schemes : a Parametrized Approach for Fast Systems*. Springer, 2006.
- [Ala13] Mazen ALAMIR. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control : Self Contained Algorithms and Cases Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN : ISBN-10 1489541349.
- [All+19] Guillaume ALLIBERT, Minh Duc HUA, Szymon KRUPÍŃSKI et Tarek HAMEL. « Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles ». In : *Control Engineering Practice, Elsevier* 82 (2019), p. 151-160.
- [AMB16] Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Moses BANGURA. « Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2016.
- [AO03] Javier ANTICH et Alberto ORTIZ. « Underwater Cable Tracking By Visual Feedback ». In : *Pattern Recognition and Image Analysis* 2652 (2003), p. 53-61.
- [Bag+11] Andrey BAGNITSKY, Alexander INZARTSEV, Alexander PAVIN, Sergey MELMAN et Morozov MOROZOV. « Side Scan Sonar Using for Underwater Cables & Pipelines Tracking By Means of AUV ». In : *IEEE Symposium on Underwater Technology (UT) and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*. 2011, p. 1-10.
- [Ban+14] Moses BANGURA, Hyon LIM, H. Jin KIM et Robert MAHONY. « Aerodynamic Power Control for Multirotor Aerial Vehicles ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2014, p. 529-536.
- [Ban+15] Moses BANGURA, Frits KUIPERS, Guillaume ALLIBERT et Robert MAHONY. « Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors ». In : *in Proc. Australasian Conf. Robotics Automation*. 2015.

- [Ban+18] Moses BANGURA, Xiaolei HOU, Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Nathan MICHAEL. « Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions Using Inertial Measurements ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.6 (2018), p. 1490-1501.
- [BB00] Sanjay P. BHAT et Dennis S. BERNSTEIN. « A Topological Obstruction to Continuous Global Stabilization of Rotational Motion and the Unwinding Phenomenon ». In : *Systems & control letters* 39.1 (2000), p. 63-70.
- [Bia+17] Jacob BIAMONTE, Peter WITTEK, Nicola PANCOTTI, Patrick REBENTROST, Nathan WIEBE et Seth LLOYD. « Quantum Machine Learning ». In : *Nature* 549.7671 (2017), p. 195-202.
- [BM07] Selim BENHIMANE et Ezio MALIS. « Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing ». In : *Int. Journal of Robotics Research* 26.7 (2007), p. 661-676.
- [BMS09] Silvère BONNABEL, Philippe MARTIN et Erwan SALAÜN. « Invariant Extended Kalman Filter : Theory and Application to a Velocity-aided Attitude Estimation Problem ». In : *48th IEEE Conference on Decision and Control with 28th Chinese Control Conference*. 2009, p. 1297-1304.
- [BO85] Itzhack Y. BAR-ITZHACK et Yaakov OSHMAN. « Attitude Determination from Vector Observations : Quaternion Estimation ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-21 (1985), p. 128-136.
- [BPV07] Lorenzo BRIGNONE, Michel PERRIER et Christophe VIALA. « A Fully Autonomous Docking Strategy for Intervention Auvs ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 2007, p. 1-6.
- [CC04] Yang CHENG et John L. CRASSIDIS. « Particle Filtering for Sequential Spacecraft Attitude Estimation ». In : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2004.
- [CH06] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13.4 (2006), p. 82-90.
- [CH07] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.1 (2007), p. 109-118.
- [Cre14] Vincent CREUZE. « Robots Marins Et Sous-marins : Perception, Modélisation, Commande ». In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783 (2014).
- [DBV99] Edwin T. van DONKELAAR, Okko H. BOSGRA et Paul M.J. VAN DEN HOF. « Model Predictive Control With Generalized Input Parametrization ». In : *European Control Conference*. 1999, p. 1693-1698.
- [FEB16] Hassen FOURATI, Djamel EDDINE et Chouaib BELKHIAT. *Multisensor Attitude Estimation : Fundamental Concepts and Applications*. Boca Raton : CRC Press LLC, Florence : Taylor & Francis Group, 2016.
- [Fos02] Thor I. FOSSEN. *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetix AS, 2002. ISBN : 82-92356-00-2.
- [Fos11] Thor I. FOSSEN. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley et Sons Ltd, 2011.

- [GD10] Christopher GEYER et Kostas DANILIDIS. « Catadioptric Projective Geometry ». In : *Int. Journal on Computer Vision* 45.3 (2010), p. 223-243.
- [Gri+12] Håvard Fjær GRIP, Thor I. FOSSEN, Tor A. JOHANSEN et Ali SABERI. « Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements With Time-Varying Reference Vectors ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), p. 1332-1338.
- [Gro13] Paul GROVES. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 2013.
- [HCO17] Inhwan HWANG, Geonho CHA et Songhwai OH. « Multi-modal Human Action Recognition Using Deep Neural Networks Fusing Image and Inertial Sensor Data ». In : *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2017.
- [HHS17] Minh Duc HUA, Tarek HAMEL et Claude SAMSON. « Riccati Nonlinear Observer for Velocity-aided Attitude Estimation of Accelerated Vehicles Using Coupled Velocity Measurements ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2017, p. 2428-2433.
- [HM13] Xiaolei HOU et Robert MAHONY. « Dynamic Kinesthetic Boundary for Haptic Teleoperation of Aerial Robotic Vehicles ». In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, p. 4549-4950.
- [Hua+19] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Feature-based Recursive Observer Design for Homography Estimation and Its Application to Image Stabilization ». In : *Asian Journal of Control* 21.4 (2019), p. 1443-1458.
- [Hua+20] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Nonlinear Observer Design on SL(3) for Homography Estimation By Exploiting Point and Line Correspondences With Application to Image Stabilization ». In : *to be published in Automatica* (2020).
- [Hua09] Minh Duc HUA. « Contributions to the Automatic Control of Aerial Vehicles ». Thèse de doct. University of Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- [Hua10] Minh-Duc HUA. « Attitude Estimation for Accelerated Vehicles using GPS/INS Measurements ». In : *Control Engineering Practice* 18 (2010), p. 723-732.
- [HZ03] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [IP09] Alexander INZARTSEV et Alexander PAVIN. *AUV Application for Inspection of Underwater Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [IY20] Daisuke INOUE et Hiroaki YOSHIDA. « Model Predictive Control for Finite Input Systems Using the D-Wave Quantum Annealer ». In : *Quantum Machine Intelligence* 10.1591 (2020).
- [Jen11] Kenneth JENSEN. « Generalized Nonlinear Complementary Attitude Filter ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.5 (2011), p. 1588-1592.
- [JU04] Simon J. JULIER et Jeffrey K. UHLMANN. « Unscented Filtering and Nonlinear Estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.
- [KA05] Thomas R. KANE et Levinson David A. *Dynamics : Theory and Applications*. McGraw-Hill, NY, 2005.

- [Kac49] Marck KAC. « On Distributions of Certain Wiener Functionals ». In : *Transactions of the American Mathematical Society* 65.1 (1949), p. 200-201.
- [Kap05] Hilbert J. KAPPEN. « Path Integrals and Symmetry Breaking for Optimal Control Theory ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 11 (2005), P11011.
- [Kru+17] Szymon KRUPÍNSKI, Guillaume ALLIBERT, Minh-Duc HUA et Tarek HAMEL. « An Inertial-Aided Homography-based Visual Servo Control Approach for (Almost) Fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.5 (2017), p. 1041-1060.
- [Kru14] Szymon KRUPÍNSKI. « Offshore Structure Following By Means of Sensor Servoing and Sensor Fusion ». Thèse de doct. Laboratoire I3S, Université de Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [LBH15] Yann LE CUN, Yoshua BENGIO et Geoffrey HINTON. « Deep learning ». In : *Nature* 521.7553 (2015), p. 436-444.
- [Leo97] Naomi Ehrich LEONARD. « Stability of a Bottom-Heavy Underwater Vehicle ». In : *Automatica* 33.3 (1997), p. 331-246.
- [LLT00] Jean-François LOTS, David LANE et Emmanuele TRUCCO. « Application of 2 1/2 D Visual Servoing to Underwater Vehicle Station-keeping ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. T. 2. 2000, p. 1257-1264.
- [Lot+01] Jean-François LOTS, David LANE, Emmanuele TRUCCO et François CHAUMETTE. « A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2001, p. 2767-2772.
- [Mah+09] Robert MAHONY, Tarek HAMEL, Jochen TRUMPF et Christian LAGEMAN. « Nonlinear Attitude Observers on  $SO(3)$  for Complementary and Compatible Measurements : a Theoretical Study ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009, p. 6407-6412.
- [Mar03] Francis Landis MARKLEY. « Attitude Error Representations for Kalman Filtering ». In : *Journal of Guidance Control and Dynamics* 26 (2003), p. 311-317.
- [MCB99] Ezio MALIS, François CHAUMETTE et Sylvie BOUDET. « 2 1/2D Visual Servoing ». In : *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15.2 (1999), p. 238-250.
- [MD16] Michael MUEHLEBACH et Raffaello D'ANDREA. « Parametrized Infinite-horizon Model Predictive Control for Linear Time-Invariant Systems With Input and State Constraints ». In : *American Control Conference*. 2016, p. 2669-2674.
- [MH05] Robert MAHONY et Tarek HAMEL. « Image-based Visual Servo Control of Aerial Robotic Systems Using Linear Image Features ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21.2 (2005), p. 227-239.
- [MHP08] Robert MAHONY, Tarek HAMEL et Jean Michel PFLIMLIN. « Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.5 (2008), p. 1203-1217.
- [MHP15] Lorenz MEIER, Dominik HONEGGER et Marc POLLEFEYS. « PX4 : a Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015, p. 6235-6240.

- [MLS94] Richard M. MURRAY, Zexiang LI et S. Shankara SASTRY. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [MV07] Ezio MALIS et Manuel VARGAS. *Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-based Control*. INRIA Research report, RR-6303, 2007.
- [MV17] Matthias MÖLLER et Cornelis VUIK. « On the Impact of Quantum Computing Technology on Future Developments in High-performance Scientific Computing ». In : *Ethics and Information Technology* 19.4 (2017), p. 253-269.
- [MY95] Shigetaka MATSUMOTO et Ito YOSHIHIKO. « Real-Time Vision-Based Tracking of Submarine-cables for AUV/ROV ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 1995, p. 1997-2002.
- [MZ83] Manfred MORARI et Evangelos ZAFIRIOU. *Robust Control*. Paris, France : Dunod, 1983.
- [Ngu+20] Lam Hung NGUYEN, Minh Duc HUA, Guillaume ALLIBERT et Tarek HAMEL. « A Homography-based Dynamic Control Approach Applied to Station Keeping of Autonomous Underwater Vehicles Without Linear Velocity Measurements ». In : *To appear in IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2020).
- [Pet+19] Christina PETSCHNIGG, Mathias BRANDSTÖTTER, Horst PICHLER, Michael HOFBAUR et Bernhard DIEBER. « Quantum Computation in Robotic Science and Applications ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. 2019, p. 803-810.
- [PL01] Elena PANTELEY et Antonio LORÍA. « Growth Rate Conditions for Uniform Asymptotic Stability of Cascaded Time-varying Systems ». In : *Automatica* 37.3 (2001), p. 453-460.
- [Plü65] Julius PLÜCKER. « On a new geometry of space ». In : *Philisophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (1865), p. 725-791.
- [RB97] Patrick RIVES et Jean Jacques BORRELLY. « Underwater Pipe Inspection Task Using Visual Servoing Techniques ». In : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1997, p. 63-68.
- [Rib+12] David RIBAS, Narcis PALOMERAS, Pere RIDAO, Marc CARRERAS et Angelos MALLIOS. « Girona 500 AUV : From Survey to Intervention ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1.17 (2012), p. 46-53.
- [Sal91] Septimiu E. SALCUDEAN. « A Globally Convergent Angular Velocity Observer for Rigid Body Motion ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.12 (1991), p. 1493-1497.
- [SER91] Claude SAMSON, Bernard ESPIAU et Patrick RIVES. *Robot Control : the Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [Ste94] Robert F. STENGEL. *Optimal Control and Estimation*. Dover, 1994. ISBN : 0-486-68200-5.
- [Sto51] George Gabriel STOKES. « On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums ». In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 99.8 (1851), p. 1-10.
- [Tan+17] Prateek TANDON, Stanley LAM, Ben SHIH, Tanay MEHTA, Alex MITEV et Zhiyang ONG. *Quantum Robotics : a Primer on Current Science and Future Perspectives*. Morgan & Claypool, 2017.

- [THS69] N. F. TODA, J. L. HEISS et F. H. SCHLEE. « SPARS : the System, Algorithm, and Test Results ». In : *Proceedings of the Symposium on Spacecraft Attitude Determination*. 1969, p. 361-370.
- [TRB11] Abdelhamid TAYEBI, Andrew ROBERTS et Abdelaziz BENALLEGUE. « Inertial Measurements Based Dynamic Attitude Estimation and Velocity-free Attitude Stabilization ». In : *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. 2011, p. 1027-1032.
- [WAT17] Grady WILLIAMS, Andrew ALDRICH et Evangelos A. THEODOROU. « Model Predictive Path Integral Control : From Theory to Parallel Computation ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (2017), p. 344-357.
- [WN18] Weiyue WANG et Ulrich NEUMANN. « Depth-aware CNN for RGB-D Segmentation ». In : *ECCV*. 2018.
- [WSN87] Leland WEISS, Arthur SANDERSON et Charles P. NEUMAN. « Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 3.5 (1987), p. 404-417.
- [ZBS02] Sjoerd van der ZWAAN, Alexandre BERNARDINO et José SANTOS-VICTOR. « Visual Station Keeping for Floating Robots In Unstructured Environments ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 39 (2002), p. 145-155.
- [Zha+20] Chaoqiang ZHAO, Qiyu SUN, Chongzhen ZHANG, Yang TANG et Feng QIAN. *Monocular depth estimation based on deep learning : An overview*. Sci. China Technology, 2020.

# Commande référencée vision de sous-marins

Ce chapitre propose une synthèse des travaux que nous avons menés ces dernières années autour de la commande référencée vision des véhicules sous-marins autonomes (AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*). La robotique sous-marine est un terrain de jeu idéal pour ce genre de défis, du fait d'une dynamique fortement non linéaire et des effets hydrodynamiques complexes. Les récents progrès technologiques permettent aujourd'hui la construction de modèles réduits de véhicules sous-marins et par conséquent, ouvrent des perspectives très intéressantes pour la découverte des océans. La protection des ressources naturelles et minérales, fragilisées par la pollution et la surexploitation, en est une application concrète. Cette thématique est également d'intérêt pour la région Sud où de nombreux industriels sont implantés. Le cadre d'étude concerne les AUVs totalement actionnés pour des tâches d'inspection visuelle diverses, allant du suivi de structures linéaires à la stabilisation à proximité d'une structure marine. Ces missions, communes de nos jours, sont généralement réalisées à partir des sous-marins télécommandés par des opérateurs humains en surface. Dans ce genre de missions, la perception et la navigation des AUVs reposent essentiellement sur des capteurs extéroceptifs embarqués. Cependant, la commande référencée capteur, et plus particulièrement la commande référencée vision de systèmes dynamiques fortement non linéaires, est relativement complexe. L'estimation de la pose du véhicule n'est généralement pas disponible et les données perçues par les capteurs fournissent des informations couplées et indirectes sur l'état du système et son environnement proche. À ces difficultés s'ajoutent celles liées au milieu marin telles que les problèmes de communication et de traitement d'images ou encore l'impossibilité d'utiliser les capteurs standards en robotique terrestre et/ou aérienne.

Bien que de nombreux chercheurs et industriels travaillent sur ces thématiques, les résultats obtenus ne sont pas encore assez matures pour envisager leurs industrialisations. Les travaux développés dans les thèses de Szymon Krupinski et Lam Hung Nguyen tentent d'apporter des solutions nouvelles et originales pour atteindre ces objectifs. Deux applications concrètes sont présentées dans la suite. La première concerne le suivi de structures linéaires, telles qu'un pipeline. La seconde concerne la stabilisation en une image fixe afin d'inspecter des infrastructures sous-marines. L'intérêt de ces applications est multiple car il existe un nombre important de structures dans les fonds marins qui nécessitent régulièrement des actions préventives et/ou correctives. En voici quelques exemples :

- les pipelines transportant du pétrole, du gaz ou de l'eau ;
- les câbles de télécommunication et d'énergie ;
- les plateformes de recherches océanographiques équipées d'instruments ;
- les têtes de puits, les unités de séparation sous-marines, les collecteurs, les pompes ;
- les réseaux d'hydrophones militaires ;
- les parcs éoliens flottants en mer ;
- les systèmes d'ancrage sous-marin ;
- etc.

Dans la section 4.1, un rappel important est fait sur la modélisation de la dynamique complexe des sous-marins en utilisant l’approche lagrangienne. Les phénomènes hydrodynamiques et hydrostatiques sont étudiés et le modèle non linéaire du sous-marin complet est donné. La section 4.2 est dédiée au suivi de structures linéaires tandis que la section 4.3 est consacrée à la stabilisation en une image fixe, basée sur la matrice homographie. Deux approches sont proposées dans cette dernière section. L’une fait l’hypothèse que la mesure des vitesses linéaires est disponible tandis que la deuxième considère que cette mesure est inexistante.

## 4.1 Modélisation du sous-marin

Il existe diverses représentations mathématiques pour les navires et véhicules sous-marins. La plus connue a été définie en 1950 par la SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers). Inspirée de la modélisation des bras manipulateurs, elle est reprise dans le livre de T.I. Fossen [Fos02]. Elle est la base d’un grand nombre d’ouvrages et de travaux scientifiques sur le contrôle des véhicules sous-marins. La représentation choisie est non linéaire et elle est développée sur la base des angles d’Euler. L’avantage de cette paramétrisation minimale de l’attitude permet une linéarisation directe des équations du système par rapport à une trajectoire d’équilibre souhaitée. L’application de toutes les techniques de contrôle linéaire sur le système linéarisé est donc directe. Cependant, comme toute paramétrisation minimale de l’attitude, cette représentation souffre d’une singularité quand l’angle de tangage atteint  $\pm\pi/2$ .

Afin d’éviter cette singularité, l’attitude peut être représentée par une matrice de rotation  $\mathbf{R}$ , un élément du groupe Spécial Orthogonal  $SO(3)$ . Concernant les équations dynamiques, la formulation proposée par N. E. Leonard [Leo97] est préférée ici à celle de T.I. Fossen [Fos02]. Ce choix se justifie en raison de sa forme compacte et de son interprétation physique. L’équivalence entre ces deux modèles peut être aisément trouvée dans [Kru14].

Dans la suite, les bases de la modélisation des AUV sont rappelées. Les repères de référence utilisés sont définis ainsi que les notions de cinématique et de dynamique du véhicule. L’AUV étant immergé dans un fluide, les effets hydrodynamiques en termes de masse ajoutée et de traînée sont ensuite soigneusement étudiés. Enfin, les perturbations extérieures sont examinées et le modèle non linéaire complet est donné. La section se termine par le modèle mathématique qui sera utilisé pour le contrôle.

### 4.1.1 Repères de référence

Pour établir les équations décrivant le mouvement d’un AUV dans l’espace euclidien à trois dimensions, on utilise deux repères. Le premier  $\{\mathcal{A}\} = \{O; \vec{e}_1^a, \vec{e}_2^a, \vec{e}_3^a\}$  est fixe, attaché à la Terre, avec l’axe  $\vec{e}_3^a$  orienté vers le bas (perpendiculairement à la surface de la Terre). Le second  $\{\mathcal{B}\} = \{B; \vec{e}_1^b, \vec{e}_2^b, \vec{e}_3^b\}$  est mobile et attaché au centre de flottabilité du sous-marin (voir Figure 4.1), où les trois axes sont alignés avec les principaux axes de symétrie du véhicule :  $\vec{e}_1^b$  pointe vers l’avant du véhicule, l’axe  $\vec{e}_2^b$  est orienté vers tribord et l’axe  $\vec{e}_3^b$  est orienté vers le bas.

Le vecteur de coordonnées représentant la position du centre de gravité (CG) dans  $\{\mathcal{B}\}$  est désigné par  $\mathbf{r}_G \in \mathbb{R}^3$ .

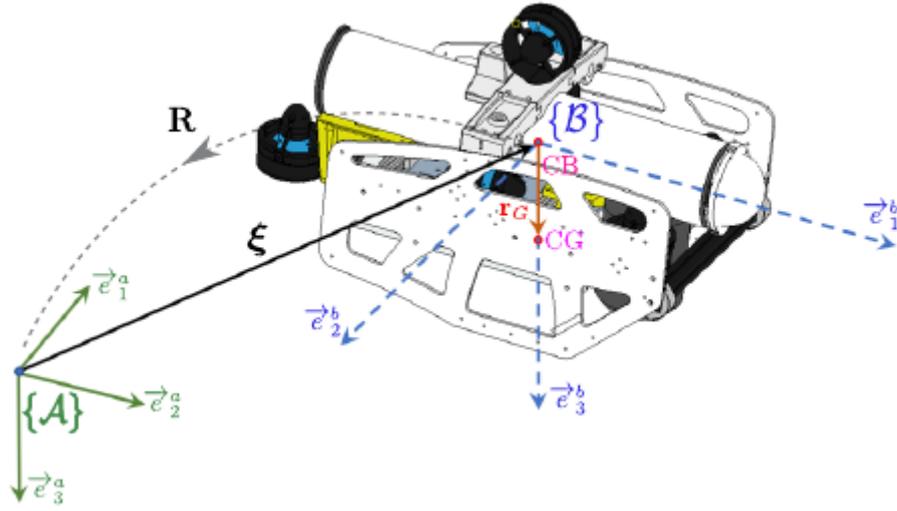


Figure 4.1 – Repères de référence utilisés

### 4.1.2 Modélisation cinématique

Le modèle cinématique décrit les relations géométriques entre les variations de la pose du véhicule (c'est-à-dire sa position et son orientation) et ses vitesses (linéaires et angulaires). Elles peuvent s'exprimer dans les différents repères de référence.

Soit  $\xi$  un vecteur représentant la position du centre de flottabilité (CB) du sous-marin dans le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$ . La variation de la position du centre de flottabilité exprimée dans le repère  $\{\mathcal{A}\}$  en fonction des vitesses linéaires  $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^3$  exprimées dans le repère mobile  $\{\mathcal{B}\}$  s'écrit :

$$\dot{\xi} = \mathbf{R}\mathbf{V}, \quad (4.1)$$

où  $\mathbf{R}$  est la matrice de rotation qui définit l'orientation du repère mobile  $\{\mathcal{B}\}$  par rapport au repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$ . La relation exprimant la cinématique de la matrice de rotation du véhicule satisfait [MLS94] :

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\boldsymbol{\Omega}_\times, \quad (4.2)$$

avec  $\boldsymbol{\Omega} \in \mathbb{R}^3$  le vecteur des vitesses angulaires exprimé dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ .

### 4.1.3 Modélisation dynamique

Le modèle dynamique décrit les accélérations linéaires et angulaires liées au mouvement du véhicule sous l'action des forces et des couples qui agissent sur lui. La dynamique d'un AUV peut être divisée en deux parties. La première découle du corps rigide tandis que la deuxième résulte de l'interaction de l'AUV avec le milieu dense et visqueux dans lequel il évolue (forces et couples dus aux effets hydrostatiques et hydrodynamiques). Les paragraphes suivants fournissent une analyse de chacune d'entre elles.

#### 4.1.3.1 Dynamique du corps rigide

Soit la matrice d'inertie du corps rigide, notée  $\mathbf{J}_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , exprimée au centre de gravité (CG) du véhicule et dans un repère dont les axes sont alignés avec ceux du repère  $\{\mathcal{B}\}$ . Cette matrice  $\mathbf{J}_0$ , diagonale et définie positive, peut s'exprimer en  $\{\mathcal{B}\}$  par [KA05] :

$$\mathbf{J}_B = \mathbf{J}_0 - m\mathbf{r}_{G \times}^2. \quad (4.3)$$

En notant respectivement  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$  et  $\mathbf{\Pi} \in \mathbb{R}^3$  les moments de translation et de rotation exprimés dans  $\{\mathcal{B}\}$ , on peut écrire :

$$\begin{cases} \mathbf{P} &= m\mathbf{V} - m\mathbf{r}_{G \times} \boldsymbol{\Omega} \\ \mathbf{\Pi} &= \mathbf{J}_B \boldsymbol{\Omega} + m\mathbf{r}_{G \times} \mathbf{V} \end{cases} \quad (4.4)$$

Soit  $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^3$  et  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$  les forces et couples totaux exprimés dans  $\{\mathcal{A}\}$  qui agissent sur le véhicule. En considérant que ces grandeurs s'appliquent au centre de flottabilité (CB), la dynamique du corps rigide est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{F} \\ \dot{\mathbf{\Pi}} &= \mathbf{\Pi} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V} + \boldsymbol{\Gamma} \end{cases} \quad (4.5)$$

avec  $\mathbf{F} = \mathbf{R}^\top \mathbf{f}$  et  $\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{R}^\top \boldsymbol{\tau}$ , les forces et couples exprimés dans  $\{\mathcal{B}\}$ .

L'énergie cinétique totale, composée de l'énergie cinétique de translation et de l'énergie cinétique de rotation s'écrit alors :

$$E_B = \frac{1}{2} \mathbf{W}^\top \mathbf{M}_B \mathbf{W} \quad (4.6)$$

avec  $\mathbf{W} \triangleq [\mathbf{V}^\top, \boldsymbol{\Omega}^\top]^\top \in \mathbb{R}^6$  et  $\mathbf{M}_B$  la matrice de masse et d'inertie du sous-marin

$$\mathbf{M}_B \triangleq \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & -m\mathbf{r}_{G \times} \\ m\mathbf{r}_{G \times} & \mathbf{J}_B \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

#### 4.1.3.2 Masse ajoutée

Les masses ajoutées sont des masses virtuelles permettant de représenter certains effets hydrodynamiques de l'eau sur le corps du véhicule. Ce phénomène a été introduit pour la première fois en 1828 dans [Sto51]. D'après la théorie de Kirchhoff et Lamb, l'énergie cinétique du liquide entourant le sous-marin s'écrit :

$$E_F = \frac{1}{2} \mathbf{W}^\top \mathbf{M}_A \mathbf{W} \quad (4.8)$$

où la matrice  $\mathbf{M}_A$  est donnée par :

$$\mathbf{M}_A \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{M}_A^{11} & \mathbf{M}_A^{12} \\ \mathbf{M}_A^{21} & \mathbf{M}_A^{22} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

En dépit de procédures d'estimations complexes, cette matrice constante est généralement considérée comme définie positive et avec tous les coefficients de la diagonale positifs dans le cas de corps submergés. Une bonne approximation, démontrée dans [Fos11], prouve que l'on peut considérer que  $\mathbf{M}_A = \mathbf{M}_A^\top$  ce qui revient à avoir  $\mathbf{M}_A^{21} = \mathbf{M}_A^{12\top}$ .

En pratique, lorsque le véhicule se déplace à des vitesses faibles et que sa géométrie possède trois axes de symétrie, la matrice  $\mathbf{M}_A$  est généralement considérée comme diagonale [Fos11]. Dans ce cas,  $\mathbf{M}_A^{21} = \mathbf{M}_A^{12} \approx \mathbf{0}$ .

#### 4.1.3.3 Dynamique corps/fluide

L'énergie cinétique totale  $E_T$  du corps dans son milieu est obtenue en concaténant (4.6) et (4.8) :

$$E_T = \frac{1}{2} \mathbf{W}^\top \mathbf{M}_T \mathbf{W}, \text{ avec } \mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \boldsymbol{\Xi}^\top \\ \boldsymbol{\Xi} & \mathbf{J} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

où  $\mathbf{M} \triangleq m\mathbf{I}_3 + \mathbf{M}_A^{11}$ ,  $\mathbf{J} \triangleq \mathbf{J}_B + \mathbf{M}_A^{22}$  et  $\mathbf{\Xi} \triangleq m\mathbf{r}_{G\times} + \mathbf{M}_A^{21}$ .

**Remarque 6** L'équation (4.10) montre clairement que la présence d'éléments non diagonaux dans la matrice  $\mathbf{M}_T$  provoquent un couplage entre la dynamique de translation et la dynamique de rotation. Ce couplage s'explique par la présence des masses ajoutées et par le fait que la dynamique du corps rigide est exprimée en (CB).

Selon l'hypothèse réaliste précédente (c'est-à-dire  $\mathbf{M}_A^{21} = \mathbf{M}_A^{12} \approx \mathbf{0}$ ), on obtient  $\mathbf{\Xi}^\top = -\mathbf{\Xi} \approx -m\mathbf{r}_{G\times}$ . Les moments de translation et rotation totaux s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \mathbf{P} &= \frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{V}} = \mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\boldsymbol{\Omega} \\ \boldsymbol{\Pi} &= \frac{\partial E_T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} = \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V} \end{cases} \quad (4.11)$$

On déduit de (4.5) et de (4.11) la dynamique du sous-marin suivante :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} - \mathbf{\Xi}\dot{\boldsymbol{\Omega}} &= (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{F} \\ \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}} &= (\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{V} + \boldsymbol{\Gamma} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Les paragraphes suivants détaillent les forces  $\mathbf{F}$  et couples  $\boldsymbol{\Gamma}$  présents dans (4.12) qui agissent sur le véhicule.

## 4.1.4 Couples et forces extérieures

### 4.1.4.1 Forces et couples induits par le poids et la poussée d'Archimède

Tandis que le modèle présenté dans les sections précédentes décrit l'hydrodynamique et la physique du corps rigide, il n'explicite pas les forces et les couples liés à la gravité et à la flottabilité :

- la force gravitationnelle agit sur le corps rigide dans la direction  $\vec{e}_3^g$ . Dans  $\{\mathcal{A}\}$ , cette force s'écrit  $\mathbf{F}_G^A = mg\mathbf{e}_3$  où  $g \approx 9.8[m.s^{-2}]$  est la constante de gravité. Quand cette force est exprimée dans le repère mobile  $\{\mathcal{B}\}$ , elle s'écrit :

$$\mathbf{F}_G = mg\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3. \quad (4.13)$$

- la force de flottabilité d'un corps submergé est égale au poids gravitationnel du liquide déplacé. Son estimation nécessite la connaissance du volume du véhicule  $v$  et de la densité de l'eau  $\rho_w$ . Son expression dans le repère mobile  $\{\mathcal{B}\}$  est donnée par :

$$\mathbf{F}_B = -\rho_w v g \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3. \quad (4.14)$$

Ces deux forces peuvent alors s'ajouter :

$$\mathbf{F}_{gb} \triangleq \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B = \beta_{gb} \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3, \quad (4.15)$$

avec  $\beta_{gb} = (m - \rho_w v)g$ . Sachant que la force de flottabilité s'applique en (CB) et que la force gravitationnelle s'applique en (CG), un couple supplémentaire résultant de ces deux forces apparaît. Il s'écrit :

$$\boldsymbol{\Gamma}_g \triangleq m g \mathbf{r}_{G\times} \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3. \quad (4.16)$$

D'un point de vue pratique, les véhicules sous-marins sont souvent construits pour tirer avantage de ces deux forces. En effet, l'amplitude et la position relative des points d'application de (4.13) et de (4.14) ont un impact important sur la stabilité du véhicule. Un équilibre est généralement recherché lors de la construction de façon à ce que le poids soit légèrement inférieur à la poussée d'Archimède. Ceci permet :

- de minimiser l'énergie nécessaire pour maintenir les angles de roulis et de tangage vers zéro ;
- d'avoir un retour à la surface spontané en cas de panne moteur.

#### 4.1.4.2 Forces et couples de traînées

Un véhicule sous-marin immergé est soumis à une force de traînée, aussi appelée amortissement hydrodynamique. Cette force contraint le mouvement relatif du véhicule par rapport à son fluide environnant.

**Remarque 7** *Il est important de différencier la traînée et la masse ajoutée (ou inertie ajoutée) vue précédemment. La première décrit l'effet du liquide environnant sur le corps rigide se déplaçant à une vitesse relative tandis que la seconde n'est appliquée que dans le contexte de l'accélération.*

Il existe trois formes différentes de traînée [Cre14] pour les AUV<sup>1</sup> :

- la première, appelée traînée de friction est due aux frottements dans la couche limite (*skin friction*). Elle est linéaire dans le cas de vitesses faibles et devient non linéaire lorsque les mouvements deviennent plus rapides ;
- la deuxième est la traînée de forme due à la viscosité du fluide. Elle devient prépondérante par rapport à la traînée de friction lorsque la vitesse augmente ;
- la troisième est la traînée induite, engendrée par les tourbillons créés par le véhicule.

Il est difficile de dissocier mathématiquement toutes ces contributions. L'ensemble de ces forces s'exprime alors globalement sous la forme [Fos02] :

$$\begin{cases} \mathbf{F}_d &= -(\mathbf{D}_{Vl} + |\mathbf{V}|\mathbf{D}_{Vq}) \mathbf{V} \\ \mathbf{\Gamma}_d &= -(\mathbf{D}_{\Omega l} + |\mathbf{\Omega}|\mathbf{D}_{\Omega q}) \mathbf{\Omega} \end{cases} \quad (4.17)$$

où les matrices  $\mathbf{D}_{Vl}$ ,  $\mathbf{D}_{Vq}$ ,  $\mathbf{D}_{\Omega l}$  et  $\mathbf{D}_{\Omega q}$  sont définies positives. Dans le cas de véhicules sous-marins, on considère que ces matrices contiennent seulement des termes diagonaux.

#### 4.1.4.3 Courant marin

Le courant marin est un facteur externe qui doit donc être pris en compte dans la modélisation puisqu'il affecte directement le comportement des véhicules sous-marins. Afin de simplifier sa modélisation, il est généralement considéré constant et irrotationnel dans le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$ . Dans le repère  $\{\mathcal{B}\}$ , on le note  $\mathbf{V}_f$  et on définit  $\mathbf{V}_h \triangleq \mathbf{V} - \mathbf{V}_f$ , la vitesse relative de (CB) par rapport au courant  $\mathbf{V}_f$ . En notant  $\mathbf{W}_h = [\mathbf{V}_h^\top, \mathbf{\Omega}^\top]^\top$ , la nouvelle énergie cinétique totale du système corps/fluide s'écrit :

$$E_T = \frac{1}{2} \mathbf{W}_h^\top \mathbf{M}_T \mathbf{W}_h. \quad (4.18)$$

---

1. Pour les véhicules sous-marins, la traînée ondulatoire est ignorée en raison du manque d'interaction entre le véhicule et la surface de l'eau.

Les moments de translation et rotation qui prennent en compte les effets du courant sous les hypothèses précédemment citées s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \mathbf{P}_h &= \frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{V}_h} = \mathbf{M}\mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega} \\ \mathbf{\Pi}_h &= \frac{\partial E_T}{\partial \mathbf{\Omega}} = \mathbf{J}\mathbf{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}_h \end{cases} \quad (4.19)$$

En prenant en compte les dynamiques (4.5) et (4.11), on obtient finalement :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}_h - \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{\Omega}} &= (\mathbf{M}\mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{F} \\ \mathbf{J}\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}}_h &= (\mathbf{J}\mathbf{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}_h) \times \mathbf{\Omega} + (\mathbf{M}\mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{V}_h + \mathbf{\Gamma} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Le courant a également un effet sur la force de traînée du véhicule (4.17) qui devient :

$$\mathbf{F}_d = -(\mathbf{D}_{Vl} + |\mathbf{V}_h|\mathbf{D}_{Vq}) \mathbf{V}_h. \quad (4.21)$$

#### 4.1.4.4 Force et couple de contrôle

Bien que l'on puisse faire une modélisation fine du système de propulsion, on considère ici que l'on peut générer des variables de contrôle composées d'un vecteur force noté  $\mathbf{F}_c \in \mathbb{R}^3$  et d'un vecteur couple noté  $\mathbf{\Gamma}_c \in \mathbb{R}^3$ . Ces forces et couples de contrôle permettent au sous-marin de manœuvrer et de lutter contre la résistance de l'eau.

La poussée et le couple exercés par un propulseur dépendent de nombreux paramètres qui ne sont pas détaillés ici. Le lecteur intéressé trouvera dans [Cre14; Kru14] des éléments supplémentaires de modélisation.

#### 4.1.5 Modèle non linéaire complet

Le modèle non linéaire complet du sous-marin dans son milieu peut être déduit des développements précédents. Indépendant du nombre d'actionneurs et de leurs distributions géométriques, le véhicule peut-être soit complètement actionné, soit sous-actionné.

Dans la suite, on considérera le cas d'un sous-marin totalement actionné. Les forces et couples de contrôle  $\mathbf{F}_c$  et  $\mathbf{\Gamma}_c$  fournissent donc six variables indépendantes qui peuvent contrôler la position et l'orientation de l'AUV. Le modèle mathématique non linéaire complet est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\xi}} &= \mathbf{R}\mathbf{V} \\ \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{R}\mathbf{\Omega}_\times \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}_h - \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{\Omega}} &= (\mathbf{M}\mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_{gb} + \mathbf{F}_d \\ \mathbf{J}\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}}_h &= (\mathbf{J}\mathbf{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}_h) \times \mathbf{\Omega} + (\mathbf{M}\mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{V}_h + \mathbf{\Gamma}_c + \mathbf{\Gamma}_g + \mathbf{\Gamma}_d \end{aligned} \quad (4.22)$$

#### 4.1.6 Modèle utilisé pour le contrôle

Dans le modèle (4.22) précédent, quelques grandeurs comme par exemple le courant marin  $\mathbf{V}_f$  ne sont pas mesurées. Les quantités de mouvement  $\mathbf{P}_h$  et  $\mathbf{\Pi}_h$  et leurs dynamiques associées sont donc inconnues et non mesurables. Il est donc nécessaire de réécrire le modèle précédent afin qu'il soit utilisable pour le contrôle en considérant les termes inconnus comme des perturbations.

En admettant que le courant est constant et irrotationnel dans  $\{\mathcal{A}\}$  (c'est-à-dire  $\dot{\mathbf{V}}_f = \mathbf{V}_f \times \mathbf{\Omega}$ ), on peut reformuler les deux dernières équations de (4.22) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} - \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{\Omega}} &= (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_{gb} + \bar{\mathbf{F}}_d + \mathbf{\Delta}_F \\ \mathbf{J}\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}} &= (\mathbf{J}\mathbf{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}) \times \mathbf{\Omega} + (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{V} + \mathbf{\Gamma}_c + \mathbf{\Gamma}_g + \mathbf{\Gamma}_d + \mathbf{\Delta}_\Gamma \end{aligned} \quad (4.23)$$

avec  $\bar{\mathbf{F}}_d = -(\mathbf{D}_{Vl} + |\mathbf{V}|\mathbf{D}_{Vq}) \mathbf{V}$ , la nouvelle force dissipative. Les termes  $\Delta_F$  et  $\Delta_\Gamma$  dépendent quant à eux de la vitesse du courant et sont donc considérés comme des termes de perturbations :

$$\begin{aligned}\Delta_F &\triangleq -(\mathbf{M}\mathbf{V}_f) \times \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{M}\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}_f + \mathbf{F}_d - \bar{\mathbf{F}}_d \\ \Delta_\Gamma &\triangleq -(\mathbf{M}\mathbf{V}) \times \mathbf{V}_f - (\mathbf{M}\mathbf{V}_f) \times (\mathbf{V} - \mathbf{V}_f) - \boldsymbol{\Xi}\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}_f - (\boldsymbol{\Xi}\mathbf{V}_f) \times \boldsymbol{\Omega}.\end{aligned}\tag{4.24}$$

Les termes  $\Delta_F$  et  $\Delta_\Gamma$  sont nuls dans le cas où le courant marin est égal à zéro. Dans le cas contraire, ces termes devront être soit estimés par un observateur, soit traités à l'aide d'intégrateur.

## 4.2 Poursuite de trajectoire par asservissement visuel le long d'une structure linéaire

Dans cette section, le problème du suivi de structure linéaire est résolu en utilisant une caméra monoculaire. L'objectif consiste à contrôler les mouvements d'un sous-marin pour qu'il navigue le long d'un pipeline, à une hauteur prédéfinie et à une vitesse de référence choisie par un opérateur humain. De nombreux travaux ayant le même objectif sont disponibles dans la littérature [MY95; AO03; IP09; Bag+11], pour n'en citer que quelques-uns. Ils utilisent les informations visuelles pour détecter le pipeline et des connaissances *a priori* sur sa géométrie pour déterminer la position relative du sous-marin par rapport à la structure linéaire. Un contrôleur cinématique est alors utilisé sans prendre en compte la dynamique du sous-marin. Bien que les résultats obtenus soient performants dans le cas où la position initiale de l'AUV est proche de la trajectoire de référence, la stabilité globale ne peut pas être prouvée.

D'autres approches ont été proposées de manière plus "abstraite", dans le sens où les erreurs sont directement calculées à partir des caractéristiques de l'image. Les avantages de cette approche sont nombreuses. Premièrement, elle ne nécessite aucune information sur la géométrie du pipeline. Deuxièmement, elle est plus robuste car elle n'est pas basée sur une reconstruction 3D. Enfin, elle est moins "gourmande" en terme de calculs. La principale caractéristique des pipelines et des câbles sous-marins étant leur nature linéaire, les lignes ont été l'une des premières primitives à être utilisées dans le cas de l'AV2D. Ainsi dans [RB97], les auteurs proposent d'utiliser les lignes du bord du pipeline avec une représentation polaire. À partir d'un angle et d'une distance de référence dans l'image, les auteurs développent un contrôleur basé sur le principe de fonctions de tâche [SER91]. Cependant, en raison du caractère local de l'approche proposée, seule une stabilité locale est obtenue et le domaine de convergence est impossible à caractériser.

L'objectif du travail suivant a été d'étendre ces résultats en prenant en compte la dynamique complète du sous-marin et en définissant le domaine de convergence. Comme précédemment, les caractéristiques visuelles considérées sont les droites correspondant aux bords du pipeline, modélisées à partir des coordonnées de Plücker.

### 4.2.1 Formulation du problème

Le drone sous-marin considéré ici est équipé d'une caméra monoculaire. Soit  $\{\mathcal{C}\} = \{O; \vec{e}_1^c, \vec{e}_2^c, \vec{e}_3^c\}$  un repère attaché à la caméra dont les axes sont parallèles à  $\{\mathcal{B}\}$ . Le vecteur de coordonnées représentant la position de  $\{\mathcal{C}\}$  dans  $\{\mathcal{B}\}$  est donné par  $\mathbf{r}_C$  (voir Fig 4.2). Les vitesses linéaires de la caméra, exprimées dans  $\{\mathcal{B}\}$  sont données par le vecteur

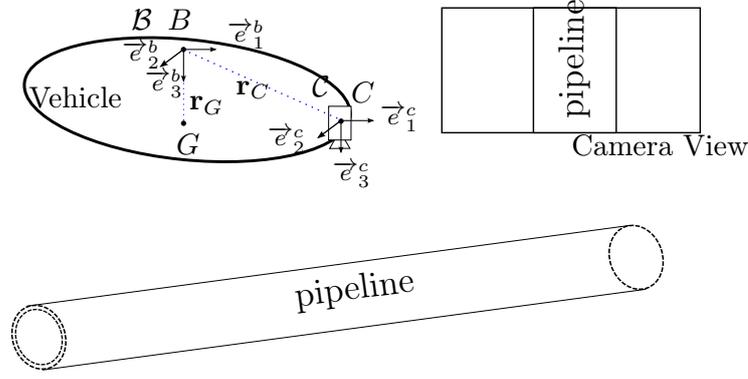


Figure 4.2 – Notations et repères

$$\mathbf{V}_C = \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_C.$$

Le véhicule est également équipé d'une centrale inertielle (*Inertial Measurement Unit*, IMU) et d'un capteur de vitesses linéaires (*Doppler Velocity Log*, DVL). La centrale inertielle fournit les mesures des vitesses angulaires  $\boldsymbol{\Omega}$ , ainsi qu'une estimation de la direction de la gravité  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$  (angles de roulis et de tangage), sous l'hypothèse d'accélération faible. Le DVL fournit, quant à lui, une mesure des vitesses linéaires  $\mathbf{V}$ .

Sans perte de généralité, le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$  est choisi de telle sorte que  $\mathbf{u}$ , la direction du pipeline dans le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$ , vérifie la condition  $\mathbf{u} \in \text{span}(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3)$ . On considère également que sa courbure est négligeable de manière à ce que sa direction  $\mathbf{u}$  soit approximativement constante.

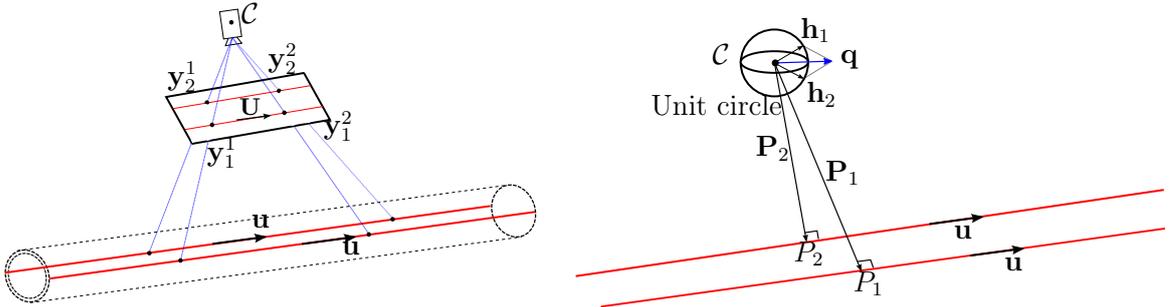


Figure 4.3 – Construction de l'erreur visuelle  $\mathbf{q}$

En considérant parallèles les droites qui définissent les bords du pipeline, les coordonnées de Plücker bi-normalisées des droites  $(\mathbf{h}_i, \mathbf{U}) \in S^2 \times S^2$ ,  $i = \{1, 2\}$  dans le repère caméra  $\{\mathcal{C}\}$  s'écrivent [Plü65] :

$$\begin{cases} \mathbf{h}_i \triangleq \frac{\mathbf{y}_i^1 \times \mathbf{y}_i^2}{|\mathbf{y}_i^1 \times \mathbf{y}_i^2|} \\ \mathbf{U} = \pm \frac{\mathbf{h}_1 \times \mathbf{h}_2}{|\mathbf{h}_1 \times \mathbf{h}_2|} \end{cases} \quad (4.25)$$

où  $\mathbf{y}_i^1$  et  $\mathbf{y}_i^2$  sont les coordonnées métriques en pixels<sup>2</sup> des points appartenant à la ligne  $i$  par rapport au centre optique de la caméra. La direction du pipeline  $\mathbf{U}$ , exprimée dans  $\{\mathcal{C}\}$  est spécifiée au signe près par l'utilisateur.

L'information visuelle utilisée est basée sur la somme des vecteurs  $\mathbf{h}_i$ ,  $i = \{1, 2\}$  (voir Figure 4.3) :

$$\mathbf{q} \triangleq \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2,$$

2. C'est-à-dire les coordonnées 3D des points divisées par leurs profondeurs

avec  $\mathbf{h}_i = \frac{\mathbf{H}_i}{|\mathbf{H}_i|}$  où  $\mathbf{H}_i = \mathbf{P}_i \times \mathbf{U}$  et  $\mathbf{P}_i$  est le vecteur de coordonnées du point  $P_i$  de la ligne la plus proche de l'origine du repère de la caméra  $\{\mathcal{C}\}$ . La variation du vecteur visuel  $\mathbf{q}$  s'obtient à partir de la vitesse de la caméra et des équations dynamiques de  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{P}_i$  et  $\mathbf{H}_i$  ([MH05]) :

$$\dot{\mathbf{q}} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{q} - \mathbf{Q}(\mathbf{V}_C \times \mathbf{U}) \quad (4.26)$$

où  $\mathbf{Q} \triangleq \sum_{i=1}^2 \frac{1}{|\mathbf{H}_i|} \pi_{\mathbf{h}_i}$  est une matrice symétrique définie positive avec  $|\mathbf{H}_i|$  qui est égale à la distance de l'origine de  $\{\mathcal{C}\}$  au point  $i$  le plus proche de la ligne, c'est-à-dire  $|\mathbf{H}_i| = |\mathbf{P}_i|$ .

**Remarque 8** *Il est important de bien noter ici que cette distance n'est ni mesurée, ni connue. Seule la connaissance de la positivité de la matrice  $\mathbf{Q}$  est utilisée dans la conception du contrôleur.*

Soit  $\mathbf{q}^*$ , un vecteur de référence visuel, choisi constant et parallèle à  $\mathbf{e}_2$ . On vérifie aisément que  $\mathbf{q}^* = |\mathbf{q}^*| \mathbf{e}_2$  et  $\dot{\mathbf{q}}^* = 0$ . Le contrôle revient à assurer une stabilisation asymptotique de  $\mathbf{q}$  vers  $\mathbf{q}^*$ , ce qui revient à positionner la caméra du sous-marin au milieu du pipeline et à une distance relative dépendante de la norme de  $\mathbf{q}^*$ .

Soit une erreur visuelle définie par :

$$\boldsymbol{\delta}_1 \triangleq \mathbf{q} - \pi_{\mathbf{U}} \mathbf{q}^*. \quad (4.27)$$

Les objectifs du contrôleur se résument à :

- stabiliser la position latérale et la position verticale de la camera du sous-marin par rapport au pipeline aux valeurs désirées avec un angle de roulis nul (c'est-à-dire  $\boldsymbol{\delta}_1$  et  $\phi$  égaux à 0) ;
- stabiliser le vecteur  $\mathbf{U}$  vers  $\mathbf{e}_1$  ;
- stabiliser la vitesse  $\mathbf{V}^\top \mathbf{U}$  vers une valeur de référence  $v_r \in \mathbb{R}$  ;
- faire converger l'angle de tangage asymptotiquement vers l'angle de pente  $\beta$  du pipeline ( $-\pi/2 < \beta < \pi/2$ ).

## 4.2.2 Description des contrôleurs

Une architecture de contrôle alliant une boucle interne et une boucle externe est utilisée (*inner* et *outer loop*).

La boucle interne (*inner loop*) permet d'assurer la stabilisation asymptotique des vitesses  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega})$  du sous-marin vers des vitesses de référence  $(\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r)$  au moyen des forces  $\mathbf{F}_c$  et des couples  $\boldsymbol{\Gamma}_c$  de contrôle. Le sous-marin étant complétement actionné, la conception de la boucle interne ne pose pas de problème particulier. Son étude sera donnée en seconde partie.

La boucle externe a pour objectif de déterminer les vitesses de références  $(\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r)$  ainsi que leurs dérivées à partir des informations visuelles issues de la caméra afin d'assurer la stabilisation de  $(\boldsymbol{\delta}_1, \mathbf{U}, \mathbf{V})$  vers  $(\mathbf{0}, \mathbf{e}_1, v_r \mathbf{e}_1)$ .

### 4.2.2.1 Boucle externe

L'objectif de la boucle externe est de stabiliser  $(\boldsymbol{\delta}_1, \mathbf{U}, \mathbf{V})$  vers  $(\mathbf{0}, \mathbf{e}_1, v_r \mathbf{e}_1)$  à partir de la mesure des informations visuelles issues de la caméra. À partir de (4.26), (4.27) et de la dynamique de  $\mathbf{U}$  ( $\dot{\mathbf{U}} = -\mathbf{U} \times \boldsymbol{\Omega}$  car  $\mathbf{u}$  est constant dans  $\{\mathcal{A}\}$ ), les variations de l'erreur visuelle s'écrivent :

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\delta}}_1 &= -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{q} - \mathbf{Q}(\mathbf{V}_C \times \mathbf{U}) + (\dot{\mathbf{U}} \mathbf{U}^\top + \mathbf{U} \dot{\mathbf{U}}^\top) \mathbf{q}^* \\ &= -\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\delta}_1 + \pi_{\mathbf{U}} \mathbf{q}^*) - \mathbf{Q}(\mathbf{V}_C \times \mathbf{U}) + (-\boldsymbol{\Omega}_\times \mathbf{U} \mathbf{U}^\top + \mathbf{U} \mathbf{U}^\top \boldsymbol{\Omega}_\times) \mathbf{q}^* \\ &= -\boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\delta}_1 - \pi_{\mathbf{U}}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{q}^*) - \mathbf{Q}(\mathbf{V}_C \times \mathbf{U}). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Une étude rapide de (4.28) montre qu'il est possible, lorsque l'on considère  $\mathbf{V}$  et  $\mathbf{\Omega}$  comme des entrées, d'assurer les objectifs imposés à la boucle externe. Toutefois,  $\mathbf{V}$  et  $\mathbf{\Omega}$  ne sont pas les variables de contrôle physiques et ne peuvent donc pas être utilisées directement. L'approche proposée ici consiste alors à définir le couple des vitesses de référence  $(\mathbf{V}_r, \mathbf{\Omega}_r)$  ainsi que leurs dérivées afin de les transmettre à la boucle interne. Cette dernière assurera la convergence des vitesses  $(\mathbf{V}, \mathbf{\Omega})$  vers celles de référence  $(\mathbf{V}_r, \mathbf{\Omega}_r)$ .

Afin de satisfaire ces exigences, on propose de définir les vitesses de référence de la manière suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{\Omega}_r \triangleq k_u \mathbf{e}_1 \times \mathbf{U} - k_\omega \mathbf{e}_1 (\mathbf{e}_2^\top \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) \\ \mathbf{V}_r \triangleq [\mathbf{e}_1]_\times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\delta}_2 \end{bmatrix} + v_r \mathbf{e}_1 - \mathbf{\Omega}_r \times \mathbf{r}_C \end{cases} \quad (4.29)$$

avec  $k_u$  et  $k_\omega$  des gains positifs et  $\bar{\delta}_2 \in \mathbb{R}^2$  une variable solution de l'équation différentielle suivante :

$$\dot{\bar{\delta}}_2 = \mathbf{K}_1 \bar{\delta}_1 - \mathbf{K}_2 \bar{\delta}_2, \quad \bar{\delta}_2(0) = \bar{\delta}_0. \quad (4.30)$$

Dans (4.30),  $\bar{\delta}_0 \in \mathbb{R}^2$  est la solution initiale,  $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12})$ ,  $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(k_{21}, k_{22}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  sont des matrices diagonales de gains positifs et  $\bar{\delta}_1 \triangleq [\delta_{1,2}, \delta_{1,3}]^\top \in \mathbb{R}^2$  est le vecteur des deux dernières composantes de  $\delta_1$ .

Puisque les dérivées de  $\mathbf{U}$  et de  $\bar{\delta}_2$  peuvent être calculées et que  $\bar{\delta}_2$  peut être obtenu par intégration, le calcul de  $\dot{\mathbf{V}}_r$  et  $\dot{\mathbf{\Omega}}_r$  est direct. On en déduit la Proposition suivante :

**Proposition 5** *Soient les vitesses de référence  $\mathbf{V}_r$  et  $\mathbf{\Omega}_r$  définies par les équations (4.29). Soit un contrôleur de boucle interne qui assure une stabilité asymptotique globale et une stabilité exponentielle locale de l'équilibre  $(\mathbf{V}_C, \mathbf{\Omega}) = (\mathbf{V}_{C_r}, \mathbf{\Omega}_r)$ . Soit  $\lambda_{\bar{\mathbf{Q}}}^{\text{sup}}, \lambda_{\bar{\mathbf{Q}}}^{\text{inf}} > 0$  qui désignent la plus grande et la plus petite valeur propre de la matrice symétrique définie positive  $\bar{\mathbf{Q}} \triangleq \begin{bmatrix} Q_{2,2} & Q_{2,3} \\ Q_{2,3} & Q_{3,3} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ . Soit  $\gamma_{\dot{\bar{\mathbf{Q}}}}$  qui représente les bornes de  $\dot{\bar{\mathbf{Q}}}$ . En considérant que les gains  $\mathbf{K}_1$  et  $\mathbf{K}_2$  utilisés dans (4.29) et (4.30) satisfont :*

$$k_{1\text{max}} < \frac{k_{2\text{min}}^2}{\varepsilon \lambda_{\bar{\mathbf{Q}}}^{\text{sup}}}, \quad k_{1\text{min}} > \frac{(1 + \varepsilon) \gamma_{\dot{\bar{\mathbf{Q}}}}}{2\varepsilon (\lambda_{\bar{\mathbf{Q}}}^{\text{inf}})^2} k_{2\text{max}} \quad (4.31)$$

avec  $\varepsilon$  un nombre positif et

$$\begin{aligned} k_{1\text{max}} &\triangleq \max(k_{11}, k_{12}), & k_{1\text{min}} &\triangleq \min(k_{11}, k_{12}) \\ k_{2\text{max}} &\triangleq \max(k_{21}, k_{22}), & k_{2\text{min}} &\triangleq \min(k_{21}, k_{22}) \end{aligned}$$

alors,  $\mathbf{U}$  converge vers  $\pm \mathbf{e}_1$  et  $\delta_1$  et  $\bar{\delta}_2$  convergent vers zéro. De plus,  $(\mathbf{V}, \mathbf{\Omega})$  convergent asymptotiquement vers  $(v_r \mathbf{U}, \mathbf{0})$ .

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [All+19, Pro.1].

Cette preuve, basée sur la théorie de Lyapunov, suit les trois étapes suivantes :

1. la première montre la convergence de  $\mathbf{U}$  vers  $\pm \mathbf{e}_1$  ;
2. la deuxième montre la convergence de  $\mathbf{\Omega}_r$  puis celle de  $\mathbf{\Omega}$  vers zéro ;
3. enfin, la dernière étape montre la convergence exponentielle de  $\delta_1$  et  $\bar{\delta}_2$  vers zéro puis celle de  $\mathbf{V}$  vers  $v_r \mathbf{e}_1$ .

### 4.2.2.2 Boucle interne

L'objectif de la boucle interne est de stabiliser des vitesses du sous-marin vers les vitesses désirées issues de la boucle externe. Puisque le sous-marin est complètement actionné, la conception du contrôleur interne ne présente pas de challenge particulier.

Le principe consiste à réguler vers zéro l'erreur entre les vitesses mesurées et les vitesses de référence  $(\tilde{\mathbf{V}}, \tilde{\mathbf{\Omega}}) \rightarrow \mathbf{0}$  avec  $\tilde{\mathbf{V}} \triangleq \mathbf{V} - \mathbf{V}_r$  et  $\tilde{\mathbf{\Omega}} \triangleq \mathbf{\Omega} - \mathbf{\Omega}_r$ . En utilisant (4.23), on peut écrire :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\tilde{\mathbf{V}}} - \mathbf{\Xi}\dot{\tilde{\mathbf{\Omega}}} &= (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \tilde{\mathbf{\Omega}} + (\mathbf{M}\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{\Xi}\tilde{\mathbf{\Omega}}) \times \mathbf{\Omega}_r + \mathbf{F}_{gb} + \bar{\mathbf{F}}_d + \mathbf{\Delta}_F + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_c \\ \mathbf{J}\dot{\tilde{\mathbf{\Omega}}} + \mathbf{\Xi}\dot{\tilde{\mathbf{V}}} &= (\mathbf{J}\mathbf{\Omega} + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}) \times \tilde{\mathbf{\Omega}} + (\mathbf{M}\mathbf{V} - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}) \times \tilde{\mathbf{V}} + (\mathbf{J}\tilde{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Xi}\tilde{\mathbf{V}}) \times \mathbf{\Omega}_r + (\mathbf{M}\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{\Xi}\tilde{\mathbf{\Omega}}) \times \mathbf{V}_r + \mathbf{\Gamma}_g + \\ &\quad \mathbf{\Gamma}_d + \mathbf{\Delta}_\Gamma + \mathbf{\Gamma}_r + \mathbf{\Gamma}_c \end{aligned} \tag{4.32a}$$

$$\tag{4.32b}$$

où  $\mathbf{F}_r$  et  $\mathbf{\Gamma}_r$ , les termes de *feedforward* définis par :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_r &\triangleq -\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}_r + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{\Omega}}_r + (\mathbf{M}\mathbf{V}_r - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}_r) \times \mathbf{\Omega}_r \\ \mathbf{\Gamma}_r &\triangleq -\mathbf{J}\dot{\mathbf{\Omega}}_r - \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}}_r + (\mathbf{J}\mathbf{\Omega}_r + \mathbf{\Xi}\mathbf{V}_r) \times \mathbf{\Omega}_r + (\mathbf{M}\mathbf{V}_r - \mathbf{\Xi}\mathbf{\Omega}_r) \times \mathbf{V}_r. \end{aligned}$$

**Proposition 6** *Soit le système dynamique défini par les équations (4.32a)–(4.32b). En appliquant le contrôleur suivant :*

$$\begin{cases} \mathbf{F}_c = -\mathbf{K}_V \tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{K}_{iV} \mathbf{z}_V - (\mathbf{M}\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{\Xi}\tilde{\mathbf{\Omega}}) \times \mathbf{\Omega}_r - \mathbf{\Xi}(\tilde{\mathbf{\Omega}} \times \mathbf{\Omega}_r) + \mathbf{M}(\tilde{\mathbf{\Omega}} \times \mathbf{V}_r) - \mathbf{F}_{gb} - \bar{\mathbf{F}}_{dr} - \mathbf{F}_r \\ \mathbf{\Gamma}_c = -\mathbf{K}_\Omega \tilde{\mathbf{\Omega}} - \mathbf{K}_{i\Omega} \mathbf{z}_\Omega - (\mathbf{J}\tilde{\mathbf{\Omega}}) \times \mathbf{\Omega}_r + (\mathbf{\Xi}\tilde{\mathbf{\Omega}}) \times \mathbf{V}_r - \mathbf{\Gamma}_g - \bar{\mathbf{\Gamma}}_{dr} - \mathbf{\Gamma}_r \end{cases} \tag{4.33}$$

avec  $\mathbf{K}_V, \mathbf{K}_\Omega, \mathbf{K}_{iV}, \mathbf{K}_{i\Omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  des matrices diagonales de gains positifs,  $\mathbf{z}_V \triangleq \int_0^t \tilde{\mathbf{V}}(s) ds$ ,  $\mathbf{z}_\Omega \triangleq \int_0^t \tilde{\mathbf{\Omega}}(s) ds$ , et

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{F}}_{dr} \triangleq -(\mathbf{D}_{Vl} + |\mathbf{V}|\mathbf{D}_{Vq})\mathbf{V}_r \\ \bar{\mathbf{\Gamma}}_{dr} \triangleq -(\mathbf{D}_{\Omega l} + |\mathbf{\Omega}|\mathbf{D}_{\Omega q})\mathbf{\Omega}_r \end{cases} \tag{4.34}$$

En assumant que les termes de perturbations  $\mathbf{\Delta}_F$  et  $\mathbf{\Delta}_\Gamma$  sont constants et que  $\mathbf{V}_r, \mathbf{\Omega}_r$  et leurs dérivées sont bornées, alors le point d'équilibre du système contrôlé  $(\mathbf{V}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega) = (\mathbf{V}_r, \mathbf{\Omega}_r, \mathbf{z}_V^*, \mathbf{z}_\Omega^*)$ , avec  $\mathbf{z}_V^* = \mathbf{K}_{iV}^{-1} \mathbf{\Delta}_F$  et  $\mathbf{z}_\Omega^* = \mathbf{K}_{i\Omega}^{-1} \mathbf{\Delta}_\Gamma$ , est globalement asymptotiquement stable et localement exponentiellement stable.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Pro.3].

## 4.2.3 Validation des résultats : simulations et expérimentations

Dans cette section, on présente quelques résultats de simulations ainsi que des comparaisons avec l'état de l'art [RB97], suivis de résultats expérimentaux.

### 4.2.3.1 Simulations et comparaisons avec l'état de l'art

Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres physiques du sous-marin simulé sont donnés dans le Tableau 4.1. Ils correspondent grossièrement à ceux du Girona-500, plateforme qui est utilisée dans la partie expérimentale (voir section 4.2.3.2). Pour toutes les simulations présentées, les objectifs sont les mêmes :

Spécification	Valeur numérique
$m$ [kg]	160
$\mathbf{F}_{gb}$ [N]	$1.047mg$
$\mathbf{r}_G$ [m]	$[0 \ 0 \ 0.15]^\top$
$\mathbf{r}_C$ [m]	$[0 \ 0 \ 0]^\top$
$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{M}_A^{22}$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$\begin{bmatrix} 88 & 5 & 10 \\ 5 & 110 & 8 \\ 10 & 8 & 70 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{11}$ [kg]	$\begin{bmatrix} 20 & 5 & 10 \\ 5 & 320 & 12 \\ 10 & 12 & 320 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{12} = \mathbf{M}_A^{21\top}$ [kg.m]	$\begin{bmatrix} 1 & 10 & 4 \\ 10 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 0.5 \end{bmatrix}$
$\mathbf{D}_{Vl}$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	$diag(1, 1.2, 1.4)$
$\mathbf{D}_{Vq}$ [kg.m <sup>-1</sup> ]	$diag(30, 1700, 2550)$
$\mathbf{D}_{\Omega l}$ [kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$diag(0.3, 0.2, 0.4)$
$\mathbf{D}_{\Omega q}$ [N.m]	$diag(3, 2, 4)$

Tableau 4.1 – Paramètres physiques du sous-marin simulé

- se positionner à une hauteur de  $1[m]$  au dessus du pipeline (dont le diamètre est de  $0.2[m]$ ) et être centré en son milieu. Cela revient à choisir la valeur de  $\mathbf{q}^* = 1.9901\mathbf{e}_2$  ;
- naviguer à une vitesse de  $1[m.s^{-1}]$  le long du pipeline.

Afin de rendre explicites les résultats obtenus, le courant ainsi que les erreurs de modélisation sont considérés nuls.

Dans la suite, on appellera :

- **contrôleur 1**, le contrôleur développé dans la section 4.2.2 basé sur les boucles interne et externe. Les gains des deux boucles sont calculés à partir de la théorie classique de placement de pôles.

Pour la boucle interne, deux pôles triples à parties réelles strictement négatives  $(-2, -4)$  sont choisis pour le point de fonctionnement suivant :  $\mathbf{V}_r \equiv \mathbf{\Omega}_r \equiv \mathbf{v}_f \equiv \mathbf{0}$ . Les matrices de gains obtenus sont données par :

- $\mathbf{K}_V = diag(330.8, 922.1, 960)$ ,  $\mathbf{K}_{iV} = \mathbf{0}$ ,
- $\mathbf{K}_\Omega = diag(351.8, 438.7, 280)$ ,  $\mathbf{K}_{i\Omega} = \mathbf{0}$ .

Pour la boucle externe, deux pôles à parties réelles strictement négatives  $(-2.6, -1.2)$  sont choisis pour le système (4.30), linéarisé au point d'équilibre. Les dynamiques correspondantes sont le mouvement vertical et le mouvement latéral du sous-marin. Les valeurs des gains obtenus sont données par :

- $k_u = 6$ ,  $k_\omega = 0.5$ ,
- $\mathbf{K}_1 = diag(41.36, 3.31)$ ,  $\mathbf{K}_2 = diag(3.8, 5)$ .

- **contrôleur 2**, le contrôleur basé sur [RB97] qui faisait référence dans le domaine. Ce contrôleur est basé sur l'approche classique d'asservissement visuel en prenant comme primitives les droites correspondant à la projection des bords du pipeline. Les erreurs visuelles, écrites sous forme polaires, correspondent à la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs de référence. Comme expliqué dans [RB97], un terme

supplémentaire doit être ajouté dans le calcul des couples de contrôle afin d'assurer la stabilisation du roulis à zéro. Les gains utilisés dans les simulations sont donnés par<sup>3</sup> :  $k = 0.3$ ,  $\mu = 5/3$ ,  $\beta = 1$ ,  $k_\omega = 0.5$ .

Quelques résultats de simulation pour les deux contrôleurs sont donnés dans la suite pour des configurations initiales différentes (erreurs faibles, moyennes et importantes par rapport à la configuration désirée). Ces résultats sont visibles sur les Figures 4.4, 4.5 et 4.6.

Si les résultats semblent identiques lorsque la configuration initiale est la plus proche de celle désirée, on peut noter que des oscillations apparaissent pour le **contrôleur 2** dans le cas où l'erreur initiale devient plus importante (Figure 4.5). Lorsqu'elle devient trop grande (Figure 4.6), seul le **contrôleur 1** assure la convergence avec un comportement dynamique très satisfaisant. Ce résultat n'est pas surprenant vu le caractère local du **contrôleur 2**.

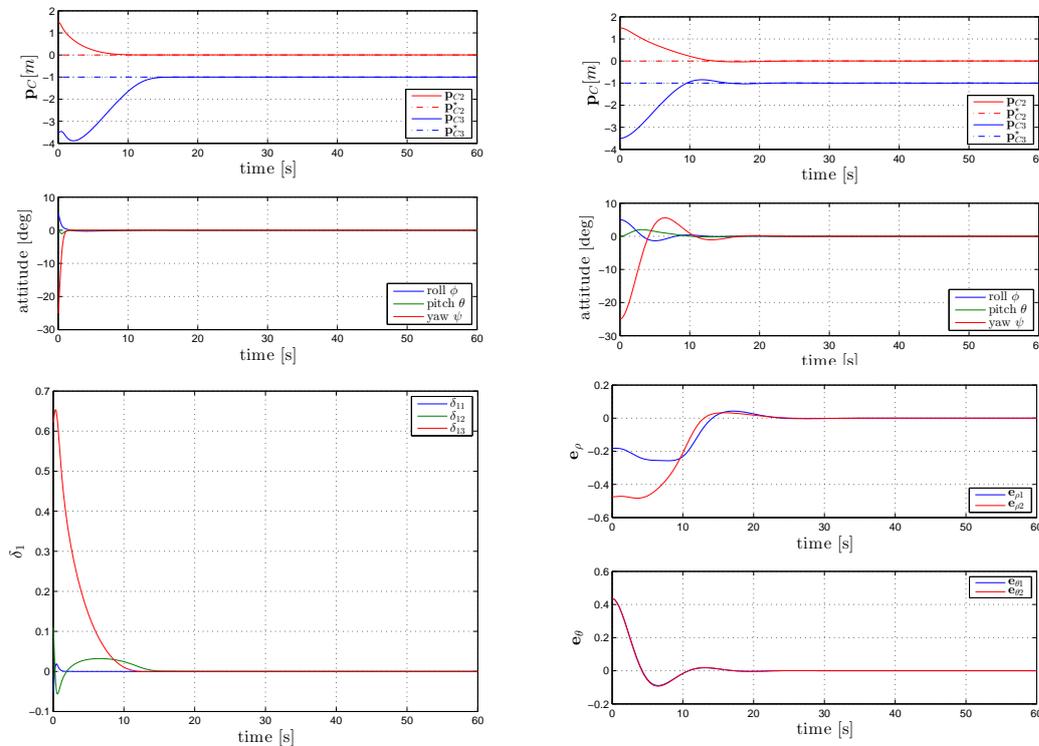


Figure 4.4 – Comparaison 1 (colonne de gauche (resp. droite) pour le **contrôleur 1** (resp. **2**)) pour des erreurs initiales faibles  $\mathbf{p}_C(0) = [0, 1.5, -3.5]^\top$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\left\{\frac{5\pi}{180}, 0, \frac{-25\pi}{180}\right\}}$ . Du haut vers le bas : position et attitude (angles d'Euler) du sous-marin vs. temps, erreur visuelle vs. temps.

3. la notation des gains  $k, \mu, \beta$  est adoptée dans [RB97]

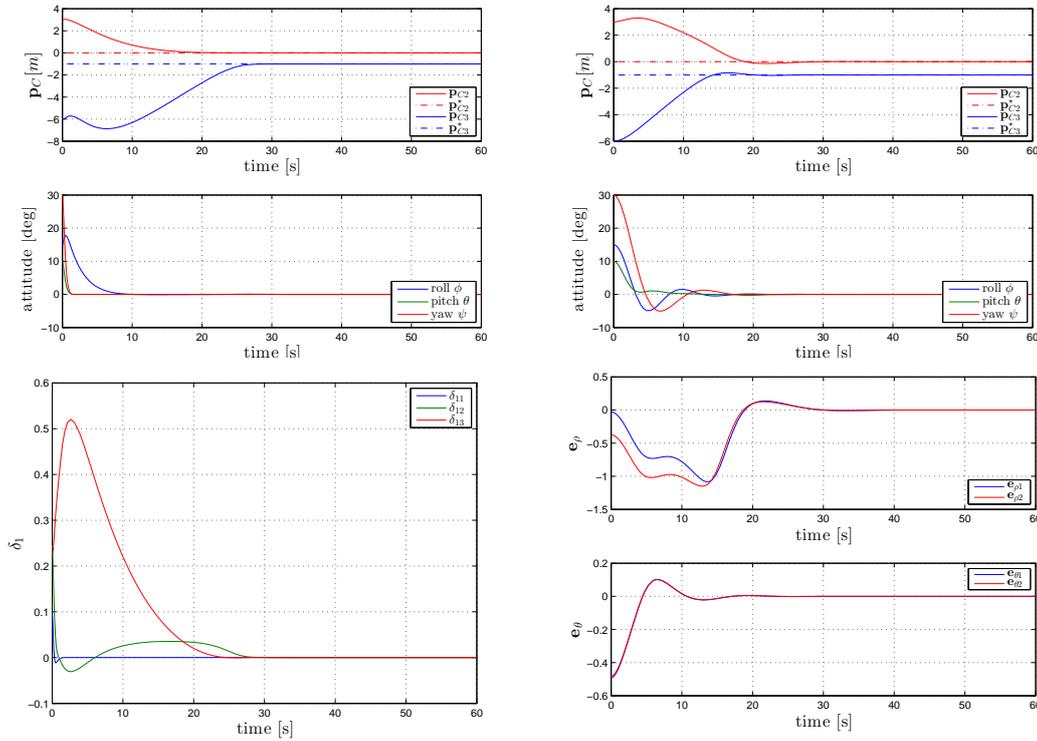


Figure 4.5 – Comparaison 2 (colonne de gauche (resp. droite) pour le **contrôleur 1** (resp. **2**)) pour des erreurs initiales moyennes  $\mathbf{p}_C(0) = [0, 3, -6]^\top$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\left\{\frac{15\pi}{180}, \frac{10\pi}{180}, \frac{30\pi}{180}\right\}}$ . Du haut vers le bas : position et attitude (angles d’Euler) du sous-marin vs. temps, erreur visuelle vs. temps.

#### 4.2.3.2 Expérimentation sur le Girona-500

Le sous-marin Girona-500 développé par le Centre *Underwater Vision and Robotics* (Girona, Espagne) [Rib+12] (voir Figure 4.7)) a été utilisé pour effectuer les expérimentations. Il est composé d’une structure en aluminium sur laquelle sont positionnés trois tubes en forme de torpilles. Ses dimensions totales sont de  $1 \times 1 \times 1.5[m]$  (hauteur, largeur, longueur), et son poids est d’environ  $160 [kg]$  dans l’air. Les mouvements du véhicule sont assurés par plusieurs actionneurs :

- deux propulseurs horizontaux pour assurer la poussée dans la direction principale et les rotations suivant l’angle de lacet ;
- deux propulseurs verticaux pour assurer la poussée dans la direction verticale et les rotations suivant l’angle de roulis ;
- un propulseur latéral pour assurer la poussée dans la direction latérale.

**Remarque 9** *La stabilisation des mouvements de roulis se fait de manière passive sur le Girona-500. On a donc  $\Gamma_{c1} = 0$ . Une adaptation de la boucle interne est proposée dans [Kru+17, Corol.1] afin de prendre en compte cette configuration.*

Les capteurs embarqués disponibles au sein du Girona-500 sont nombreux : une centrale inertielle, un capteur de vitesses linéaires ainsi que plusieurs caméras fournissant des images à une fréquence de  $6[Hz]$ . Le traitement d’images est réalisé avec la bibliothèque OpenCV et la communication entre chaque partie du code est assurée par le *middeware* ROS.

Les paramètres du modèle utilisés sont les mêmes que ceux qui ont été donnés dans le

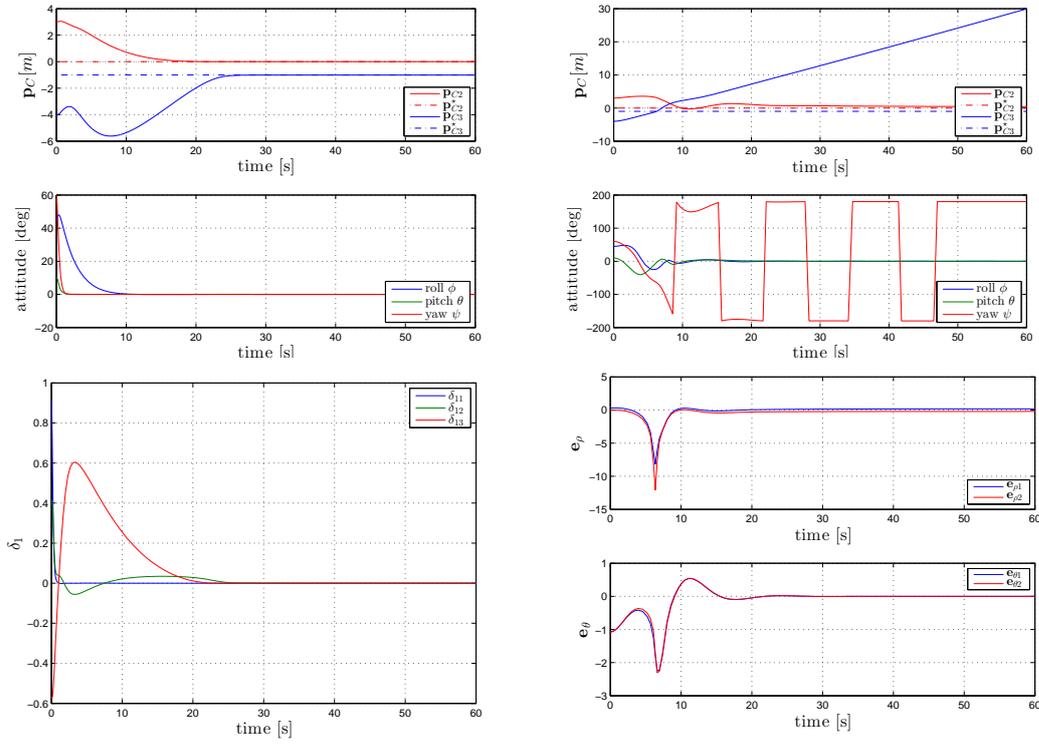


Figure 4.6 – Comparaison 3 (Colonne de gauche (resp. droite) pour le **contrôleur 1** (resp. **2**)) pour des erreurs initiales importantes  $\mathbf{p}_C(0) = [0, 3, -4]^T$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{45\pi}{180}, \frac{10\pi}{180}, \frac{60\pi}{180}\}}$ . Du haut vers le bas : position et attitude (angles d'Euler) du sous-marin vs. temps, erreur visuelle vs. temps.

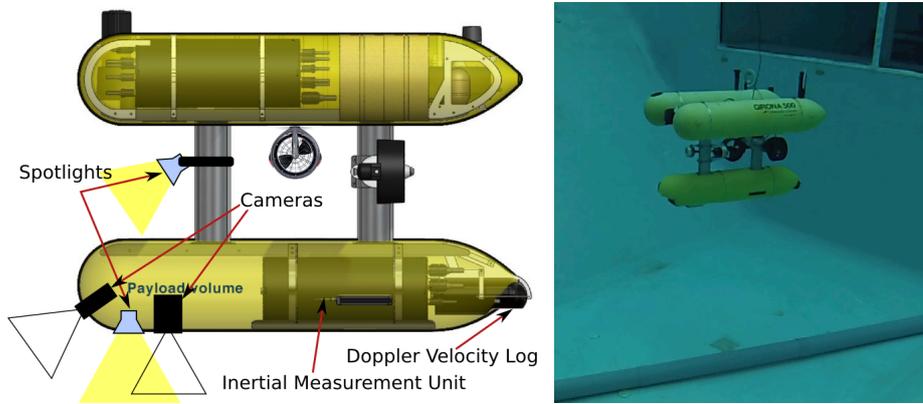


Figure 4.7 – Girona-500

Tableau 4.1, à l'exception des matrices d'inertie totale (inertie et inertie ajoutée) et de masse totale (masse et masse ajoutée) dans lesquelles les éléments diagonaux ont été supprimés. Enfin, les termes d'amortissement  $\bar{\mathbf{F}}_d$  et  $\bar{\mathbf{T}}_d$  sont négligés. Les gains et autres paramètres sont donnés ci dessous :

- $\mathbf{K}_V = \text{diag}(145.4, 418.5, 480)$ ,  $\mathbf{K}_{iV} = 0.1\mathbf{K}_V$
- $\mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(96.9, 124.7, 70)$ ,  $\mathbf{K}_{i\Omega} = 0.1\mathbf{K}_\Omega$
- $k_u = 0.5$ ,  $k_\omega = 1$
- $\mathbf{K}_1 = \text{diag}(2.65, 0.3)$ ,  $\mathbf{K}_2 = \text{diag}(0.9, 1.5)$
- $\mathbf{q}^* = 1.9901\mathbf{e}_2$ ,  $v_r = 0.15[m.s^{-1}]$
- $\mathbf{r}_C = [0.5, 0, 0.5]^T[m]$

Les expérimentations ont été réalisées en piscine, dans laquelle un tube de 20[cm] de diamètre a été déposé afin de simuler un pipeline. Les résultats expérimentaux sont présentés sur les Figures 4.8 à 4.10. Ils montrent l'évolution temporelle des principales grandeurs physiques qui interviennent dans la régulation, à savoir le vecteur  $\mathbf{U}$  et le vecteur  $\mathbf{q}$  (Figure 4.8), l'erreur visuelle  $\delta_1$  et les vitesses linéaires de référence (Figure 4.9) ainsi que les contrôles  $\mathbf{F}_c$  et  $\mathbf{\Gamma}_c$  calculés (Figs. 4.10). La vidéo de cette expérimentation est disponible à l'adresse suivante : <https://youtu.be/jPH1J2CYHLI>.

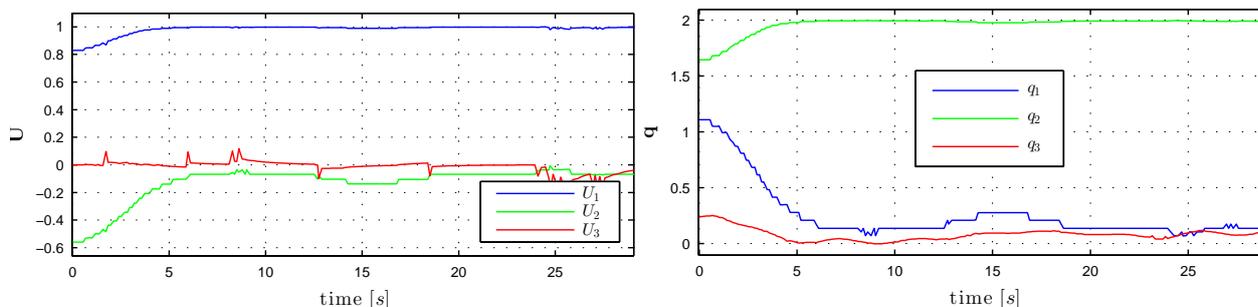


Figure 4.8 – Direction du pipeline  $\mathbf{U}$  et vecteur visuel  $\mathbf{q}$  vs. temps

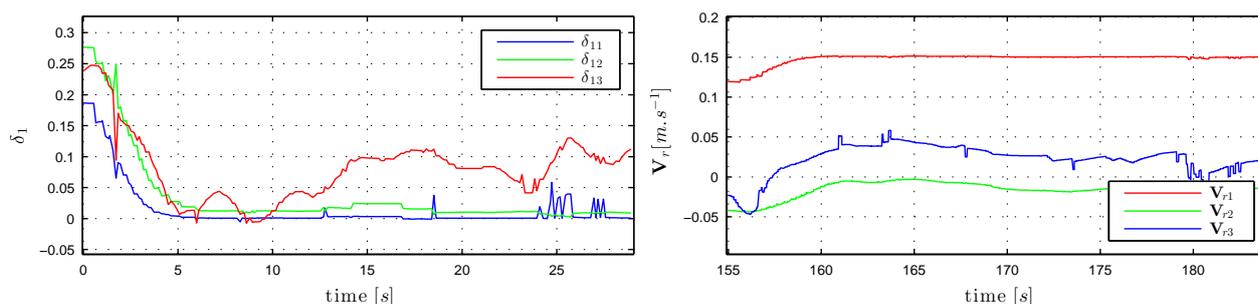


Figure 4.9 – Erreur visuelle  $\delta_1$  vs. temps

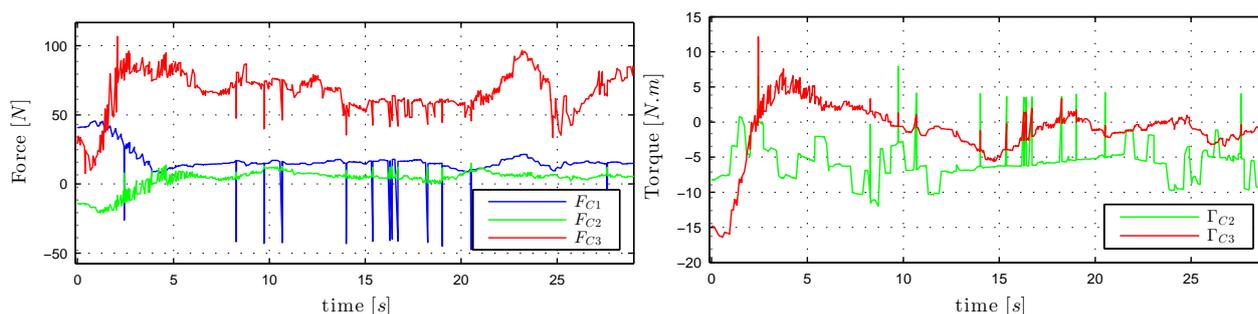


Figure 4.10 – Forces et couples de contrôle vs. temps

On observe une convergence rapide de tous les signaux vers leurs valeurs de référence avec un comportement dynamique très satisfaisant, en dépit des bruits de mesure. L'alignement du sous-marin dans la direction du pipeline ainsi que son positionnement en altitude peut se vérifier aisément en observant l'évolution du vecteur  $\mathbf{U}$  (qui converge vers  $\mathbf{e}_1$ ) et  $\mathbf{q}$  (qui converge vers sa valeur désirée  $\mathbf{q}^*$ ). L'évolution des forces et couples calculés par la boucle interne est intéressante et permet d'établir les remarques suivantes :

- concernant les forces, on remarque que la première composante se stabilise à une valeur qui permet de compenser les forces nécessaires pour déplacer le véhicule à une vitesse de  $0.15[m.s^{-1}]$ . La troisième composante, quant à elle, se stabilise aux alentours de  $75[N.m]$  afin de compenser la flottabilité positive du Girona-500 ;
- concernant les couples, on peut noter que la deuxième composante (la première étant nulle dû au non-actionnement) converge vers une valeur différente de zéro. Cela s'explique par le fait qu'un couple est nécessaire pour garder le sous-marin aligné dans le plan horizontal. D'un point de vue physique, cela correspond à un non-alignement suivant  $e_3$  du centre de gravité et du centre de flottabilité.

**Remarque 10** *On peut constater quelques “spikes” sur les forces et couples calculés par la boucle interne. Ceux-ci s'expliquent par la présence d'un contrôleur de sécurité présent à bord du Girona-500 qui s'est activé de manière aléatoire durant les expérimentations. Ce problème n'a pas pu être réglé durant le temps imparti. Néanmoins, on peut noter que cela n'a eu aucune incidence sur la performance des résultats obtenus, ce qui prouve également la robustesse du contrôleur.*

### 4.3 Stabilisation par asservissement visuel basé homographie

Dans cette section, le délicat problème de la stabilisation d'un sous-marin totalement actionné par rapport à son environnement est étudié. La stabilisation (ou le positionnement) basée vision est d'un grand intérêt pour la navigation des sous-marins qui doivent naviguer à proximité d'infrastructures ou de fonds marins. Les applications potentielles sont nombreuses, à savoir la surveillance, l'inspection, la manipulation, le maintien en position, etc. Dans le cadre de la robotique générale et avec une caméra monoculaire, ce problème a été abordé dans la littérature en s'appuyant sur l'hypothèse de planéité locale de la cible visuelle et en exploitant la matrice homographie. Le travail proposé par *Malis et al* [MCB99] fait référence dans le domaine. Cette approche nécessite la décomposition de la matrice homographie, qui s'avère être coûteuse en temps de calcul et sensible aux bruits de mesure. Afin de s'affranchir de cette décomposition, une nouveau contrôleur cinématique d'asservissement visuel basé homographie (2D1/2) a été proposé par *Benhimane et Malis* [BM07]. Malheureusement, les résultats de stabilité et de convergence obtenus ne sont que locaux, ce qui peut limiter fortement l'utilisation de ce contrôleur pour des systèmes dynamiques fortement non linéaires.

Dans le cadre de la robotique sous-marine, plusieurs approches basées homographie ont été proposées [LLT00 ; ZBS02 ; BPV07]. Toutes ces approches sont basées sur des contrôleurs cinématiques. Les auteurs de [Lot+01] proposent, quant à eux, un contrôleur dynamique mais seul le plan horizontal est étudié. De plus, aucune étude de stabilité n'est proposée. Enfin, tous les travaux cités précédemment sont basés sur la décomposition de la matrice homographie, avec les inconvénients associés qui seront rappelés dans la suite.

L'objectif du travail suivant a été d'étendre les résultats précédents en prenant en compte la dynamique complète du sous-marin dans les cas complexes où :

- aucune décomposition de la matrice homographie n'est nécessaire ;
- aucune information 3D n'est disponible (comme par exemple la profondeur relative de la caméra par rapport à la cible et/ou la connaissance d'un vecteur normal à la cible).

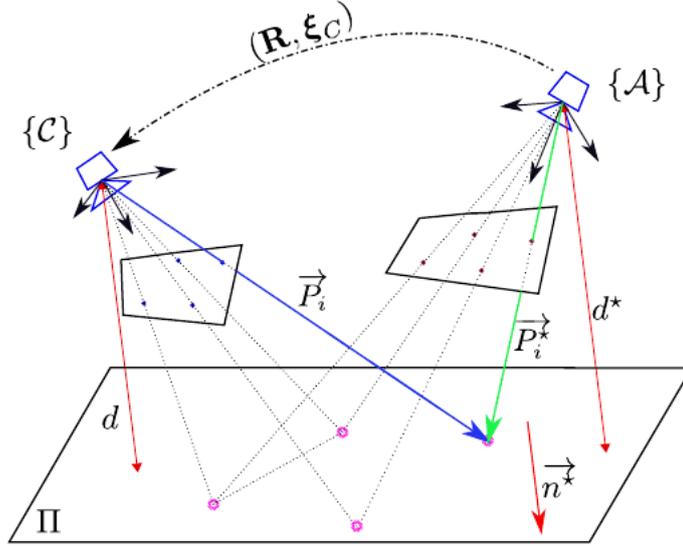


Figure 4.11 – Notations et repères de référence

Dans la continuité de ces travaux, un deuxième objectif a été de généraliser les résultats au cas délicat où la mesure des vitesses linéaires n'est plus accessible. Le prix exorbitant des capteurs DVL ainsi que la mauvaise qualité des mesures qu'il fournit à faible vitesse sont les principales justifications pour se priver de ce type de capteur.

Comme précédemment, le problème de contrôle est résolu en utilisant une structure de boucle en cascade, composée d'une boucle interne et d'une boucle externe.

Dans un premier temps, un bref rappel est donné sur la matrice homographie. Quelques détails sont donnés sur la façon dont on peut l'estimer en ligne et sur l'utilisation que l'on peut en avoir pour des tâches de stabilisation.

**Remarque 11** *La modélisation du sous-marin, étudiée dans la section 4.1 reste inchangée, tout comme le modèle utilisé pour le contrôleur (voir section 4.1.6). Nous renvoyons le lecteur intéressé vers ces deux sections.*

### 4.3.1 Quelques rappels sur la matrice homographie et son utilisation en contrôle

#### 4.3.1.1 La matrice homographie et son estimation

La matrice homographie  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  est une relation qui lie deux images d'une même cible planaire [HZ03]. Cette matrice dépend de la pose de la caméra, de la distance entre la caméra et la cible planaire ainsi que de la direction de la normale à la cible.

Soit  $\{\mathcal{A}\}$  (resp.  $\{\mathcal{C}\}$ ), un repère attaché à la pose désirée (resp. courante) de la caméra (voir Figure 4.11). Soit  $\xi_C$  la position de l'origine du repère  $\{\mathcal{C}\}$  par rapport à  $\{\mathcal{A}\}$  exprimée en  $\{\mathcal{A}\}$  et  $\mathbf{R}$ , l'orientation du repère  $\{\mathcal{C}\}$  par rapport à  $\{\mathcal{A}\}$ . En notant  $d^*$  (resp.  $d$ ) la distance du repère de l'origine  $\{\mathcal{A}\}$  (resp.  $\{\mathcal{C}\}$ ) à la cible planaire et  $\mathbf{n}^*$  (resp.  $\mathbf{n}$ ) le vecteur normal pointant vers le bas de la cible planaire exprimé dans  $\{\mathcal{A}\}$  (resp.  $\{\mathcal{C}\}$ ), on peut écrire<sup>4</sup> :

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}^\top \left( \mathbf{I} - \frac{\xi_C \mathbf{n}^{*\top}}{d^*} \right) \mathbf{P}^* \quad (4.35)$$

4. La démonstration est donnée dans [MV07].

En notant  $\mathbf{p}_{\text{img}}^* \in \{\mathcal{A}\}$  (resp.  $\mathbf{p}_{\text{img}} \in \{\mathcal{C}\}$ ) la projection d'un point 3D dans le plan image lorsque la caméra est alignée avec le repère  $\{\mathcal{A}\}$  (resp.  $\{\mathcal{C}\}$ ), on obtient<sup>5</sup> :

$$\mathbf{p}_{\text{img}}^* \cong \mathbf{K}\mathbf{P}^*, \quad \mathbf{p}_{\text{img}} \cong \mathbf{K}\mathbf{P} \quad (4.36)$$

où  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  est la matrice de calibration qui contient les paramètres intrinsèques de la caméra. Dans le cas où  $\mathbf{K}$  est bien estimée, ces quantités peuvent être normalisées sur la sphère unitaire  $S^2$  :

$$\mathbf{p}^* := \frac{\mathbf{P}^*}{|\mathbf{P}^*|} = \frac{\mathbf{K}^{-1}\mathbf{p}_{\text{img}}^*}{|\mathbf{K}^{-1}\mathbf{p}_{\text{img}}^*|}, \quad \mathbf{p} := \frac{\mathbf{P}}{|\mathbf{P}|} = \frac{\mathbf{K}^{-1}\mathbf{p}_{\text{img}}}{|\mathbf{K}^{-1}\mathbf{p}_{\text{img}}|}. \quad (4.37)$$

Les équations (4.35) et (4.37) permettent alors d'écrire :

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{p}^*, \quad (4.38)$$

où  $\mathbf{H}$  est la matrice homographie euclidienne qui vérifie :

$$\mathbf{H} \cong \mathbf{R}^\top \left( \mathbf{I} - \frac{\boldsymbol{\xi}\mathbf{c}\mathbf{n}^{*\top}}{\mathbf{d}^*} \right). \quad (4.39)$$

Il existe plusieurs méthodes d'estimation en ligne de la matrice homographie.

La plus courante, issue de la communauté "vision par ordinateur", consiste à estimer une nouvelle matrice homographie sans tenir compte des estimations précédentes dès lors qu'une nouvelle image est disponible. Cette méthode algébrique [HZ03], basée sur l'algorithme DLT (*Direct Linear Transform*) utilise la correspondance d'au minimum quatre points dans l'image de référence et dans l'image courante, pour résoudre un ensemble d'équations sous contraintes. Bien qu'efficace, cette méthode nécessite en pratique des ressources computationnelles importantes et un nombre de points conséquent pour estimer de façon robuste la matrice homographie.

La deuxième méthode consiste à estimer la matrice homographie en prenant en compte l'aspect temporel d'une séquence vidéo. L'estimation est améliorée dans le temps en utilisant des techniques de filtres. Des observateurs non linéaires basés sur les groupes de Lie ont été proposés dans [Hua+19; Hua+20]. Plusieurs avantages sont liés à ces observateurs : ils ne nécessitent pas de nombre de correspondances de points minimum et ils sont très simples du point de vue algorithmique pour être utilisés en temps réel. Cependant, ils nécessitent des mesures supplémentaires comme les vitesses linéaires et angulaires de la caméra.

La matrice homographie a de multiples applications en robotique dont celle du contrôle. Dans les paragraphes suivants, un bref état de l'art des contrôleurs basés sur la matrice homographie est donné en insistant sur le cas du contrôle de sous-marins.

#### 4.3.1.2 Contrôleurs basés sur la matrice homographie

Le travail proposé par *Malis et al.* [MCB99] fait référence sur le sujet. Dans ces travaux, la décomposition de la matrice homographie est utilisée pour construire une loi de commande cinématique. Cette dernière est composée d'informations mesurées dans l'image mais également d'informations obtenues à partir d'une reconstruction partielle de l'environnement 3D.

---

5. L'égalité est donnée à un facteur près ce qui est classique en géométrie projective.

Plusieurs remarques peuvent être faites :

- le contrôleur développé permet de découpler la partie rotation de la partie translation ;
- le système d'erreur obtenu lorsque le contrôleur cinématique est appliqué possède un équilibre en zéro localement exponentiellement stable. Ce résultat reste encore valable dans le cas d'une estimation grossière de  $\hat{d}^*$ , ce qui montre une certaine robustesse du contrôleur ;
- l'estimation de certains paramètres 3D nécessaires au contrôle est basée la connaissance des normales à la position courante  $\mathbf{n}$  et à la position désirée  $\mathbf{n}^*$ . C'est le cas pour la matrice d'interaction ainsi que pour le signal des erreurs visuelles. Bien que ces dernières puissent être obtenues grâce à la décomposition de  $\mathbf{H}$ , leur estimation est très sensible aux bruits de mesure. Ce constat est d'autant plus vrai lorsque l'on souhaite stabiliser un système proche de sa position d'équilibre. Dans ce cas particulier,  $\xi_C$  tend vers de zéro ce qui rend l'estimation des normales impossible. Ce constat a motivé la conception de contrôleur ne nécessitant pas l'étape de décomposition de la matrice homographie.

Afin d'éviter la coûteuse et délicate étape de décomposition de  $\mathbf{H}$ , un contrôleur cinématique basé sur la matrice homographie sans décomposition a été proposé par Malis dans [BM07]. Ce contrôleur cinématique consiste à contrôler les vitesses de translation et de rotation de la caméra pour stabiliser des erreurs visuelles, directement calculées à partir de la mesure de la matrice homographie. La suite des travaux présentés dans ce document étant basée sur ce travail, un bref résumé est donné ici.

Soient les erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_\theta \in \mathbb{R}^3$  données par :

$$\mathbf{e}_p \triangleq (\mathbf{I}_3 - \mathbf{H})\mathbf{m}^*, \quad \mathbf{e}_\theta \triangleq \text{vex}(\mathbf{H}^\top - \mathbf{H}), \quad (4.40)$$

avec  $\mathbf{m}^* \in S^2$  satisfaisant l'hypothèse suivante :

**Hypothèse 4** *Considérons qu'il existe un vecteur unitaire  $\mathbf{m}^* \in S^2$  qui satisfait  $\mathbf{n}^{*\top} \mathbf{m}^* > 0$ .*

**Remarque 12** *Il est important de noter que l'hypothèse précédente n'est pas restrictive en pratique. En effet, pour que la cible planaire soit dans le champ de vue de la caméra à la pose désirée, l'angle formé par le vecteur normal à la cible  $\mathbf{n}^*$  et l'axe optique de la caméra doit être contenu dans l'intervalle  $[0, \frac{\pi}{2})$ . Dans le cas concret où la caméra pointe vers le bas, le choix trivial  $\mathbf{m}^* = \mathbf{e}_3$  permet donc d'assurer la condition  $\mathbf{n}^{*\top} \mathbf{m}^* > 0$  sans aucune connaissance préalable de la normale  $\mathbf{n}^*$ .*

Sous l'Hypothèse 4, la loi de commande cinématique :

$$\mathbf{V}_C = -k_p \mathbf{e}_p \quad (4.41a)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = -k_\theta \mathbf{e}_\theta \quad (4.41b)$$

avec  $k_p$  et  $k_\theta$  des gains positifs constants, assure une stabilité exponentielle locale du point d'équilibre  $(\mathbf{R}, \boldsymbol{\xi}_C) = (\mathbf{I}_3, \mathbf{0})$ , ou de manière équivalente,  $\mathbf{H} = \mathbf{I}_3$ . De plus, la fonction  $\mathbf{e} \triangleq [\mathbf{e}_p^\top, \mathbf{e}_\theta^\top]^\top$  est isomorphe à  $\mathbf{H}$ , c'est-à-dire  $\mathbf{e} = \mathbf{0}$  si et seulement si  $\mathbf{H} = \mathbf{I}_3$ .

Une des faiblesses de ce contrôleur est son bassin de convergence difficile à caractériser. De plus, lorsque ce contrôleur est appliqué à un système fortement non linéaire comme c'est le cas du sous-marin, les performances sont dégradées et des problèmes de convergence apparaissent (l'exemple d'un tel comportement est donné dans la section 4.3.2.3).

Dans la suite de ce chapitre, plusieurs contrôleurs dynamiques basés sur la matrice homographie pour la stabilisation de sous-marins sont présentés. Aucun des contrôleurs présentés requiert la décomposition complexe de la matrice homographie. De plus, ils ont tous un résultat de stabilité asymptotique quasi-globale, ce qui correspond au plus grand domaine possible avec un retour d'état continu [BB00]. Deux cas sont étudiés :

1. le premier fait l'hypothèse que les mesures des vitesses linéaires et des vitesses angulaires sont disponibles par le biais de capteurs embarqués ;
2. le deuxième considère que seules les mesures des vitesses angulaires sont accessibles. Ceci se justifie par le fait que les capteurs de mesures des vitesses linéaires fournissent des informations de très mauvaises qualités lorsqu'ils sont utilisés proche des structures et à des vitesses faibles.

## 4.3.2 Stabilisation avec mesure des vitesses linéaires

### 4.3.2.1 Formulation du problème

Le drone sous-marin considéré ici est équipé des mêmes capteurs que celui utilisé dans la section précédente, à savoir :

- une caméra monoculaire, dont les axes du repère  $\{C\}$  sont parallèles à ceux de  $\{B\}$ . Le vecteur de coordonnées représentant la position de  $\{C\}$  dans  $\{B\}$  est donné par  $\mathbf{r}_C$  (voir Fig 4.12) ;
- une centrale inertielle (mesure de la vitesse angulaire  $\boldsymbol{\Omega}$ , ainsi qu'une estimation de la direction de la gravité  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$  (angles de roulis et de tangage), sous l'hypothèse d'accélération faible) ;
- un capteur de mesure de la vitesse linéaire  $\mathbf{V} \in \{B\}$ .

Sans perte de généralité, le repère inertiel  $\{A\}$  est choisi comme étant attaché à la pose désirée de la caméra (Figure 4.12).

Le problème de contrôle se formule de la façon suivante : l'image de référence d'une cible planaire à une pose désirée est prise à partir de la caméra embarquée du sous-marin. À partir de cette image de référence et de l'image courante, l'objectif est de déplacer le sous-marin afin de stabiliser sa pose vers la pose de référence.

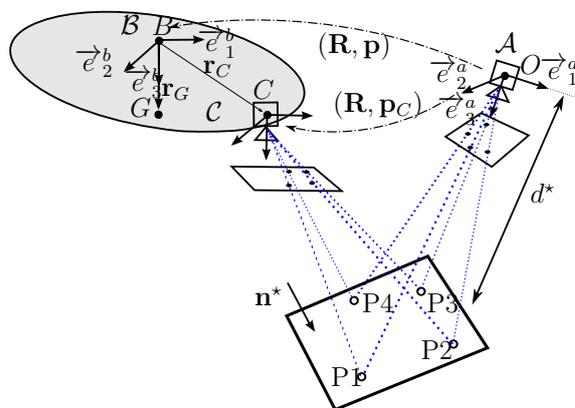


Figure 4.12 – Notation

On suppose que la mesure de la matrice homographie  $\mathbf{H}$ , donnée par [BM07] :

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}^\top - \frac{1}{d^*} \mathbf{R}^\top \mathbf{p}_C \mathbf{n}^{*\top}, \quad (4.42)$$

est disponible à chaque nouvelle mesure. Dans cette équation où les informations de rotation  $\mathbf{R}$  et de translation  $\mathbf{p}_C$  sont couplées,  $d^*$  est la distance entre le centre optique de la caméra à la pose désirée et le plan de la cible et  $\mathbf{n}^* \in S^2 = [n_1^*, n_2^*, n_3^*]^\top$  est le vecteur normal unitaire pointant vers le plan de la cible et exprimé dans  $\{\mathcal{A}\}$  (voir Figure 4.12). On vérifie aisément que la dynamique de (4.42) vérifie :

$$\dot{\mathbf{H}} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H} - \frac{1}{d^*} \mathbf{V}_C \mathbf{n}^{*\top}. \quad (4.43)$$

L'objectif de contrôle peut être traduit comme la stabilisation de  $\mathbf{H}$  autour de la matrice identité  $\mathbf{I}_3$ , ou de manière équivalente, à la stabilisation de  $(\mathbf{R}, \mathbf{p}_C)$  autour de  $(\mathbf{I}_3, \mathbf{0})$ . Les principales difficultés résident ici dans le fait que la profondeur  $d^*$  ainsi que le vecteur normal  $\mathbf{n}^*$  associés à l'équation (4.42) sont inconnus.

Dans la section suivante, nous proposons un contrôleur basé sur la matrice homographie qui exploite toute la dynamique du sous-marin. Il est basé sur l'architecture classique alliant une boucle interne et une boucle externe. Comme précédemment, la boucle externe a pour objectif de déterminer les vitesses de référence  $(\mathbf{V}_{Cr}, \boldsymbol{\Omega}_r)$  ainsi que leurs dérivées à partir des informations visuelles et la boucle interne a pour objectif d'assurer la stabilisation des vitesses  $(\mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega})$  du sous-marin vers les vitesses de référence  $(\mathbf{V}_{Cr}, \boldsymbol{\Omega}_r)$ .

### 4.3.2.2 Description des contrôleurs

#### 4.3.2.2.1 Boucle externe

Dans l'approche proposée, la conception des vitesses de référence linéaires et angulaires est découplée. Dans un premier temps, le contrôleur de vitesses linéaires est étudié, suivi dans un deuxième temps du contrôleur de vitesses angulaires.

#### Contrôleur de vitesses linéaires

Afin d'introduire le contrôleur dynamique et d'en faciliter la compréhension, nous proposons ici de traiter dans un premier temps le cas cinématique où la vitesse de la caméra  $\mathbf{V}_C$  est choisie comme variable de contrôle. En utilisant la première équation de (4.40) et (4.42), on vérifie que :

$$\dot{\mathbf{e}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{e}_p - \mathbf{m}^*) + a^* \mathbf{V}_C, \quad (4.44)$$

avec  $a^* \triangleq \frac{(\mathbf{n}^{*\top} \mathbf{m}^*)}{d^*} > 0$  dû à l'Hypothèse 4.

La principale difficulté liée de la stabilisation globale de  $\mathbf{e}_p$  vers zéro réside dans le fait que les termes  $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{m}^*$  et  $a^*$  sont inconnus.

**Lemme 1** *Soit  $z_p$  un scalaire vérifiant la dynamique :*

$$\dot{z}_p = \mathbf{e}_p^\top (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{m}^*), \quad z_p(0) \in \mathbb{R}, \quad (4.45)$$

*et un contrôleur cinématique :*

$$\mathbf{V}_C = -k_p \mathbf{e}_p - z_p \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{m}^*, \quad (4.46)$$

avec  $k_p > 0$ .

Sous l'hypothèse que  $\boldsymbol{\Omega}$  reste bornée, l'erreur visuelle  $\mathbf{e}_p$  est globalement asymptotiquement stabilisée vers zéro.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Lem.4]

**Remarque 13** La différence entre le contrôle cinématique  $\mathbf{V}_C$  (4.46) et celui proposé dans (4.41a) est que la convergence globale de  $\mathbf{e}_p$  vers zéro est obtenue en utilisant uniquement  $\mathbf{V}_C$  comme variable de contrôle. L'autre variable de contrôle cinématique  $\boldsymbol{\Omega}$  peut donc être conçue indépendamment pour assurer la convergence de  $\mathbf{e}_\Theta$  vers zéro.

Compte tenu du résultat précédent, une solution simple serait de définir la vitesse linéaire de référence comme étant  $\mathbf{V}_{Cr} = -k_p \mathbf{e}_p - z_p \boldsymbol{\Omega}_r \times \mathbf{m}^*$  mais de la même manière que pour le contrôleur interne utilisé dans le cas du suivi de structure linéaire, la connaissance de  $\dot{\mathbf{V}}_{Cr}$  est indispensable. Les termes  $\mathbf{n}^*$  et  $d^*$  n'étant pas connus, la dérivée de  $\mathbf{e}_p$  n'est donc pas directement calculable. Pour contourner cette difficulté, on propose de modifier le Lemme 1 par la Proposition suivante :

**Proposition 7** Soit  $k_{p1}, k_{p2}, k_z, \Delta, \nabla$  des nombres positifs. Soit le système augmenté suivant :

$$\begin{cases} \dot{z}_p = \text{sat}^\nabla(\mathbf{e}_p)^\top (\boldsymbol{\Omega}_r \times \mathbf{m}^*) - k_z \nabla (z_p - \text{sat}^\Delta(z_p)) \\ \dot{\hat{\mathbf{e}}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{e}}_p - k_{p2}(\hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p) \end{cases} \quad (4.47)$$

avec  $z_p(0) \in \mathbb{R}$  et  $\hat{\mathbf{e}}_p(0) \in \mathbb{R}^3$ , et avec  $\Delta$  suffisamment grand de telle sorte que  $\Delta \geq 1/a^*$ . Soient les vitesses linéaires de référence utilisées par la boucle interne :

$$\mathbf{V}_{Cr} \triangleq -k_{p1} \hat{\mathbf{e}}_p - z_p \boldsymbol{\Omega}_r \times \mathbf{m}^*. \quad (4.48)$$

Considérons que l'Hypothèse 4 est satisfaite et que les vitesses angulaires de référence  $\boldsymbol{\Omega}_r$  et ses dérivées sont bornées et utilisables par le contrôleur interne. Considérons également que l'on dispose d'un contrôleur de boucle interne permettant d'assurer la stabilité asymptotique globale et la stabilité exponentielle locale du point d'équilibre  $(\mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega}) = (\mathbf{V}_{Cr}, \boldsymbol{\Omega}_r)$ . Il existe des nombres positifs  $\bar{\nabla}$  et  $\bar{k}_p$  tels que si  $\nabla > \bar{\nabla}$  et  $\frac{k_{p2}}{k_{p1}} > \bar{k}_p$ , alors  $\mathbf{e}_p$  est globalement stabilisé autour de zéro.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Prop.1].

### Contrôleur de vitesses angulaires

Les vitesses linéaires de référence (4.48) font intervenir les vitesses angulaires de référence. Dans la suite, on propose deux moyens de définir  $\boldsymbol{\Omega}_r$  et sa dérivée  $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_r$  afin d'assurer la convergence de  $\mathbf{e}_\Theta$  vers zéro.

**Proposition 8** Considérons que tous les résultats de stabilité de la Proposition 7 soient vérifiés. Définissons les vitesses angulaires de référence utilisées par la boucle interne comme étant la solution du système suivant :

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_r = -k_{\Theta 2} \boldsymbol{\Omega}_r - k_{\Theta 1} \text{sat}^{\Delta_\omega}(\mathbf{e}_\Theta), \quad \boldsymbol{\Omega}_r(0) \in \mathbb{R}^3, \quad (4.49)$$

avec  $k_{\Theta 1}, k_{\Theta 2}$  et  $\Delta_\omega$  des nombres positifs.

Alors, les propriétés suivantes sont vérifiées :

1.  $\boldsymbol{\Omega}_r$  et  $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_r$  sont bornées par respectivement  $\frac{k_{\Theta 1} \Delta_\omega}{k_{\Theta 2}}$  et  $2k_{\Theta 1} \Delta_\omega$  ;
2. l'équilibre  $(\mathbf{H}, \mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega}) = (\mathbf{I}_3, \mathbf{0}, \mathbf{0})$  du système contrôlé est localement asymptotiquement stable. De plus, il existe un nombre positif  $\underline{k}_{\Theta 1}$  tel que si  $k_{\Theta 1} \leq \underline{k}_{\Theta 1}$  alors l'équilibre  $(\mathbf{H}, \mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega}) = (\mathbf{I}_3, \mathbf{0}, \mathbf{0})$  est localement exponentiellement stable.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Prop.2].

Le résultat donné dans la Proposition 7 pour l'erreur visuelle  $\mathbf{e}_p$  est plus fort que celui donné par la Proposition 8 pour l'erreur visuelle  $\mathbf{e}_\Theta$ . En effet, dans ce dernier cas, le résultat de convergence n'est que local. Dans la suite, nous proposons d'ajouter une mesure vectorielle supplémentaire dans le contrôleur des vitesses angulaires afin améliorer le domaine de convergence. Dans la pratique, cette mesure vectorielle peut être aisément obtenue à l'aide de capteurs basiques tels que des accéléromètres (mesure de la direction de la gravité) ou des magnétomètres (mesure du champ magnétique terrestre).

**Hypothèse 5** Soit un vecteur unitaire connu dans le repère inertiel  $\{\mathcal{A}\}$  et noté  $\mathbf{u} \in S^2$ . Considérons que la mesure de  $\mathbf{u}$  dans  $\{\mathcal{B}\}$ , c'est-à-dire  $\mathbf{R}^\top \mathbf{u}$ , peut être obtenue par l'intermédiaire d'un capteur embarqué.

En utilisant l'Hypothèse 5, l'objectif consiste à définir le vecteur des vitesses angulaires de référence de la façon suivante :

$$\boldsymbol{\Omega}_r \triangleq k_u \mathbf{u} \times \mathbf{R}^\top \mathbf{u} + \omega_r \mathbf{u}, \quad (4.50)$$

où  $k_u > 0$  et  $\omega_r \in \mathbb{R}$  à définir plus tard. En plus de la convergence de  $(\mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega})$  vers  $(\mathbf{V}_{C_r}, \boldsymbol{\Omega}_r)$ , nous ajoutons aux objectifs du contrôleur de boucle interne de faire converger  $\mathbf{R}^\top \mathbf{u}$  vers  $\mathbf{u}$ .

**Remarque 14** Pour tout  $\mathbf{u} \in S^2$ , il existe une matrice de rotation bien définie  $\mathbf{R}_u \in \text{SO}(3)$  telle que  $\mathbf{R}_u \mathbf{u} = \mathbf{e}_3$ . Par exemple, si  $\mathbf{u} \neq -\mathbf{e}_3$ , une telle matrice de rotation est donnée par<sup>6</sup> :

$$\mathbf{R}_u \triangleq \mathbf{I}_3 + (\mathbf{u} \times \mathbf{e}_3)_\times + \frac{(\mathbf{u} \times \mathbf{e}_3)_\times^2}{1 + \mathbf{u}^\top \mathbf{e}_3}. \quad (4.51)$$

**Théorème 2** Considérons que l'Hypothèse 4 est satisfaite avec  $\mathbf{m}^* = \mathbf{R}_u^\top \bar{\mathbf{m}}^* \in S^2$  et  $\bar{\mathbf{m}}^* \in \text{span}(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_3)$ . Soit la vitesse angulaire de référence  $\boldsymbol{\Omega}_r$  définie par (4.50), où  $\omega_r$  est la solution du système suivant :

$$\dot{\omega}_r = -k_{\Theta 2} \omega_r - k_{\Theta 1} \text{sat}^{\Delta_\omega}(\bar{h}_{1,2}), \quad \omega_r(0) \in \mathbb{R}, \quad (4.52)$$

avec  $k_{\Theta 1}$ ,  $k_{\Theta 2}$  et  $\Delta_\omega$ , des nombres positifs et  $\bar{h}_{1,2}$  l'élément correspondant à l'intersection de la première ligne avec la deuxième colonne de la matrice  $\bar{\mathbf{H}} \triangleq \mathbf{R}_u \mathbf{H} \mathbf{R}_u^\top$ .

Soit la vitesse linéaire de référence  $\mathbf{V}_{C_r}$  définie dans la Proposition 7.

Appliquons un contrôleur de boucle interne qui assure une stabilité asymptotique quasi-globale pour toute condition initiale autre que zéro et une stabilité exponentielle locale de l'équilibre  $(\mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{u}) = (\mathbf{V}_{C_r}, \boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{u})$ . Alors, il existe des nombres positifs  $\bar{k}_\Theta$  et  $\bar{\Delta}_\omega$  tels que pour tous  $k_{\Theta 1}$ ,  $k_{\Theta 2}$  et  $\Delta_\omega$  qui satisfont  $k_{\Theta 2} / \sqrt{k_{\Theta 1}} > \bar{k}_\Theta$  et  $\Delta_\omega > \bar{\Delta}_\omega$ , la matrice homographie  $\mathbf{H}$  est stabilisée vers  $\mathbf{I}_3$  pour presque toutes les conditions initiales.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Th.1].

D'un point de vue pratique, les centrales inertielles sont des capteurs à bas coûts standards,

---

6. Voir formule de Rodrigues [MLS94].

indispensables pour la navigation autonome des robots mobiles (aériens et sous-marins). En plus d'une mesure de la vitesse angulaire  $\boldsymbol{\Omega}$ , elles fournissent une estimation de la direction de la gravité dans le repère corps  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g \in \mathcal{B}$  sous l'hypothèse de faible accélération du véhicule. En utilisant cette information, l'équation (4.50) devient :

$$\boldsymbol{\Omega}_r = k_u \mathbf{e}_g \times \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g + \omega_r \mathbf{e}_g \quad (4.53)$$

avec  $k_u > 0$  et  $\omega_r$  spécifié par le Théorème 2.

#### 4.3.2.2 Boucle interne

La conception de la boucle interne est identique à celle présentée dans la section 4.2.2.2 pour le suivi de structure linéaire. La principale différence se situe sur les objectifs à savoir que dans le cas présent, la boucle interne doit assurer en plus de la convergence de  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega})$  vers  $(\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r)$ , celle de  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g$  vers  $\mathbf{e}_g$ .

**Proposition 9** *Soit le système dynamique défini par les équations (4.32a)–(4.32b). Appliquons le contrôleur dynamique (4.33) avec (4.34). Considérons que les termes de perturbations  $\boldsymbol{\Delta}_F$  et  $\boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  sont constants. Posons  $\mathbf{V}_r \triangleq \mathbf{V}_{Cr} - \boldsymbol{\Omega}_r \times \mathbf{r}_C$ , avec  $\mathbf{V}_{Cr}$  définie par la Proposition 7.*

Alors, les propriétés suivantes peuvent être vérifiées :

1. Si  $\boldsymbol{\Omega}_r$  est définie par (4.49) (c.f. Proposition 8), l'équilibre  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega) = (\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{z}_V^*, \mathbf{z}_\Omega^*)$  (avec  $\mathbf{z}_V^* \triangleq \mathbf{K}_{iV}^{-1} \boldsymbol{\Delta}_F$  et  $\mathbf{z}_\Omega^* \triangleq \mathbf{K}_{i\Omega}^{-1} \boldsymbol{\Delta}_\Gamma$ ) du système contrôlé est globalement asymptotiquement stable et localement exponentiellement stable ;
2. Si  $\boldsymbol{\Omega}_r$  est définie par (4.52)+(4.53) (c.f. Théorème 2), alors le système contrôlé a deux points d'équilibre  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega) = (\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r, \pm \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V^*, \mathbf{z}_\Omega^*)$ . Le point d'équilibre "désiré"  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega) = (\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V^*, \mathbf{z}_\Omega^*)$  est globalement asymptotiquement stable presque partout et localement exponentiellement stable, alors que le point d'équilibre "non désiré"  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega) = (\mathbf{V}_r, \boldsymbol{\Omega}_r, -\mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V^*, \mathbf{z}_\Omega^*)$  est instable.  $(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_g, \mathbf{z}_V, \mathbf{z}_\Omega)$  convergent donc vers le point d'équilibre désiré pour presque toutes les conditions initiales.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Kru+17, Pro.3]).

L'architecture de contrôle globale est donnée en Figure 4.13.

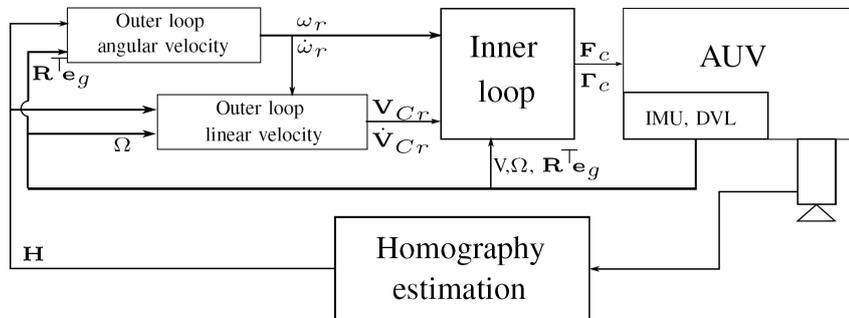


Figure 4.13 – Architecture de contrôle avec la boucle interne (définie par la Proposition 9) et la boucle externe (définie par le Théorème 2).

### 4.3.2.3 Validation des résultats : simulations et expérimentations

Dans cette section, on présente quelques résultats de simulations ainsi que des comparaisons avec le contrôleur cinématique proposé dans [BM07], suivi de résultats expérimentaux.

**4.3.2.3.1 Simulations et comparaisons avec l'état de l'art** Les contrôleurs proposés sont dans un premier temps testés en simulation. Le modèle mathématique réaliste du sous-marin est donné par (4.22). Les paramètres physiques utilisés sont proches de ceux du Girona-500 et les valeurs sont données dans le Tableau 4.2.

Spécification	Valeur Numérique
Densité de l'eau $\rho_f [kg/m^3]$	1000
Masse $m [kg]$	160
Volume $V [m^3]$	0.1616
$l [m]$	0.15
$\mathbf{r}_C [m]$	$[0.5 \ 0 \ 0.5]^\top$
$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{M}_A^{22} [kg.m^2]$	$\begin{bmatrix} 88 & 5 & 10 \\ 5 & 110 & 8 \\ 10 & 8 & 70 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{11} [kg]$	$\begin{bmatrix} 99 & 10 & 15 \\ 10 & 187 & 12 \\ 15 & 12 & 525 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{12} = \mathbf{M}_A^{21\top} [kg.m]$	$\begin{bmatrix} 1 & 10 & 4 \\ 10 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 0.5 \end{bmatrix}$
$\mathbf{D}_{Vl} [kg.s^{-1}]$	$diag(1, 1.2, 1.4)$
$\mathbf{D}_{Vq} [kg.m^{-1}]$	$diag(15, 40, 70)$
$\mathbf{D}_{\Omega l} [kg.m^2.s^{-1}]$	$diag(0.3, 0.2, 0.4)$
$\mathbf{D}_{\Omega q} [N.m]$	$diag(3, 2, 4)$

Tableau 4.2 – Caractéristiques du sous-marin simulé

L'objectif ici est d'illustrer la performance et la robustesse de notre contrôleur par rapport à l'état de l'art et plus particulièrement par rapport au contrôleur cinématique proposé dans [BM07]. Comme la différence ne concerne que la boucle externe, nous appliquerons le même contrôleur pour la boucle interne (4.33) tel qu'il est donné dans la Proposition 9. Pour ce qui est de la boucle externe, les trois contrôleurs suivants sont comparés :

- **contrôleur boucle externe 1** :  $\mathbf{V}_{Cr}$  et  $\mathbf{\Omega}_r$  sont calculés comme proposé dans [BM07].

$$\mathbf{V}_{Cr} \triangleq -k_p \mathbf{e}_p, \quad \mathbf{\Omega}_r \triangleq -k_\Theta \mathbf{e}_\Theta. \quad (4.54)$$

Les termes de *feedforward*  $\dot{\mathbf{V}}_{Cr}$  et  $\dot{\mathbf{\Omega}}_r$  sont considérés nuls dans le contrôleur de boucle interne ;

- **contrôleur boucle externe 2** (Proposition 7 + Proposition 8) :  $\mathbf{V}_{Cr}$  est calculé en utilisant (4.47)+(4.48) comme défini dans la Proposition 7, tandis que  $\mathbf{\Omega}_r$  est calculé en utilisant (4.49) comme défini dans la Proposition 8.

— **contrôleur boucle externe 3** (Proposition 7 + Théorème 2) :  $\mathbf{V}_{Cr}$  est calculé de la même manière que pour le **contrôleur boucle externe 2** mais  $\mathbf{\Omega}_r$  est calculé en utilisant (4.53) comme défini dans le Théorème 2.

La matrice homographie  $\mathbf{H}$  est calculée à partir de sa définition (4.42), avec  $d^* = 1[m]$  et  $\mathbf{n}^* = [-0.49, 0.17, -0.85]^\top = -\mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{6}, 0\}} \mathbf{e}_3$ . Le vecteur  $\mathbf{m}^*$  est donné par  $\mathbf{m}^* = -\mathbf{e}_3$  ( $\neq \mathbf{n}^*$ ). L'Hypothèse 4 est bien vérifiée puisque  $\mathbf{n}^{*\top} \mathbf{m}^* = 0.8529 > 0$ .

Les matrices de gain  $\mathbf{K}_V$  et  $\mathbf{K}_\Omega$  du contrôleur de boucle interne (4.33) sont données par<sup>7</sup> :

$$\begin{cases} \mathbf{K}_V = \text{diag}(233.7, 347.4, 660) \\ \mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(159.8, 199.6, 150) \\ \mathbf{K}_{iV} = 0.1\mathbf{K}_V, \mathbf{K}_{i\Omega} = 0.1\mathbf{K}_\Omega \end{cases} \quad (4.55)$$

Pour tester la robustesse du contrôleur de boucle interne, nous considérons des erreurs de modélisation sur les paramètres physiques estimés :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{J}} = \text{diag}(80, 100, 75) [kg.m^2], \\ \hat{\mathbf{M}} = m\mathbf{I}_3 + \hat{\mathbf{M}}_A^{11} = \text{diag}(250, 368, 660) [kg], \\ \hat{\mathbf{E}} = ml\mathbf{e}_{3 \times} = 24\mathbf{e}_{3 \times} [kg.m]. \end{cases} \quad (4.56)$$

Enfin, afin de montrer l'intérêt des actions intégrales dans le contrôleur de boucle interne, nous introduisons un courant constant  $\mathbf{v}_f = [0, 0.5, 0]^\top [m.s^{-1}]$  afin que les termes de perturbation  $\mathbf{\Delta}_F$  et  $\mathbf{\Delta}_\Gamma$  ne soient pas négligeables.

### Test du contrôleur 1

Plusieurs simulations du **contrôleur de boucle externe 1** [BM07] ont été effectuées, pour différentes valeurs de gains  $(k_p, k_\theta)$  ainsi que pour différentes conditions initiales. On observe, comme attendu, que plus les gains  $(k_p, k_\theta)$  sont faibles, plus le domaine de stabilité est grand. Ceci aux dépens d'un taux de convergence relativement lent. Les Figures (4.14) à (4.17) illustrent clairement ce comportement. Les évolutions de  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et de l'attitude sont tracées dans le cas de gains faibles ( $k_p = k_\theta = 0.5$ ) et dans le cas de gains élevés ( $k_p = 1.5, k_\theta = 2.5$ ) pour deux configurations initiales.

Dans le cas d'une erreur initiale faible (c'est-à-dire  $\mathbf{p}_C(0) = [-0.5, -0.6, 0.8]^\top [m]$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, -\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{6}\}}$ ), les erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p$  et  $\mathbf{e}_\theta$ , et par conséquent  $\mathbf{p}_C$  et l'attitude convergent vers zéro dans les cas où  $k_p = k_\theta = 0.5$  et où  $k_p = 1.5$  et  $k_\theta = 2.5$  (voir Figures 4.14 et 4.15). Comme attendu, le temps de convergence dans le cas où  $k_p = 1.5$  et  $k_\theta = 2.5$  (Figure 4.15) est nettement plus rapide que dans le cas où  $k_p = k_\theta = 0.5$  (Figure 4.14).

Lorsque les erreurs initiales deviennent plus importantes, c'est-à-dire  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^\top [m]$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ , on observe des oscillations sur les évolutions temporelles de  $\mathbf{e}_p$  et  $\mathbf{e}_\theta$  pendant la convergence (voir Figure 4.16) dans le cas où  $k_p = k_\theta = 0.5$ . On constate également une rotation importante de l'ordre de 180 [deg] suivant l'axe de roulis, ce qui n'est clairement pas souhaitable en pratique.

Lorsque les gains augmentent ( $k_p = 1.5$  et  $k_\theta = 2.5$ ), le système en boucle fermée devient instable (voir Figure 4.17).

---

7. Ces gains sont calculés en utilisant la théorie classique de placement de pôles sur le système linéarisé en boucle fermée (4.32) dans le cas où  $\mathbf{V}_r \equiv \mathbf{\Omega}_r \equiv \mathbf{v}_f \equiv \mathbf{0}$ . Les deux pôles réels triples strictement négatifs sont égaux à  $(-1, -2)$ .

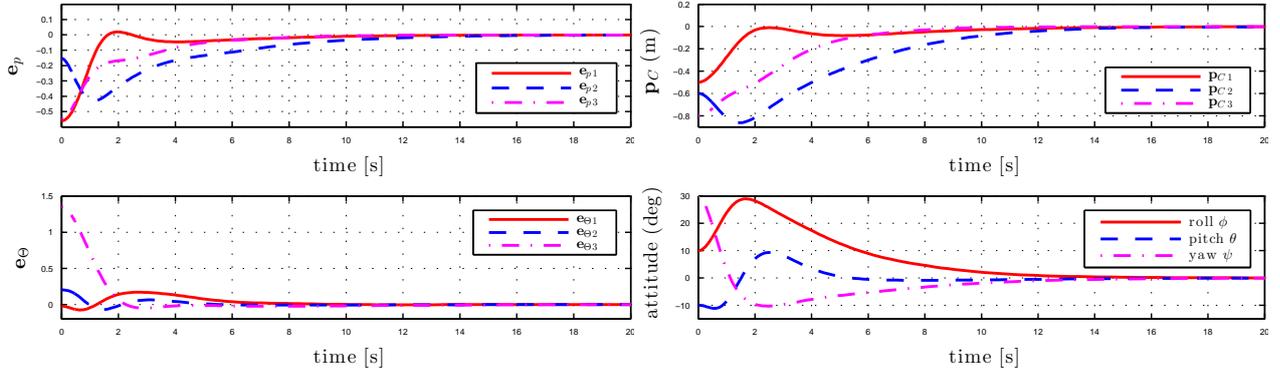


Figure 4.14 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 1** avec gains faibles  $k_p = k_\theta = 0.5$  et erreur initiale faible  $\mathbf{p}_C(0) = [-0.5, -0.6, 0.8]^\top [m]$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, -\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{6}\}}$ .

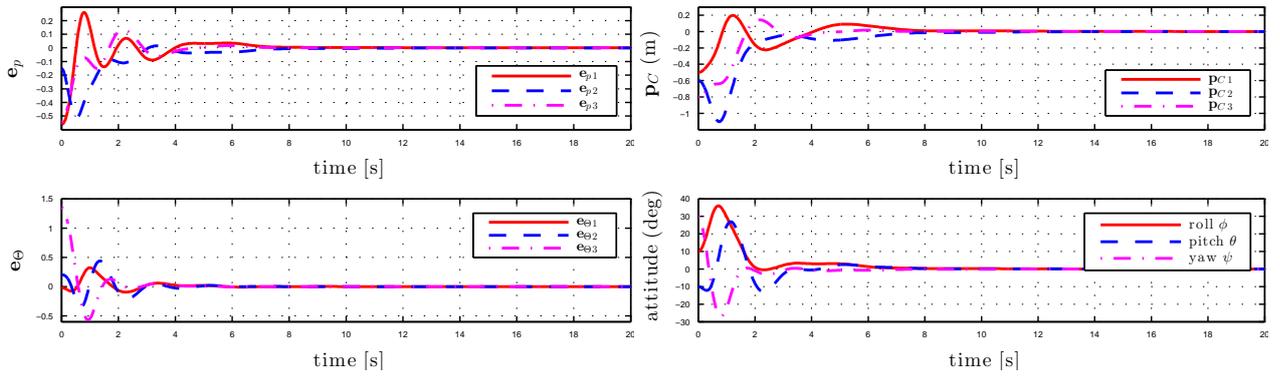


Figure 4.15 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 1** avec gains élevés  $k_p = 1.5, k_\theta = 2.5$  et erreur initiale faible  $\mathbf{p}_C(0) = [-0.5, -0.6, 0.8]^\top [m]$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, -\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{6}\}}$ .

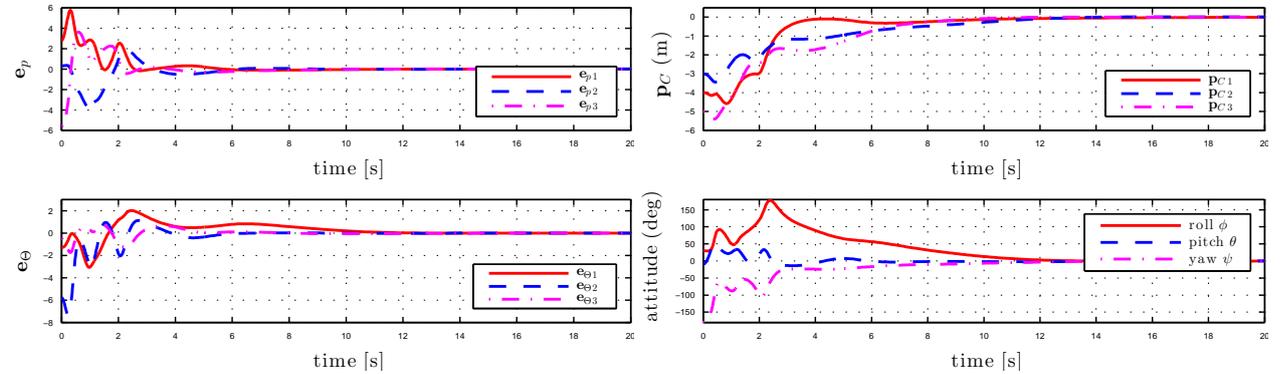


Figure 4.16 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 1** avec gains faibles  $k_p = k_\theta = 0.5$  et erreur initiale importante  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^\top [m]$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ .

### Test des contrôleurs 2 et 3

Afin de montrer qu'il est possible d'obtenir un temps de convergence rapide sans aucune influence sur le comportement dynamique en boucle fermée, les gains associés aux **contrôleurs de boucle externe 2 et 3** sont choisis de manière à ce que le temps de convergence soit similaire à celui du **contrôleur de boucle externe 1** dans le cas où  $k_p = 1.5$  et  $k_\theta = 2.5$ . Par conséquent, les gains et les paramètres du **contrôleur de boucle externe 2** sont

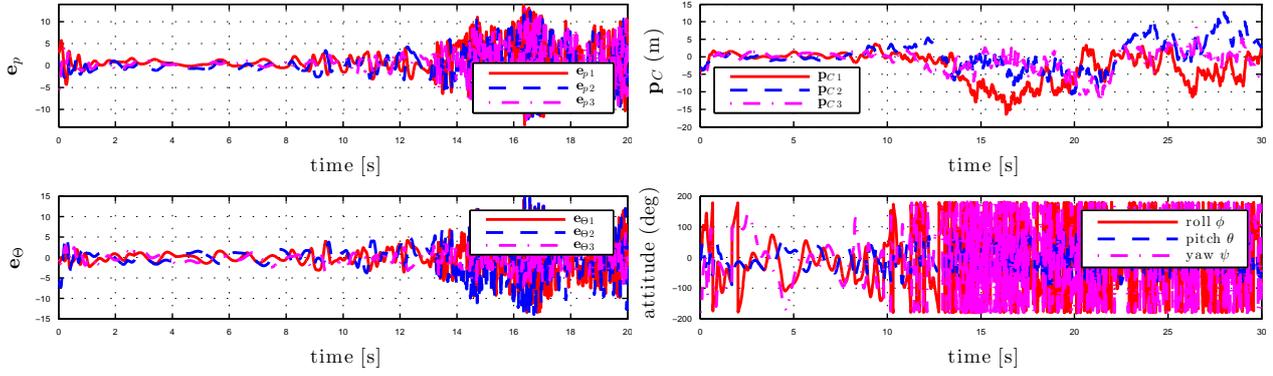


Figure 4.17 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\Theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 1** avec gains élevés  $k_p = 1.5, k_\Theta = 2.5$  et erreur initiale importante  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^\top [m]$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ .

donnés par :

$$\begin{cases} k_{p1} = 1.5 & k_{p2} = 6 & k_z = 10 & \Delta = 5 & \nabla = 0.5 \\ k_{\Theta1} = 2.5 & k_{\Theta2} = 3.162 & \Delta_\omega = 2 & & \end{cases} \quad (4.57)$$

tandis que ceux du **contrôleur de boucle externe 3** vérifient :

$$\begin{cases} k_{p1} = 1.5 & k_{p2} = 6 & k_z = 10 & \Delta = 5 & \nabla = 0.5 \\ k_{\Theta1} = 5 & k_{\Theta2} = 3.162 & \Delta_\omega = 1 & k_u = 2.5 & \end{cases} \quad (4.58)$$

Les Figures 4.18 et 4.19 montrent les évolutions de  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\Theta$ ,  $\mathbf{p}_C$ , et les angles d'Euler de l'AUV, pour les **contrôleurs de boucle externe 2 et 3**. Pour ces deux simulations, l'erreur initiale considérée correspond au cas le plus défavorable de la simulation précédente, c'est-à-dire  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^\top [m]$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ . On constate une nette amélioration des performances obtenues, quel que soit le contrôleur utilisé. En plus d'une convergence rapide, le comportement dynamique est très satisfaisant avec quasiment aucune oscillation. On peut également noter que l'ajout de la mesure de la direction de gravité dans le **contrôleur de boucle externe 3** permet d'obtenir une convergence encore plus rapide que pour le **contrôleur de boucle externe 2** avec un comportement dynamique bien meilleur. Les angles de roulis et tangage convergent vers zéro sans jamais augmenter, ce qui est idéal pour garder la cible dans le champ de vue de la caméra pendant que le sous-marin converge vers sa position désirée.

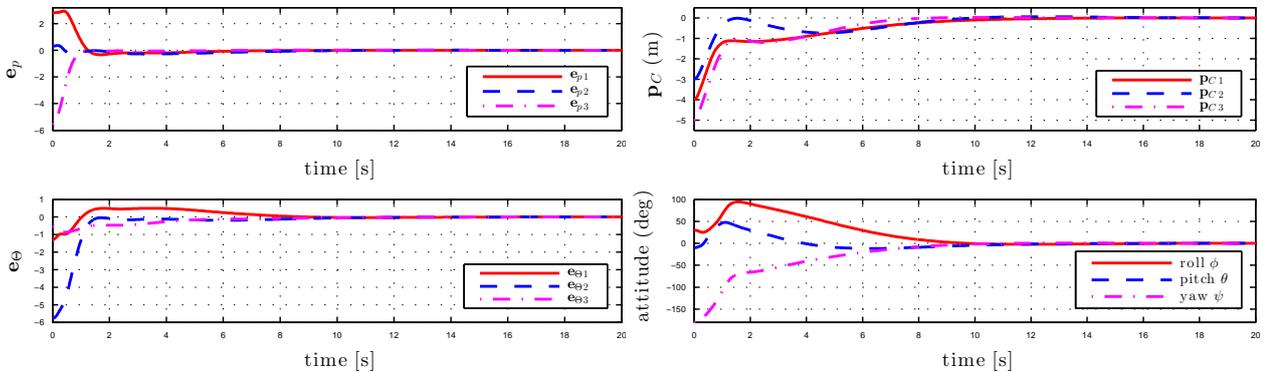


Figure 4.18 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\Theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 2** avec erreur initiale importante  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^\top (m)$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ .

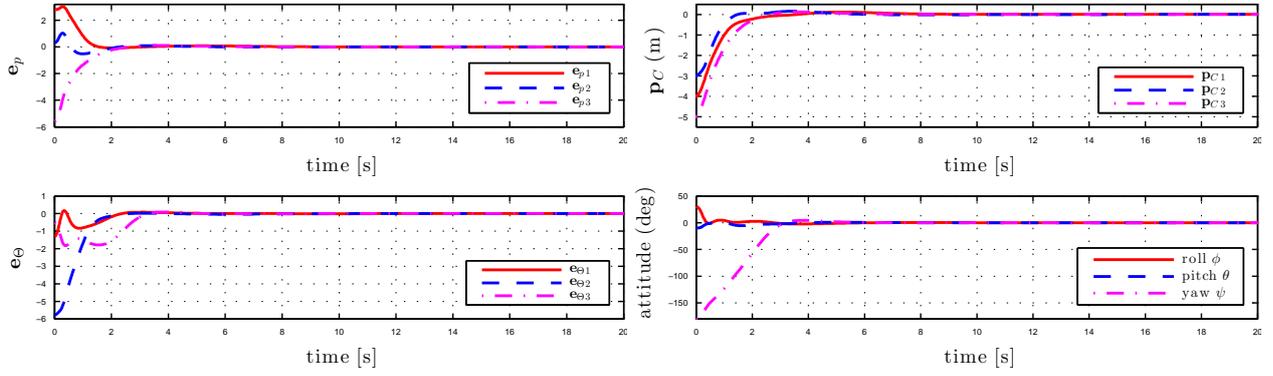


Figure 4.19 –  $\mathbf{e}_p$ ,  $\mathbf{e}_\theta$ ,  $\mathbf{p}_C$  et attitude (angles d'Euler) vs. temps. **contrôleur de boucle externe 3** avec *erreur initiale importante*  $\mathbf{p}_C(0) = [-4, -3, -5]^T(m)$ ,  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{18}, \pi\}}$ .

**4.3.2.3.2 Expérimentations sur le Girona-500** Le sous-marin utilisé pour les expérimentations est le même que celui utilisé pour le suivi de structures linéaires. Sa description est donnée dans la section 4.2.3.2. La caméra utilisée dans la suite pointe dans la direction  $\vec{e}_3^b$ . Afin de simuler une inspection autonome d'une infrastructure sous-marine, nous avons placé dans une piscine la maquette d'une tête de puits ayant une dimension d'environ  $2[m^2]$ (voir Figure 4.20). La bibliothèque OpenCV permet d'obtenir en temps réel (à la fréquence d'acquisition de  $6[Hz]$ ) la matrice homographie entre une image de référence prise à une pose désirée et l'image courante. Le *middleware* ROS assure le transfert des images de la caméra dans un format compressé.

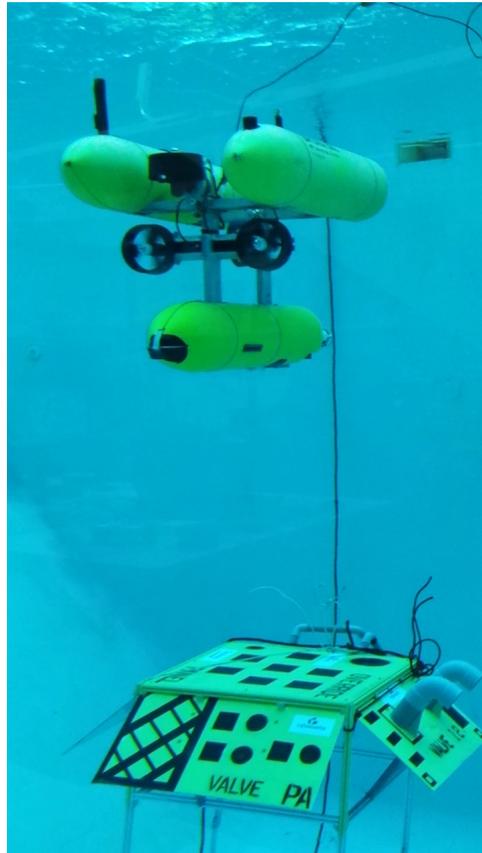
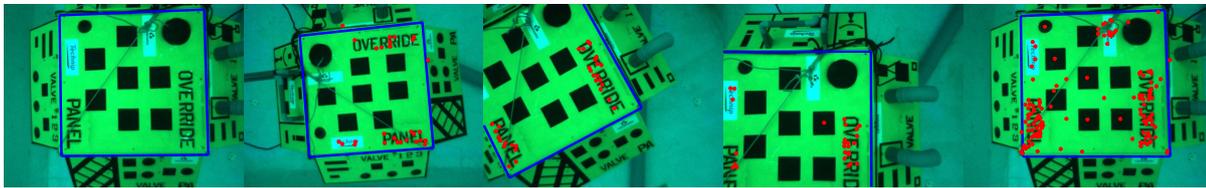


Figure 4.20 – Configuration de l'expérimentation

Le scenario qui a été suivi pour ces expérimentations est le suivant : dans un premier temps, plusieurs images de référence ont été collectées en déplaçant manuellement le sous-marin à l'aide d'une télécommande. Ensuite, le sous-marin est positionné aléatoirement dans la piscine, tout en s'assurant que la maquette est dans le champ de vue de la caméra. Les contrôleurs interne et externe sont alors activés. Lorsque les normes de  $\mathbf{e}_\Theta$  et  $\mathbf{e}_p$  sont inférieures à un certain seuil, l'image de référence change et la procédure est réitérée. Les contrôleurs utilisés dans ces expérimentations correspondent à ceux obtenus avec la Proposition 7 et le Théorème 2. Les paramètres utilisés pour le calcul des forces et couples sont donnés par :

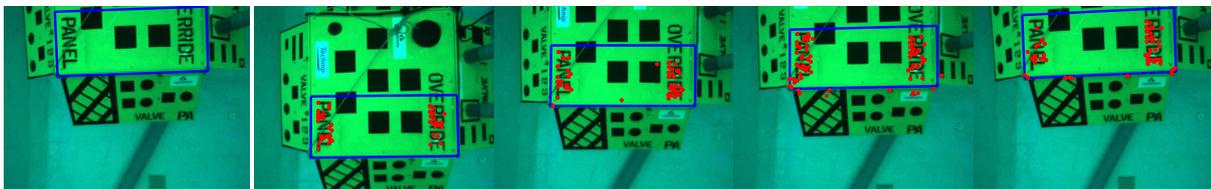
- $\hat{\mathbf{J}}, \hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{E}}$  donnés par (4.56) ;
- $\mathbf{K}_V = \text{diag}(233.7, 347.4, 660)$ ,  $\mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(199.6, 150)$ ,  $\mathbf{K}_{iV} = 0.1\mathbf{K}_V$ ,  $\mathbf{K}_{i\Omega} = 0.1\mathbf{K}_\Omega$  ;
- $k_{p1} = 0.3$ ,  $k_{p2} = 1.2$ ,  $k_z = 2$ ,  $\Delta = 10$ ,  $\nabla = 5$  ;
- $k_{\Theta 1} = 0.5$ ,  $k_{\Theta 2} = 1$ ,  $\Delta_\omega = 2$ ,  $k_u = 1$  ;
- $\mathbf{m}^* = -\mathbf{e}_3$  ;
- $\mathbf{r}_C = [0.5, 0, 0.5]^\top [m]$ .

Les résultats montrés ci-dessous correspondent à un échantillon de séquence complète de huit minutes<sup>8</sup>. Dans cet extrait, deux images de référence consécutives (la première est appelée *Mission 1* (voir 4.21a) et la deuxième *Mission 2* (voir 4.22a)) sont enchaînées. Les deux images de référence et quelques images courantes prises à des instants différents pendant la convergence sont données en Figure 4.21 et 4.22. Sur ces figures, les rectangles bleus englobent les cibles planaires et les cercles rouges (voir 4.21b–4.21e et 4.22b–4.22e) correspondent aux points mis en correspondance avec l'image de référence. L'évolution de ces images au cours du temps montre clairement la convergence des images courantes vers les images de référence.



(a) Image de référence      (b) t=73s      (c) t=84s      (d) t=90s      (e) t=110s

Figure 4.21 – Mission 1, image de référence et images courantes à différents instants.



(a) Image de référence      (b) t=111s      (c) t=115s      (d) t=126s      (e) t=133s

Figure 4.22 – Mission 2, image de référence et images courantes à différents instants.

L'évolution temporelle des erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p$  et  $\mathbf{e}_\Theta$  ainsi que leurs normes qui sont utilisées pour passer d'une image de référence à une autre, sont données dans les figures 4.23 et 4.24.

<sup>8</sup>. L'ensemble de la vidéo est disponible sur <https://youtu.be/BD5nEZWJRKA>. L'échantillon se situe de la vingt-deuxième seconde à la trente-huitième seconde.

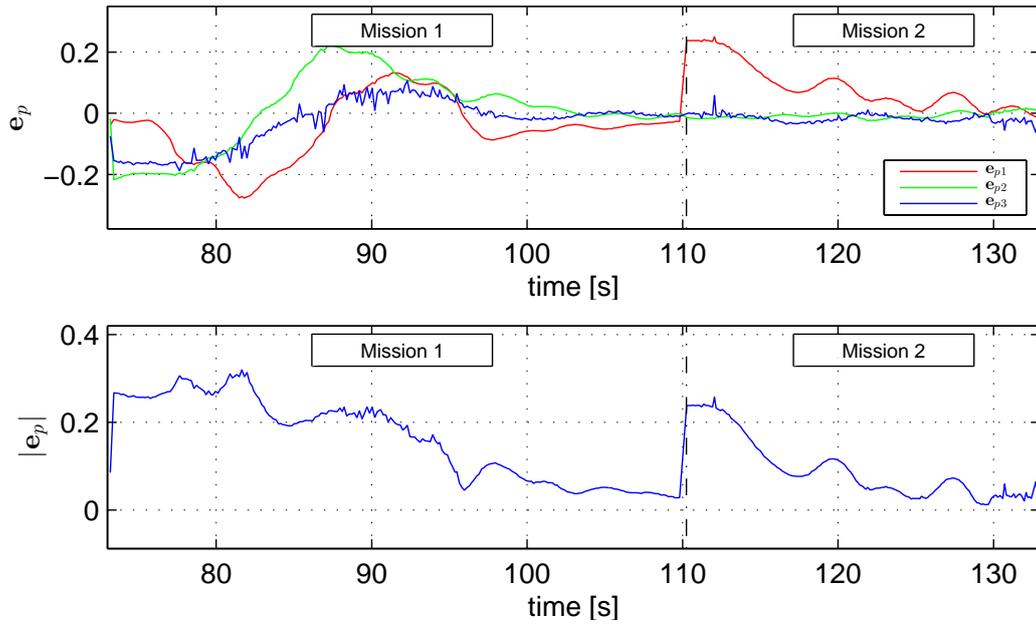


Figure 4.23 –  $e_p$  et  $|e_p|$  vs. temps.

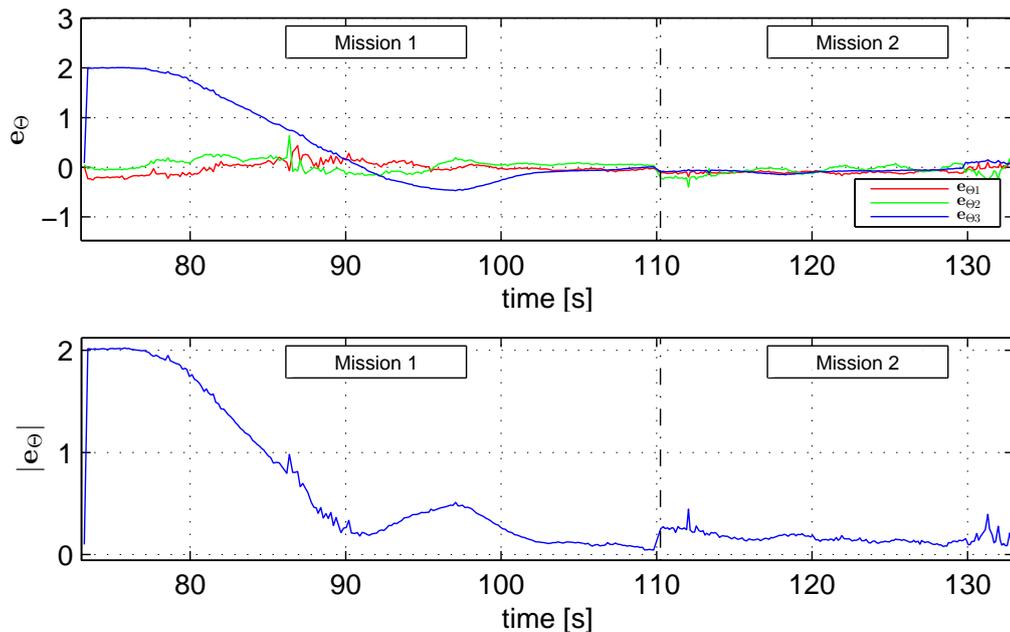


Figure 4.24 –  $e_\theta$  et  $|e_\theta|$  vs. temps.

On observe que les normes des erreurs convergent vers zéro malgré une erreur initiale en lacet importante (pour la mission 1). Le comportement dynamique est relativement satisfaisant malgré quelques oscillations. Ces dernières sont dues à une fréquence d'acquisition des images trop faible ce qui amène un retard non négligeable dans la boucle de contrôle et dégrade les performances globales des contrôleurs.

Les figures 4.25 et 4.26 montrent les vitesses de référence calculées par le contrôleur de boucle externe. On observe sur cette figure que pendant la mission 2 (c'est-à-dire après 110[s]), seule la première composante des vitesses linéaires de référence  $V_{r,1}$  est active. Cela

correspond à une translation pure le long de l'axe  $\vec{e}_1^b$ , bien visible dans la vidéo. D'autre part, les figures 4.25 et 4.26 montrent les vecteurs de force et de couple calculés par la boucle interne. Comme dans le cas du suivi de structures linéaires, on remarque que la troisième composante du vecteur de force  $F_{c,3}$  converge approximativement vers  $60[N]$  pour compenser la flottabilité positive du Girona-500.

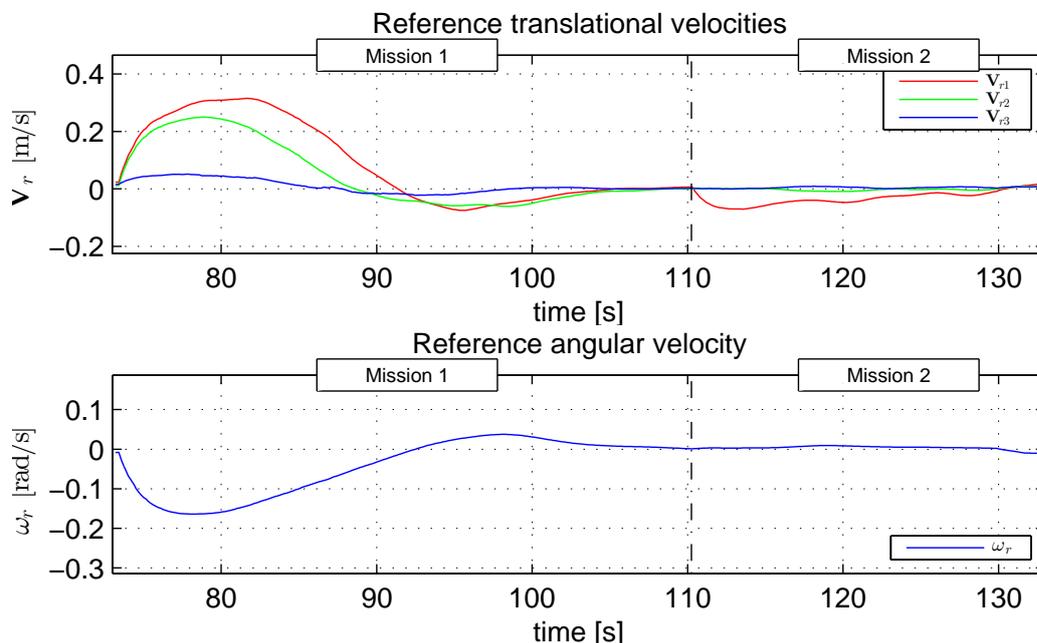


Figure 4.25 – Vitesses linéaires et vitesse angulaire de référence vs. temps.

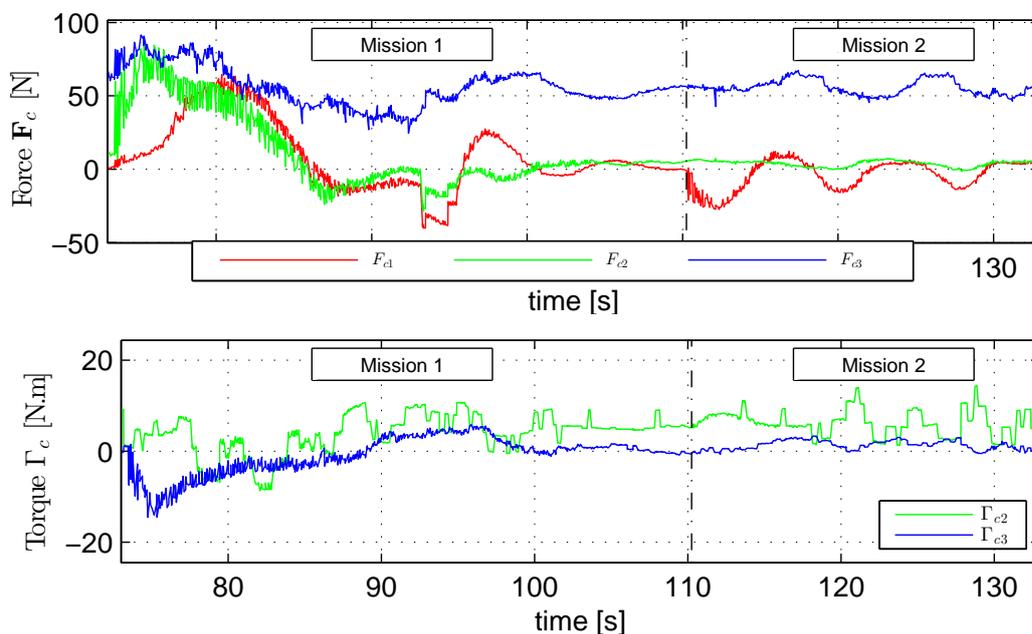


Figure 4.26 – Forces et couples vs. temps.

Les résultats obtenus permettent de valider expérimentalement le contrôleur proposé malgré la fréquence d'acquisition de la caméra relativement faible. Il montre aussi clairement la robustesse du contrôleur vis-à-vis des paramètres physiques grossièrement estimés du Girona-500.

### 4.3.3 Stabilisation sans mesure des vitesses linéaires

#### 4.3.3.1 Formulation du problème

La formulation du problème telle qu'elle a été énoncée dans la section 4.3.2.1 est identique ici. La principale différence réside dans la disponibilité de certaines grandeurs mesurées. En effet, on considère dans la suite que le sous-marin n'est plus équipé de DVL. La mesure des vitesses linéaires n'est donc plus disponible pour concevoir le contrôle. Ce choix volontaire se justifie pour au moins deux raisons :

- le prix de ce genre de capteur est relativement élevé (le plus performant dépasse largement les 15K€). Un des objectifs des recherches menées ici est de proposer des solutions à bas coût. Se restreindre à une caméra monoculaire et une centrale inertielle semble donc être un choix judicieux et pertinent ;
- les capteurs DVL sont connus pour manquer de précision lorsqu'ils sont utilisés à proximité des structures et/ou à faible vitesse. Les applications visées ici (stabilisation autour d'une tête de puits, maintien en position, etc) rentrent parfaitement dans les cas où les DVL ne sont pas performants.

Dans la suite, nous présentons l'approche proposée et des résultats de simulation et d'expérimentation.

#### 4.3.3.2 Modèle simplifié utilisé pour le contrôle

Les vitesses linéaires  $\mathbf{V}$  n'étant plus mesurées, plusieurs grandeurs associées aux quantités de mouvement  $\mathbf{P}_h$  et  $\mathbf{\Pi}_h$  et leurs dynamiques associées (4.22) deviennent inconnues. Une simplification du modèle utilisé pour le contrôle (voir section 4.1.6) est donc nécessaire :

- la première concerne le moment de Munk,  $(\mathbf{M}\mathbf{V}_h) \times \mathbf{V}_h$ , qui dépend des vitesses linéaires  $\mathbf{V}$  et qui sera considéré comme un terme de perturbation ;
- la seconde concerne le couplage entre les dynamiques de translation et de rotation dû à la matrice  $\mathbf{\Xi}$ . Pour un corps possédant trois axes de symétrie et dans les cas où la distance entre le centre de flottabilité (CB) et le centre de gravité (CG) est négligeable, il est courant de considérer que tous les termes de couplages impliqués dans la matrice  $\mathbf{\Xi}$  sont nuls [Fos11]. Ceci est d'autant plus vrai si les vitesses de déplacements sont faibles.

Les considérations précédentes aboutissent à un modèle dynamique plus simple mais néanmoins réaliste, où la dynamique de rotation est découplée de la dynamique de translation :

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} = (\mathbf{M}\mathbf{V}) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_{gb} + \mathbf{\Delta}_F \quad (4.59a)$$

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{\Omega}} = (\mathbf{J}\mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{\Gamma}_c + \mathbf{\Gamma}_g + \mathbf{\Delta}_\Gamma \quad (4.59b)$$

Les termes de perturbations sont donnés par :

$$\begin{aligned} \mathbf{\Delta}_F &\triangleq -(\mathbf{M}\mathbf{V}_f) \times \mathbf{\Omega} - \mathbf{M}\mathbf{\Omega} \times \mathbf{V}_f + (\mathbf{\Xi}^\top \mathbf{\Omega}) \times \mathbf{\Omega} - \mathbf{\Xi}^\top \dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{F}_d \\ \mathbf{\Delta}_\Gamma &\triangleq (\mathbf{\Xi}\mathbf{V}_h) \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{P}_h \times \mathbf{V}_h - \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{V}}_h + \mathbf{\Gamma}_d \end{aligned} \quad (4.60)$$

Dans le cadre applicatif considéré ici, une hypothèse réaliste consiste à considérer les termes de perturbations (4.60) comme constants. Ils peuvent alors être estimés et traités par des actions intégrales.

#### 4.3.3.3 Vue globale de l'architecture de contrôle

Afin de simplifier la lecture de ce chapitre dédié à la stabilisation sans mesure des vitesses linéaires, nous proposons ici d'illustrer l'idée générale à travers un exemple simple.

Soit un système suivant :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_p &= a^* \mathbf{V} \\ \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{u} \end{cases} \quad (4.61)$$

avec  $\mathbf{e}_p \in \mathbb{R}^3$  une erreur visuelle mesurable,  $a^*$  un nombre positif inconnu et  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$  le vecteur de commande.

Considérons dans un premier temps que la mesure des vitesses linéaires  $\mathbf{V}$  est accessible par l'intermédiaire d'un capteur. Plusieurs solutions s'offrent alors à nous pour stabiliser le système (4.61).

La première consiste à définir le contrôleur suivant, en utilisant l'hypothèse que  $a^* > 0$  :

$$\mathbf{u} = -k_1 \mathbf{e}_p - k_2 \mathbf{V}$$

avec  $k_1, k_2 > 0$ . Dans ce cas, la stabilité du système bouclé est obtenue aisément à partir de la dynamique de l'erreur  $\ddot{\mathbf{e}} + k_2 \dot{\mathbf{e}}_p + a^* k_1 \mathbf{e}_p = 0$ .

La deuxième, plus en adéquation avec les contrôleurs utilisés jusqu'à présent, consiste à utiliser une structure en cascade constituée d'une boucle interne et d'une boucle externe :

— le régulateur de boucle interne, qui contrôle la dynamique de  $\dot{\mathbf{V}}$ , est donné par

$$\mathbf{u} = -k_3(\mathbf{V} - \mathbf{V}_r) + \dot{\mathbf{V}}_r,$$

avec  $k_3 > 0$ , sous la condition que  $\dot{\mathbf{V}}_r$  soit calculable. Dans ce cas, le sous-système bouclé s'écrit  $\dot{\mathbf{V}} - \dot{\mathbf{V}}_r = -k_3(\mathbf{V} - \mathbf{V}_r)$  ce qui prouve la stabilité exponentielle globale de  $\mathbf{V}$  autour de toute trajectoire de référence  $\mathbf{V}_r$  ;

— le régulateur de boucle externe, qui contrôle la dynamique de l'équation  $\dot{\mathbf{e}}_p = a^* \mathbf{V}$  par l'intermédiaire de la vitesse de référence, est donné par  $\mathbf{V}_r = -k_2 \hat{\mathbf{e}}_p$ , avec :

$$\dot{\hat{\mathbf{e}}}_p = -k_1(\hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p) \quad (4.62)$$

et  $\hat{\mathbf{e}}_p(0) \in \mathbb{R}^3$ ,  $k_1, k_2 > 0$ .

Le système bouclé résultant est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_p &= -a^* k_2 \hat{\mathbf{e}}_p + \varepsilon(t) \\ \dot{\hat{\mathbf{e}}}_p &= k_1 \mathbf{e}_p - k_1 \hat{\mathbf{e}}_p \end{cases} \quad (4.63)$$

avec  $\varepsilon(t) \triangleq a^*(\mathbf{V} - \mathbf{V}_r)$ , un terme qui converge exponentiellement vers zéro dû au contrôleur de boucle interne. Le polynôme caractéristique  $P(\lambda) = (\lambda^2 + k_1 \lambda + a^* k_1 k_2)^3$ , obtenu en considérant le terme  $\varepsilon(t)$  nul, permet de conclure à un résultat de stabilité asymptotique globale uniforme (voir [PL01] pour les détails sur l'étude de la stabilité d'un système nominal perturbé par un terme exponentiellement stable).

Considérons à présent que la mesure des vitesses linéaires  $\mathbf{V}$  n'est plus accessible. Le contrôleur hiérarchique précédent ne peut plus être appliqué en l'état. Dans ce cas, on propose de remplacer le régulateur de boucle interne par :

$$\mathbf{u} = k_2(\hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p) - k_3 \mathbf{e}_p \quad (4.64)$$

avec  $k_2, k_3 > 0$ . Dans ce cas, la stabilité asymptotique globale de l'équilibre  $(\hat{\mathbf{e}}_p, \mathbf{e}_p, \mathbf{V}) = (\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$  du système (4.61)+(4.62) peut être obtenue en montrant que la fonction de Lyapunov

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} |\hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p|^2 + \frac{k_3}{2k_2} |\mathbf{e}_p|^2 + \frac{a^*}{2k_2} |\mathbf{V}|^2$$

a pour dérivée

$$\dot{\mathcal{L}} = -k_1 |\hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p|^2 \leq 0.$$

Il est intéressant de noter ici que la stabilisation de  $\mathbf{e}_p$  vers  $\mathbf{0}$  est possible en utilisant la variable  $\hat{\mathbf{e}}_p$  associé au contrôleur (4.64), malgré la méconnaissance de  $a^*$  et l'absence de mesure de  $\mathbf{V}$ .

L'application directe de cette théorie est appliquée au cas du sous-marin dans la section suivante.

#### 4.3.3.4 Description des contrôleurs

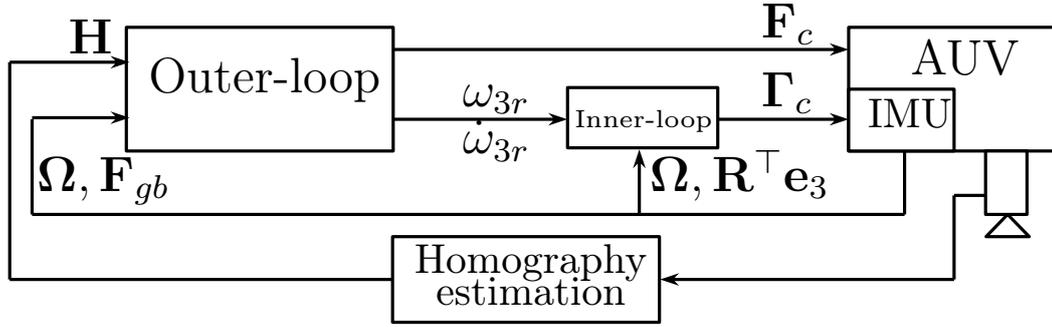


Figure 4.27 – Architecture de contrôle

Par analogie avec l'architecture de contrôle proposée dans la section 4.3.2.2, une nouvelle version est proposée (voir Figure 4.27). Dans le cas présent :

- le contrôleur de boucle interne, qui contrôle la dynamique de rotation (4.2) et (4.59b), définit le vecteur de couple  $\Gamma_c$  qui assure la stabilisation asymptotique de  $(\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3)$  vers  $(\boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{e}_3)$ . Comme précédemment, la vitesse angulaire de référence  $\boldsymbol{\Omega}_r$  est définie par :

$$\boldsymbol{\Omega}_r \triangleq k_g \mathbf{e}_3 \times \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3 + \omega_{3r} \mathbf{e}_3 \quad (4.65)$$

avec  $k_g > 0$  un gain positif et où  $\omega_{3r} \in \mathbb{R}$  est la vitesse de référence angulaire en lacet, donnée par le contrôleur de boucle externe. Il est important de noter que la dérivée de cette dernière,  $\dot{\omega}_{3r}$ , devra être calculable.

- Le contrôleur de boucle extérieure, qui calcule le vecteur de force  $\mathbf{F}_c$  ainsi que la vitesse de référence angulaire en lacet  $\omega_{3r}$ , assure la stabilisation de  $\mathbf{H}$  vers  $\mathbf{I}_3$  à condition que le contrôleur de boucle interne assure une stabilité asymptotique quasi-globale et une stabilité exponentielle locale de l'équilibre  $(\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) = (\boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{e}_3)$ .

##### 4.3.3.4.1 Contrôleur de boucle externe

###### Contrôleur de force

De manière analogue à la section 4.3.2.2, l'erreur visuelle  $\mathbf{e}_p$  définie par (4.40) est dans un premier temps stabilisée vers zéro sans la mesure des vitesses linéaires. En choisissant  $\mathbf{m}^* = \mathbf{e}_3$  et en utilisant (4.40) et (4.42), on vérifie :

$$\dot{\mathbf{e}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times (\mathbf{e}_p - \mathbf{e}_3) + a^* \mathbf{V}_C, \quad (4.66)$$

avec  $a^* \triangleq \frac{(\mathbf{n}^{*\top} \mathbf{m}^*)}{d^*} > 0$ .

Afin de traiter le cas général où la position de la caméra est choisie de manière arbitraire

par rapport au centre de flottabilité (CB) du sous-marin, on définit une nouvelle variable de vitesse par :

$$\bar{\mathbf{V}} \triangleq \mathbf{V} + \omega_{3r} \mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C. \quad (4.67)$$

En considérant que le contrôleur de boucle interne (voir section 4.3.3.4.2) assure une convergence exponentielle de  $(\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3)$  vers  $(\boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{e}_3)$ , on peut déduire la convergence de  $\boldsymbol{\Omega}$  vers  $\omega_{3r} \mathbf{e}_3$ , ce qui implique que i)  $\mathbf{V}_C$  converge vers  $\bar{\mathbf{V}}$  et ii)  $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{e}_3$  converge vers zéro. Par conséquent, (4.66) s'écrit :

$$\dot{\mathbf{e}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{e}_p + a^* \bar{\mathbf{V}} + \boldsymbol{\varepsilon}(t) \quad (4.68)$$

où  $\boldsymbol{\varepsilon}(t) \triangleq \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{m}^* + a^*(\mathbf{V}_C - \bar{\mathbf{V}})$  est un terme qui décroît exponentiellement vers zéro. La dynamique de  $\bar{\mathbf{V}}$ , associée à (4.59a) vérifie alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \dot{\bar{\mathbf{V}}} &= (\mathbf{M} \bar{\mathbf{V}}) \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_{gb} + \boldsymbol{\Delta}_F + \dot{\omega}_{3r} \mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C) - \omega_{3r} (\mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C)) \times \boldsymbol{\Omega} \\ &= (\mathbf{M} \bar{\mathbf{V}}) \times \boldsymbol{\Omega} + \bar{\mathbf{F}}_c + \mathbf{F}_{gb} + \boldsymbol{\Delta}_F + \boldsymbol{\varepsilon}_1(t) \end{aligned} \quad (4.69)$$

avec la nouvelle force de contrôle

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{F}}_c &\triangleq \mathbf{F}_c + \dot{\omega}_{3r} \mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C) - \omega_{3r}^2 (\mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C)) \times \mathbf{e}_3 \\ &= \mathbf{F}_c + (\dot{\omega}_{3r} \mathbf{I}_3 + \omega_{3r}^2 [\mathbf{e}_3]_\times) \mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C) \end{aligned} \quad (4.70)$$

et  $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$ , un terme qui décroît exponentiellement vers zéro, donné par :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) \triangleq -\omega_{3r} (\mathbf{M}(\mathbf{e}_3 \times \mathbf{r}_C)) \times (\boldsymbol{\Omega} - \omega_{3r} \mathbf{e}_3).$$

Afin de faciliter la lecture et la compréhension du contrôleur de boucle externe, nous allons considérer dans un premier temps que le terme de perturbation  $\boldsymbol{\Delta}_F$  est nul, c'est-à-dire  $\boldsymbol{\Delta}_F \equiv \mathbf{0}$ . Dans un deuxième temps, nous proposerons d'ajouter au contrôleur une action intégrale afin de prendre en compte  $\boldsymbol{\Delta}_F$ , dans le cas où ce dernier est constant.

**Proposition 10** *Soit un système comprenant la dynamique de  $\mathbf{e}_p$  donnée par (4.68) et la dynamique de translation donnée par (4.69) avec  $\boldsymbol{\Delta}_F \equiv \mathbf{0}$ . Supposons que les termes de perturbation  $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$  et  $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$  sont bornés et convergent exponentiellement vers zéro. Soit le système augmenté*

$$\dot{\hat{\mathbf{e}}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{K}_1 \hat{\mathbf{e}}_p + \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_p, \quad \hat{\mathbf{e}}_p(0) \in \mathbb{R}^3 = \mathbf{e}_p(0) \quad (4.71)$$

avec  $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  une matrice de gains positifs. Considérons que  $\boldsymbol{\Omega}$  reste borné pour tout  $t > 0$ . Appliquons la force de contrôle

$$\bar{\mathbf{F}}_c = \bar{m} \mathbf{M}^{-1} (\text{sat}^{\eta_1}(k_2 \tilde{\mathbf{e}}_p) - \text{sat}^{\eta_2}(k_3 \mathbf{e}_p)) - \mathbf{F}_{gb} \quad (4.72)$$

avec  $\bar{m}$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  des nombres positifs, et  $\tilde{\mathbf{e}}_p \triangleq \hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{e}_p$ . Alors, l'équilibre  $(\hat{\mathbf{e}}_p, \mathbf{e}_p, \bar{\mathbf{V}}) = (\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$  est globalement asymptotiquement stable. De plus,  $\bar{\mathbf{F}}_c$  reste borné par

$$|\bar{\mathbf{F}}_c| \leq \bar{m} \lambda_{\mathbf{M}}^{-1} (\eta_1 + \eta_2) + |mg - F_b| \quad (4.73)$$

avec  $\lambda_{\mathbf{M}}$  la plus petite valeur propre de  $\mathbf{M}$ .

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Ngu+20, Prop.1].

**Remarque 15** La linéarisation au premier ordre de la force de contrôle  $\bar{\mathbf{F}}_c$  donnée par (4.72) vérifie

$$\bar{\mathbf{F}}_c = k_2 \bar{m} \mathbf{M}^{-1} \hat{\mathbf{e}}_p - (k_2 + k_3) \bar{m} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_p - \mathbf{F}_{gb}. \quad (4.74)$$

La preuve de la stabilité asymptotique globale de l'équilibre  $(\hat{\mathbf{e}}_p, \mathbf{e}_p, \bar{\mathbf{V}}) = (\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})$ , avec  $\bar{\mathbf{F}}_c$  donnée par (4.74) s'effectue de manière analogue à la preuve de la Proposition 10. L'approximation linéaire (4.74) de  $\bar{\mathbf{F}}_c$  trouve son intérêt pour le réglage des gains, en utilisant par exemple, la théorie classique du placement de pôles. L'expression non-linéaire de  $\bar{\mathbf{F}}_c$  (4.72) permet, quant à elle, de définir explicitement des bornes sur la force de contrôle donnée par (4.73) en utilisant les fonctions de saturation. Cette propriété, indispensable lors d'expérimentation, permet de prendre en compte explicitement les limitations des actionneurs. L'équation (4.73) nous indique que les bornes de  $|\bar{\mathbf{F}}_c|$  peuvent être fixées par n'importe quelles valeurs  $\mu (> |mg - F_b|)$  si

$$\eta_1 + \eta_2 \leq \bar{m}^{-1} \lambda_{\mathbf{M}}(\mu - |mg - F_b|).$$

La Proposition 10 s'applique lorsque le terme de perturbation  $\Delta_F$  est nul voire négligeable. Bien que le contrôleur proposé puisse néanmoins être capable de traiter des courants de faibles amplitudes, en pratique, il est souvent souhaitable d'améliorer la robustesse en ajoutant des corrections intégrales. Toutefois, le système considéré dans la Proposition 10 (c'est-à-dire (4.68)+(4.69)+(4.71)) est déjà un système temps variant d'ordre trois. L'ajout d'un intégrateur conduirait à un système temps variant d'ordre quatre qui, associé à la présence d'un facteur multiplicatif inconnu  $a^*$  dans (4.68) et à l'indisponibilité de la mesure des vitesses linéaires, rendrait des résultats de stabilité globale (ou semi-globale) similaires à la Proposition 10 très complexes à obtenir. Une solution alternative consiste alors à établir des résultats de stabilité (exponentielle) locale. Afin de simplifier le raisonnement et les calculs, nous considérons dans la suite le cas réaliste où la matrice  $\mathbf{M}$  peut être approximée par une matrice diagonale positive, c'est-à-dire  $\mathbf{M} \approx \text{diag}(m_{1,1}, m_{2,2}, m_{3,3})$ .

**Proposition 11** Soit un système comprenant la dynamique de  $\mathbf{e}_p$  donnée par (4.68) et la dynamique de translation donnée par (4.69) où  $\Delta_F$  est un terme de perturbation constant et  $\mathbf{M}$  est la matrice de masse totale supposée diagonale, c'est-à-dire  $\mathbf{M} = \text{diag}(m_{1,1}, m_{2,2}, m_{3,3})$ . Considérons que les termes de perturbation  $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$  et  $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$  sont bornés et convergent exponentiellement vers zéro. Soit l'intégrateur suivant

$$\dot{\mathbf{z}} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{z} + \mathbf{e}_p, \quad \mathbf{z}(0) \in \mathbb{R}^3 \quad (4.75)$$

et le système augmenté

$$\dot{\hat{\mathbf{e}}}_p = -\boldsymbol{\Omega} \times \hat{\mathbf{e}}_p - \mathbf{K}_1 \hat{\mathbf{e}}_p + \mathbf{K}_1 \bar{\mathbf{e}}_p, \quad \hat{\mathbf{e}}_p(0) \in \mathbb{R}^3 \quad (4.76)$$

avec  $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  une matrice de gains positifs et  $\bar{\mathbf{e}}_p \triangleq \mathbf{e}_p + k_I \mathbf{z}$  avec  $k_I$  un gain positif. Appliquons la force de contrôle

$$\bar{\mathbf{F}}_c = \bar{m} \mathbf{M}^{-1} (\text{sat}^{\eta_1}(k_2 \tilde{\mathbf{e}}_p) - \text{sat}^{\eta_2}(k_3 \bar{\mathbf{e}}_p)) - \mathbf{F}_{gb} \quad (4.77)$$

où  $\bar{m}$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  sont des nombres positifs et  $\tilde{\mathbf{e}}_p \triangleq \hat{\mathbf{e}}_p - \bar{\mathbf{e}}_p$ . Choisissons  $\eta_2$  suffisamment grand tel que

$$\eta_2 > \bar{m}^{-1} |\mathbf{M} \Delta_F| \quad (4.78)$$

et choisissons  $k_I$  pour qu'il vérifie

$$k_I < \frac{k_2 \underline{\lambda}_{\mathbf{K}_1}}{k_2 + k_3} \quad (4.79)$$

avec  $\underline{\lambda}_{\mathbf{K}_1}$  la plus petite valeur de la matrice diagonale  $\mathbf{K}_1$ . Considérons que le contrôleur  $\omega_{3r}$  défini par la boucle externe, associé au contrôleur  $\Gamma_c$  défini par la boucle interne, assure que  $\Omega$  peut être considéré comme le terme de degré un dans le cas d'une approximation au premier ordre. Alors, l'équilibre du système contrôlé  $(\hat{\mathbf{e}}_p, \mathbf{e}_p, \bar{\mathbf{V}}, \mathbf{z}) = (k_I \mathbf{z}^*, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{z}^*)$ , avec  $\mathbf{z}^* \triangleq (\bar{m} k_3 k_I)^{-1} \mathbf{M} \Delta_F$ , est localement exponentiellement stable.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Ngu+20, Prop.2].

### Vitesse de référence angulaire en lacet

La première partie du contrôleur de boucle externe assure la convergence de  $\mathbf{e}_p$  vers zéro. Il reste à concevoir le contrôleur de vitesse de référence angulaire. La conception est identique au cas traité dans la section 4.3.2.2.1. Un résumé rapide est donné ici pour faciliter la suite de la lecture.

Soit  $\psi$  l'angle de lacet du sous-marin et  $\mathbf{R}_\psi$  la matrice de rotation associée autour de l'axe  $\vec{e}_3^b$  du sous-marin. À la vue de (4.65), les vitesses angulaires de référence contiennent deux termes :

- le premier terme,  $k_g \mathbf{e}_3 \times \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$ , assure la convergence de  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$  vers  $\mathbf{e}_3$  par l'intermédiaire du contrôleur de boucle interne ou, de manière équivalente, stabilise les angles de roulis et de tangage vers zéro. Par conséquent, la force de contrôle  $\mathbf{F}_c$  donnée par (4.72) ou (4.77) stabilise  $\mathbf{e}_p$  vers zéro ou, de manière équivalente,  $\xi_C$  vers zéro. D'après la définition de  $\mathbf{H}$  (4.39),  $\mathbf{H}$  converge vers  $\mathbf{R}^\top$ , et donc vers  $\mathbf{R}_\psi^\top$  grâce au contrôleur de boucle interne. On en déduit la convergence de  $h_{1,2}$  (l'élément à l'intersection de la première ligne et de la deuxième colonne de  $\mathbf{H}$ ) vers  $\sin \psi$ .
- le deuxième terme,  $\omega_{3r} \mathbf{e}_3$ , assure la convergence de l'angle de lacet vers zéro à partir de l'information contenue dans le terme  $h_{1,2}$ .

**Proposition 12** *Soit un contrôleur de boucle interne  $\Gamma_c$  qui assure une convergence asymptotique quasi-globale et une convergence exponentielle locale de l'équilibre  $(\Omega, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) = (\Omega_r, \mathbf{e}_3)$ , avec  $\Omega_r$  défini par (4.65) et  $\omega_{3r}$  solution du système*

$$\dot{\omega}_{3r} = -k_{\Theta 2} \omega_{3r} - k_{\Theta 1} \text{sat}^{\Delta_\Theta}(h_{1,2}), \quad \omega_{3r}(0) \in \mathbb{R} \quad (4.80)$$

avec  $k_{\Theta 1}, k_{\Theta 2}, \Delta_\Theta$  des nombres positifs et  $h_{1,2}$  l'élément à l'intersection de la première ligne et de la deuxième colonne de  $\mathbf{H}$ . Appliquons un contrôleur de boucle externe  $\mathbf{F}_c$ , donné soit par la Proposition 10 (quand  $\Delta_F \equiv \mathbf{0}$ ), soit par la Proposition 11 (quand  $\Delta_F$  est constant). Alors, l'équilibre  $\mathbf{H} = \mathbf{I}_3$  est localement exponentiellement stable. De plus, cet équilibre est quasi-globalement asymptotiquement stable dans le cas où  $\bar{\mathbf{F}}_c$  est donné par la Proposition 10 (avec  $\Delta_F \equiv \mathbf{0}$ ).

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Ngu+20, Prop.3].

#### 4.3.3.4.2 Contrôleur de boucle interne

Le contrôleur de boucle interne doit assurer la stabilité de l'équilibre  $(\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) = (\boldsymbol{\Omega}_r, \mathbf{e}_3)$  avec  $\boldsymbol{\Omega}_r$  défini par (4.65). En sachant que les mesures de  $\boldsymbol{\Omega}$  et  $\mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3$  sont disponibles avec une bonne précision et à haute fréquence, et que le véhicule est totalement actionné, les objectifs de contrôle ne présentent pas de challenge particulier. La difficulté principale provient du terme  $\boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  qui fait intervenir le moment de Munk, inconnu dû à l'absence de mesure de  $\mathbf{V}$ . Dans le cas où le véhicule est sujet à des courants marins importants, ce terme peut être problématique et source d'instabilité. Afin de prendre en compte cette difficulté, un estimateur est proposé.

**Lemme 2** *Soit l'observateur de  $\boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  :*

$$\begin{cases} \mathbf{J}\dot{\hat{\boldsymbol{\Omega}}} &= (\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega}) \times \hat{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Gamma}_c + \boldsymbol{\Gamma}_g + \hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma + k_0 \mathbf{J}(\boldsymbol{\Omega} - \hat{\boldsymbol{\Omega}}) \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\Delta}}}_\Gamma &= a_0^2 k_0^2 \mathbf{J}(\boldsymbol{\Omega} - \hat{\boldsymbol{\Omega}}) \end{cases} \quad (4.81)$$

avec  $\hat{\boldsymbol{\Omega}}$  et  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma$  les estimées respectives de  $\boldsymbol{\Omega}$  et  $\boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  ( $\hat{\boldsymbol{\Omega}}(0) \in \mathbb{R}^3$ ,  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma(0) \in \mathbb{R}^3$ ) et  $a_0, k_0$  des gains positifs. Considérons que  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma$  est uniformément ultimement borné (u.u.b.). Alors, pour tout  $a_0 \in (1 - \sqrt{2}/2, 1 + \sqrt{2}/2)$  :

1. les erreurs  $\hat{\boldsymbol{\Omega}} - \boldsymbol{\Omega}$  et  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma - \boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  sont u.u.b. par une constante positive  $\varepsilon(k_0)$  qui tend vers zéro quand  $k_0$  tend vers  $+\infty$ . De plus, ces termes convergent exponentiellement vers zéro pour tout  $k_0 > 0$  si  $\boldsymbol{\Delta}_\Gamma$  est constant.
2.  $\dot{\hat{\boldsymbol{\Delta}}}_\Gamma$  est u.u.b. par une constante indépendante de  $k_0$ .

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Hua09, Prop.8].

L'estimation du terme  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma$  peut être à présent utilisé dans le contrôleur de boucle interne. En utilisant (4.59b) et en posant  $\tilde{\boldsymbol{\Omega}} \triangleq \boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\Omega}_r$ , on peut écrire :

$$\mathbf{J}\dot{\tilde{\boldsymbol{\Omega}}} = (\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega})_\times \tilde{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Gamma}_c + \boldsymbol{\Gamma}_g + \boldsymbol{\Gamma} + \hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma + \bar{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma \quad (4.82)$$

avec  $\boldsymbol{\Gamma} \triangleq (\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega})_\times \boldsymbol{\Omega}_r - \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}}_r$  et  $\bar{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma \triangleq \boldsymbol{\Delta}_\Gamma - \hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma$ .

**Proposition 13** *Soit le système d'erreur donné par (4.82). Considérons inconnu, constant et borné par une valeur connue  $\bar{\varepsilon}$  le terme de perturbation  $\bar{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma$ . Définissons un intégrateur anti-emballement  $\mathbf{I}_\Omega$ , solution de l'équation différentielle suivante*

$$\dot{\mathbf{I}}_\Omega = -k\mathbf{I}_\Omega + \text{sat}^{\Delta_1}(k\mathbf{I}_\Omega + \text{sat}^{\Delta_2}(\mathbf{Q}\tilde{\boldsymbol{\Omega}})), \quad \mathbf{I}_\Omega(0) \in \mathbb{R}^3 \quad (4.83)$$

avec  $k$  un gain positif,  $\Delta_1, \Delta_2$  des constantes positives, et  $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  satisfaisant  $\mathbf{Q}^\top \mathbf{Q} = \mathbf{J}$ . Appliquons le couple de contrôle

$$\boldsymbol{\Gamma}_c = -\text{sat}^{\eta_3}(\mathbf{K}_\Omega \tilde{\boldsymbol{\Omega}}) - k_{i\Omega} \mathbf{Q}^\top \mathbf{I}_\Omega \max\left(0, \frac{|\mathbf{Q}\tilde{\boldsymbol{\Omega}}|}{\Delta_2} - 1\right) \boldsymbol{\Gamma}_g - \boldsymbol{\Gamma} - \hat{\boldsymbol{\Delta}}_\Gamma \quad (4.84)$$

avec  $\mathbf{K}_\Omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  une matrice de gains positifs,  $k_{i\Omega}$  un gain positif,  $\eta_3$  un nombre positif, et  $\boldsymbol{\Omega}_r$  défini par (4.65) combiné avec (4.80). Si

$$\frac{k}{k_{i\Omega}} \|\mathbf{Q}^{-\top}\| \bar{\varepsilon} + \Delta_2 \leq \Delta_1 \quad (4.85)$$

alors, les propriétés suivantes sont vérifiées :

1. les états  $(\tilde{\Omega}, \mathbf{I}_\Omega, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3)$  convergent soit vers  $(\mathbf{0}, \mathbf{I}_\Omega^*, \mathbf{e}_3)$  ou  $(\mathbf{0}, \mathbf{I}_\Omega^*, -\mathbf{e}_3)$  pour toutes les conditions initiales, avec  $\mathbf{I}_\Omega^* \triangleq k_{i\Omega}^{-1} \mathbf{Q}^{-\top} \hat{\Delta}_\Gamma$  ;
2. l'équilibre "désiré"  $(\tilde{\Omega}, \mathbf{I}_\Omega, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) = (\mathbf{0}, \mathbf{I}_\Omega^*, \mathbf{e}_3)$  est quasi-globalement asymptotiquement stable et localement exponentiellement stable. L'équilibre "non désiré"  $(\tilde{\Omega}, \mathbf{I}_\Omega, \mathbf{R}^\top \mathbf{e}_3) = (\mathbf{0}, \mathbf{I}_\Omega^*, -\mathbf{e}_3)$  est instable.

Le lecteur intéressé trouvera la preuve dans [Ngu+20, Prop.4].

### 4.3.4 Validation des résultats : simulations et expérimentations

Dans cette section, on présente quelques résultats de simulations ainsi des résultats expérimentaux.

#### 4.3.4.1 Simulations

Afin d'être le plus pertinent possible sur les résultats de simulation, nous proposons dans cette section de comparer les contrôleurs développés précédemment sans la mesure des vitesses linéaires avec ceux développés dans la section précédente (voir section 4.3.2). Ainsi, nous nommerons dans la suite :

- **contrôleur 1**, les contrôleurs donnés dans la Proposition 11 et 13 ;
- **contrôleur 2**, les contrôleurs donnés dans la Proposition 7 et le Théorème 2 de la section 4.3.2, basés sur la mesure des vitesses linéaires.

Le sous-marin simulé correspond au BlueROV<sup>9</sup>. Ses paramètres physiques sont donnés dans le Tableau 4.3.

Les masses et inerties ajoutées ainsi que les coefficients d'amortissement ont été grossièrement identifiés à partir de la forme du sous-marin. Afin d'être le plus réaliste possible, des erreurs de modélisation ont été introduites pour  $\mathbf{M}$  et  $\mathbf{J}$  :

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{M}} = m\mathbf{I}_3 + \hat{\mathbf{M}}_A^{11} & = \text{diag}(8.71, 12.71, 10.81) [kg] \\ \hat{\mathbf{J}} = \hat{\mathbf{J}}_0 + \hat{\mathbf{M}}_A^{22} & = \text{diag}(0.16, 0.56, 0.51) [kg.m^2] \end{cases}$$

La matrice homographie  $\mathbf{H}$  est calculée à partir de (4.42) avec  $d^* = 1[m]$  et  $\mathbf{n}^* = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{6}, 0\}} \mathbf{e}_3 \approx [0.49, -0.17, 0.85]^\top$ . Les conditions initiales sont données par  $\mathbf{p}_C(0) = [-2, -1.5, -1]^\top$  et  $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_{\{\frac{\pi}{18}, \frac{\pi}{18}, \pi\}}$ ,  $\mathbf{V}(0) = \mathbf{\Omega}(0) = 0$ . Les erreurs initiales de roulis et de tangage ont été choisies volontairement faibles afin de s'assurer que la cible reste dans le champ de vue de la caméra. À l'inverse, une erreur initiale très importante est considérée pour l'angle de lacet ( $\psi = \pi$ ) afin de montrer que le domaine de convergence est important. Le courant marin est supposé constant et égal à  $\mathbf{v}_f = [\frac{1}{2\sqrt{2}}, \frac{1}{2\sqrt{2}}, 0]^\top [m/s]$ . L'amplitude importante de la norme de ce courant ( $\approx 0.5[m/s]$ ) permet d'exciter de manière significative le moment de Munk ainsi que les forces de traînées et également de justifier l'utilisation des intégrateurs et de l'observateur pour le terme  $\hat{\Delta}_\Gamma$ .

- Simulations avec le **contrôleur 1** (approche proposée) : les gains des contrôleurs ont été obtenus en utilisant la théorie classique du placement de pôles avec l'estimation grossière  $a^* = 1$ . Ils sont donnés dans le Tableau 4.4. On constate que la position et l'orientation du sous-marin convergent toutes deux vers zéro, sans dépassement malgré l'absence de la mesure des vitesses linéaires (voir Figure 4.30a). Les effets des erreurs de modélisation et du courant marin sont clairement visibles sur les résultats. L'estimation  $\hat{\Delta}_\Gamma$  et les intégrateurs

9. <http://bluerobotics.com/store/retired/bluerov-r1/>

Spécification	Valeur Numérique
$m$ [kg]	7.6
$F_b$ [N]	$1.01mg$
$l$ [m]	0.025
$\mathbf{r}_C$ [m]	[0 0 0.15]
$\mathbf{J}_0$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$\begin{bmatrix} 0.0842 & 0.004 & 0.005 \\ 0.004 & 0.2643 & 0.007 \\ 0.005 & 0.007 & 0.3116 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{22}$ [kg.m <sup>2</sup> ]	$\begin{bmatrix} 0.1 & 0.005 & 0.006 \\ 0.005 & 0.25 & 0.008 \\ 0.006 & 0.008 & 0.3 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{11}$ [kg]	$\begin{bmatrix} 1.39 & 0.10 & 0.12 \\ 0.10 & 4.26 & 0.13 \\ 0.12 & 0.13 & 4.02 \end{bmatrix}$
$\mathbf{M}_A^{21} = \mathbf{M}_A^{12}$	$\begin{bmatrix} 0.002 & 0.02 & 0.01 \\ 0.02 & 0.003 & 0.018 \\ 0.01 & 0.018 & 0.003 \end{bmatrix}$
$\mathbf{D}_{Vl}$ [kg.s <sup>-1</sup> ]	$diag(5.85, 9.21, 11.03)$
$\mathbf{D}_{Vq}$ [kg.m <sup>-1</sup> ]	$diag(36.57, 57.58, 68.97)$
$\mathbf{D}_{\Omega l}$ [kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$diag(0.01126, 0.01855, 0.01701)$
$\mathbf{D}_{\Omega q}$ [N.m]	$diag(0.0053, 0.0130, 0.0118)$

Tableau 4.3 – Paramètres du sous-marin simulé

dans les boucles interne et externe permettent de compenser les perturbations et les termes non mesurés. Le courant marin, agissant sur le plan horizontal, a un impact évident sur l'intégrateur  $\mathbf{z}$ , sur les estimées  $\hat{\mathbf{e}}_p$  et  $\hat{\Delta}_\Gamma$ , ainsi que sur la force et le couple de contrôle. On remarque en effet que  $z_1, z_2, \hat{e}_{p1}, \hat{e}_{p2}, \hat{\Delta}_{\Gamma 3}, F_{c1}, F_{c2}$  et  $\Gamma_{c3}$  convergent vers des valeurs non nulles comme le montrent les figures 4.29a–4.31a. Enfin, la composante verticale de  $F_{c3}$  converge vers une valeur supérieure à zéro afin de compenser la flottabilité positive du véhicule.

Contrôleur 1	Gains et paramètres
Boucle externe	$\mathbf{K}_1 = diag(3\sqrt{2}, 3\sqrt{2}, 3\sqrt{2})$ $k_2 = \frac{16}{3}, k_3 = \frac{2}{3}$ $k_I = 0.7, \eta_1 = 1.8, \eta_2 = 2.3$ $k_g = 1, k_{\Theta 1} = 1, k_{\Theta 2} = \sqrt{2}, \Delta_\Theta = 1$
Boucle interne	$\mathbf{K}_\Omega = diag(3, 3, 3), k_{i\Omega} = 2$ $k = 10, \Delta_1 = 6.25, \Delta_2 = 2$ $a_0 = 0.5, k_0 = 20, \eta_3 = 8$

Tableau 4.4 – Gains et paramètres du **contrôleur 1**

- Simulations avec le **contrôleur 2** (section 4.3.2) : les gains des contrôleurs sont donnés dans le Tableau 4.5. Ils ont été choisis de façon à obtenir un temps de convergence identique à celui obtenu dans les simulations précédentes. Pour faire une comparaison *juste*, le contrôleur de boucle interne donné dans le Théorème 2 a été revisité en incorporant

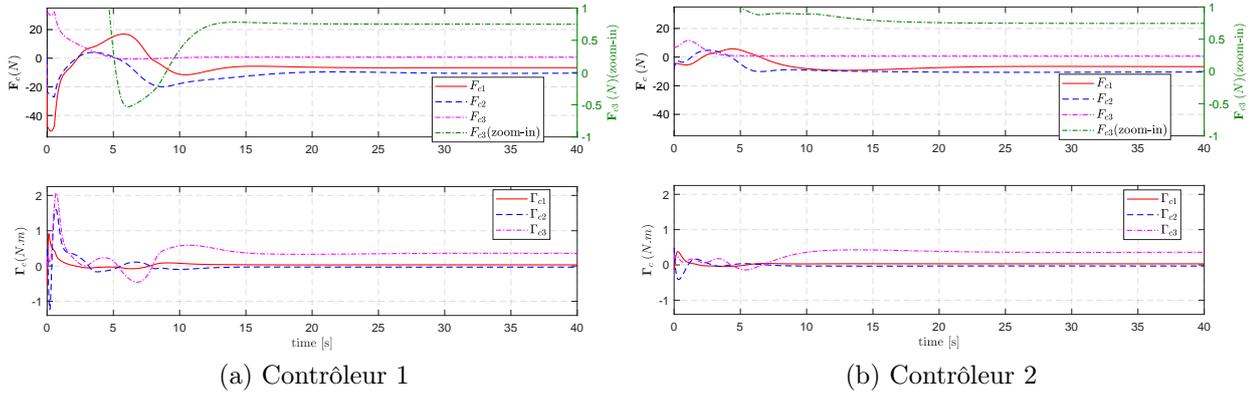


Figure 4.28 – Force  $F_c$  et couple de contrôle  $\Gamma_c$  vs. temps

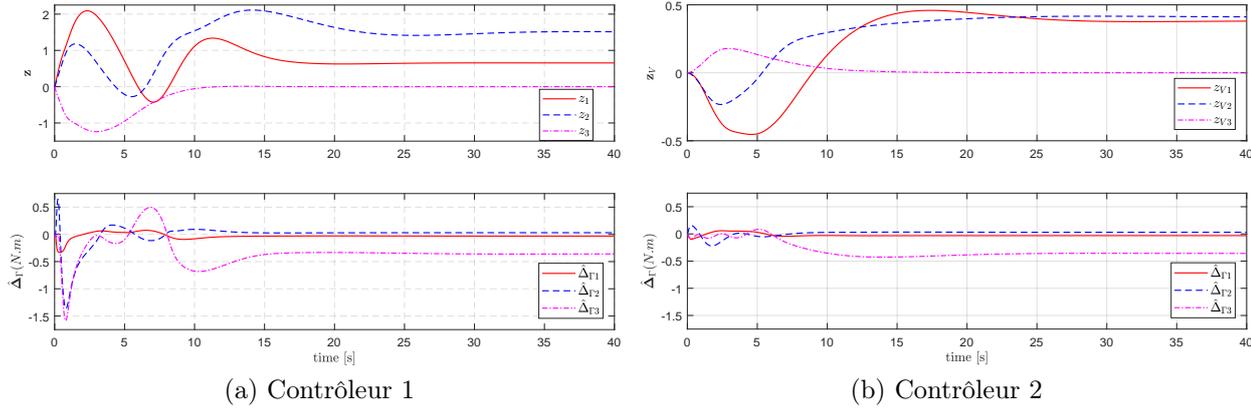


Figure 4.29 –  $\mathbf{z}$  (gauche),  $\mathbf{z}_V$  (droite), et  $\hat{\Delta}_\Gamma$  vs. temps

également un observateur à grand gain pour estimer le couple de perturbation induit par le courant marin, de manière similaire à celui proposé dans Lemme 4.81. Les résultats de simulations sont présentés dans Figs 4.29b–4.30b. On remarque que les évolutions temporelles de la pose du véhicule et les erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p$  sont similaires à celles obtenues avec le **contrôleur 1**. Cela nous permet de conclure que les performances du **contrôleur 1** sont comparables à celles du **contrôleur 2** qui lui, en revanche, se base sur la mesure des vitesses linéaires.

<b>Contrôleur 2</b>	Gains et paramètres
Boucle externe	$k_{p1} = 0.41, k_{p2} = \sqrt{2}$ $k_u = 1, k_{\theta 1} = 1, k_{\theta 2} = \sqrt{2}, \Delta_\theta = 1$
Boucle interne	$\mathbf{K}_V = \text{diag}(5, 5, 5), \mathbf{K}_{iV} = 0.4\mathbf{K}_V$ $\mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(3, 3, 3), k_{i\Omega} = 2$ $k = 10, \Delta_1 = 6.25, \Delta_2 = 2$ $a_0 = 0.5, k_0 = 20, \eta_3 = 8$

Tableau 4.5 – Gains et paramètres du **contrôleur 2**

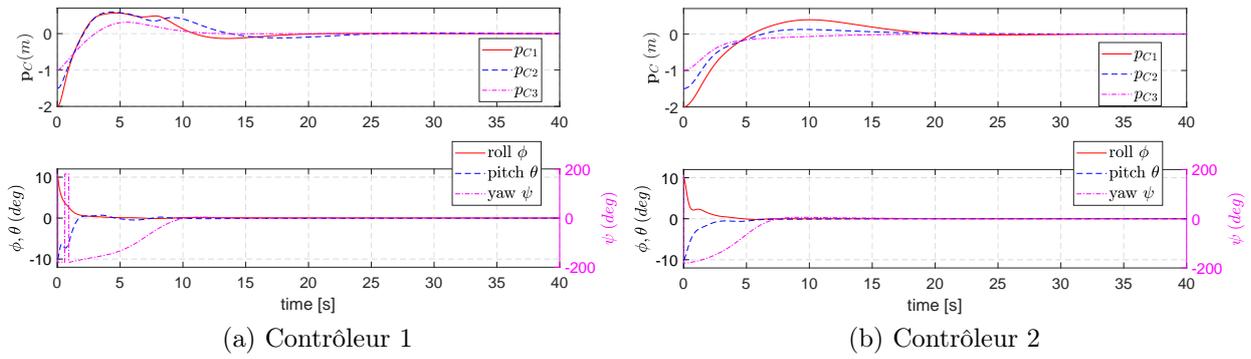


Figure 4.30 – Position et orientation (angles d’Euler) du sous-marin vs. temps

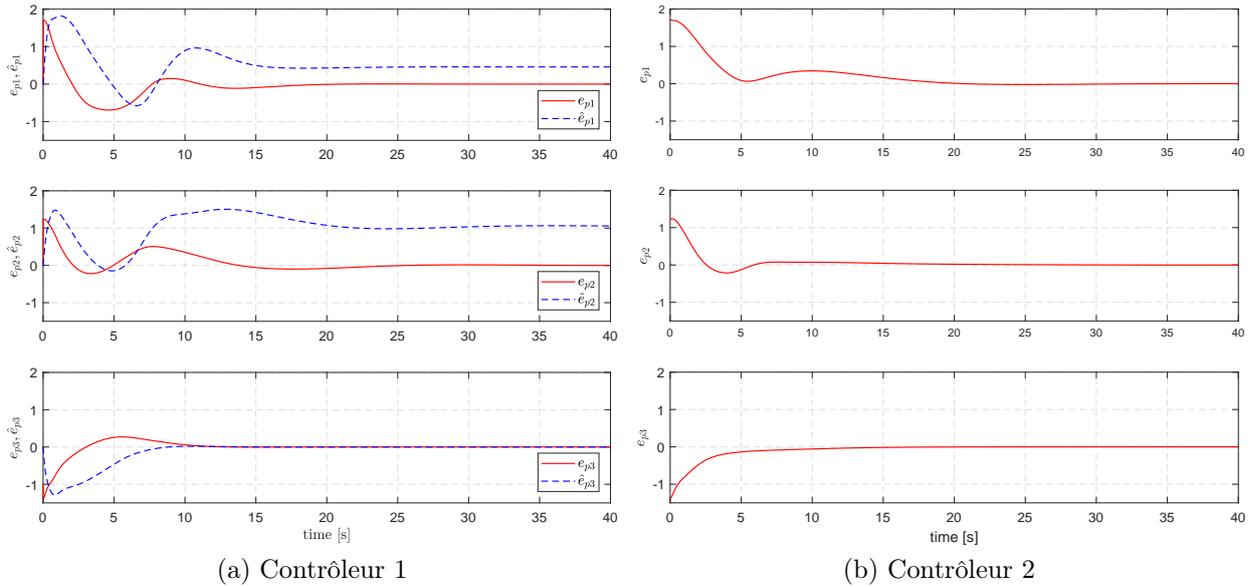


Figure 4.31 –  $e_p$  (et  $\hat{e}_p$ ) vs. temps

#### 4.3.4.2 Expérimentations sur le BlueRov-I3S

Le sous-marin utilisé pour ces expérimentations est basé sur une plateforme de type BlueRov1<sup>10</sup>, dont une vue d’ensemble est donnée par la Figure 4.32.

Comme le Girona-500, il est totalement actionné. Son poids dans l’air est de  $16[kg]$  et il a pour dimensions  $0.33 \times 0.39 \times 0.65[m]$  (hauteur, largeur et longueur). L’électronique embarquée est composée d’un pixhawk et d’un nano-ordinateur huit cœurs de type Odroid XU-4. La communication entre le pixhawk et la station de maître est gérée par l’Odroid XU-4 par l’intermédiaire d’un câble RJ45 et avec le *middeware* ROS. Plusieurs capteurs sont disponibles dont une caméra, orientée vers le bas du sous-marin, ainsi qu’une centrale inertielle. La matrice homographie est estimée en utilisant le filtre non linéaire proposé dans [Hua+19]. La fréquence d’estimation est d’environ  $10[Hz]$ . Bien que le sous-marin soit autonome en terme de capacité de calcul, l’estimation de la matrice homographie, ainsi que le calcul du contrôleur externe sont effectués sur la station maître.

Les expérimentations présentées dans la suite ont été réalisées au lac Saint-Cassien, dans le département du Var (83). Pour effectuer la tâche de stabilisation, le sous-marin est d’abord positionné manuellement au-dessus du fond afin que ce dernier soit visible par la caméra et garantisse un nombre suffisant d’amers visuels pour estimer, de manière fiable, la matrice

10. <https://bluerobotics.com/>

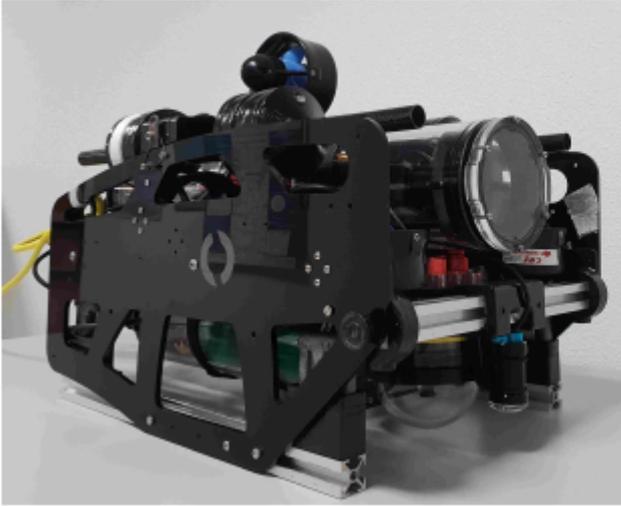


Figure 4.32 – Sous-marin développé à I3S par Lam Hung Nguyen

homographie. La profondeur du sous-marin n'est pas connue précisément et varie en fonction des conditions d'éclairage et de la turbidité de l'eau. Dans l'expérience rapportée ici, le véhicule était positionné aux alentours de  $50[cm]$  au-dessus du lit du lac. Les paramètres et gains qui interviennent dans les contrôleurs sont donnés dans les Tableaux 4.6 et 4.7.

Spécifications	Valeurs numériques
$m [kg]$	16
$F_b [N]$	$1.01mg$
$l [m]$	0.025
$\mathbf{r}_C [m]$	$[0.2, 0, 0.1]^T$
$\hat{\mathbf{M}} = m\mathbf{I}_3 + \hat{\mathbf{M}}_A^{11} [kg]$	$diag(17.87, 23.87, 21.02)$
$\hat{\mathbf{J}} = \mathbf{J}_0 + \hat{\mathbf{M}}_A^{22} [kg.m^2]$	$diag(0.31, 0.85, 1.0)$
$\hat{\mathbf{E}} = m\mathbf{e}_{3 \times} [kg.m]$	$0.4\mathbf{e}_{3 \times}$

Tableau 4.6 – Paramètres du sous-marin

Par soucis de clarté et de concision, les résultats présentés correspondent à un échantillon d'environ  $360[s]$  d'une séquence complète de plus de trente minutes<sup>11</sup>. Une vidéo condensée, représentative de ces résultats, est visible ici à l'adresse suivante : [https://youtu.be/p\\_oiISP0tgw](https://youtu.be/p_oiISP0tgw). Les Figures 4.33–4.36 montrent l'évolution des principales grandeurs physiques liées au contrôle : la force de contrôle  $\mathbf{F}_c$ , les erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p$  et leurs estimations  $\hat{\mathbf{e}}_p$ , l'élément  $h_{1,2}$  de la matrice homographie et la norme de Frobenius de  $\|\mathbf{H} - \mathbf{I}\|$ .

Afin de montrer la réponse du contrôleur à des perturbations externes, le sous-marin est volontairement déplacé à l'aide d'une perche à différents instants :  $85[s]$ ,  $100[s]$ ,  $120[s]$ ,  $180[s]$ ,  $245[s]$  et  $280[s]$ . Sur la Figure 4.34, on observe qu'une fois le contact terminé, le sous-marin converge rapidement vers la pose désirée avec quasiment aucune oscillation, ni dépassement. Le temps de réponse est d'environ  $30[s]$ . On constate également l'efficacité des intégrateurs qui permettent d'éliminer l'erreur statique due au courant.

11. <https://youtu.be/mkAAjX3mgVk>, <https://youtu.be/KjAfYu1jG18>

Contrôleur	Gains et autres paramètres
Proposition 11	$\mathbf{K}_1 = \text{diag}(3s, 3s, 3s)$ $k_2 = \frac{8 s^2}{3 a^*}, k_3 = \frac{1 s^2}{3 a^*}, s = 0.9$ $k_I = 0.1, \eta_1 = 1.8, \eta_2 = 2.3$
Proposition 12	$k_g = 1, k_{\Theta_1} = 1/2, k_{\Theta_2} = \sqrt{2}, \Delta_{\Theta} = 2\sqrt{2}$
Proposition 13	$\mathbf{K}_{\Omega} = \text{diag}(1.86, 5.09, 5.0), \mathbf{K}_{i\Omega} = 0.1\mathbf{K}\Omega$ $a_0 = 0.5, k_0 = 20, \eta_3 = 6$

Tableau 4.7 – Gains et paramètres du contrôle

La convergence du sous-marin vers sa pose désirée peut être facilement observée à partir de la convergence de la norme de Frobenius de  $\|\mathbf{H} - \mathbf{I}\|$  vers zéro (voir Figure 4.36). Ceci peut être également vérifié à partir des évolutions temporelles des erreurs visuelles de  $\mathbf{e}_p$  et de  $h_{1,2}$  (voir Figure 4.35) qui encodent l’erreur sur l’angle de lacet.

L’action des intégrateurs peut également être mise en avant en observant les Figures 4.33 et 4.34. Sur la première, on remarque que les forces  $F_{c1}$  et  $F_{c2}$  (Figure 4.33) dans le plan horizontal convergent vers des valeurs différentes de zéro en régime permanent pour compenser les effets du courant, présent lors des expérimentations. La composante verticale converge vers une valeur positive, ce qui s’explique par le fait que le sous-marin possède une flottabilité positive. Sur la deuxième (Figure 4.34), on constate que les erreurs visuelles  $\mathbf{e}_p$  convergent vers zéro et que l’écart entre les composantes de  $\mathbf{e}_p$  et  $\hat{\mathbf{e}}_p$  sont constantes en régime permanent.

Enfin, quelques remarques peuvent également être faites concernant la robustesse de l’approche :

- l’asservissement visuel basé sur la matrice homographie se base sur l’hypothèse d’une cible planaire. Dans les expérimentations qui ont été faites, cette hypothèse n’est clairement pas vérifiée. Le lit du lac est parsemé de pierres de différentes tailles (voir par exemple à la trentième seconde de la vidéo) et la caméra n’est pas à une hauteur suffisante pour considérer cette scène comme planaire. Néanmoins, la stabilisation est assurée avec de très bonnes performances ;
- comme cela peut être vérifié dans la vidéo entre les instants 310[s] et 360[s], l’approche est robuste à des occlusions partielles de l’image. Ceci est d’un grand intérêt puisque les fonds marins sont généralement dynamiques (présence de poissons ou de crustacés, flore marine qui ondule au gré du courant, etc.) ;
- certains paramètres physiques du sous-marin ( $\hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{J}}, \text{etc.}$ ) utilisés dans les contrôleurs n’ont pas fait l’objet d’une estimation précise. Ils sont donc remplacés par des valeurs approchées ;
- l’estimation de la matrice homographie est réalisée à une fréquence relativement basse de 10[Hz]. Ceci engendre quelques oscillations sur les évolutions temporelles des erreurs visuelles sans altérer la stabilisation du sous-marin. Une fréquence d’estimation plus élevée permet de pallier ce phénomène.

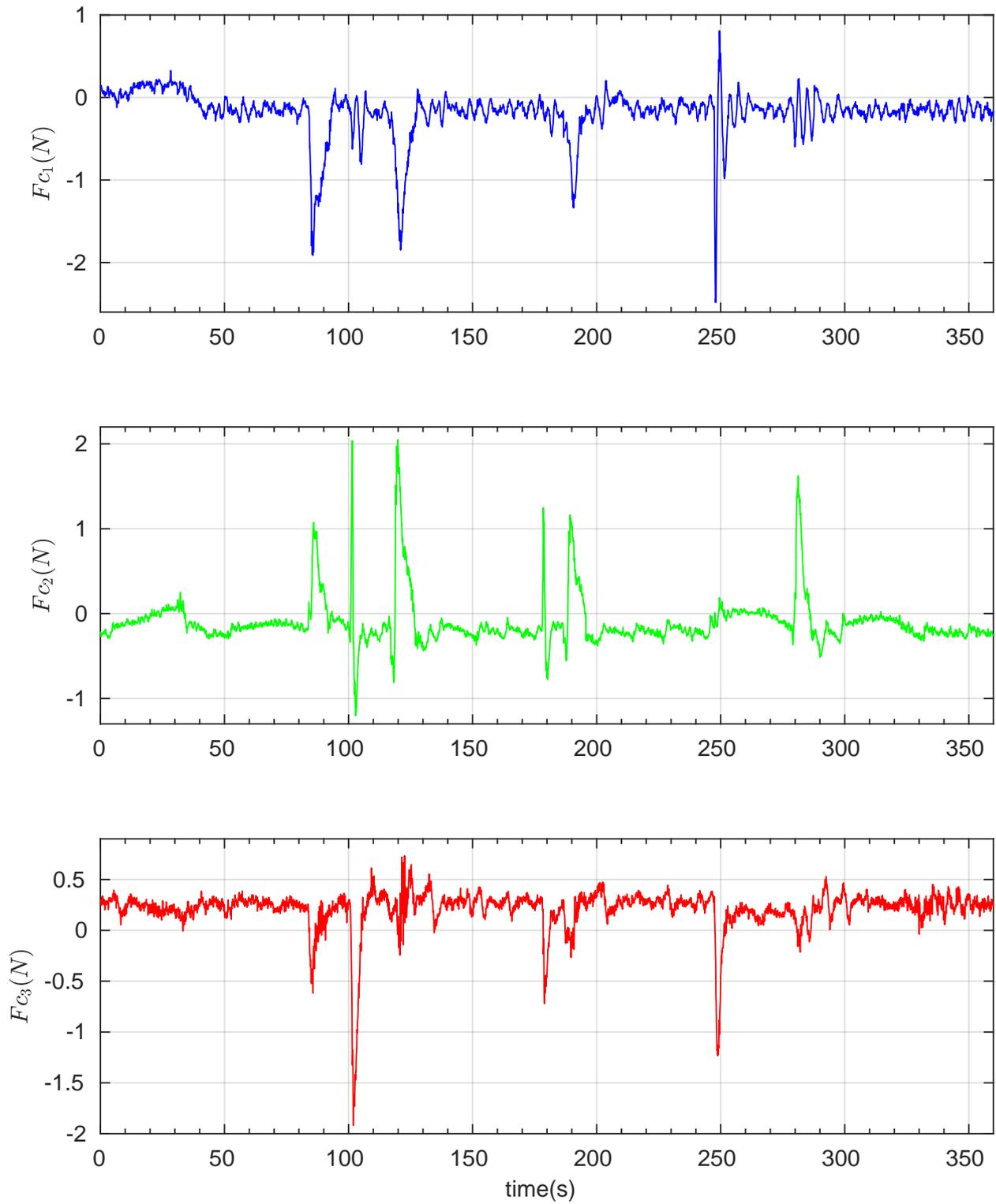


Figure 4.33 – Force de contrôle  $\mathbf{F}_c$  vs. temps

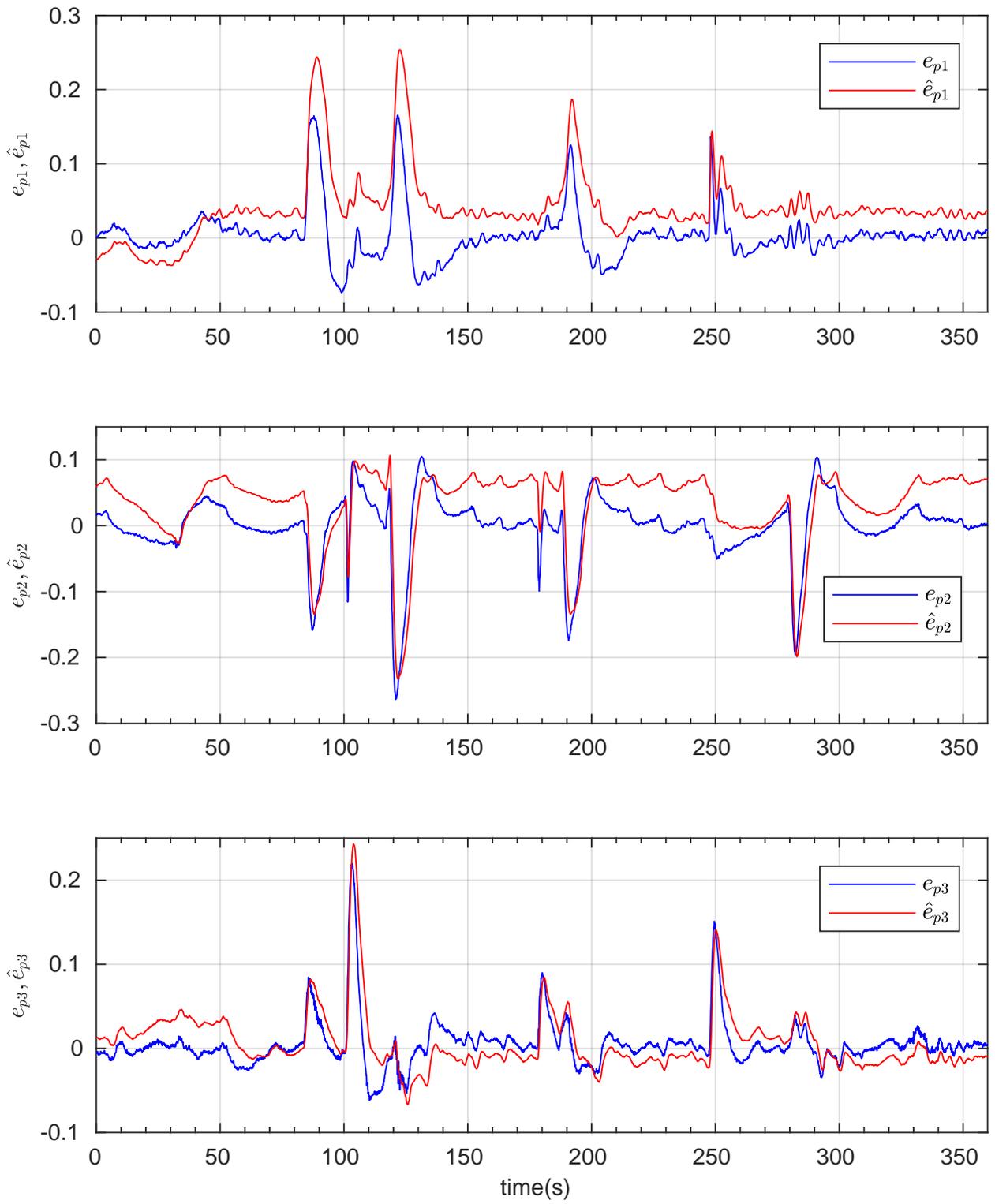


Figure 4.34 –  $e_p$  et  $\hat{e}_p$  vs. temps

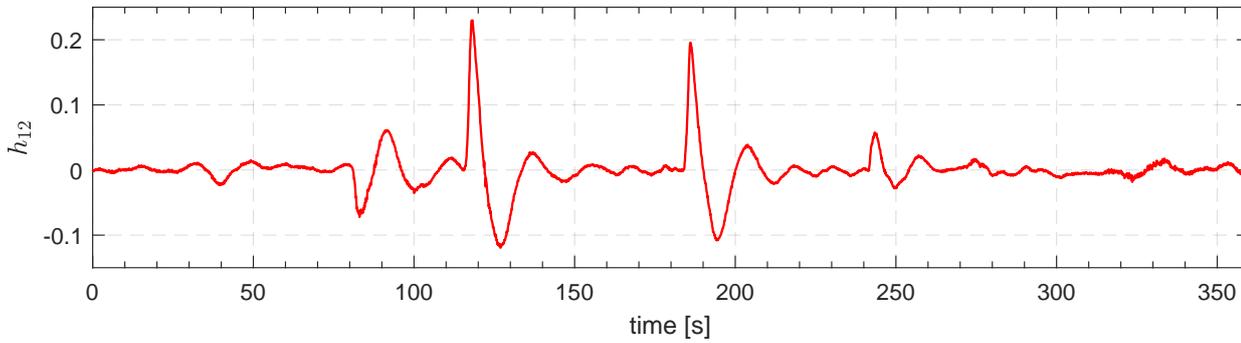


Figure 4.35 –  $h_{1,2}$  vs. temps

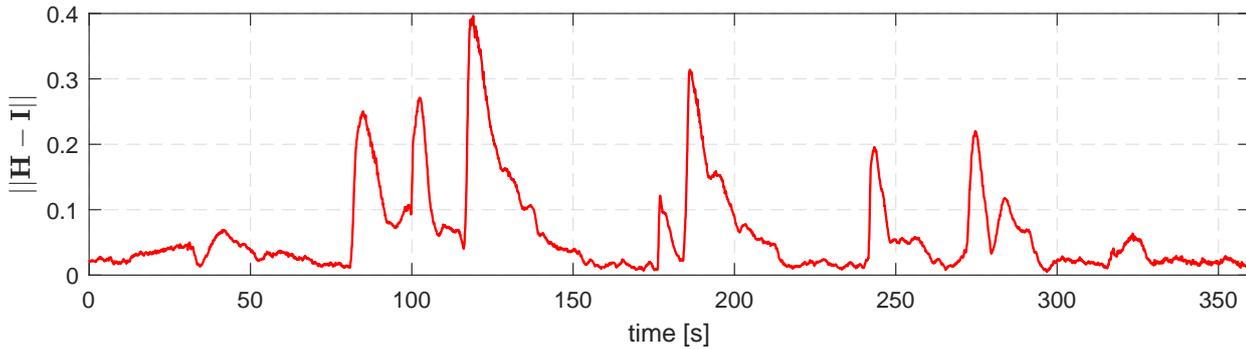


Figure 4.36 – Norme de Frobenius  $\|\mathbf{H} - \mathbf{I}\|$  vs. temps. Le sous-marin est ‘poussé’ à l’aide d’une perche aux instants 85[s], 100[s], 120[s], 180[s], 245[s] et 280[s].

### 4.3.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre propose une synthèse de plusieurs contributions centrées sur la commande référencée vision de sous-marins autonomes.

Après un rappel sur la modélisation des véhicules sous-marins, les problèmes de suivi de structure linéaire et de positionnement par rapport à une cible fixe ont été étudiés. Pour cette deuxième application, l’étude du cas sans mesure de vitesse a également été conduite. Tous les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l’objet d’une validation pratique, en piscine ou en environnement naturel.

Les travaux menés ici s’appuient sur l’hypothèse d’un sous-marin totalement actionné. Une extension directe de ce travail au cas de sous-marins sous-actionnés (par nature ou pouvant l’être en fonction du mode de navigation) semble clairement pertinente.

Les résultats théoriques et pratiques développés dans ce chapitre ont été obtenus au travers de deux encadrements de thèse. La première a été soutenue par Szymon Krupinsky en 2014. La seconde a été soutenue en 2019 par Lam Hung Nguyen en 2019. Ces travaux ont également donné lieu à des publications présentées lors conférences internationales [CI11,CI14,CI16,CI20] ainsi que dans des revues internationales<sup>12</sup> [R2,R4,R5].

12. *IEEE Transactions on Robotics, Control Engineering Practice, IEEE Transactions on Control Systems Technology*

# Bibliographie

- [ACC10] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et François CHAUMETTE. « Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.5 (2010), p. 933-939.
- [ACT08a] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Real-time Visual Predictive Controller for Image-based Trajectory Tracking of a Mobile Robot ». In : *IFAC World Congress*. 2008.
- [ACT08b] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
- [Ala06] Mazen ALAMIR. *Stabilization of Nonlinear Systems Using Receding-Horizon Control Schemes : a Parametrized Approach for Fast Systems*. Springer, 2006.
- [Ala13] Mazen ALAMIR. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control : Self Contained Algorithms and Cases Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN : ISBN-10 1489541349.
- [All+19] Guillaume ALLIBERT, Minh Duc HUA, Szymon KRUPÍŃSKI et Tarek HAMEL. « Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles ». In : *Control Engineering Practice, Elsevier* 82 (2019), p. 151-160.
- [AMB16] Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Moses BANGURA. « Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2016.
- [AO03] Javier ANTICH et Alberto ORTIZ. « Underwater Cable Tracking By Visual Feedback ». In : *Pattern Recognition and Image Analysis* 2652 (2003), p. 53-61.
- [Bag+11] Andrey BAGNITSKY, Alexander INZARTSEV, Alexander PAVIN, Sergey MELMAN et Morozov MOROZOV. « Side Scan Sonar Using for Underwater Cables & Pipelines Tracking By Means of AUV ». In : *IEEE Symposium on Underwater Technology (UT) and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*. 2011, p. 1-10.
- [Ban+14] Moses BANGURA, Hyon LIM, H. Jin KIM et Robert MAHONY. « Aerodynamic Power Control for Multirotor Aerial Vehicles ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2014, p. 529-536.
- [Ban+15] Moses BANGURA, Frits KUIPERS, Guillaume ALLIBERT et Robert MAHONY. « Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors ». In : *in Proc. Australasian Conf. Robotics Automation*. 2015.

- [Ban+18] Moses BANGURA, Xiaolei HOU, Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Nathan MICHAEL. « Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions Using Inertial Measurements ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.6 (2018), p. 1490-1501.
- [BB00] Sanjay P. BHAT et Dennis S. BERNSTEIN. « A Topological Obstruction to Continuous Global Stabilization of Rotational Motion and the Unwinding Phenomenon ». In : *Systems & control letters* 39.1 (2000), p. 63-70.
- [Bia+17] Jacob BIAMONTE, Peter WITTEK, Nicola PANCOTTI, Patrick REBENTROST, Nathan WIEBE et Seth LLOYD. « Quantum Machine Learning ». In : *Nature* 549.7671 (2017), p. 195-202.
- [BM07] Selim BENHIMANE et Ezio MALIS. « Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing ». In : *Int. Journal of Robotics Research* 26.7 (2007), p. 661-676.
- [BMS09] Silvère BONNABEL, Philippe MARTIN et Erwan SALAÜN. « Invariant Extended Kalman Filter : Theory and Application to a Velocity-aided Attitude Estimation Problem ». In : *48th IEEE Conference on Decision and Control with 28th Chinese Control Conference*. 2009, p. 1297-1304.
- [BO85] Itzhack Y. BAR-ITZHACK et Yaakov OSHMAN. « Attitude Determination from Vector Observations : Quaternion Estimation ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-21 (1985), p. 128-136.
- [BPV07] Lorenzo BRIGNONE, Michel PERRIER et Christophe VIALA. « A Fully Autonomous Docking Strategy for Intervention Auvs ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 2007, p. 1-6.
- [CC04] Yang CHENG et John L. CRASSIDIS. « Particle Filtering for Sequential Spacecraft Attitude Estimation ». In : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2004.
- [CH06] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13.4 (2006), p. 82-90.
- [CH07] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.1 (2007), p. 109-118.
- [Cre14] Vincent CREUZE. « Robots Marins Et Sous-marins : Perception, Modélisation, Commande ». In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783 (2014).
- [DBV99] Edwin T. van DONKELAAR, Okko H. BOSGRA et Paul M.J. VAN DEN HOF. « Model Predictive Control With Generalized Input Parametrization ». In : *European Control Conference*. 1999, p. 1693-1698.
- [FEB16] Hassen FOURATI, Djamel EDDINE et Chouaib BELKHIAT. *Multisensor Attitude Estimation : Fundamental Concepts and Applications*. Boca Raton : CRC Press LLC, Florence : Taylor & Francis Group, 2016.
- [Fos02] Thor I. FOSSEN. *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetix AS, 2002. ISBN : 82-92356-00-2.
- [Fos11] Thor I. FOSSEN. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley et Sons Ltd, 2011.

- [GD10] Christopher GEYER et Kostas DANILIDIS. « Catadioptric Projective Geometry ». In : *Int. Journal on Computer Vision* 45.3 (2010), p. 223-243.
- [Gri+12] Håvard Fjær GRIP, Thor I. FOSSEN, Tor A. JOHANSEN et Ali SABERI. « Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements With Time-Varying Reference Vectors ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), p. 1332-1338.
- [Gro13] Paul GROVES. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 2013.
- [HCO17] Inhwan HWANG, Geonho CHA et Songhwai OH. « Multi-modal Human Action Recognition Using Deep Neural Networks Fusing Image and Inertial Sensor Data ». In : *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2017.
- [HHS17] Minh Duc HUA, Tarek HAMEL et Claude SAMSON. « Riccati Nonlinear Observer for Velocity-aided Attitude Estimation of Accelerated Vehicles Using Coupled Velocity Measurements ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2017, p. 2428-2433.
- [HM13] Xiaolei HOU et Robert MAHONY. « Dynamic Kinesthetic Boundary for Haptic Teleoperation of Aerial Robotic Vehicles ». In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, p. 4549-4950.
- [Hua+19] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Feature-based Recursive Observer Design for Homography Estimation and Its Application to Image Stabilization ». In : *Asian Journal of Control* 21.4 (2019), p. 1443-1458.
- [Hua+20] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Nonlinear Observer Design on  $SL(3)$  for Homography Estimation By Exploiting Point and Line Correspondences With Application to Image Stabilization ». In : *to be published in Automatica* (2020).
- [Hua09] Minh Duc HUA. « Contributions to the Automatic Control of Aerial Vehicles ». Thèse de doct. University of Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- [Hua10] Minh-Duc HUA. « Attitude Estimation for Accelerated Vehicles using GPS/INS Measurements ». In : *Control Engineering Practice* 18 (2010), p. 723-732.
- [HZ03] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [IP09] Alexander INZARTSEV et Alexander PAVIN. *AUV Application for Inspection of Underwater Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [IY20] Daisuke INOUE et Hiroaki YOSHIDA. « Model Predictive Control for Finite Input Systems Using the D-Wave Quantum Annealer ». In : *Quantum Machine Intelligence* 10.1591 (2020).
- [Jen11] Kenneth JENSEN. « Generalized Nonlinear Complementary Attitude Filter ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.5 (2011), p. 1588-1592.
- [JU04] Simon J. JULIER et Jeffrey K. UHLMANN. « Unscented Filtering and Nonlinear Estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.
- [KA05] Thomas R. KANE et Levinson David A. *Dynamics : Theory and Applications*. McGraw-Hill, NY, 2005.

- [Kac49] Marck KAC. « On Distributions of Certain Wiener Functionals ». In : *Transactions of the American Mathematical Society* 65.1 (1949), p. 200-201.
- [Kap05] Hilbert J. KAPPEN. « Path Integrals and Symmetry Breaking for Optimal Control Theory ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 11 (2005), P11011.
- [Kru+17] Szymon KRUPÍNSKI, Guillaume ALLIBERT, Minh-Duc HUA et Tarek HAMEL. « An Inertial-Aided Homography-based Visual Servo Control Approach for (Almost) Fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.5 (2017), p. 1041-1060.
- [Kru14] Szymon KRUPÍNSKI. « Offshore Structure Following By Means of Sensor Servoing and Sensor Fusion ». Thèse de doct. Laboratoire I3S, Université de Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [LBH15] Yann LE CUN, Yoshua BENGIO et Geoffrey HINTON. « Deep learning ». In : *Nature* 521.7553 (2015), p. 436-444.
- [Leo97] Naomi Ehrich LEONARD. « Stability of a Bottom-Heavy Underwater Vehicle ». In : *Automatica* 33.3 (1997), p. 331-246.
- [LLT00] Jean-François LOTS, David LANE et Emmanuele TRUCCO. « Application of 2 1/2 D Visual Servoing to Underwater Vehicle Station-keeping ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. T. 2. 2000, p. 1257-1264.
- [Lot+01] Jean-François LOTS, David LANE, Emmanuele TRUCCO et François CHAUMETTE. « A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2001, p. 2767-2772.
- [Mah+09] Robert MAHONY, Tarek HAMEL, Jochen TRUMPF et Christian LAGEMAN. « Non-linear Attitude Observers on SO(3) for Complementary and Compatible Measurements : a Theoretical Study ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009, p. 6407-6412.
- [Mar03] Francis Landis MARKLEY. « Attitude Error Representations for Kalman Filtering ». In : *Journal of Guidance Control and Dynamics* 26 (2003), p. 311-317.
- [MCB99] Ezio MALIS, François CHAUMETTE et Sylvie BOUDET. « 2 1/2D Visual Servoing ». In : *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15.2 (1999), p. 238-250.
- [MD16] Michael MUEHLEBACH et Raffaello D'ANDREA. « Parametrized Infinite-horizon Model Predictive Control for Linear Time-Invariant Systems With Input and State Constraints ». In : *American Control Conference*. 2016, p. 2669-2674.
- [MH05] Robert MAHONY et Tarek HAMEL. « Image-based Visual Servo Control of Aerial Robotic Systems Using Linear Image Features ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21.2 (2005), p. 227-239.
- [MHP08] Robert MAHONY, Tarek HAMEL et Jean Michel PFLIMLIN. « Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.5 (2008), p. 1203-1217.
- [MHP15] Lorenz MEIER, Dominik HONEGGER et Marc POLLEFEYS. « PX4 : a Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015, p. 6235-6240.

- [MLS94] Richard M. MURRAY, Zexiang LI et S. Shankara SASTRY. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [MV07] Ezio MALIS et Manuel VARGAS. *Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-based Control*. INRIA Research report, RR-6303, 2007.
- [MV17] Matthias MÖLLER et Cornelis VUIK. « On the Impact of Quantum Computing Technology on Future Developments in High-performance Scientific Computing ». In : *Ethics and Information Technology* 19.4 (2017), p. 253-269.
- [MY95] Shigetaka MATSUMOTO et Ito YOSHIHIKO. « Real-Time Vision-Based Tracking of Submarine-cables for AUV/ROV ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 1995, p. 1997-2002.
- [MZ83] Manfred MORARI et Evangelos ZAFIRIOU. *Robust Control*. Paris, France : Dunod, 1983.
- [Ngu+20] Lam Hung NGUYEN, Minh Duc HUA, Guillaume ALLIBERT et Tarek HAMEL. « A Homography-based Dynamic Control Approach Applied to Station Keeping of Autonomous Underwater Vehicles Without Linear Velocity Measurements ». In : *To appear in IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2020).
- [Pet+19] Christina PETSCHNIGG, Mathias BRANDSTÖTTER, Horst PICHLER, Michael HOFBAUR et Bernhard DIEBER. « Quantum Computation in Robotic Science and Applications ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. 2019, p. 803-810.
- [PL01] Elena PANTELEY et Antonio LORÍA. « Growth Rate Conditions for Uniform Asymptotic Stability of Cascaded Time-varying Systems ». In : *Automatica* 37.3 (2001), p. 453-460.
- [Plü65] Julius PLÜCKER. « On a new geometry of space ». In : *Philisophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (1865), p. 725-791.
- [RB97] Patrick RIVES et Jean Jacques BORRELLY. « Underwater Pipe Inspection Task Using Visual Servoing Techniques ». In : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1997, p. 63-68.
- [Rib+12] David RIBAS, Narcis PALOMERAS, Pere RIDAO, Marc CARRERAS et Angelos MALLIOS. « Girona 500 AUV : From Survey to Intervention ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1.17 (2012), p. 46-53.
- [Sal91] Septimiu E. SALCUDEAN. « A Globally Convergent Angular Velocity Observer for Rigid Body Motion ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.12 (1991), p. 1493-1497.
- [SER91] Claude SAMSON, Bernard ESPIAU et Patrick RIVES. *Robot Control : the Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [Ste94] Robert F. STENGEL. *Optimal Control and Estimation*. Dover, 1994. ISBN : 0-486-68200-5.
- [Sto51] George Gabriel STOKES. « On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums ». In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 99.8 (1851), p. 1-10.
- [Tan+17] Prateek TANDON, Stanley LAM, Ben SHIH, Tanay MEHTA, Alex MITEV et Zhiyang ONG. *Quantum Robotics : a Primer on Current Science and Future Perspectives*. Morgan & Claypool, 2017.

- [THS69] N. F. TODA, J. L. HEISS et F. H. SCHLEE. « SPARS : the System, Algorithm, and Test Results ». In : *Proceedings of the Symposium on Spacecraft Attitude Determination*. 1969, p. 361-370.
- [TRB11] Abdelhamid TAYEBI, Andrew ROBERTS et Abdelaziz BENALLEGUE. « Inertial Measurements Based Dynamic Attitude Estimation and Velocity-free Attitude Stabilization ». In : *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. 2011, p. 1027-1032.
- [WAT17] Grady WILLIAMS, Andrew ALDRICH et Evangelos A. THEODOROU. « Model Predictive Path Integral Control : From Theory to Parallel Computation ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (2017), p. 344-357.
- [WN18] Weiyue WANG et Ulrich NEUMANN. « Depth-aware CNN for RGB-D Segmentation ». In : *ECCV*. 2018.
- [WSN87] Leland WEISS, Arthur SANDERSON et Charles P. NEUMAN. « Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 3.5 (1987), p. 404-417.
- [ZBS02] Sjoerd van der ZWAAN, Alexandre BERNARDINO et José SANTOS-VICTOR. « Visual Station Keeping for Floating Robots In Unstructured Environments ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 39 (2002), p. 145-155.
- [Zha+20] Chaoqiang ZHAO, Qiyu SUN, Chongzhen ZHANG, Yang TANG et Feng QIAN. *Monocular depth estimation based on deep learning : An overview*. Sci. China Technology, 2020.

# Bilan et Perspectives

Ce document synthétise le travail de dix années de recherche centrées sur l'Automatique et la Perception pour la Robotique. Les nombreuses applications présentées dans ce document témoignent du côté multidisciplinaire de ma recherche, avec une volonté permanente de valider expérimentalement tous les développements théoriques proposés. Toutes ces recherches ont été menées dans le cadre de projets régionaux (thèse cifre, thèse École Doctorale STIC, projets IDEX), nationaux (projets PEPS et ANR) et d'une collaboration internationale (Robert Mahony, *Australian National University*). Tous les travaux ont pour vocation d'améliorer l'autonomie et les performances des robots mobiles, qu'ils soient sous-marins, terrestres ou aériens. D'un point de vue quantitatif, ces recherches ont conduit à la publication de cinq revues internationales à comité de lecture et d'une trentaine de conférences internationales. Ma stratégie de diffusion scientifique est prioritairement basée sur des publications dans des revues internationales à comités de lecture d'excellents niveaux<sup>1</sup>, ce qui explique le nombre modeste d'articles de revue. Tout ce travail a été mené grâce à l'encadrement de doctorants et de post-doctorants.

Nous n'allons pas faire dans ce chapitre un résumé des conclusions faites dans chaque chapitre mais plutôt exposer quelques orientations futures de nos recherches, qu'elles soient à court, moyen et long termes.

## 5.1 Commande Prédictive pour les systèmes rapides

Bien que cet axe de travail en cours ait été développé dans le chapitre 2, il me semble ici important de le mentionner au vu des résultats préliminaires obtenus. Ces derniers semblent ouvrir la voie à des développements importants et pouvant être appliqués efficacement à la robotique aérienne (asservissement visuel rapide, évitement d'obstacle dynamique, etc.).

La première piste de travail concerne le choix et l'étude de la paramétrisation pour la commande prédictive, l'impact de ce choix et son effet sur l'étude de la stabilité et la mise en œuvre pratique sur des nano-ordinateurs embarqués à des systèmes robotiques ayant une dynamique rapide. Pour cet axe de recherche, le financement d'une année de post-doctorat a été obtenu sur un appel à projets interne du laboratoire I3S. Il va permettre le recrutement de Franco Fusco en décembre 2020, avec qui je collabore maintenant depuis quelques mois sur le sujet.

La deuxième piste de travail concerne l'extension du *MPPI* à la navigation des drones aériens dans les environnements denses, non structurés et potentiellement dynamiques. Là aussi, plusieurs questions ouvertes méritent d'être adressées, comme l'étude de la stabilité ou encore l'influence des paramètres de réglage de la commande comme le nombre de trajectoires calculées et l'horizon de prédiction.

---

1. Publications en Robotique, Version 2015, Document du GDR Robotique pour le CNRS

## 5.2 Couplage des méthodes basées apprentissage profond (*data-driven*) et des méthodes basées modèle (*model-driven*) pour la Robotique

Depuis quelques années, les techniques d'apprentissage profond ont considérablement amélioré l'état de l'art dans de nombreux domaines : détection d'objets, reconnaissance vocale, génération de voix, génération de musique, navigation de robots mobiles, etc. Elles ont produit des résultats comparables à ceux d'experts humains, voire même supérieurs [LBH15]. Bien que très efficaces, elles ne profitent toutefois pas des outils d'analyse et des résultats théoriques obtenus depuis plusieurs années par les méthodes MB. Cette difficulté limite la fiabilité des approches AP lorsque des garanties théoriques sont requises. C'est clairement le cas en Automatique avec les lois de contrôle.

Nous souhaitons donc aborder le délicat problème du couplage de ces deux approches afin d'en tirer tous les avantages. À long terme, l'objectif est d'aborder cette problématique sous les angles du contrôle et de la perception, domaines étroitement couplés en robotique. Ces deux approches peuvent se combiner de deux manières différentes.

- La première manière, plus globale, consiste à utiliser ces deux méthodes pour une même mission mais de manière indépendante, de façon à ce qu'elles s'alimentent l'une de l'autre. À titre d'exemple, on peut citer la navigation d'un robot mobile dans un environnement encombré où la partie perception est faite par des méthodes AP et le contrôle par des méthodes MB (*AP-perception based Control* ou *AP-perception for MB control*).
- La deuxième, plus locale, vise à introduire des données ou des mesures issues du monde physique dans les méthodes AP. En effet, les architectures des réseaux développées jusqu'à présent ne tiennent pas compte des particularités des capteurs utilisés et/ou de grandeurs physiques issues du monde réel. En caricaturant légèrement, les réseaux les plus performants sont généralement les plus complexes en termes d'architecture. Les progrès permanents des GPU incitent alors les chercheurs à ajouter des couches supplémentaires et par conséquent, à augmenter les bases de données pour les apprentissages devant le nombre de degrés de liberté supplémentaires. A contrario, nous pensons qu'il est possible d'adapter et d'optimiser les architectures en introduisant des informations physiques dans les réseaux. À titre d'exemple, on peut citer l'adaptation des convolutions en fonction du capteur utilisé (convolution adaptée aux images sphériques), la prise en compte des particularités des capteurs (caméra sphérique), l'ajout de mesures supplémentaires comme la profondeur pour adapter les filtres de convolution, etc.

À court et moyen termes, plusieurs pistes de recherches concrètes sont privilégiées, dont certaines viennent juste de commencer par l'intermédiaire d'étudiants en début de thèse.

### 5.2.1 Du point de vue contrôle

Les stratégies de commande avancées de type MB se basent, comme leur nom l'indique, sur la connaissance du système à contrôler. Les performances du contrôleur sont donc directement liées à la qualité du modèle dynamique utilisé. Dans la robotique moderne, les robots sont de plus en plus complexes en termes de structure mécanique, de redondance des actionneurs, de dynamique, etc. Dans certains cas, ces systèmes peuvent être difficiles à modéliser et les méthodes basées AP peuvent fournir des solutions efficaces. En effet, l'état d'un système n'est généralement pas mesuré directement. Il est calculé à l'aide d'estimateurs ou d'observateurs et à partir de mesures généralement bruitées. Les capteurs embarqués

et/ou déportés fournissent des informations de plus en plus riches et permettent de mesurer un grand nombre de données brutes à des fréquences très élevées. Les capteurs visuels sont des exemples concrets. Dans ce cadre, nous souhaitons proposer des solutions au problème d’identification des systèmes dynamiques non linéaires à partir d’observations en dimension élevée en utilisant les récents progrès de l’apprentissage profond. Ce problème de modélisation par mesures purement indirectes de l’état à partir de données de capteurs à très haute dimension est très complexe. Premièrement, il peut être difficile de trouver des relations non linéaires en dimension élevée en raison des problèmes de non-observabilité, de minima locaux, d’*overfitting*, etc. Deuxièmement, la quantité de données requises pour trouver un “bon” modèle peut être très importante. Pour remédier à ces difficultés, nous souhaitons trouver à l’aide des méthodes AP, des représentations de dimensions inférieures à celles d’origine. Les modèles ainsi obtenus seront ensuite utilisés dans des stratégies de commandes avancées basées modèle.

Parmi les moyens mis en œuvre pour mener à bien ces objectifs, on peut citer une action que j’ai initiée avec des collègues physiciens de UCA, et qui a pour but de contrôler un poisson par asservissement visuel à partir d’un modèle obtenu en utilisant les méthodes d’apprentissage profond. L’objectif ici est d’étudier la dynamique complexe de la nage du poisson afin de la modéliser, prédire son comportement optimal et de contrôler le poisson à partir de ce modèle. Dans un premier temps, nous souhaitons trouver un modèle dynamique à partir d’images de déformation de sa queue grâce à une caméra déportée. Dans un deuxième temps, nous souhaitons déterminer le modèle dynamique à partir d’images de flux optique obtenues à partir de la visualisation de l’écoulement autour du poisson par vélocimétrie par images de particules. Chaque modèle développé sera alors utilisé dans une stratégie de commande basé modèle.

## 5.2.2 Du point de vue perception

Les réseaux convolutifs actuellement utilisés dans les réseaux de convolution souffrent d’un inconvénient majeur : ils ne permettent pas de prendre en compte explicitement des informations physiques (dynamique de la scène, déformation des objets) et/ou géométriques issues du monde réel. Qu’elles viennent de capteurs ou d’équations de la physique, ces informations pourraient sans aucun doute améliorer les performances obtenues par les méthodes basées AP. Bien que quelques travaux commencent à voir le jour [HCO17; WN18], nous pensons que cette piste de travail prometteuse mérite d’être développée avec énergie. Deux encadrements de thèse, démarrés fin 2019 et début 2020, s’orientent dans cette direction.

- Dans un travail de thèse qui a débuté en janvier 2020, nous souhaitons étendre les méthodes d’estimation de flux optique actuelles aux images sphériques. Ces dernières sont particulièrement bien adaptées à des tâches de navigation de part leur champ de vue à 360 degrés. Une des particularités liées à ces images est la redondance d’informations que l’on peut en extraire avec les parties haute, basse, droite et gauche de l’image. Nous souhaitons donc utiliser ces informations physiques liées à la géométrie du capteur pour estimer de façon plus précise le flux optique et le foyer d’expansion.

Dans le même esprit, les véhicules autonomes étant généralement pourvus de capteurs inertiels, nous souhaitons trouver le moyen adéquat pour inclure les mesures de ces capteurs dans les réseaux afin d’améliorer la précision de l’estimation. Parmi les pistes envisagées, la modification des architectures de réseaux existants paraît la plus sérieuse pour prendre en compte ces informations.

- Dans un second travail de thèse qui a débuté en octobre 2019, nous sommes partis du constat que de nos jours, toutes les méthodes basées AP consistent à “décrire” les images

à partir de plusieurs couches de produits de convolution. Les algorithmes utilisent ces opérateurs entre les pixels voisins dans l’image afin d’en analyser leur cohérence spatiale sans tenir compte de l’effet de perspective. Nous souhaitons donc revoir les méthodes de traitement d’images usuelles pour les rendre plus performantes vis à vis de la perspective de la scène. L’objectif est de définir de nouveaux produits de convolution qui tiennent compte, de manière intrinsèque, de la géométrie de l’image telle que la profondeur en chaque pixel. Cette information géométrique permettra d’obtenir des filtrages indépendants de la distance de l’objet par rapport à la caméra. L’intérêt de cette approche est qu’elle pourra s’étendre à tout type de caméras (RGB-D) pour laquelle une information de profondeur est disponible. C’est le cas des *Kinect*, des caméras Temps de Vol, etc, qui sont aujourd’hui des produits technologiques matures. L’utilisation de ces réseaux de convolution adaptés à la profondeur, c’est-à-dire prenant en compte de manière implicite l’information de profondeur, nous semble une piste prometteuse pour améliorer les réseaux existants.

Les deux exemples précédents nous poussent à penser que les performances des méthodes basées sur l’apprentissage profond peuvent grandement être améliorées en ajoutant des informations supplémentaires dans les réseaux. À long terme, nous souhaitons donc proposer de nouvelles architectures de réseaux pilotées par des informations physiques hétérogènes mesurables et/ou modélisables.

Pour cet axe de recherche couvrant à la fois les aspects perception et commande, plusieurs moyens sont et seront mis en œuvre pour satisfaire les objectifs à atteindre :

- tout d’abord humain, avec le recrutement depuis novembre 2019 et janvier 2020 de deux nouveaux doctorants (Zongwei Wu et Charles-Olivier Artizzu). Comme évoqué précédemment, ces deux doctorants sont focalisés sur la partie perception. Ces moyens humains seront renforcés dans les mois à venir avec l’arrivée d’un nouveau doctorant (Sardor Israilov) et un post-doctorant de dix-huit mois dont le recrutement en cours. Le travail de ces étudiants sera axé sur la partie contrôle et sera financé dans le cadre du projet IBRID qui a été sélectionné par l’IDEX et l’EUR DS4H.
- Ensuite, par le biais de collaborations, consolidée comme c’est le cas avec le laboratoire VIBOT et l’encadrement des thèses de Zongwei Wu et Charles-Olivier Artizzu, ou par le biais de nouvelles collaborations comme c’est le cas avec le laboratoire de physique de Nice (INPHYNI) dans le cas du projet IBRID.

### 5.3 L’Informatique Quantique pour la Robotique

Cet axe de recherche fait partie des thématiques dans lesquelles je souhaite m’investir sur le long terme. Il fait également partie des pistes de travail de l’équipe commune ACENTAURI<sup>2</sup> en cours de création pour laquelle je suis l’animateur scientifique de l’axe “Contrôle”. L’existence de cet axe de recherche se justifie par le fait que l’informatique quantique révolutionne depuis quelques années plusieurs disciplines scientifiques [MV17]. L’exemple le plus courant est celui de la cryptographie. Si, pour un ordinateur “classique”, plusieurs dizaines de milliers d’années seraient nécessaires pour casser un cryptage RSA-2048<sup>3</sup>, seule une centaine de secondes suffirait à un ordinateur quantique. C’est une révolution à venir et un bouleversement pour la société actuelle. Les disciplines telles que la médecine, l’intelligence artificielle, la cyber-sécurité, la chimie, la finance, etc., devraient être impactées par cette

---

2. Équipe Projet Commune CNRS/INRIA, dirigé par Ezio Malis.

3. Ce sont les cryptages qui sont à la base des plus grands systèmes de sécurités mondiaux.

révolution à moyen et long terme. La robotique le sera également [Pet+19].

On peut distinguer actuellement deux types de recherches sur l'informatique quantique :

- la première concerne la réalisation physique d'un ordinateur quantique. Les chercheurs actuels peinent à développer des modèles stables avec un nombre significatif de *qubits* qui pourrait réaliser sans erreur tous types de calcul ;
- la deuxième concerne le développement d'algorithmes qui pourraient être utilisés sur ce type d'ordinateur, en considérant qu'ils seront disponibles au grand public dans un avenir proche.

Les progrès récents dans le développement des ordinateurs quantiques montrent qu'il semble pertinent dès à présent de commencer à identifier certaines directions de recherche qui pourraient faire avancer la robotique autonome. Parmi celles-ci, deux me semblent prometteuses :

- la première concerne le contrôle et plus particulièrement toutes les stratégies de commandes basées sur l'optimisation d'une ou plusieurs fonctions coûts. S'il est clair que les méthodes actuelles ne permettent pas de trouver en temps réel une commande qui minimise globalement une fonction coût quelconque soumise à des contraintes, l'informatique quantique pourrait apporter des solutions. Les problèmes d'optimisation précédents peuvent se formuler comme des problèmes de recherche pour lesquels plusieurs algorithmes quantiques (Algorithme de Grover, *Quantum Annealing*) permettent de trouver le minimum global d'une fonction coût.

Le potentiel de ces approches ouvrent incontestablement la voie vers de nouvelles opportunités pour toutes les stratégies de contrôle basées sur l'optimisation. Les stratégies prédictives en font bien évidemment parties [IY20].

- la seconde concerne l'intelligence artificielle, dans laquelle l'informatique quantique pourrait avoir de multiples répercussions. Les algorithmes de robotique modernes font de plus en plus appel aux techniques de *machine learning*, quels que soient les domaines d'applications [Tan+17] : perception, localisation, planification, contrôle, interaction homme-machine, etc. La plupart des outils actuels utilisés dans ces algorithmes (Analyse en Composantes Principale *PCA*, régression, *SVM*, etc.) ont leur équivalent en informatique quantique avec des accélérations en termes de temps de calcul pouvant être exponentielles. L'impact sur la robotique actuelle est donc vaste. On peut citer, à titre d'exemple l'utilisation de l'informatique quantique pour accélérer les phases d'apprentissage d'un réseau. Il est maintenant établi que les performances des réseaux de neurones actuels sont directement fonction de la quantité de données utilisées pendant la phase d'apprentissage. Ceci est valable, quels que soient les apprentissages, supervisés ou non. Une question directe et encore ouverte [Bia+17] serait de déterminer si (et comment) l'informatique quantique peut entraîner et déterminer plus rapidement les poids d'un réseau avant de les implémenter sur les GPUs actuels.



# Bibliographie

- [ACC10] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et François CHAUMETTE. « Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.5 (2010), p. 933-939.
- [ACT08a] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Real-time Visual Predictive Controller for Image-based Trajectory Tracking of a Mobile Robot ». In : *IFAC World Congress*. 2008.
- [ACT08b] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
- [Ala06] Mazen ALAMIR. *Stabilization of Nonlinear Systems Using Receding-Horizon Control Schemes : a Parametrized Approach for Fast Systems*. Springer, 2006.
- [Ala13] Mazen ALAMIR. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control : Self Contained Algorithms and Cases Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN : ISBN-10 1489541349.
- [All+19] Guillaume ALLIBERT, Minh Duc HUA, Szymon KRUPÍŃSKI et Tarek HAMEL. « Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles ». In : *Control Engineering Practice, Elsevier* 82 (2019), p. 151-160.
- [AMB16] Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Moses BANGURA. « Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2016.
- [AO03] Javier ANTICH et Alberto ORTIZ. « Underwater Cable Tracking By Visual Feedback ». In : *Pattern Recognition and Image Analysis* 2652 (2003), p. 53-61.
- [Bag+11] Andrey BAGNITSKY, Alexander INZARTSEV, Alexander PAVIN, Sergey MELMAN et Morozov MOROZOV. « Side Scan Sonar Using for Underwater Cables & Pipelines Tracking By Means of AUV ». In : *IEEE Symposium on Underwater Technology (UT) and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*. 2011, p. 1-10.
- [Ban+14] Moses BANGURA, Hyon LIM, H. Jin KIM et Robert MAHONY. « Aerodynamic Power Control for Multirotor Aerial Vehicles ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2014, p. 529-536.
- [Ban+15] Moses BANGURA, Frits KUIPERS, Guillaume ALLIBERT et Robert MAHONY. « Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors ». In : *in Proc. Australasian Conf. Robotics Automation*. 2015.

- [Ban+18] Moses BANGURA, Xiaolei HOU, Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Nathan MICHAEL. « Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions Using Inertial Measurements ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.6 (2018), p. 1490-1501.
- [BB00] Sanjay P. BHAT et Dennis S. BERNSTEIN. « A Topological Obstruction to Continuous Global Stabilization of Rotational Motion and the Unwinding Phenomenon ». In : *Systems & control letters* 39.1 (2000), p. 63-70.
- [Bia+17] Jacob BIAMONTE, Peter WITTEK, Nicola PANCOTTI, Patrick REBENTROST, Nathan WIEBE et Seth LLOYD. « Quantum Machine Learning ». In : *Nature* 549.7671 (2017), p. 195-202.
- [BM07] Selim BENHIMANE et Ezio MALIS. « Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing ». In : *Int. Journal of Robotics Research* 26.7 (2007), p. 661-676.
- [BMS09] Silvère BONNABEL, Philippe MARTIN et Erwan SALAÜN. « Invariant Extended Kalman Filter : Theory and Application to a Velocity-aided Attitude Estimation Problem ». In : *48th IEEE Conference on Decision and Control with 28th Chinese Control Conference*. 2009, p. 1297-1304.
- [BO85] Itzhack Y. BAR-ITZHACK et Yaakov OSHMAN. « Attitude Determination from Vector Observations : Quaternion Estimation ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-21 (1985), p. 128-136.
- [BPV07] Lorenzo BRIGNONE, Michel PERRIER et Christophe VIALA. « A Fully Autonomous Docking Strategy for Intervention Auvs ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 2007, p. 1-6.
- [CC04] Yang CHENG et John L. CRASSIDIS. « Particle Filtering for Sequential Spacecraft Attitude Estimation ». In : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2004.
- [CH06] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13.4 (2006), p. 82-90.
- [CH07] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.1 (2007), p. 109-118.
- [Cre14] Vincent CREUZE. « Robots Marins Et Sous-marins : Perception, Modélisation, Commande ». In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783 (2014).
- [DBV99] Edwin T. van DONKELAAR, Okko H. BOSGRA et Paul M.J. VAN DEN HOF. « Model Predictive Control With Generalized Input Parametrization ». In : *European Control Conference*. 1999, p. 1693-1698.
- [FEB16] Hassen FOURATI, Djamel EDDINE et Chouaib BELKHIAT. *Multisensor Attitude Estimation : Fundamental Concepts and Applications*. Boca Raton : CRC Press LLC, Florence : Taylor & Francis Group, 2016.
- [Fos02] Thor I. FOSSEN. *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetix AS, 2002. ISBN : 82-92356-00-2.
- [Fos11] Thor I. FOSSEN. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley et Sons Ltd, 2011.

- [GD10] Christopher GEYER et Kostas DANILIDIS. « Catadioptric Projective Geometry ». In : *Int. Journal on Computer Vision* 45.3 (2010), p. 223-243.
- [Gri+12] Håvard Fjær GRIP, Thor I. FOSSEN, Tor A. JOHANSEN et Ali SABERI. « Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements With Time-Varying Reference Vectors ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), p. 1332-1338.
- [Gro13] Paul GROVES. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 2013.
- [HCO17] Inhwan HWANG, Geonho CHA et Songhwai OH. « Multi-modal Human Action Recognition Using Deep Neural Networks Fusing Image and Inertial Sensor Data ». In : *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2017.
- [HHS17] Minh Duc HUA, Tarek HAMEL et Claude SAMSON. « Riccati Nonlinear Observer for Velocity-aided Attitude Estimation of Accelerated Vehicles Using Coupled Velocity Measurements ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2017, p. 2428-2433.
- [HM13] Xiaolei HOU et Robert MAHONY. « Dynamic Kinesthetic Boundary for Haptic Teleoperation of Aerial Robotic Vehicles ». In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, p. 4549-4950.
- [Hua+19] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Feature-based Recursive Observer Design for Homography Estimation and Its Application to Image Stabilization ». In : *Asian Journal of Control* 21.4 (2019), p. 1443-1458.
- [Hua+20] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Nonlinear Observer Design on SL(3) for Homography Estimation By Exploiting Point and Line Correspondences With Application to Image Stabilization ». In : *to be published in Automatica* (2020).
- [Hua09] Minh Duc HUA. « Contributions to the Automatic Control of Aerial Vehicles ». Thèse de doct. University of Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- [Hua10] Minh-Duc HUA. « Attitude Estimation for Accelerated Vehicles using GPS/INS Measurements ». In : *Control Engineering Practice* 18 (2010), p. 723-732.
- [HZ03] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [IP09] Alexander INZARTSEV et Alexander PAVIN. *AUV Application for Inspection of Underwater Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [IY20] Daisuke INOUE et Hiroaki YOSHIDA. « Model Predictive Control for Finite Input Systems Using the D-Wave Quantum Annealer ». In : *Quantum Machine Intelligence* 10.1591 (2020).
- [Jen11] Kenneth JENSEN. « Generalized Nonlinear Complementary Attitude Filter ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.5 (2011), p. 1588-1592.
- [JU04] Simon J. JULIER et Jeffrey K. UHLMANN. « Unscented Filtering and Nonlinear Estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.
- [KA05] Thomas R. KANE et Levinson David A. *Dynamics : Theory and Applications*. McGraw-Hill, NY, 2005.

- [Kac49] Marck KAC. « On Distributions of Certain Wiener Functionals ». In : *Transactions of the American Mathematical Society* 65.1 (1949), p. 200-201.
- [Kap05] Hilbert J. KAPPEN. « Path Integrals and Symmetry Breaking for Optimal Control Theory ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 11 (2005), P11011.
- [Kru+17] Szymon KRUPÍNSKI, Guillaume ALLIBERT, Minh-Duc HUA et Tarek HAMEL. « An Inertial-Aided Homography-based Visual Servo Control Approach for (Almost) Fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.5 (2017), p. 1041-1060.
- [Kru14] Szymon KRUPÍNSKI. « Offshore Structure Following By Means of Sensor Servoing and Sensor Fusion ». Thèse de doct. Laboratoire I3S, Université de Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [LBH15] Yann LE CUN, Yoshua BENGIO et Geoffrey HINTON. « Deep learning ». In : *Nature* 521.7553 (2015), p. 436-444.
- [Leo97] Naomi Ehrlich LEONARD. « Stability of a Bottom-Heavy Underwater Vehicle ». In : *Automatica* 33.3 (1997), p. 331-246.
- [LLT00] Jean-François LOTS, David LANE et Emmanuele TRUCCO. « Application of 2 1/2 D Visual Servoing to Underwater Vehicle Station-keeping ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. T. 2. 2000, p. 1257-1264.
- [Lot+01] Jean-François LOTS, David LANE, Emmanuele TRUCCO et François CHAUMETTE. « A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2001, p. 2767-2772.
- [Mah+09] Robert MAHONY, Tarek HAMEL, Jochen TRUMPF et Christian LAGEMAN. « Non-linear Attitude Observers on SO(3) for Complementary and Compatible Measurements : a Theoretical Study ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009, p. 6407-6412.
- [Mar03] Francis Landis MARKLEY. « Attitude Error Representations for Kalman Filtering ». In : *Journal of Guidance Control and Dynamics* 26 (2003), p. 311-317.
- [MCB99] Ezio MALIS, François CHAUMETTE et Sylvie BOUDET. « 2 1/2D Visual Servoing ». In : *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15.2 (1999), p. 238-250.
- [MD16] Michael MUEHLEBACH et Raffaello D'ANDREA. « Parametrized Infinite-horizon Model Predictive Control for Linear Time-Invariant Systems With Input and State Constraints ». In : *American Control Conference*. 2016, p. 2669-2674.
- [MH05] Robert MAHONY et Tarek HAMEL. « Image-based Visual Servo Control of Aerial Robotic Systems Using Linear Image Features ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21.2 (2005), p. 227-239.
- [MHP08] Robert MAHONY, Tarek HAMEL et Jean Michel PFLIMLIN. « Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.5 (2008), p. 1203-1217.
- [MHP15] Lorenz MEIER, Dominik HONEGGER et Marc POLLEFEYS. « PX4 : a Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015, p. 6235-6240.

- [MLS94] Richard M. MURRAY, Zexiang LI et S. Shankara SASTRY. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [MV07] Ezio MALIS et Manuel VARGAS. *Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-based Control*. INRIA Research report, RR-6303, 2007.
- [MV17] Matthias MÖLLER et Cornelis VUIK. « On the Impact of Quantum Computing Technology on Future Developments in High-performance Scientific Computing ». In : *Ethics and Information Technology* 19.4 (2017), p. 253-269.
- [MY95] Shigetaka MATSUMOTO et Ito YOSHIHIKO. « Real-Time Vision-Based Tracking of Submarine-cables for AUV/ROV ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 1995, p. 1997-2002.
- [MZ83] Manfred MORARI et Evangelos ZAFIRIOU. *Robust Control*. Paris, France : Dunod, 1983.
- [Ngu+20] Lam Hung NGUYEN, Minh Duc HUA, Guillaume ALLIBERT et Tarek HAMEL. « A Homography-based Dynamic Control Approach Applied to Station Keeping of Autonomous Underwater Vehicles Without Linear Velocity Measurements ». In : *To appear in IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2020).
- [Pet+19] Christina PETSCHNIGG, Mathias BRANDSTÖTTER, Horst PICHLER, Michael HOFBAUR et Bernhard DIEBER. « Quantum Computation in Robotic Science and Applications ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. 2019, p. 803-810.
- [PL01] Elena PANTELEY et Antonio LORÍA. « Growth Rate Conditions for Uniform Asymptotic Stability of Cascaded Time-varying Systems ». In : *Automatica* 37.3 (2001), p. 453-460.
- [Plü65] Julius PLÜCKER. « On a new geometry of space ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (1865), p. 725-791.
- [RB97] Patrick RIVES et Jean Jacques BORRELLY. « Underwater Pipe Inspection Task Using Visual Servoing Techniques ». In : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1997, p. 63-68.
- [Rib+12] David RIBAS, Narcis PALOMERAS, Pere RIDAO, Marc CARRERAS et Angelos MALLIOS. « Girona 500 AUV : From Survey to Intervention ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1.17 (2012), p. 46-53.
- [Sal91] Septimiu E. SALCUDEAN. « A Globally Convergent Angular Velocity Observer for Rigid Body Motion ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.12 (1991), p. 1493-1497.
- [SER91] Claude SAMSON, Bernard ESPIAU et Patrick RIVES. *Robot Control : the Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [Ste94] Robert F. STENGEL. *Optimal Control and Estimation*. Dover, 1994. ISBN : 0-486-68200-5.
- [Sto51] George Gabriel STOKES. « On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums ». In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 99.8 (1851), p. 1-10.
- [Tan+17] Prateek TANDON, Stanley LAM, Ben SHIH, Tanay MEHTA, Alex MITEV et Zhiyang ONG. *Quantum Robotics : a Primer on Current Science and Future Perspectives*. Morgan & Claypool, 2017.

- [THS69] N. F. TODA, J. L. HEISS et F. H. SCHLEE. « SPARS : the System, Algorithm, and Test Results ». In : *Proceedings of the Symposium on Spacecraft Attitude Determination*. 1969, p. 361-370.
- [TRB11] Abdelhamid TAYEBI, Andrew ROBERTS et Abdelaziz BENALLEGUE. « Inertial Measurements Based Dynamic Attitude Estimation and Velocity-free Attitude Stabilization ». In : *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. 2011, p. 1027-1032.
- [WAT17] Grady WILLIAMS, Andrew ALDRICH et Evangelos A. THEODOROU. « Model Predictive Path Integral Control : From Theory to Parallel Computation ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (2017), p. 344-357.
- [WN18] Weiyue WANG et Ulrich NEUMANN. « Depth-aware CNN for RGB-D Segmentation ». In : *ECCV*. 2018.
- [WSN87] Leland WEISS, Arthur SANDERSON et Charles P. NEUMAN. « Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 3.5 (1987), p. 404-417.
- [ZBS02] Sjoerd van der ZWAAN, Alexandre BERNARDINO et José SANTOS-VICTOR. « Visual Station Keeping for Floating Robots In Unstructured Environments ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 39 (2002), p. 145-155.
- [Zha+20] Chaoqiang ZHAO, Qiyu SUN, Chongzhen ZHANG, Yang TANG et Feng QIAN. *Monocular depth estimation based on deep learning : An overview*. Sci. China Technology, 2020.

# Bibliographie

- [ACC10] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et François CHAUMETTE. « Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 26.5 (2010), p. 933-939.
- [ACT08a] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Real-time Visual Predictive Controller for Image-based Trajectory Tracking of a Mobile Robot ». In : *IFAC World Congress*. 2008.
- [ACT08b] Guillaume ALLIBERT, Estelle COURTIAL et Youssoufi TOURÉ. « Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
- [Ala06] Mazen ALAMIR. *Stabilization of Nonlinear Systems Using Receding-Horizon Control Schemes : a Parametrized Approach for Fast Systems*. Springer, 2006.
- [Ala13] Mazen ALAMIR. *A Pragmatic Story of Model Predictive Control : Self Contained Algorithms and Cases Studies*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN : ISBN-10 1489541349.
- [All+19] Guillaume ALLIBERT, Minh Duc HUA, Szymon KRUPÍŃSKI et Tarek HAMEL. « Pipeline following by visual servoing for Autonomous Underwater Vehicles ». In : *Control Engineering Practice, Elsevier* 82 (2019), p. 151-160.
- [AMB16] Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Moses BANGURA. « Velocity Aided Attitude Estimation for Aerial Robotic Vehicles Using Latent Rotation Scaling ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2016.
- [AO03] Javier ANTICH et Alberto ORTIZ. « Underwater Cable Tracking By Visual Feedback ». In : *Pattern Recognition and Image Analysis* 2652 (2003), p. 53-61.
- [Bag+11] Andrey BAGNITSKY, Alexander INZARTSEV, Alexander PAVIN, Sergey MELMAN et Morozov MOROZOV. « Side Scan Sonar Using for Underwater Cables & Pipelines Tracking By Means of AUV ». In : *IEEE Symposium on Underwater Technology (UT) and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*. 2011, p. 1-10.
- [Ban+14] Moses BANGURA, Hyon LIM, H. Jin KIM et Robert MAHONY. « Aerodynamic Power Control for Multirotor Aerial Vehicles ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2014, p. 529-536.
- [Ban+15] Moses BANGURA, Frits KUIPERS, Guillaume ALLIBERT et Robert MAHONY. « Non-linear Velocity Aided Attitude Estimation and Velocity Control for Quadrotors ». In : *in Proc. Australasian Conf. Robotics Automation*. 2015.

- [Ban+18] Moses BANGURA, Xiaolei HOU, Guillaume ALLIBERT, Robert MAHONY et Nathan MICHAEL. « Supervisory Control of Multirotor Vehicles in Challenging Conditions Using Inertial Measurements ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.6 (2018), p. 1490-1501.
- [BB00] Sanjay P. BHAT et Dennis S. BERNSTEIN. « A Topological Obstruction to Continuous Global Stabilization of Rotational Motion and the Unwinding Phenomenon ». In : *Systems & control letters* 39.1 (2000), p. 63-70.
- [Bia+17] Jacob BIAMONTE, Peter WITTEK, Nicola PANCOTTI, Patrick REBENTROST, Nathan WIEBE et Seth LLOYD. « Quantum Machine Learning ». In : *Nature* 549.7671 (2017), p. 195-202.
- [BM07] Selim BENHIMANE et Ezio MALIS. « Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing ». In : *Int. Journal of Robotics Research* 26.7 (2007), p. 661-676.
- [BMS09] Silvère BONNABEL, Philippe MARTIN et Erwan SALAÜN. « Invariant Extended Kalman Filter : Theory and Application to a Velocity-aided Attitude Estimation Problem ». In : *48th IEEE Conference on Decision and Control with 28th Chinese Control Conference*. 2009, p. 1297-1304.
- [BO85] Itzhack Y. BAR-ITZHACK et Yaakov OSHMAN. « Attitude Determination from Vector Observations : Quaternion Estimation ». In : *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Vol. AES-21 (1985), p. 128-136.
- [BPV07] Lorenzo BRIGNONE, Michel PERRIER et Christophe VIALA. « A Fully Autonomous Docking Strategy for Intervention Auvs ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 2007, p. 1-6.
- [CC04] Yang CHENG et John L. CRASSIDIS. « Particle Filtering for Sequential Spacecraft Attitude Estimation ». In : *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2004.
- [CH06] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13.4 (2006), p. 82-90.
- [CH07] François CHAUMETTE et Seth HUTCHINSON. « Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches ». In : *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.1 (2007), p. 109-118.
- [Cre14] Vincent CREUZE. « Robots Marins Et Sous-marins : Perception, Modélisation, Commande ». In : *Techniques de l'ingénieur Applications en robotique* base documentaire : TIB623DUO.ref. article : s7783 (2014).
- [DBV99] Edwin T. van DONKELAAR, Okko H. BOSGRA et Paul M.J. VAN DEN HOF. « Model Predictive Control With Generalized Input Parametrization ». In : *European Control Conference*. 1999, p. 1693-1698.
- [FEB16] Hassen FOURATI, Djamel EDDINE et Chouaib BELKHIAT. *Multisensor Attitude Estimation : Fundamental Concepts and Applications*. Boca Raton : CRC Press LLC, Florence : Taylor & Francis Group, 2016.
- [Fos02] Thor I. FOSSEN. *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetix AS, 2002. ISBN : 82-92356-00-2.
- [Fos11] Thor I. FOSSEN. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley et Sons Ltd, 2011.

- [GD10] Christopher GEYER et Kostas DANILIDIS. « Catadioptric Projective Geometry ». In : *Int. Journal on Computer Vision* 45.3 (2010), p. 223-243.
- [Gri+12] Håvard Fjær GRIP, Thor I. FOSSEN, Tor A. JOHANSEN et Ali SABERI. « Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements With Time-Varying Reference Vectors ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.5 (2012), p. 1332-1338.
- [Gro13] Paul GROVES. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 2013.
- [HCO17] Inhwan HWANG, Geonho CHA et Songhwai OH. « Multi-modal Human Action Recognition Using Deep Neural Networks Fusing Image and Inertial Sensor Data ». In : *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2017.
- [HHS17] Minh Duc HUA, Tarek HAMEL et Claude SAMSON. « Riccati Nonlinear Observer for Velocity-aided Attitude Estimation of Accelerated Vehicles Using Coupled Velocity Measurements ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2017, p. 2428-2433.
- [HM13] Xiaolei HOU et Robert MAHONY. « Dynamic Kinesthetic Boundary for Haptic Teleoperation of Aerial Robotic Vehicles ». In : *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013, p. 4549-4950.
- [Hua+19] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Feature-based Recursive Observer Design for Homography Estimation and Its Application to Image Stabilization ». In : *Asian Journal of Control* 21.4 (2019), p. 1443-1458.
- [Hua+20] Minh Duc HUA, Jochen TRUMPF, Tarek HAMEL, Robert MAHONY et Pascal MORIN. « Nonlinear Observer Design on  $SL(3)$  for Homography Estimation By Exploiting Point and Line Correspondences With Application to Image Stabilization ». In : *to be published in Automatica* (2020).
- [Hua09] Minh Duc HUA. « Contributions to the Automatic Control of Aerial Vehicles ». Thèse de doct. University of Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- [Hua10] Minh-Duc HUA. « Attitude Estimation for Accelerated Vehicles using GPS/INS Measurements ». In : *Control Engineering Practice* 18 (2010), p. 723-732.
- [HZ03] Richard HARTLEY et Andrew ZISSERMAN. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [IP09] Alexander INZARTSEV et Alexander PAVIN. *AUV Application for Inspection of Underwater Communications*. INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [IY20] Daisuke INOUE et Hiroaki YOSHIDA. « Model Predictive Control for Finite Input Systems Using the D-Wave Quantum Annealer ». In : *Quantum Machine Intelligence* 10.1591 (2020).
- [Jen11] Kenneth JENSEN. « Generalized Nonlinear Complementary Attitude Filter ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34.5 (2011), p. 1588-1592.
- [JU04] Simon J. JULIER et Jeffrey K. UHLMANN. « Unscented Filtering and Nonlinear Estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.
- [KA05] Thomas R. KANE et Levinson David A. *Dynamics : Theory and Applications*. McGraw-Hill, NY, 2005.

- [Kac49] Marck KAC. « On Distributions of Certain Wiener Functionals ». In : *Transactions of the American Mathematical Society* 65.1 (1949), p. 200-201.
- [Kap05] Hilbert J. KAPPEN. « Path Integrals and Symmetry Breaking for Optimal Control Theory ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 11 (2005), P11011.
- [Kru+17] Szymon KRUPÍNSKI, Guillaume ALLIBERT, Minh-Duc HUA et Tarek HAMEL. « An Inertial-Aided Homography-based Visual Servo Control Approach for (Almost) Fully-actuated Autonomous Underwater Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 33.5 (2017), p. 1041-1060.
- [Kru14] Szymon KRUPÍNSKI. « Offshore Structure Following By Means of Sensor Servoing and Sensor Fusion ». Thèse de doct. Laboratoire I3S, Université de Nice Sophia Antipolis, 2014.
- [LBH15] Yann LE CUN, Yoshua BENGIO et Geoffrey HINTON. « Deep learning ». In : *Nature* 521.7553 (2015), p. 436-444.
- [Leo97] Naomi Ehrich LEONARD. « Stability of a Bottom-Heavy Underwater Vehicle ». In : *Automatica* 33.3 (1997), p. 331-246.
- [LLT00] Jean-François LOTS, David LANE et Emmanuele TRUCCO. « Application of 2 1/2 D Visual Servoing to Underwater Vehicle Station-keeping ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. T. 2. 2000, p. 1257-1264.
- [Lot+01] Jean-François LOTS, David LANE, Emmanuele TRUCCO et François CHAUMETTE. « A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2001, p. 2767-2772.
- [Mah+09] Robert MAHONY, Tarek HAMEL, Jochen TRUMPF et Christian LAGEMAN. « Non-linear Attitude Observers on  $SO(3)$  for Complementary and Compatible Measurements : a Theoretical Study ». In : *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009, p. 6407-6412.
- [Mar03] Francis Landis MARKLEY. « Attitude Error Representations for Kalman Filtering ». In : *Journal of Guidance Control and Dynamics* 26 (2003), p. 311-317.
- [MCB99] Ezio MALIS, François CHAUMETTE et Sylvie BOUDET. « 2 1/2D Visual Servoing ». In : *IEEE Trans. on Robotics and Automation* 15.2 (1999), p. 238-250.
- [MD16] Michael MUEHLEBACH et Raffaello D'ANDREA. « Parametrized Infinite-horizon Model Predictive Control for Linear Time-Invariant Systems With Input and State Constraints ». In : *American Control Conference*. 2016, p. 2669-2674.
- [MH05] Robert MAHONY et Tarek HAMEL. « Image-based Visual Servo Control of Aerial Robotic Systems Using Linear Image Features ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 21.2 (2005), p. 227-239.
- [MHP08] Robert MAHONY, Tarek HAMEL et Jean Michel PFLIMLIN. « Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.5 (2008), p. 1203-1217.
- [MHP15] Lorenz MEIER, Dominik HONEGGER et Marc POLLEFEYS. « PX4 : a Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2015, p. 6235-6240.

- [MLS94] Richard M. MURRAY, Zexiang LI et S. Shankara SASTRY. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [MV07] Ezio MALIS et Manuel VARGAS. *Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-based Control*. INRIA Research report, RR-6303, 2007.
- [MV17] Matthias MÖLLER et Cornelis VUIK. « On the Impact of Quantum Computing Technology on Future Developments in High-performance Scientific Computing ». In : *Ethics and Information Technology* 19.4 (2017), p. 253-269.
- [MY95] Shigetaka MATSUMOTO et Ito YOSHIHIKO. « Real-Time Vision-Based Tracking of Submarine-cables for AUV/ROV ». In : *MTS/IEEE OCEANS*. 1995, p. 1997-2002.
- [MZ83] Manfred MORARI et Evangelos ZAFIRIOU. *Robust Control*. Paris, France : Dunod, 1983.
- [Ngu+20] Lam Hung NGUYEN, Minh Duc HUA, Guillaume ALLIBERT et Tarek HAMEL. « A Homography-based Dynamic Control Approach Applied to Station Keeping of Autonomous Underwater Vehicles Without Linear Velocity Measurements ». In : *To appear in IEEE Transactions on Control Systems Technology* (2020).
- [Pet+19] Christina PETSCHNIGG, Mathias BRANDSTÖTTER, Horst PICHLER, Michael HOFBAUR et Bernhard DIEBER. « Quantum Computation in Robotic Science and Applications ». In : *International Conference on Robotics and Automation*. 2019, p. 803-810.
- [PL01] Elena PANTELEY et Antonio LORÍA. « Growth Rate Conditions for Uniform Asymptotic Stability of Cascaded Time-varying Systems ». In : *Automatica* 37.3 (2001), p. 453-460.
- [Plü65] Julius PLÜCKER. « On a new geometry of space ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (1865), p. 725-791.
- [RB97] Patrick RIVES et Jean Jacques BORRELLY. « Underwater Pipe Inspection Task Using Visual Servoing Techniques ». In : *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1997, p. 63-68.
- [Rib+12] David RIBAS, Narcis PALOMERAS, Pere RIDAO, Marc CARRERAS et Angelos MALLIOS. « Girona 500 AUV : From Survey to Intervention ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 1.17 (2012), p. 46-53.
- [Sal91] Septimiu E. SALCUDEAN. « A Globally Convergent Angular Velocity Observer for Rigid Body Motion ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.12 (1991), p. 1493-1497.
- [SER91] Claude SAMSON, Bernard ESPIAU et Patrick RIVES. *Robot Control : the Task Function Approach*. Oxford University Press, 1991.
- [Ste94] Robert F. STENGEL. *Optimal Control and Estimation*. Dover, 1994. ISBN : 0-486-68200-5.
- [Sto51] George Gabriel STOKES. « On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums ». In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 99.8 (1851), p. 1-10.
- [Tan+17] Prateek TANDON, Stanley LAM, Ben SHIH, Tanay MEHTA, Alex MITEV et Zhiyang ONG. *Quantum Robotics : a Primer on Current Science and Future Perspectives*. Morgan & Claypool, 2017.

- [THS69] N. F. TODA, J. L. HEISS et F. H. SCHLEE. « SPARS : the System, Algorithm, and Test Results ». In : *Proceedings of the Symposium on Spacecraft Attitude Determination*. 1969, p. 361-370.
- [TRB11] Abdelhamid TAYEBI, Andrew ROBERTS et Abdelaziz BENALLEGUE. « Inertial Measurements Based Dynamic Attitude Estimation and Velocity-free Attitude Stabilization ». In : *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. 2011, p. 1027-1032.
- [WAT17] Grady WILLIAMS, Andrew ALDRICH et Evangelos A. THEODOROU. « Model Predictive Path Integral Control : From Theory to Parallel Computation ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40 (2017), p. 344-357.
- [WN18] Weiyue WANG et Ulrich NEUMANN. « Depth-aware CNN for RGB-D Segmentation ». In : *ECCV*. 2018.
- [WSN87] Leland WEISS, Arthur SANDERSON et Charles P. NEUMAN. « Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 3.5 (1987), p. 404-417.
- [ZBS02] Sjoerd van der ZWAAN, Alexandre BERNARDINO et José SANTOS-VICTOR. « Visual Station Keeping for Floating Robots In Unstructured Environments ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 39 (2002), p. 145-155.
- [Zha+20] Chaoqiang ZHAO, Qiyu SUN, Chongzhen ZHANG, Yang TANG et Feng QIAN. *Monocular depth estimation based on deep learning : An overview*. Sci. China Technology, 2020.