



HAL
open science

**Contributions à la commande de deux bras
manipulateurs d'un robot sous-marin pour la
manipulation à grande profondeur d'échantillons
biologiques déformables.**

François Leborne

► **To cite this version:**

François Leborne. Contributions à la commande de deux bras manipulateurs d'un robot sous-marin pour la manipulation à grande profondeur d'échantillons biologiques déformables.. Automatique / Robotique. Université de Montpellier, 2018. Français. NNT: . tel-01998909

HAL Id: tel-01998909

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/tel-01998909>

Submitted on 29 Jan 2019

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

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

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER**

En robotique

École doctorale : Information, Structures, Systèmes

Unité de recherche LIRMM

**Contributions à la commande de deux bras manipulateurs
d'un robot sous-marin pour la manipulation à grande
profondeur d'échantillons biologiques déformables**

Présentée par François LEBORNE

le 16 novembre 2018

Sous la direction de Vincent CREUZE, Lorenzo BRIGNONE et Ahmed CHEMORI

Devant le jury composé de

Kouider Nacer M'SIRDI	Professeur	Université d'Aix-Marseille	Président du jury
Vincent HUGEL	Professeur	Université de Toulon	Rapporteur
Benoît ZERR	Maître de conférences HDR	ENSTA Bretagne	Rapporteur
Philippe FRAISSE	Professeur	Université de Montpellier	Examineur
François PIERROT	Directeur de recherche	CNRS	Examineur
Vincent CREUZE	Maître de conférences HDR	Université de Montpellier	Directeur de thèse
Lorenzo BRIGNONE	Docteur	Ifremer, la Seyne-sur-mer	Co-encadrant
Ahmed CHEMORI	Chargé de recherche	CNRS	Co-encadrant
Olivier COMPANYY	Maître de conférences	Université de Montpellier	Invité
Jan OPDERBECKE	Docteur	Ifremer, la Seyne-sur-mer	Invité



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**



Table des matières

Table des figures	v
Liste des tableaux	ix
Remerciements	1
Notations	3
Introduction	5
1 Contexte général et problématique	9
1.1 Introduction	9
1.2 Moyens d'intervention profonds actuels	10
1.2.1 Les sous-marins habités	10
1.2.2 Les engins télé-opérés (ROV - Remotely Operated Vehicles)	15
1.2.3 Les engins d'intervention autonomes (I-AUV - Intervention Autonomous Underwater Vehicles)	20
1.2.4 Comparaison des différents moyens d'intervention sous-marins	22
1.3 Présentation générale du HROV <i>Ariane</i>	24
1.3.1 Spécifications générales d' <i>Ariane</i>	24
1.3.2 Présentation des bras manipulateurs	28
1.3.3 <i>Ariane</i> comme outil pour la recherche océanographique	29
1.4 Problématique de la thèse	31
1.5 Contributions de la thèse et organisation du manuscrit	31
1.6 Conclusion	32
2 État de l'art sur la manipulation sous-marine	35
2.1 Introduction	35
2.2 Principaux bras manipulateurs existants	36
2.2.1 Bras hydrauliques	36

2.2.2	Bras électriques	38
2.2.3	Bras à mesure d'efforts	39
2.2.4	Comparaison des différents types de bras	41
2.3	Manipulation sous-marine à deux bras	42
2.3.1	Modélisation des bras manipulateurs	43
2.3.2	Principales approches de commande des bras manipulateurs	45
2.3.3	Stratégies de commande coordonnée d'un système à deux bras	49
2.4	Préhenseurs pour la manipulation sous-marine	51
2.5	Conclusion	56
3	Contribution 1 : modélisation des bras du HROV Ariane	57
3.1	Introduction	58
3.2	Modélisation cinématique	59
3.2.1	Modélisation des actionneurs	59
3.2.2	Augmentation du modèle cinématique d'un bras série	62
3.3	Étalonnage expérimental des paramètres cinématiques	62
3.4	Modélisation dynamique	70
3.4.1	Modèle dynamique inverse	70
3.4.2	Détermination des paramètres de base du modèle dynamique	73
3.4.3	Modèle dynamique d'identification et trajectoire d'excitation	74
3.5	Estimation expérimentale des paramètres dynamiques	76
3.5.1	Expression du modèle dynamique pour l'identification	77
3.5.2	Calcul et suivi d'une trajectoire d'excitation de référence	78
3.5.3	Identification des paramètres dynamiques	79
3.5.4	Validation du modèle et de ses paramètres dynamiques	79
3.6	Conclusion	81
4	Contribution 2 : manipulation à deux bras à l'aide d'outils compliant	83
4.1	Introduction	84
4.2	Conception d'outils de préhension compliant	84
4.2.1	Conception de l'outil « englobant »	84
4.2.2	Conception de l'outil « piston »	87
4.3	Caractérisation du comportement de l'outil piston	90
4.4	Essais de l'outil piston sur le HROV Ariane	93
4.5	Manipulation à deux bras avec l'outil piston	98
4.6	Conclusion	101
5	Conclusion et perspectives	103
5.1	Conclusion	103
5.2	Perspectives	104

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	iii
A Étalonnage cinématique des paramètres des actionneurs du bras 7E d'Ariane	107
Bibliographie	113
Liste des publications	123



Table des figures

1.1	Première mise à l'eau du sous-marin habité <i>Archimède</i> (France, 1961).	11
1.2	L'évolution de l'engin habité <i>Alvin</i> , développé par la Woods Hole Oceanographic Institution (USA). (crédit : <i>Woods Hole Oceanographic Institution</i>)	12
1.3	Les sous-marins habités <i>Cyana</i> et <i>Nautille</i> d'Ifremer (France). (crédit : Ifremer) .	12
1.4	Le sous-marin habité <i>Shinkai 6500</i> de JAMSTEC (Japon, 1990). (crédit : Malcolm Clark, NIWA)	13
1.5	Les sous-marins habités <i>Jiaolong</i> et <i>Shenhai Yongshi</i> de l'Académie chinoise des sciences.	13
1.6	Le sous-marin <i>TRITON 3300/3 MKII</i> commercialisé par l'entreprise TRITON (USA, 2015). (crédit : TRITON Submarines LLC)	14
1.7	Les ROV <i>JASON</i> et <i>KAIKO</i> . Ils utilisent tous deux un lanceur instrumenté pour plonger.	16
1.8	Le ROV <i>Victor 6000</i> d'Ifremer (France, 2010). (crédit : Ifremer)	17
1.9	Le ROV <i>Crabster</i> du KIOST (Corée du Sud, 2013).	19
1.10	Le ROV <i>OceanOne</i> de l'université Stanford (USA, 2016).	20
1.11	Les I-AUV <i>SAUVIM</i> et <i>ALIVE</i>	21
1.12	L'I-AUV <i>Girona 500</i> de l'Université de Gérone (Espagne, 2015). (crédit : Université de Gérone)	22
1.13	Comparaison entre les différents types d'engins sous-marins présentés.	23
1.14	Le HROV <i>Ariane</i> d'Ifremer (France, 2015). (crédit : Ifremer)	25
1.15	Schéma du <i>Tether Management System</i> d' <i>Ariane</i>	26
1.16	Placement d' <i>Ariane</i> par rapport aux trois principaux types d'engins sous-marins.	27
1.17	Les deux bras d' <i>Ariane</i> : à gauche, les bras <i>7E</i> à six degrés de liberté, et à droite, le bras <i>5E</i> à quatre degrés de liberté. (crédit : ECA Group)	28
1.18	Le panier de prélèvement d' <i>Ariane</i> . (crédit : Ifremer)	29
1.19	Deux exemples de tâches de manipulation sous-marine exécutées par le robot télé-opéré <i>Victor 6000</i> . (crédit : Ifremer)	30
2.1	Bras manipulateurs sous-marins hydrauliques	37

2.2	Bras maître pour la commande manuelle	37
2.3	Bras manipulateurs sous-marins électriques	38
2.4	Bras manipulateurs sous-marins à mesure d'efforts	40
2.5	L'I-AUV <i>Aquanaut</i> de Houston Mechatronics	41
2.6	Comparaison des différents types de bras manipulateurs sous-marins.	42
2.7	Commande hybride force position	49
2.8	Préhenseur du projet AMADEUS	52
2.9	Préhenseur du projet TRIDENT	53
2.10	Préhenseur avec capteurs à effet Hall	54
2.11	Préhenseur développé pour <i>OceanOne</i>	54
2.12	Préhenseur souple	55
3.1	Schéma d'un actionneur linéaire	60
3.2	Montage expérimental pour l'identification du modèle cinématique	63
3.3	Exemple de trajectoire d'excitation cinématique	64
3.4	Numérotation des actionneurs sur le bras <i>5E</i> d' <i>Ariane</i>	66
3.5	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 1 du bras <i>5E</i>	67
3.6	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 2 du bras <i>5E</i>	68
3.7	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 3 du bras <i>5E</i>	69
3.8	Une trajectoire d'excitation pour le bras <i>5E</i> d' <i>Ariane</i> satisfaisant les contraintes du tableau 3.7	79
3.9	Estimation des courants d'alimentation des moteurs.	80
4.1	Support de l'outil englobant.	85
4.2	Outil englobant	85
4.3	Pression mesurée en fonction du temps lors du remplissage d'un récipient posé sur l'outil englobant.	86
4.4	Schéma des trois parties distinctes composant l'outil « piston ».	87
4.5	Mesure de pression dans l'outil	88
4.6	Partie compliant de l'outil	88
4.7	Embouts de l'outil	89
4.8	Caractérisation du comportement de l'outil.	90
4.9	Caractéristique longueur enfoncée / pression mesurée	91
4.10	Caractéristique force exercée / longueur de l'outil piston.	93
4.11	La saisie de l'outil dans la pince du bras <i>7E</i> d' <i>Ariane</i> et le repère attaché à l'outil pour les essais menés expérimentalement.	94
4.12	Installations expérimentales pour la réalisation des essais de régulation de la pression mesurée par l'outil.	95
4.13	Régulation de la pression dans l'outil.	97
4.14	Suivi d'une surface avec régulation de la pression mesurée dans l'outil.	97

4.15	Installation expérimentale des bras 7E (gauche) et 5E (droite) d'Ariane pour les tests de manipulation à deux bras.	99
4.16	Étapes de la saisie d'un objet pour la manipulation à deux bras.	100
4.17	Pression mesurée par l'outil comparée à la pression de consigne au cours de la manipulation à deux bras d'un objet rigide.	101
A.1	Numérotation des actionneurs sur le bras 7E d'Ariane.	107
A.2	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 1 du bras 7E	108
A.3	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 2 du bras 7E	109
A.4	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 3 du bras 7E	110
A.5	Estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 5 du bras 7E	111



Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des principaux engins habités en service.	14
1.2	Caractéristiques des principaux ROV non commerciaux en service.	18
2.1	Bras manipulateurs sous-marins hydrauliques	36
2.2	Bras manipulateurs sous-marins électriques	38
2.3	Bras manipulateurs sous-marins à mesure d'efforts	40
3.1	Notations utilisées dans ce chapitre	59
3.2	Résultats de l'optimisation des paramètres des actionneurs du bras <i>5E</i>	65
3.3	Erreur quadratique moyenne de l'optimisation des paramètres du bras <i>5E</i>	66
3.4	Caractéristiques des bras d' <i>Ariane</i>	76
3.5	Paramètres cinématiques du bras gauche d' <i>Ariane</i> à quatre degrés de liberté.	77
3.6	Paramètres cinématiques du bras droit d' <i>Ariane</i> à six degrés de liberté.	77
3.7	Contraintes utilisées pour le calcul d'une trajectoire d'excitation du bras <i>5E</i> d' <i>Ariane</i>	78
3.8	Erreur quadratique moyenne d'estimation des courants d'alimentation des mo- teurs lors du suivi de la trajectoire de validation.	81
4.1	Erreur quadratique moyenne de l'estimation de la pression en fonction de la longueur de tige enfoncée pour différents ordres de régression polynomiale.	91
4.2	Coefficients du polynôme approchant le mieux la caractéristique déplacement / pression de l'outil « piston ».	92
A.1	Résultats de l'optimisation des paramètres des actionneurs du bras <i>7E</i>	107
A.2	Erreur quadratique moyenne de l'optimisation des paramètres du bras <i>7E</i>	108



Remerciements

Au cours des trois années qu'a duré cette thèse, j'ai eu la chance de croiser le chemin de personnes extraordinaires dont je suis sûr que le souvenir et les enseignements m'accompagneront pendant de longues années. Avec elles, j'ai appris, je me suis émerveillé, je me suis épanoui, je me suis diverti. J'aimerais, grâce aux quelques lignes qui suivent, remercier du mieux que je le peux celles et ceux sans qui je n'aurais pas autant apprécié les trois dernières années ; et celles et ceux qui m'accompagnent depuis bien plus longtemps, et qui étaient là lors de toutes les étapes qui m'ont amené à la rédaction du présent manuscrit.

Mes remerciements les plus sincères vont tout d'abord à mon directeur de thèse, Vincent Creuze, qui a su me montrer jusqu'où il est possible de s'investir dans une passion, et qui en ce sens restera pour moi un exemple à suivre. Je remercie aussi sincèrement Lorenzo Brignone, qui m'a accompagné, encadré et inspiré depuis mon arrivée à l'Ifremer. J'aimerais dire ici la chance que j'ai eue d'être épaulé par Vincent Creuze et Lorenzo Brignone, non seulement d'un point de vue scientifique mais aussi humain ; et leur exprimer ma gratitude pour les heures passées à discuter des sujets, divers, qui nous réunissent. Je suis sûr que sans ces innombrables moments, je n'aurais pas eu le même plaisir à m'investir dans ce travail. Je souhaite aussi remercier Ahmed Chemori, pour ses conseils et l'aide qu'il m'a apportée aux moments cruciaux de ma thèse.

Pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse, ainsi que pour leurs rapports que j'ai beaucoup appréciés et qui m'ont permis d'améliorer significativement la présentation de mon travail, je veux remercier Benoît Zerr et Vincent Hugel. Merci aussi à tous les membres du jury, pour leur présence, leur attention, et leurs questions et remarques : Kouider Nacer M'Sirdi, Philippe Fraisse, François Pierrot, Olivier Company, et Jan Opderbecke.

J'ai eu la chance d'être admirablement bien accueilli par trois équipes différentes pendant ma thèse, et j'aimerais en remercier les membres ici. Par ordre plus ou moins exact d'apparition dans ma vie, un immense merci à Maxence, David, Momo, Moussab et Joao du LIRMM, qui m'ont aidé à faire mes premiers pas dans ma vie de doctorant.

Pour leur chaleureux accueil dans leur magnifique région, merci à Jennifer, Charlélie,

Marie, Virginie, Annaïck, Justin, Lucie, et Jibril de l'Ifremer. Toujours à l'Ifremer, merci à Jan, Michel, Romain, Aurélien, Sébastien et Ewen, pour leur immense confiance et les incroyables opportunités qu'ils m'ont offertes ; et merci infiniment à Emilie pour son soutien logistique sans faille. Merci aussi à Patrice, David, et Romain, de Genavir, d'avoir pris en compte mon travail et ses applications sur un engin opérationnel.

En revenant au LIRMM pour rédiger mon manuscrit, j'ai eu le plaisir de faire la connaissance de JR, Vinayak, Laure et Julie, qui ont chacun à leur manière su m'apporter un peu de joie. Merci à vous pour votre agréable compagnie. J'ai aussi eu l'occasion de rencontrer les membres de l'équipe ICAR, qui m'ont très bien accueilli. Parmi eux, merci à Lionel d'avoir été un excellent camarade pour ces longs mois de rédaction, et pour avoir partagé avec moi son immense culture cinématographique... Merci aussi, dans le désordre, à JD, Quentin, Ahmad, Pauline, Flo, Vincent, Alexandre, Sébastien, Marion, Sylvère, Mehdi, Younès, et à tous les permanents pour la bonne humeur qui règne dans l'épi !

Il me semble indispensable de remercier ici les équipes administratives, aussi bien du Labex NUMEV que d'Ifremer, qui ont contribué au bon déroulement de ma thèse. Je souhaite aussi remercier les équipages de l'Europe et de l'André Malraux, qui ont contribué à mon travail en fournissant un cadre technique de grande qualité à mes essais expérimentaux. Merci aussi aux archéologues du DRASSM, notamment Souen et Denis, pour avoir partagé leur passion avec moi et donné du sens à mon travail.

Parce que la navigation tient une place importante dans ma vie, et que sans elle j'aurais eu bien plus de mal à me changer les idées quand il l'a fallu, merci à mes amis voileux. Merci à Etienne, qui m'a transmis bien plus que son savoir maritime. Merci à Guillaume et à tout l'équipage des Copains d'abord, qui m'ont accueilli pour partager cette autre passion.

Ils le savent sans doute, les mots ne suffisent pas à retranscrire tout ce qu'ils m'ont apporté. Mais en écrivant ces lignes, j'ai bien sûr une pensée toute particulière pour Nico et Quentin. Merci infiniment à vous deux, pour tout.

Paul, Perrine, Papa, Maman. Je ne sais pas dire, et encore moins écrire, à quel point vous avez été importants pour m'aider, depuis que l'on se connaît, à cheminer jusqu'à cet ultime diplôme. Vous m'avez toujours soutenu dans mes choix, vous avez toujours cru en moi, et vous m'avez permis de croire en moi-même. L'éducation que vous m'avez donnée, l'exemple que vous êtes, les valeurs que vous m'avez transmises, sont presque à eux seuls responsables du succès de mon parcours. Pour tout cela, je vous remercie du fond du cœur.

Enfin, merci infiniment à Jùn. Merci à toi d'avoir été mon rayon de soleil quand même le soleil du midi ne suffisait plus ; merci pour tous les bons moments passés, et pour tous ceux à venir.

François



Notations

Nous notons en minuscules a les scalaires, en minuscules grasses \mathbf{a} les vecteurs, et en majuscules grasses \mathbf{A} les matrices. La seule exception à cette règle est la notation du vecteur de la pose \mathbf{X} de l'organe terminal d'un bras pour être en accord avec ce que l'on trouve le plus fréquemment dans la littérature.

Opérations usuelles

\dot{f}	dérivée temporelle de la fonction f
\ddot{f}	dérivée temporelle seconde de la fonction f
\mathbf{A}^\top	transposée de la matrice \mathbf{A}
\mathbf{A}^{-1}	inverse de la matrice \mathbf{A}
\mathbf{A}^+	pseudo-inverse de Moore-Penrose de la matrice \mathbf{A}

État d'un bras

$n \in \mathbb{N}$	nombre de degrés de liberté
$\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$	vecteur des coordonnées articulaires d'un bras
$\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$	vecteur des couples articulaires
$\mathbf{X} \in \mathbb{R}^6$	vecteur de la position cartésienne de l'organe terminal

Description d'une tâche de manipulation

$m \in \mathbb{N}$	nombre de degrés de liberté de la tâche
--------------------	---

Modèle d'un bras

$\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$	matrice jacobienne
--	--------------------

$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$	matrice d'inertie
$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$	matrice des forces de Coriolis et des forces d'inertie d'entraînement
$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n$	vecteur des forces de frottement
$\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$	vecteur des forces de gravité et de flottabilité
$\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n$	vecteur des forces de forces et moments de contact avec l'environnement

Identification du modèle dynamique

$p \in \mathbb{N}$	nombre de paramètres à estimer
$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p$	vecteur des paramètres à estimer
$\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{N \cdot p}$	vecteur des courants électriques
$\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{p \times p}$	régresseur
$\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{N \cdot p \times p}$	matrice d'observation

Modèle des actionneurs d'un bras

$\ell_1, \ell_2 \in \mathbb{R}$	longueur des premier et second entraxes
$q_j \in \mathbb{R}$	coordonnée articulaire interne à l'actionneur
$q_m \in \mathbb{R}$	coordonnée relative au nombre d'incrémentes moteurs
$q_p \in \mathbb{R}$	longueur totale de l'actionneur linéaire



Introduction

L'intervention sous-marine à grande profondeur est un des grands enjeux scientifiques, politiques, et industriels de notre siècle. Du point de vue scientifique, on sait par exemple que l'océan joue un rôle majeur dans l'évolution du climat, mais ce rôle est encore peu compris. L'exploration de certaines zones très mal connues à ce jour, comme l'océan Arctique et notamment sous sa banquise, pourrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes du changement climatique auquel nous devons faire face aujourd'hui. Plus généralement, malgré le peu de connaissances que l'on a sur le fond des océans – on connaît en effet beaucoup moins bien les abysses que la surface de la Lune et de Mars – nous savons qu'une meilleure connaissance de ces milieux serait d'un grand intérêt scientifique. Du point de vue politique, être en mesure d'intervenir partout sur leur territoire, y compris maritime, est une fierté mais aussi une vitrine de l'avancement technologique des grandes puissances. C'est aussi, bien entendu, un enjeu pour la défense. Enfin, du point de vue industriel, l'exploitation des matières premières présentes dans le plancher océanique est une piste privilégiée pour pallier la raréfaction des ressources terrestres. Le développement d'engins d'intervention sous-marins munis de capacités de manipulation est donc une nécessité : d'une part pour permettre l'exploration des zones d'intérêt, et d'autre part, en assurant la multiplicité des moyens d'intervention et la diversité de leurs exploitants, pour permettre une exploitation raisonnée des ressources sous-marines.

Ce travail de thèse est motivé par le besoin d'augmenter les capacités de manipulation sous-marine des engins existants, afin de répondre aux attentes des différents acteurs de l'exploration sous-marine. À ce jour, les opérateurs de ces engins s'appuient sur des données incomplètes et imprécises pour piloter à distance les bras robotiques permettant d'intervenir à grande profondeur. Cela est notamment dû aux moyens actuels de restitution bidimensionnelle des données vidéos, qui ne permettent pas aux opérateurs de se projeter correctement dans la scène tridimensionnelle où se tient l'engin. De plus, les moyens de pilotage des engins et des bras limitent eux aussi la complexité des actions réalisables.

Pour pallier ces problèmes, la solution retenue pour ce travail de thèse est l'automatisation, du moins partielle, de certaines tâches de manipulation. Pour cela, nous proposons

tout d'abord une méthode de modélisation des bras manipulateurs électriques que l'on trouve sur plusieurs sous-marins d'intervention utilisés de nos jours. Cette méthode nous permet d'améliorer la connaissance de l'état des bras, pour mieux les commander lors de la manipulation d'objets. Nous présentons ensuite de nouveaux outils permettant de manipuler des objets fragiles sans les abimer, et nous explorons la mise en œuvre de ces outils dans un contexte opérationnel. Tous les développements proposés sont testés sur les bras du sous-marin télé-opéré *Ariane* d'Ifremer.

Les deux contributions proposées, les résultats obtenus et leur interprétation sont présentés en détails dans la suite de ce manuscrit, qui s'organise comme suit. Les engins d'intervention profonds existant de nos jours, leurs spécificités et leurs limitations sont présentés dans le premier chapitre. Ce chapitre introduit aussi le HROV *Ariane*, engin hybride développé par Ifremer, qui est le support de validation expérimentale de tous les développements présentés ici.

Un état de l'art relatif à la manipulation sous-marine autonome est dressé dans le deuxième chapitre. Il couvre la modélisation, la commande et les spécificités des principaux bras manipulateurs sous-marins électriques, les principales approches de manipulation à deux bras, et les principaux préhenseurs adaptés à la manipulation d'objets fragiles par des engins sous-marins.

Cette thèse se divise en deux contributions dont les objectifs communs sont d'une part l'augmentation des capacités de manipulation sous-marine des engins sous-marins existants, et d'autre part d'avancer vers la réalisation de tâches de manipulation en autonomie, c'est-à-dire sans intervention du pilote. Pour cela, nous proposons tout d'abord une méthode permettant de modéliser, des points de vue cinématique et dynamique, le type de bras électrique utilisé par plusieurs engins sous-marins d'intervention récents. Cette catégorie de bras a la particularité d'être composée d'articulations pivots actionnées par des vérins électriques, ce qui nécessite d'adapter les modèles utilisés communément pour les bras électriques terrestres. La validité des modèles ainsi exprimés est vérifiée en les identifiant sur les bras du HROV *Ariane* d'Ifremer.

La seconde contribution de cette thèse porte sur l'estimation des efforts d'interaction entre les bras et leur environnement. La plupart des bras sous-marins sont en effet dépourvus de capteurs d'efforts, ce qui pose problème pour automatiser certaines tâches de manipulation pour lesquelles la limitation des efforts d'interaction est nécessaire à la préservation de l'intégrité physique des échantillons prélevés. Deux versions d'un outil adapté à la manipulation d'objets fragiles sont donc présentées, et le fonctionnement de ces outils est validé sur des tâches de manipulation à deux bras réalisées à l'aide du HROV *Ariane*.

En conclusion, nous discutons l'apport de ces deux contributions pour la manipulation sous-marine, aussi bien en termes de télé-opération que de manipulation autonome. Les limites des deux contributions proposées sont aussi détaillées, et plusieurs moyens d'amé-

liorer les résultats obtenus sont donnés. De plus, nous évoquons des pistes de développements futurs qui pourront être réalisés pour rendre plus robustes les solutions proposées dans cette thèse. Enfin, nous montrons comment il est possible de continuer à avancer vers la réalisation de tâches de manipulation sous-marine d'échantillons fragiles en totale autonomie.

1

Contexte général et problématique

Sommaire

1.1	Introduction	9
1.2	Moyens d'intervention profonds actuels	10
1.3	Présentation générale du HROV <i>Ariane</i>	24
1.4	Problématique de la thèse	31
1.5	Contributions de la thèse et organisation du manuscrit	31
1.6	Conclusion	32

1.1 Introduction

Ce chapitre présente le contexte technologique et scientifique dans lequel s'inscrit ce travail de thèse. Nous présentons tout d'abord les différents engins sous-marins disponibles à ce jour pour intervenir à grande profondeur, classés suivant leur type : engin habité, engin télé-opéré, et engin autonome. Cette présentation nous permet aussi d'évoquer les avancées technologiques qui ont mené à l'état actuel de la flotte d'engins sous-marins utilisés de nos jours. Dans un second temps, nous décrivons les caractéristiques techniques ainsi que les missions scientifiques du HROV *Ariane* d'Ifremer, la cible principale des développements réalisés dans cette thèse. Enfin, nous décrivons les objectifs que nous nous fixons pour ce travail, les contributions proposées pour y parvenir, et l'organisation globale du présent manuscrit.

1.2 Moyens d'intervention profonds actuels

Explorer, étudier et exploiter les océans sont des tâches pour lesquelles l'interaction physique avec le monde sous-marin est indispensable. Que ce soit pour prélever des sédiments ou des espèces vivantes, récupérer des artefacts archéologiques, poser des câbles de communication, ou encore construire puis entretenir des structures en haute mer, il faut pouvoir manipuler des objets de toutes tailles à de grandes profondeurs. Or, au-delà de quelques dizaines de mètres de profondeur, il n'est plus possible de faire intervenir des plongeurs, car la pression et les risques deviennent trop importants. Ainsi, depuis les années 1970, des engins sous-marins équipés de bras manipulateurs robotisés sont développés et utilisés par des chercheurs et des industriels pour mener à bien toutes sortes de tâches de manipulation sous-marine. Ces UVMS¹ se classent principalement en trois catégories : les engins habités, les engins télé-opérés et les engins autonomes.

1.2.1 Les sous-marins habités

Les premiers engins sous-marins développés étaient des engins habités. À l'origine, ils se résument à une coque résistante à la pression pour abriter les passagers, munie de propulseurs et de bras rudimentaires pour interagir avec l'environnement. Mis à l'eau en 1961 et prévu pour plonger à une profondeur de 11 000 mètres, le bathyscaphe *Archimède* (figure 1.1) de la Marine Nationale française et du CNEXO² est l'un des premiers engins de ce type. Il mesurait 22 mètres de long pour une largeur de 5 mètres, une hauteur de 9 mètres et un poids total de 200 tonnes. Une des principales limitations de ces engins était leur taille importante et leur manque de manœuvrabilité : efficaces sur des terrains plats, ils étaient incapables d'opérer à des endroits pentus et accidentés. De plus, leur outillage primitif limitait les interactions possibles avec l'environnement.

Le développement d'engins sous-marins s'est ensuite concentré sur des engins de plus petite taille et à la maniabilité accrue. L'*Alvin* (figure 1.2), développé par la *Woods Hole Oceanographic Institution* et mis en service en 1964, et la *Cyana* (figure 1.3(a)), développée par Ifremer et mise en service en 1969, sont les premiers engins de ce type. Lors de sa mise à l'eau, l'*Alvin* pouvait atteindre 4 500 mètres de profondeur, disposait d'une autonomie de dix heures et mesurait 7 mètres de long, 2,6 mètres de large et 3,7 mètres de haut pour un poids de 20 tonnes. Quant à la *Cyana*, elle pouvait atteindre 3 000 mètres de profondeur avec la même autonomie. Mesurant 5,7 mètres de long, 3,2 mètres de large et 2,7 mètres de haut pour un poids de 9 tonnes, elle disposait aussi d'un bras manipulateur à cinq degrés de liberté. Ces deux engins ont effectué de nombreuses missions, y compris la campagne FAMOUS en 1974 [Bellaïche *et al.*, 1974] pendant laquelle ils ont plongé en-

1. *Underwater Vehicle Manipulator Systems*

2. Centre National pour l'Exploitation des Océans. Il a fusionné le 5 juin 1984 avec l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes pour créer Ifremer.



Figure 1.1 – Première mise à l'eau du sous-marin habité *Archimède* (France, 1961).

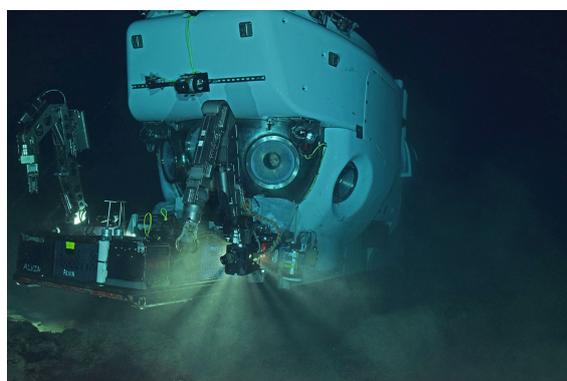
semble et avec l'*Archimède* pour explorer une partie de la dorsale médio-atlantique. Cette mission a permis à des êtres humains de plonger pour la première fois sur ce type d'environnement pour y effectuer des prélèvements de sédiments et étudier ce milieu. Alors que la *Cyana* a été remplacée par le *Nautilus* puis désarmée en 2003, l'*Alvin* a été entièrement rénové en 2013. La plupart de ses équipements sont désormais certifiés pour plonger jusqu'à 6 500 mètres de profondeur et il est aujourd'hui équipé de deux bras manipulateurs hydrauliques : sur tribord, un bras *ISE* et sur bâbord, un bras *Schilling Titan 4*, tous les deux à six degrés de liberté.

Mis à l'eau en 1984, le *Nautilus* (figure 1.3(b)) a été conçu et fabriqué par Ifremer et est toujours en service en 2018. Il peut embarquer deux pilotes et un scientifique à une profondeur allant jusqu'à 6 000 mètres et bénéficie d'une autonomie maximale de 120 heures, bien que ses missions dépassent rarement huit heures. Une des particularités du *Nautilus* est la possibilité de remplacer son panier de prélèvement par un petit ROV, *Robin*, dont le rôle est d'explorer des zones autrement inaccessibles. *Robin* a par exemple été utilisé à partir de 1987 pour explorer l'épave du *Titanic*. Le *Nautilus* dispose aussi de deux bras hydrauliques à respectivement quatre et six degrés de liberté. Ces bras lui permettent d'utiliser différents outils, notamment des carottiers et un aspirateur à faune.

En 1990, la *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (JAMSTEC) met à l'eau le sous-marin *Shinkai 6500* [Iwai *et al.*, 1990], qui permet à deux pilotes et un scienti-



(a) L'Alvin en 1965.



(b) L'Alvin en 2016

Figure 1.2 – L'évolution de l'engin habité *Alvin*, développé par la Woods Hole Oceanographic Institution (USA). (crédit : *Woods Hole Oceanographic Institution*)

(a) La *Cyana* (3 000 m, 1969)(b) Le *Nautilus* (6 000 m, 1984)

Figure 1.3 – Les sous-marins habités *Cyana* et *Nautilus* d'Ifremer (France). (crédit : Ifremer)

fique de plonger pendant 8 heures jusqu'à une profondeur de 6 500 mètres. Avec deux bras manipulateurs hydrauliques, à cinq et sept degrés de liberté respectivement, il peut manipuler des objets pesant jusqu'à 100 kilogrammes. Le *Shinkai 6500* est notamment utilisé pour collecter des sédiments et des roches afin d'étudier l'évolution du climat, les courants de marée et les dorsales océaniques où les plaques tectoniques se rencontrent.

Beaucoup plus récemment, l'Académie chinoise des sciences a construit le sous-marin *Shenhai Yongshi* (figure 1.5(b)) dont la profondeur maximale est de 4 500 mètres. Sa première plongée, pour une mission archéologique, est prévue pour 2018. Le *Shenhai Yongshi* s'ajoute à *Jiaolong* (figure 1.5(a)), un autre engin sous-marin développé par l'Académie

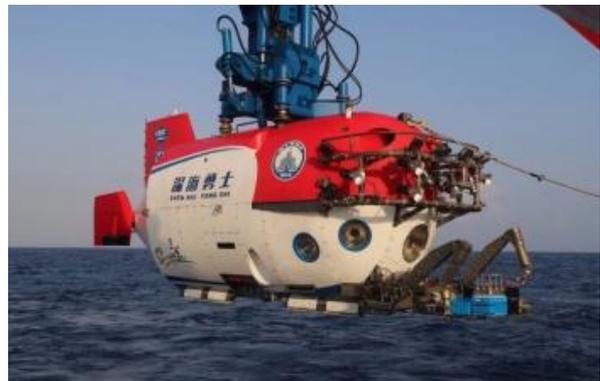


Figure 1.4 – Le sous-marin habité *Shinkai 6500* de JAMSTEC (Japon, 1990). (crédit : Malcolm Clark, NIWA)

chinoise des sciences mis à l'eau en 2010 et toujours en service. Ce dernier a notamment atteint la profondeur de 7 062 mètres le 27 juin 2012.



(a) *Jiaolong* (plus de 7 000 m, 2010)



(b) *Shenhai Yongshi* (4 500 m, 2018). (crédit : DR, le Marin)

Figure 1.5 – Les sous-marins habités *Jiaolong* et *Shenhai Yongshi* de l'Académie chinoise des sciences.

Les caractéristiques des principaux engins sous-marins habités en service à ce jour sont récapitulées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Caractéristiques des principaux engins habités en service.

	<i>Alvin</i>	<i>Nautile</i>	<i>Shinkai</i>	<i>Jiaolong</i>
Propriétaire	WHOI	Ifremer	JAMSTEC	CAS
Mise à l'eau	1964	1984	1990	2010
Prof. max. (m)	4 500	6 000	6 500	7 062
Taille L x l x h (m)	7 x 2,6 x 3,7	9 x 2,7 x 3,8	9,7 x 2,8 x 4,1	8 x 3 x 3,4
Poids (t)	20	19,5	26,7	22

Figure 1.6 – Le sous-marin *TRITON 3300/3 MKII* commercialisé par l'entreprise TRITON (USA, 2015). (crédit : TRITON Submarines LLC)

Outre ces sous-marins scientifiques développés sur fonds publics, il existe des modèles commerciaux destinés aux activités privées (loisir, télévision, cinéma, recherche privée). On peut notamment citer l'entreprise TRITON (figure 1.6) qui produit plusieurs modèles de petits sous-marins, pouvant embarquer un à trois passagers et prévus pour être mis à l'eau principalement depuis des yachts de luxe. La plupart de ces engins sont conçus pour plonger entre 300 et 1 000 mètres de profondeur en embarquant trois personnes, mais certains modèles peuvent atteindre 11 000 mètres de profondeur (*TRITON 36000/3*), tandis que d'autres peuvent embarquer jusqu'à sept personnes (*TRITON 1000/7*). Certains de ces sous-marins sont équipés d'un, voire deux bras manipulateurs. Par défaut, les bras fournis

possèdent cinq degrés de liberté et sont commandés en boucle ouverte. Mais afin d'offrir plus de possibilités de manipulation, en particulier dans des contextes d'archéologie ou de recherche océanographique, TRITON propose aussi un bras à six degrés de liberté, commandé en position et muni d'une pince matelassée pour la saisie d'objets fragiles.

1.2.2 Les engins télé-opérés (ROV - Remotely Operated Vehicles)

En raison des coûts élevés de mise en œuvre des engins habités, mais aussi pour limiter les risques de perte de vies humaines et pour s'affranchir des limites imposées par l'autonomie des engins et l'endurance de leurs équipages, une nouvelle génération d'engins non habités, les ROV³, apparaît à partir de la fin des années 1980. Ces engins sont opérés depuis un navire auquel ils sont reliés par un câble qui permet à la fois le transfert de l'énergie électrique alimentant le ROV, des commandes de pilotage, des flux vidéos capturés par les caméras embarquées et des diverses données mesurées par les appareils scientifiques équipant le robot.

Engins développés par des instituts de recherche

À ce jour, les principaux ROV non commerciaux en activité sont détenus par les États-Unis (*JASON* de la WHOI, figure 1.7(a)), le Japon (*KAIKO* de JAMSTEC, figure 1.7(b)) et la France (*Victor 6000* d'Ifremer, figure 1.8). Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.2.

Le développement du ROV *JASON* [Ballard *et al.*, 1991] a commencé dans les années 1980 à la *Woods Hole Oceanographic Institution* dans le but d'offrir aux scientifiques une présence virtuelle au fond des océans. En effet, avec un ROV, tout l'équipage présent à bord du navire assiste à la mission quand seulement un ou deux scientifiques avaient ce privilège dans un sous-marin habité. *JASON* mesure 3,4 mètres de long, 1,8 mètre de large et 2,1 mètres de haut pour un poids total de 4 tonnes en air et une flottabilité neutre dans l'eau. Il possède un bras *Titan 4* et un bras *Predator II*, tous deux à six degrés de liberté. *JASON* est relié à un navire par l'intermédiaire d'un autre engin, *MEDEA*, qui sert de support lors de la mise à l'eau, de la plongée et la remontée ; et qui embarque des instruments de mesure de données environnementales.

Les États-Unis disposent aussi des ROV *Ventana* et *Doc Ricketts*, développés et opérés par le MBARI (*Monterey Bay Aquarium Research Institute*). Pouvant plonger à 4 000 mètres de profondeur, *Doc Ricketts* mesure 3,7 mètres de long, 1,8 mètre de large et 2,1 mètres de haut pour un poids de 4,8 tonnes. Il possède un bras Schilling *Titan 4* à six degrés de liberté et au poignet équipé d'une caméra, ainsi qu'un bras Kraft *Predator* à six degrés de liberté et retour d'efforts. De son côté, le ROV *Ventana* mesure 3 mètres de long, 1,7 mètre de large et 2,2 mètres de haut pour un poids de 2,8 tonnes. Il peut plonger à une profondeur de

3. Remotely Operated Vehicle

(a) *JASON* de la WHOI (USA, 2015). (crédit : WHOI)(b) *KAIKO Mk-IV* de JAMSTEC (Japon, 2013). (crédit : JAMSTEC)

Figure 1.7 – Les ROV *JASON* et *KAIKO*. Ils utilisent tous deux un lanceur instrumenté pour plonger.

1 800 mètres et possède deux bras Schilling : un *Titan 4* et un *Atlas*, tous deux à six degrés de liberté.

Afin d'épauler son sous-marin habité *Shinkai 6500*, la JAMSTEC a mis à l'eau en 1993 le ROV *KAIKO* (figure 1.7(b)). Comme *JASON*, ce dernier dispose d'un lanceur instrumenté utilisé pour la mise à l'eau, la descente, la récupération et la remontée de l'engin. *KAIKO* se déplace donc librement seulement à partir d'une centaine de mètres d'altitude, soit pour effectuer sa propre mission, soit pour reconnaître une zone sur laquelle le *Shinkai 6500* plongera par la suite. Avant d'être accidentellement perdu en 2003, *KAIKO* a atteint le 24 mars 1995 le point le plus profond de la fosse des Mariannes, *Challenger Deep*, où il a mesuré la profondeur de 10 911,4 mètres. Suite à la perte de ce véhicule, plusieurs nouvelles versions ayant des caractéristiques très proches ont été développées par la JAMSTEC, dont la plus récente, *KAIKO Mk-IV* [Nakajoh *et al.*, 2016] est en service à ce jour. Cette version possède deux bras manipulateurs Schilling *ATLAS* à sept degrés de liberté et mesure 3 mètres de long, 2 mètres de large et 2,6 mètres de haut pour un poids total de 5,5 tonnes en air et 10 kilogrammes en eau.

En France, le ROV *Victor 6000* [Nokin, 1998] a été mis à l'eau en 1997 par Ifremer. Il mesure 3,1 mètres de long, 1,8 mètre de large et 2,1 mètres de haut pour un poids en air de 4,6 tonnes. Contrairement à *JASON* et *KAIKO* qui sont tractés par leur lest, *Victor 6000* utilise ses propulseurs pour plonger et faire surface. Cependant, *Victor* utilise aussi un lest dé-



Figure 1.8 – Le ROV *Victor 6000* d'Ifremer (France, 2010). (crédit : Ifremer)

presseur pour découpler ses mouvements de ceux du navire. Ce lest permet également de compenser les effets des courants marins sur le câble dans la colonne d'eau. Ceci permet à l'engin de se déplacer plus librement et de ne pas être perturbé par les mouvements du navire. Les bras de *Victor 6000* possèdent respectivement six et quatre degrés de liberté. Ils lui ont notamment permis d'intervenir sur le télescope sous-marin *ANTARES* [Leon *et al.*, 2011] déployé en Méditerranée, en participant à son installation, son entretien et son évolution.

Au Royaume-Uni, le *National Oceanography Center* a développé et opère à ce jour le ROV *ISIS*, dans le cadre de ses activités de recherche océanographiques. *ISIS* mesure 2,7 mètres de long, 1,5 mètre de large et 2 mètres de haut pour un poids de 3,4 tonnes, et il peut atteindre la profondeur maximale de 6 500 mètres. Il est équipé de deux bras *Kraft Predator II* hydrauliques à six degrés de liberté avec retour d'efforts. En 2007, *ISIS* a plongé en Antarctique pour prélever des échantillons biologiques et géologiques, et avait à l'époque battu un record de profondeur en Antarctique.

Enfin, l'Allemagne possède deux ROV industriels reconvertis pour la recherche océanographique. Opéré par l'institut Marum de l'Université de Brême, *QUEST*, qui peut atteindre 4 000 mètres de profondeur, pèse 3,5 tonnes et mesure 3,3 mètres de long, 2,3 mètres de large et 1,9 mètre de haut. Le second ROV, *KIEL*, est opéré par le centre de recherche océanique GEOMAR et peut plonger à 6 000 mètres. Il mesure 3,5 mètres de long, 1,9 mètre de large et 2,4 mètres de haut, pour un poids de 3,5 tonnes. Les ROV *QUEST* et *KIEL* pos-

sèdent tous deux deux bras Schilling, un *Orion 7PE* à six degrés de liberté et un *Rigmaster* à quatre degrés de liberté.

Tableau 1.2 – Caractéristiques des principaux ROV non commerciaux en service.

	<i>JASON</i>	<i>KAIKO Mk-IV</i>	<i>Victor 6000</i>
Propriétaire	WHOI	JAMSTEC	Ifremer
Mise à l'eau	1988	1993	1997
Prof. max. (m)	6 500	10 911	6 000
Taille L x l x h (m)	3,4 x 1,8 x 2,1	3 x 2 x 2,6	3,1 x 1,8 x 2,1
Poids (t)	4	5,5	4,6

Engins commercialisés par des entreprises privées

Outre ces ROV conçus par des instituts publics, il existe des ROV commerciaux développés et construits par des entreprises privées. C'est le cas du ROV *TROJAN* [Liddle, 1986] de Slingsby Engineering Limited, dont les premiers essais ont eu lieu en 1984. Ce ROV mesure 2,2 mètres de long, 1,6 mètre de large et 1,6 mètre de haut pour un poids de 1,8 tonne et peut atteindre la profondeur de 1 000 mètres.

La société FMC Technologies commercialise deux ROV principalement pensés pour l'industrie pétrolière⁴. Le modèle *HD* peut atteindre 4 000 mètres de profondeur, mesure 2,9 mètres de long, 1,7 mètre de large et 1,9 mètre de haut et pèse 3,7 tonnes. Sa charge utile est de 250 newtons et peut entre autres se composer de n'importe quel modèle de bras manipulateur Schilling. Le second modèle, *UHD-III*, peut plonger jusqu'à 4 000 mètres de profondeur et mesure 3,5 mètres de long, 1,9 mètre de large et 2,1 mètres de haut, pour un poids de 5,5 tonnes. Il peut aussi embarquer n'importe quel modèle de bras Schilling et sa charge utile atteint 450 newtons.

Quant aux sociétés Oceaneering, Saab Seaeye, sub-Atlantic, ECA Hytec et tmt, elles commercialisent une gamme de ROV complète, allant des ROV d'inspection portables aux ROV lourds destinés aux travaux sous-marins.

D'autres engins exploitant des technologies innovantes

Enfin, il existe d'autres ROV, issus de la recherche, qui diffèrent sensiblement des trois ROV présentés au début de cette section. Développé en Corée du Sud par le KIOST⁵, le

4. Les ROV de FMC Technologies respectent l'*API Standard 53* de l'American Petroleum Institute.

5. Korean Institute of Ocean Science and Technology

ROV *Crabster* (figure 1.9(a)) est prévu pour marcher sur le fond de l'océan plutôt que pour flotter, à la manière d'un crabe [Park *et al.*, 2015]. Cela lui permet d'affronter les forts courants caractéristiques des mers coréennes, jusqu'à une profondeur de 200 mètres. Il pèse 500 kilogrammes en air et 350 kilogrammes en eau et mesure 2,42 mètres de long, 2,45 mètres de large et 1,16 mètres de haut. Pour marcher au fond de l'océan, ce ROV possède six jambes dont deux sont convertibles en bras manipulateurs. Ce mécanisme est présenté dans [Kang *et al.*, 2013] et illustré par la figure 1.9(b).



(a) *Crabster* équipé de ses six jambes. Les deux jambes avant se transforment en bras. (crédit : KIOST)

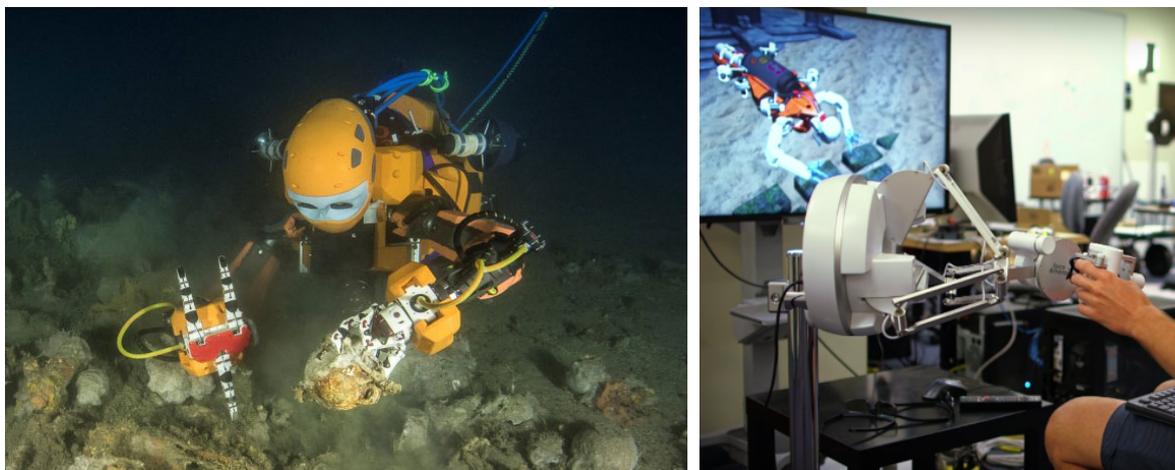
(b) Une jambe convertible de *Crabster*, ici en mode bras. (crédit : [Kang *et al.*, 2013])

Figure 1.9 – Le ROV *Crabster* du KIOST (Corée du Sud, 2013).

D'autre part, le ROV *OceanOne* (figure 1.10(a)) développé par des chercheurs de l'Université Stanford (USA) est le premier ROV à être piloté au moyen d'interfaces haptiques (figure 1.10(b)). Ce ROV a une forme humanoïde de 1,9 mètre de long pour un poids de 180 kilogrammes, et il a d'abord été conçu pour plonger à 300 mètres de profondeur mais peut atteindre 1 000 mètres depuis 2018. Ses deux bras sont équipés de capteurs d'efforts, ce qui permet d'une part leur contrôle par le biais d'interfaces haptiques, mais aussi la réalisation de tâches de manipulation complexes telles que la manipulation à deux bras d'un même objet; ses créateurs souhaitant en faire un avatar pour explorer les fonds marins, notamment dans le cadre de l'archéologie sous-marine [Khatib *et al.*, 2016]. Il a d'ailleurs effectué sa première plongée en 2016 à 91 mètres de profondeur sur l'épave de la *Lune* (Toulon, 1664) en partenariat avec le DRASSM⁶ et le LIRMM⁷ (figure 1.10(a)).

6. Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines, Ministère de la Culture, France

7. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique de Montpellier



(a) *OceanOne* manipulant des artefacts archéologiques. (crédit : Stanford - DRASSM, F. Osada / T. Seguin)

(b) Les interface haptiques d'*OceanOne*. (crédit : *Stanford University*)

Figure 1.10 – Le ROV *OceanOne* de l'université Stanford (USA, 2016).

1.2.3 Les engins d'intervention autonomes (I-AUV - Intervention Autonomous Underwater Vehicles)

Outre les engins habités et les engins télé-opérés, on trouve également des engins sous-marins autonomes pourvus de capacités de manipulation sous-marine. Bien que le développement d'engins sous-marins autonomes ait commencé dès les années 1960 ([Widditsch, 1973]), ce n'est qu'à partir de la fin des années 1990 que les premiers engins autonomes équipés de bras manipulateurs (I-AUV⁸) sont apparus.

Le premier engin notable est SAUVIM [Yuh *et al.*, 1998] (figure 1.11(a)), conçu par l'Université d'Hawaii (USA) et dont les essais à la mer ont commencé en 1999. SAUVIM mesure 3,5 mètres de long, 2 mètres de large et 1 mètre de haut et peut atteindre la profondeur de 6 000 mètres. Dans [Yuh *et al.*, 1998], les auteurs indiquent que la principale difficulté pour la commande de ces I-AUV est le couplage entre les mouvements de l'engin et ceux du ou des bras. En effet, les forces s'opposant au mouvement des bras (forces d'inertie, forces hydrodynamiques, contact avec l'environnement) perturbent la pose de l'I-AUV, conformément au principe des actions réciproques. Pour résoudre ce problème, SAUVIM était équipé de deux bras manipulateurs : l'un d'entre eux, à six degrés de liberté, était utilisé pour les tâches de manipulation, tandis que le second bras attrapait une structure fixe pour maintenir l'engin en position. Cependant, la grande différence de masse entre les bras (environ 65 kilogrammes) et l'engin (6 tonnes) a aussi permis d'utiliser des contrôleurs découplés, sans perdre de précision, pour la récupération d'un objet connu *a priori*.

8. *Intervention Autonomous Underwater Vehicle*

En 2003, *ALIVE* [Evans *et al.*, 2003] (figure 1.11(b)) est le premier I-AUV capable de mener à bien une tâche de récupération d'objet en autonomie. Développé par Cybernétix, Ocean Systems Lab et l'université Heriot-Watt (Royaume-Uni), il pèse 3 tonnes et mesure approximativement 4 mètres de long, 3 mètres de large et 2 mètres de haut. Il est équipé de deux bras hydrauliques à six degrés de liberté, l'un lui permettant de se tenir à une structure sous-marine et l'autre réalisant la tâche de manipulation. Cette dernière est alors ramenée à une tâche de manipulation classique par un bras manipulateur à six degrés de liberté grâce au maintien d'une position fixe par rapport à la structure au moyen du premier bras.



(a) SAUVIM de l'université de Hawaii (USA, 1998). (b) *ALIVE* de l'université de Heriot-Watt (Royaume-Uni, 2003). (crédit : AUVAC) (crédit : Cybernétix)

Figure 1.11 – Les I-AUV SAUVIM et *ALIVE*.

Depuis quelques années, l'I-AUV *Girona 500* [Prats *et al.*, 2012] [Ribas *et al.*, 2012], développé par l'Université de Gérone (Espagne), est utilisé comme outil d'expérimentation pour tenter de résoudre le problème de la manipulation sous-marine flottante. Il peut atteindre la profondeur de 500 mètres et est composé de trois coques en forme de torpille de diamètre 0,3 mètre et de longueur 1,5 mètre (figure 1.12). Cet I-AUV est reconfigurable pour satisfaire les contraintes liées aux différents projets l'utilisant comme plateforme expérimentale. Les spécificités des projets TRIDENT et PANDORA menés grâce à *Girona 500* sont que contrairement à ce qui a été fait avec *ALIVE*, l'I-AUV n'est pas fixe par rapport à l'objet manipulé et contrairement à *SAUVIM*, l'I-AUV est assez léger pour que le couplage entre le bras manipulateur et l'engin ne puisse pas être négligé.

Les I-AUV étant un domaine de recherche relativement récent, de nombreux travaux sont en cours à leur sujet. Une revue plus complète de ces travaux et des défis et verrous technologiques associés au développement des I-AUV est présentée par Ridao *et al.* dans [Ridao *et al.*, 2014].

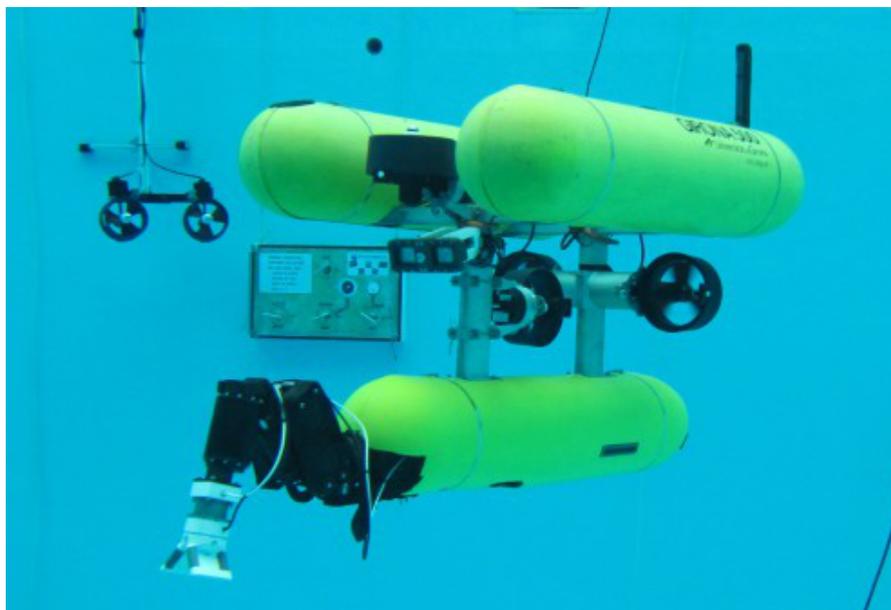


Figure 1.12 – L’I-AUV *Girona 500* de l’Université de Gérone (Espagne, 2015). (crédit : Université de Gérone)

1.2.4 Comparaison des différents moyens d’intervention sous-marins

Nous pouvons résumer ce qui a été présenté dans cette section en retraçant succinctement l’évolution des engins d’intervention sous-marins. Cette évolution a commencé avec l’*Archimède*, muni d’un seul bras manipulateur hydraulique à deux degrés de liberté, pilotés directement en actionnant manuellement les vannes de contrôle de chaque articulation. Viennent ensuite des engins plus maniables mais aussi plus habiles : *Nautile*, *Alvin*, et *Cyana*, munis de deux bras dont un à six degrés de liberté et à commande proportionnelle. Sur cette génération d’engins, les mouvements d’un bras miniature manipulé par le pilote (bras maître) sont directement reproduits par le bras de l’engin, ce qui améliore significativement leur dextérité. Avec les ROV qui apparaissent quelques années plus tard, les bras hydrauliques se dotent de mesures de position et d’effort au niveau articulaire, ce qui offre la possibilité d’assister les pilotes par un ordinateur pour l’exécution de certaines tâches récurrentes, telles que le déploiement ou le repli du bras. Enfin, avec les I-AUV, on voit apparaître des bras électriques toujours plus dextres, dont la commande est couplée à celle de l’engin pour accroître les performances de ces systèmes lors de la réalisation de tâches de manipulation autonome.

Avec l’évolution des moyens de manipulation, on assiste aussi à une évolution des moyens de supervision. Sur les bathyscaphes et les sous-marins habités, la supervision visuelle est directe, à travers des hublots dont la taille a augmenté avec les avancées technologiques. Sur les premiers ROV, le retour visuel offert pour le pilotage n’est pas optimal

comparé à la vision humaine : la résolution et le format des flux vidéos, le nombre de caméras disponibles et la qualité de la liaison analogique montante font qu'il est difficile pour les pilotes d'estimer correctement l'état et les interactions des bras avec l'environnement. Mais grâce à la présence d'un lien de communication direct et à haut débit entre le navire et l'engin, il est possible de déporter une partie de la puissance de calcul sur le navire. Grâce à cela, il y a beaucoup plus de place pour les moyens informatiques que sur un engin habité, ce qui permet d'assister les pilotes avec des fonctionnalités plus complexes. L'évolution des systèmes de prise de vue en temps-réel (PAL puis HD, UHD et enfin 4K), le passage à l'encodage numérique des flux vidéos et la possibilité d'augmenter le nombre de capteurs, ont aussi permis d'améliorer la qualité du retour visuel, qui reste encore à ce jour le moyen de supervision privilégié des opérateurs. Enfin, les techniques de perception de la scène (reconstruction tridimensionnelle notamment) et de la tâche de manipulation (meilleure modélisation des bras et des mains, intégration de capteurs d'efforts) développés pour les I-AUV permettent aujourd'hui à ces véhicules de réaliser des tâches élémentaires en autonomie.

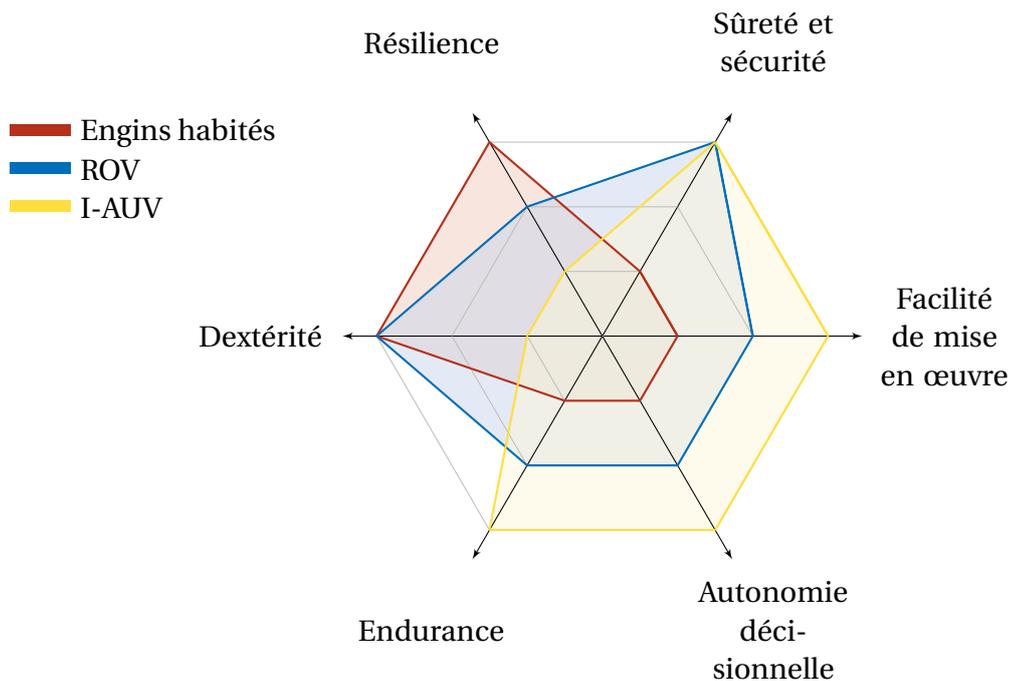


Figure 1.13 – Comparaison entre les différents types d'engins sous-marins présentés.

Au vu de ce résumé de l'évolution des moyens d'intervention sous-marins, la figure 1.13 permet de comparer les caractéristiques des différents types d'engins présentés dans cette introduction :

- la facilité de mise en œuvre prend en compte le nombre d'équipiers nécessaires au déploiement de l'engin, ainsi que le coût de déploiement. Les différences s'expliquent en partie par la taille et les capacités (positionnement dynamique) des navires requis pour mettre à l'eau chaque engin ;
- l'autonomie par rapport à la réalisation d'une tâche de manipulation est importante pour les I-AUV qui sont supervisés seulement à un haut niveau d'abstraction, mais elle est beaucoup plus faibles pour les ROV et les engins habités dont les bras sont commandés directement en vitesse par les pilotes ;
- l'endurance regroupe l'autonomie énergétique de l'engin et l'endurance de son équipage, dans le cas des engins habités et des ROV. Le facteur limitant est devenu l'endurance des équipages : ce facteur est très pénalisant pour les engins habités, moins pour les ROV dont l'équipage peut se relayer, et très faible pour les I-AUV qui sont autonomes dans leur fonctionnement ;
- la dextérité est liée à la complexité des tâches réalisables par chaque type d'engin ;
- la résilience désigne la capacité d'un engin à réagir à une situation imprévue, que ce soit une panne ou une modification de l'environnement. Celle des engins sous-marins habités est grande, puisque l'équipage est présent à bord de l'engin et peut résoudre les problèmes avec plus de facilité que sur un ROV, où l'équipage ne dispose que des informations transmises par l'engin. La résilience d'un I-AUV est très limitée à ce jour du fait du caractère autonome de ces engins.
- enfin, la sécurité des personnes en cas d'accident pendant la mise en œuvre des ROV et des I-AUV est très bonne, car l'équipage reste à bord du navire ; mais elle est plus faible pour l'équipage embarqué d'un engin habité. Il en va de même pour la sûreté des engins, qui concerne les cas de dégradation délibérée de leur état.

1.3 Présentation générale du HROV *Ariane*

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons en particulier le HROV⁹ *Ariane* comme moyen de validation expérimentale des solutions proposées. Le développement de cet engin a été lancé par Ifremer en 2010 [Brignone *et al.*, 2015] et a pour objectif de combiner dans un seul engin des capacités propres aux ROV d'une part et aux I-AUV d'autre part. C'est ce qui confère à cet engin son caractère hybride et innovant.

1.3.1 Spécifications générales d'*Ariane*

Ariane (figure 1.14) est un ROV hybride, c'est-à-dire conçu pour opérer comme un ROV ou comme un I-AUV suivant le type de mission à réaliser. Cela implique que l'énergie nécessaire à son fonctionnement est embarquée sous forme de batteries lithium-ion d'une

9. *Hybrid Remotely Operated Vehicle*

capacité de 20 kWh, ce qui permet une autonomie de 10 heures. Elle peut atteindre la pro-



Figure 1.14 – Le HROV *Ariane* d’Ifremer (France, 2015). (crédit : Ifremer)

fondeur maximale de 2 500 mètres, mesure 2,7 mètres de long, 1,2 mètre de large et 2,1 mètres de haut et pèse un poids total de 1,8 tonne dans sa configuration la plus complète. En mode AUV, l’engin communique à très bas débit avec son navire par modem acoustique. Lorsqu’*Ariane* est déployée en mode ROV, la communication se fait par une fibre optique reliant le navire au sous-marin, comme illustré par la figure 1.15. Au niveau du sous-marin, un système actif de gestion de la longueur de fibre déroulée (*Tether Management System*, TMS) permet de limiter les efforts exercés par la fibre sur l’engin. À la sortie du TMS, c’est une fibre optique légère appelée laisse véhicule, d’un diamètre de quelques millimètres, qui relie l’engin à un élément flottant, le flotteur. Ce dernier est muni d’un système d’attache avec l’engin. Ainsi, lorsque la laisse véhicule est totalement enroulée, les efforts subis par le flotteur sont directement transmis à *Ariane* et ne détériorent pas la laisse véhicule. Les principaux efforts viennent d’une laisse de traction, dont le diamètre est de l’ordre de 2 centimètres, qui relie le flotteur à un lest dépresseur instrumenté, et qui est utilisée pour tracter l’engin lors de la plongée et de la remontée. Cette laisse de traction est composée de fibre optique renforcée. Enfin, entre le lest dépresseur et le navire, on trouve un câble optoporteur d’un diamètre de l’ordre de 3 centimètres, composé d’une gaine d’acier protégeant la fibre optique. Ce système de double laisse évite la transmission des mouvements du navire à l’engin dans la limite de 300 mètres autour de la position de l’engin, et permet ainsi de déployer *Ariane* depuis un navire dépourvu de capacité de

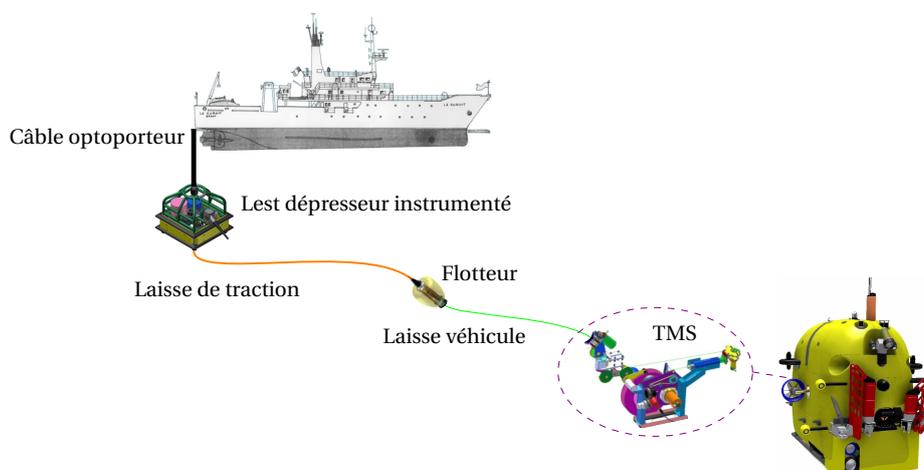


Figure 1.15 – Schéma de principe de l'intégration du système actif de gestion de la laisse véhicule (TMS) équipé *Ariane*.

positionnement dynamique. *Ariane* est localisée par USBL¹⁰ par rapport à son navire, ce qui, combiné à la position GNSS¹¹ de ce dernier donne les coordonnées géographiques absolues du sous-marin. Un capteur d'immersion permet d'améliorer la robustesse de ce positionnement absolu. *Ariane* peut aussi mesurer ses déplacements grâce à une centrale inertielle et deux DVL¹², l'un orienté vers le fond pour la navigation au dessus d'un fond globalement horizontal et plat ; et l'autre orienté vers l'avant pour permettre à l'engin de mesurer son déplacement vertical lorsqu'il se déplace ou travaille le long de surfaces verticales telles que les parois de canyons sous-marins. La présence de ces deux DVL permet aussi à l'engin de travailler sur des fortes pentes sans risquer de dégrader la qualité de son positionnement. Enfin, l'environnement dans lequel évolue *Ariane* est perçu grâce à plusieurs appareils photos, caméras numériques et sonars, dont les images sont envoyées en temps-réel aux pilotes.

Les dimensions d'*Ariane*, son système de gestion de la fibre en mode ROV et l'organisation de ses DVL en font d'une part un engin déployable à partir de navires côtiers non munis de positionnement dynamique, d'autre part un engin spécialement adapté à l'exploration de zones accidentées et de parois verticales. Ces deux caractéristiques rendent possible l'exploration de zones jusqu'alors inaccessibles et ce pour un coût d'exploitation inférieur à celui d'engins traditionnels.

10. *Ultra-Short Baseline* : une méthode de positionnement sous-marin par acoustique.

11. *Global Navigation Satellite System* : l'ensemble des systèmes de géolocalisation par satellite.

12. *Doppler Velocity Log* : un instrument utilisé pour mesurer des vitesses dans l'eau.

De plus, vis-à-vis des différents types d'engins présentés dans ce qui précède, *Ariane* se place comme indiqué par la figure 1.16.

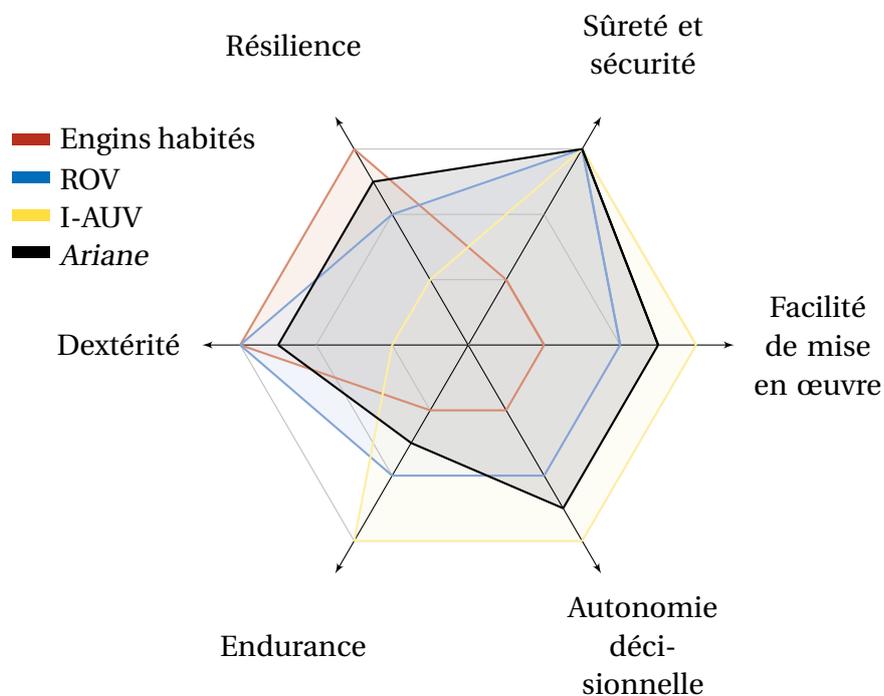


Figure 1.16 – Placement d'*Ariane* par rapport aux trois principaux types d'engins sous-marins.

- la mise en œuvre d'*Ariane* est plus simple que celle d'un ROV, car le navire utilisé n'a pas besoin d'être équipé de système de positionnement dynamique, grâce au système de double laisse utilisé par *Ariane* ;
- son autonomie décisionnelle par rapport à la réalisation d'une tâche de manipulation est meilleure que celle d'un ROV, grâce à l'automatisation de certaines tâches récurrentes, mais moindre que celle d'un I-AUV qui doit agir en totale autonomie, contrairement à *Ariane* ;
- son endurance est légèrement inférieure à celle d'un ROV, car *Ariane* est limitée par l'autonomie énergétique de ses batteries, et les tâches confiées à *Ariane* sont donc différentes de celles d'un ROV ;
- la dextérité d'*Ariane* est équivalente à celle d'un ROV ou d'un engin habité, dans la mesure où un pilote commande les mouvements des bras, mais elle est inférieure en mode autonome ;
- en termes de résilience, l'existence du mode autonome d'*Ariane* la rend meilleure qu'un ROV, mais toujours plus limitée qu'un engin habité ;

- enfin, pour ce qui concerne la sûreté et la sécurité, les modes télé-opéré et autonome d'*Ariane* la place au même niveau que les ROV et les engins habités.

1.3.2 Présentation des bras manipulateurs

Les deux bras d'*Ariane*, contrairement à la quasi totalité des bras hydrauliques des engins présentés dans la section 1.2, sont actionnés par des moteurs électriques. La spécificité de ces bras tient aussi au fait que leur actionnement est hétérogène. En effet, on trouve deux types de chaînes cinématiques fondamentalement différentes dans l'actionnement de ces bras ce qui rend hétérogène la conversion du mouvement des moteurs en mouvement articulaire. L'étude de cet actionnement particulier sera détaillée dans le chapitre 3.

Ces deux bras (figure 1.17) possèdent six et quatre degrés de liberté respectivement et sont conçus et fabriqués par ECA Group¹³. Ils sont étanches et en équipression¹⁴, ce



Figure 1.17 – Les deux bras d'*Ariane* : à gauche, les bras 7E à six degrés de liberté, et à droite, le bras 5E à quatre degrés de liberté. (crédit : ECA Group)

qui rend délicate l'intégration de la plupart des capteurs que l'on peut retrouver habituellement dans des bras terrestres, comme les capteurs d'effort. Les seuls capteurs dont ils disposent sont les capteurs à effet Hall permettant le pilotage des moteurs sans balais (*brushless*) qui les actionnent. Grâce à ces derniers, on peut mesurer le déplacement relatif de

13. <https://www.ecagroup.com/>

14. On dit qu'un élément est en équipression lorsqu'il est rempli d'une huile dont la pression est maintenue en permanence égale, ou légèrement supérieure, à la pression environnante grâce à une membrane (bâche d'équipression) ou une poche souple. Ceci supprime la nécessité d'une enceinte et de joints résistants aux fortes pressions des grandes profondeurs.

chaque articulation. De plus, les bras sont conçus pour être pilotés par un opérateur humain, en recevant des consignes de vitesse soit dans l'espace articulaire, soit dans l'espace cartésien associé à la pince.

1.3.3 Ariane comme outil pour la recherche océanographique

Ariane est avant tout conçue comme un outil permettant la mesure de données environnementales, la prise de vues sous-marines et la collecte d'échantillons dans le but de fournir des données aux océanologues d'Ifremer. En cela, elle répond à des besoins scientifiques précis liés à la recherche océanographique.

Les objectifs scientifiques d'*Ariane*



Figure 1.18 – Le panier de prélèvement d'*Ariane*. (crédit : Ifremer)

Ariane a deux types de missions principales, selon qu'elle travaille en mode ROV ou en mode AUV. En mode AUV, elle est prévue pour survoler des zones prédéfinies pour les cartographier en totale autonomie. En mode ROV, son objectif général est de prélever sur le fond ou sur les parois de falaises sous-marines des échantillons de roches, de sédiments, de faune et de flore afin de fournir des données aux scientifiques étudiant ces milieux. Ces différents prélèvements se font à l'aide d'outils amovibles saisis par les pinces situées au bout de chaque bras d'*Ariane*. Ces outils sont rangés dans le panier de prélèvement de l'engin pendant le reste de la mission (figure 1.18). Actuellement, *Ariane* est entièrement télé-opérée pour les tâches d'intervention, l'automatisation partielle de ces tâches étant un des objectifs de cette thèse.



(a) Carottage en utilisant un outil dédié.

(b) Saisie d'une gorgone grâce à une pince à godets standard.

Figure 1.19 – Deux exemples de tâches de manipulation sous-marine exécutées par le robot télé-opéré *Victor 6000*. (crédit : Ifremer)

Exemples de missions et critères de réussite

En mode télé-opéré, les missions d'*Ariane* concernées par ce travail de thèse sont principalement de deux types :

le carottage de sédiments (figure 1.19(a)) : pour cette tâche, il est nécessaire d'assurer la verticalité du carottier tout en maîtrisant les forces horizontales et verticales. En effet, il est nécessaire de contrer les forces horizontales exercées par l'environnement sur l'outil qui ont tendance à dévier ce dernier, soit latéralement soit verticalement, ce qui peut dégrader la qualité de l'échantillon prélevé en désordonnant les couches sédimentaires. La force verticale doit aussi être prise en compte afin de détecter d'éventuels obstacles qui pourraient détériorer le carottier.

la saisie d'objets (figure 4.16(b)) : pour cette tâche, l'effort de serrage de la pince doit être en adéquation avec l'objet prélevé, afin d'éviter l'écrasement des échantillons. Cette contrainte est particulièrement difficile à respecter à cause de l'absence de mesure d'effort au niveau de la fermeture et de l'ouverture des pinces d'*Ariane*.

Pour ces deux types de tâches, il est nécessaire d'éviter les collisions entre les bras et l'engin, ainsi qu'entre les bras et l'environnement et entre les bras eux-mêmes. Les échantillons prélevés doivent être délicatement placés dans le panier de prélèvement en conservant leur intégrité pour garantir leur exploitabilité scientifique.

1.4 Problématique de la thèse

L'objectif de ce travail de thèse est d'améliorer les capacités de manipulation des engins d'exploration sous-marine existants, mais aussi de fournir des avancées technologiques permettant d'appréhender différemment la conception de futurs engins sous-marins d'intervention autonomes. En effet, nous cherchons à augmenter le degré d'automatisation des tâches de manipulation sous-marine d'une part et la gamme d'objets manipulables d'autre part. Dans l'optique de manipuler des échantillons encombrants, déformables ou fragiles, nous nous donnons aussi comme objectif d'évoluer vers la manipulation à deux bras de tels échantillons.

Les évolutions proposées seront compatibles avec les engins existants présentés dans ce qui précède, c'est-à-dire que ces derniers pourront en bénéficier sans modification de leurs interfaces standards, à savoir les pinces de leurs bras robotiques. D'autre part, dans le cadre de cette thèse, nous faisons le choix de nous affranchir des problèmes liés à la manipulation flottante, en supposant que toutes les tâches de manipulation sont réalisées par un engin posé sur le fond de l'océan, et donc fixe par rapport à l'objet à manipuler.

Toutes les solutions proposées sont en particulier destinées à être testées sur le HROV *Ariane* d'Ifremer, et les retombées technologiques en faveur de la manipulation autonome pourront à l'avenir contribuer à l'évolution fonctionnelle de nouveaux engins autonomes d'intervention. À plus proche horizon, les travaux réalisés pourront être utilisés par les engins télé-opérés existants, autres qu'*Ariane*, du moment qu'ils possèdent le même type de pinces et que leurs bras sont équipés de capteurs de position, ces deux prérequis étant soit déjà remplis par la plupart des bras, soit facilement accessibles.

C'est avec ces objectifs de réutilisabilité et d'intercompatibilité que l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit ont été menés.

1.5 Contributions de la thèse et organisation du manuscrit

Les contributions réalisées au cours de la thèse et présentées dans ce manuscrit sont les suivantes :

- la modélisation cinématique et dynamique des bras électriques hétérogènes d'*Ariane* en prenant en compte leurs actionneurs,
- l'identification expérimentale des modèles obtenus,
- la conception et la réalisation d'outils compliantes amovibles, manipulables par les pinces des bras d'un robot sous-marin et destinés à être utilisés dans le cadre de la manipulation à deux bras d'objets fragiles.

Le chapitre 2 présente une revue de l'état de l'art concernant la manipulation sous-marine. Il liste les principaux bras manipulateurs hydrauliques et électriques existants,

ainsi que des bras innovants dans le domaine sous-marin. D'un point de vue plus théorique, les méthodes classiques de modélisation et de commande des bras manipulateurs sont détaillées, avant d'introduire des stratégies permettant de transposer ces méthodes à un système à deux bras. Une revue des techniques de mesure d'efforts dans le milieu sous-marin termine ce chapitre.

La première contribution de cette thèse, concernant la modélisation et l'identification des actionneurs des bras d'*Ariane*, fait l'objet du chapitre 3. Ce chapitre présente la modélisation de l'actionnement spécifique aux bras d'*Ariane* du point de vue cinématique puis dynamique. Nous proposons ensuite une méthode de regroupement des paramètres dynamiques pour permettre l'identification expérimentale du modèle. Ce modèle des actionneurs est ensuite utilisé pour augmenter le modèle classique d'un bras manipulateur en améliorant l'expression du couple articulaire. Tous les paramètres du modèle du bras sont alors identifiés expérimentalement par des méthodes d'optimisation. Pour les paramètres cinématiques d'une part, on minimise l'erreur d'estimation de la vitesse de chaque articulation en se basant sur un suivi visuel. Pour les paramètres dynamiques d'autre part, on minimise l'erreur d'estimation du courant électrique alimentant chaque moteur lors du suivi d'une trajectoire de référence par le bras.

La contribution relative au développement d'outils compliant pour la manipulation d'objets à deux bras est présentée dans le chapitre 4. Nous y présentons deux versions d'un outil de préhension compliant, adaptable à une pince standard de bras manipulateur et mesurant l'effort appliqué par cet outil sur l'environnement. Nous présentons aussi des méthodes de mise en œuvre de ces outils dans un contexte opérationnel incertain, c'est-à-dire comportant des erreurs de modélisation des bras mais aussi de l'objet à manipuler, des erreurs de commande, et des erreurs positionnement de l'engin par rapport à l'objet. Ce contexte incertain est celui rencontré lorsque l'engin opère au fond de l'océan ou lorsque la visibilité est très mauvaise à cause de la turbidité de l'eau.

Enfin, un bilan des contributions proposées et de leur mise en œuvre pour la manipulation à grande profondeur d'échantillons biologiques déformables est présenté dans le chapitre de conclusion. À la suite de ce bilan, nous proposons des pistes à suivre pour continuer ce travail et, à terme, rendre possible la manipulation autonome à deux bras d'échantillons fragiles depuis un robot sous-marin.

1.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le contexte général dans lequel s'inscrit ce travail de thèse, d'une part en listant les principaux engins sous-marins d'intervention disponibles à ce jour, et d'autre part en décrivant les caractéristiques techniques et les missions scientifiques du HROV *Ariane* d'Ifremer, sur lequel nous validerons les contributions proposées dans ce manuscrit.

Dans la suite, nous dressons un état de l'art portant sur trois aspects primordiaux du travail proposé :

- les bras manipulateurs sous-marins,
- la modélisation et la commande de ces bras,
- les préhenseurs sous-marins.

Cet état de l'art sert de base aux contributions proposées par la suite.

2

État de l'art sur la manipulation sous-marine

Sommaire

2.1	Introduction	35
2.2	Principaux bras manipulateurs existants	36
2.3	Manipulation sous-marine à deux bras	42
2.4	Préhenseurs pour la manipulation sous-marine	51
2.5	Conclusion	56

2.1 Introduction

Dans ce chapitre d'état de l'art, nous présentons ce que nous considérons comme une base scientifique pour les contributions proposées. En effet, nous rappelons ici l'existence des principaux types de bras manipulateurs sous-marins et leurs particularités, ainsi que les méthodes classiques de modélisation et de commande de ces bras, et nous présentons les principaux projets de développement de préhenseurs sous-marins conçus pour être utilisés par les bras présentés précédemment.

Nous classons les bras manipulateurs par énergie d'actionnement (hydraulique ou électrique) et nous présentons à part des bras récents équipés de mesure d'efforts d'interaction. En ce qui concerne les méthodes classiques de modélisation et commande, nous nous limitons au cas des bras séries et nous n'abordons pas les effets hydrodynamiques, qui sont négligés dans cette thèse du fait des faibles vitesses d'évolution des bras du HROV *Ariane*. Cependant, nous complétons ce qui est dit sur les bras séries par une présentation des principales approches de commande d'un système à deux bras.

2.2 Principaux bras manipulateurs existants

Dans le cadre de l'intervention sous-marine pour le prélèvement de sédiments, d'espèces animales ou végétales, ou encore d'objets artificiels, mais aussi pour la construction et la maintenance d'ouvrages sous-marins, les bras manipulateurs occupent une place centrale. Ils équipent des engins habités, des ROV, ou des I-AUV, et possèdent un nombre variable de degrés de liberté, ainsi que des longueurs et puissances très différentes d'un modèle à l'autre. Cependant, il n'existe à ce jour que deux technologies permettant de les actionner : hydraulique ou électrique. Dans ce qui suit, nous présentons différents bras hydrauliques et électriques existants, qu'il s'agisse de systèmes commerciaux ou de prototypes développés pour une application spécifique. En ce qui concerne les bras électriques, nous présenterons séparément ceux intégrant une mesure d'efforts, cette mesure pouvant être effectuée au niveau de chaque articulation (couple articulaire) ou bien au niveau du poignet (forces et couples d'interaction avec l'environnement).

2.2.1 Bras hydrauliques

Tableau 2.1 – Spécificités des principaux bras manipulateurs sous-marins hydrauliques.

	<i>Atlas Hybrid</i>	<i>Maestro</i>	<i>Titan 4</i>
Constructeur	Schilling	Cybernétix	Schilling
Degrés de liberté	6+1	6+1	6+1
Levage (kg)	250	100	122
Extension (cm)	166	240	192
Profondeur (m)	2 060	6 000	7 000
Poids (kg)	50	65	78

Les bras hydrauliques sont actionnés par un fluide sous pression, généralement de l'huile. Cela nécessite la présence à proximité du bras d'une centrale hydraulique, dont le rôle est d'effectuer la mise sous pression du fluide. L'avantage de cette technologie est qu'elle est utilisable à toutes profondeurs, car le système est naturellement en équipression. De plus, l'utilisation d'un seul générateur (la centrale hydraulique) rend l'ensemble plus fiable et moins coûteux. On peut aussi noter que le rapport poids/puissance est très favorable pour les bras hydrauliques, et que le fait que la centrale hydraulique puisse être placée n'importe où sur l'engin permet de minimiser le couplage entre les mouvements des bras et ceux de l'engin. Enfin, les bras hydrauliques sont munis d'une vanne de dé-

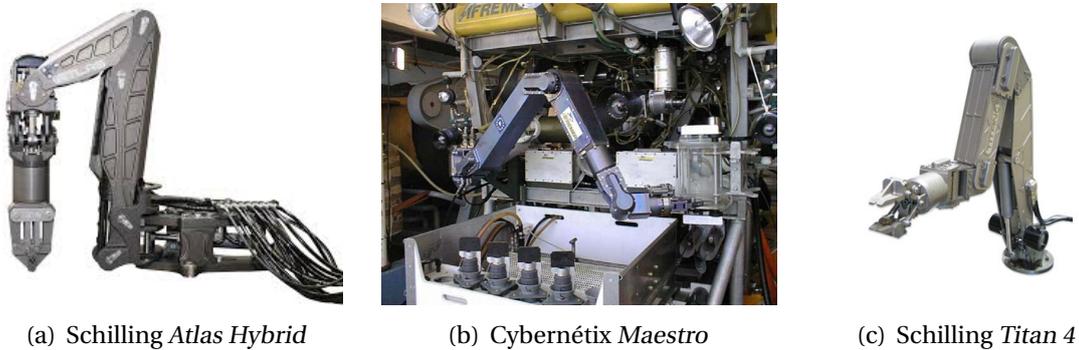


Figure 2.1 – Principaux bras hydrauliques équipant des engins sous-marins.



Figure 2.2 – Bras maître permettant le contrôle d'un bras en boucle fermée. Le bras maître a les mêmes proportions que le bras esclave, et on pilote ce dernier en lui appliquant les mêmes variations de position angulaire que celles mesurées par les capteurs du bras maître.

charge, un système de sécurité permettant aux articulations du bras de devenir naturellement libres en cas de défaillance du système, ce qui évite au bras de rester bloqué dans une position qui empêcherait l'engin sous-marin de revenir à la surface en cas de problème au cours d'une mission.

Les bras hydrauliques sont ceux que l'on trouve le plus fréquemment sur les engins sous-marins habités et sur les ROV. Ils ont l'avantage d'être puissants et rapides donc particulièrement adaptés aux travaux sous-marins. Le tableau 2.1 rassemble les caractéristiques de certains modèles de bras, représentatifs des produits existants. Dans ce tableau et dans ce qui suit, le nombre de degrés de liberté est donné sous la forme $n+1$, n étant le nombre de degrés de liberté cinématiques et le $+1$ indiquant la présence d'un actionneur permettant l'ouverture et la fermeture d'une pince. Le bras *Atlas Hybrid* de Schilling équipe par défaut tous les ROV développés par Oceaneering. Il est pilotable en mode proportionnel,

c'est-à-dire en boucle ouverte (généralement à l'aide de boutons ou de leviers actionnant chaque articulation dans un sens ou dans l'autre) ou en boucle fermée (généralement à l'aide d'un bras maître, voir fig. 2.2). En boucle fermée, il est possible de commander les coordonnées articulaires du bras, ou bien directement la position et l'orientation de l'organe terminal dans un repère cartésien. Ce repère est le plus souvent attaché à l'engin ou à l'organe terminal. Les bras *Maestro* de Cybernétix et *Titan 4* de Schilling sont utilisés respectivement sur *Victor 6000* de l'Ifremer et sur certains ROV développés par Oceaneering. D'autres modèles de bras développés par Schilling, les *Orion 7P* et *Orion 4R*, sont utilisés sur le ROV *Jaguar* de SeaEye. À ce jour, tous les bras hydrauliques du commerce sont pilotables aussi bien en boucle ouverte qu'en boucle fermée dans l'espace articulaire.

2.2.2 Bras électriques

Tableau 2.2 – Spécificités des principaux bras manipulateurs sous-marins électriques.

	<i>5E Micro</i>	<i>5E Mini</i>	<i>5E</i>	<i>7E</i>	<i>BE5-500</i>
Constructeur	ECA	ECA	ECA	ECA	OiS
Degrés de liberté	4+1	4+1	4+1	6+1	4+1
Levage (kg)	10	25	25	40	16
Extension (cm)	64	85	100	179	70
Profondeur (m)	6 000	6 000	6 000	6 000	500
Poids (kg)	2,5	15	18,5	49	8



Figure 2.3 – Principaux bras électriques équipant des engins sous-marins.

Les bras électriques sont quant à eux actionnés par des moteurs électriques, habituellement un par articulation. Ils peuvent être directement alimentés par le réseau électrique du bord et ne nécessitent pas de centrale hydraulique, ce qui réduit le poids et l'encombrement à l'intérieur de l'engin [Fernández *et al.*, 2013]. Néanmoins, l'encombrement est déplacé à l'intérieur des bras puisque la chaîne d'actionnement et de réduction couplée aux moteurs est située au niveau de chaque articulation. De plus, ils doivent être placés en équipression pour opérer à de grandes profondeurs, ce qui rend leur maintenance plus complexe puisqu'il faut avant toute opération de démontage vider l'huile présente dans le système. Ils sont donc plus coûteux, moins fiables et plus difficiles à maintenir que les bras hydrauliques. Cependant, leur mode d'actionnement permet de les piloter très précisément et les rend moins énergivores que les bras hydrauliques, lorsqu'ils sont utilisés en conjonction avec un système d'actionnement de l'engin entièrement électrique [Maloof *et al.*, 1986]. Ils sont donc particulièrement intéressants dans le cadre de la manipulation sous-marine autonome.

Plusieurs industriels proposent des bras électriques destinés à équiper des engins sous-marins. Les caractéristiques des principaux modèles de bras disponibles sont présentées dans le tableau 2.2. Les bras fabriqués par ECA sont disponibles en plusieurs modèles, à quatre ou six degrés de liberté. La version *5E* du bras à quatre degrés de liberté équipe *Ariane* et *Girona 500* en configuration PANDORA, et la version *5E Mini* est utilisée par *Girona 500* en configurations RAUVI et TRITON. Ce sont en effet les modifications apportées au bras *5E* pour qu'il puisse être utilisé dans le cadre du projet TRITON [Fernández *et al.*, 2013] qui sont à l'origine du modèle *5E Mini*. Quant au bras *7E*, il est utilisé par *Ariane*, pour qui il a spécifiquement été développé. Enfin, le très récent bras d'OiS *BE5-500* est particulièrement compact, ce qui le rend utilisable par des engins de taille réduite. En contrepartie, sa capacité de levage est limitée.

2.2.3 Bras à mesure d'efforts

Les bras électriques à mesure d'effort sont apparus plus récemment pour la robotique sous-marine, un frein important à leur développement étant la difficulté d'intégration de capteurs d'efforts dans un système sous-marin, principalement à cause de la nécessité de supporter une pression élevée. De plus, tant que les tâches de manipulation étaient réalisées par un pilote humain, il n'était pas indispensable de connaître les efforts appliqués par les bras sur leur environnement, dans la mesure où cette information pouvait être estimée visuellement par le pilote grâce à son expérience. Les bras à mesure d'effort ont cependant commencé à recevoir un grand intérêt dans le cadre de la manipulation sous-marine autonome [Ribas *et al.*, 2015], mais aussi dans le cadre du développement d'avatars sous-marins offrant une meilleure immersion au pilote [Khatib *et al.*, 2016].

Les caractéristiques des principaux bras manipulateurs électriques à mesure d'effort développés à ce jour sont présentées dans le tableau 2.3. Le bras *MARIS 7080* de ANSALDO

Tableau 2.3 – Spécificités des principaux bras manipulateurs sous-marins électriques à mesure d'efforts.

	<i>UMA</i>	<i>MARIS 7080</i>	<i>OceanOne</i>	<i>Aquanaut</i>
Constructeur	GraalTech	ANSALDO	Meka Robotics	Houston Mechatronics
Degrés de liberté	6+1	7+1	7	7+1
Levage (kg)	12	8	-	150
Extension (cm)	100	140	-	150
Poids (kg)	17	65	-	130
Profondeur (m)	200	6 000	1 000	3 000

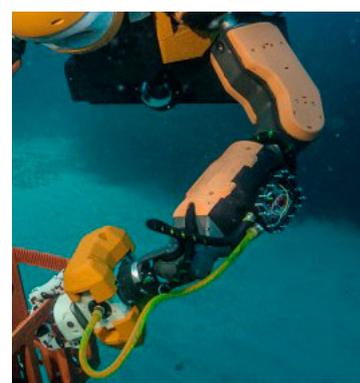
(a) GraalTech *UMA*(b) ANSALDO *MARIS 7080*(c) Meka Robotics *OceanOne*

Figure 2.4 – Principaux bras à mesure d'efforts équipant des engins sous-marins.

a été utilisé dans le cadre du projet AMADEUS [Angelletti *et al.*], ainsi que pour équiper l'I-AUV SAUVIM [Marani *et al.*, 2009]. Ce bras est placé en équipression et le capteur d'efforts six axes *JR3* est installé entre le dernier degré de liberté du poignet et la pince du bras. Le bras *UMA* de GraalTech, à six degrés de liberté, a été développé lors du projet Trident [Ribas *et al.*, 2015] pour équiper l'I-AUV *Girona 500*. Il a la particularité d'être conçu de façon modulaire, c'est-à-dire que ses différents segments sont interchangeables et facilement remplaçables. Il utilise le même capteur d'efforts six axes *JR3*, également situé au niveau du poignet. Les bras d'*OceanOne* développés à l'Université Stanford en collaboration avec Meka Robotics (Google) fournissent une mesure du couple articulaire de chaque articulation, contrairement aux bras *MARIS 7080* et *UMA* qui utilisent un capteur d'effort six axes mesurant les efforts exercés par la pince et exprimés dans un repère cartésien lié au cap-

teur. Enfin, les bras d'*Aquanaut* (fig. 2.5), un I-AUV en cours de développement par Houston Mechatronics, sont commandables en couple et possèdent une mesure d'effort dans l'espace articulaire. Ils sont équipés de pinces pouvant manipuler des outils standards, et un système de remplacement d'outil en cours de mission pour remplacer les pinces est également prévu.

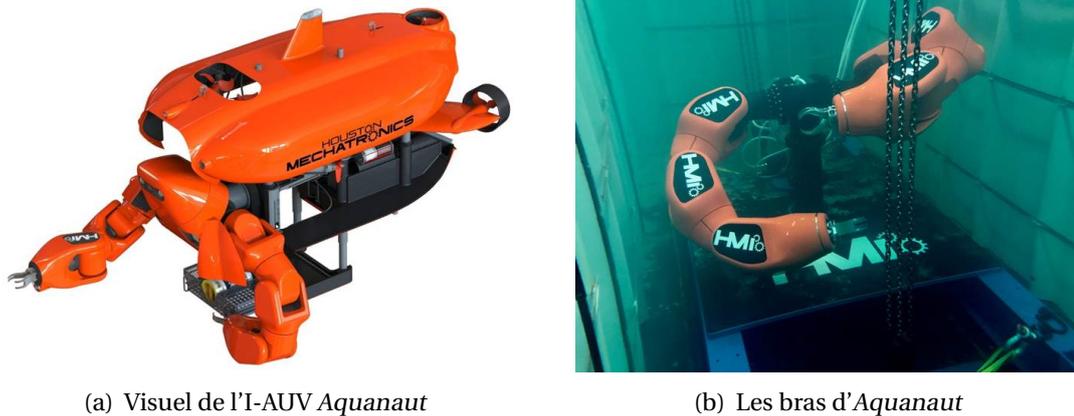
(a) Visuel de l'I-AUV *Aquanaut*(b) Les bras d'*Aquanaut*

Figure 2.5 – L'I-AUV *Aquanaut* en développement par Houston Mechatronics (USA, 2018). (crédit : Houston Mechatronics)

2.2.4 Comparaison des différents types de bras

La figure 2.6 présente une comparaison des trois grands types de bras présentés dans cette section. Cette comparaison est faite sur les critères suivants :

- fiabilité mécanique et électronique ;
- puissance, vitesse et précision de positionnement de la pince, qui vont influencer sur la qualité de réalisation des tâches de manipulation ;
- coût énergétique. Ces aspect est particulièrement important pour l'utilisation des bras sur des I-AUV ou des ROV hybrides, comme *Ariane*, qui embarquent leur propre énergie, qu'il importe donc d'économiser pour maximiser le temps de plongée ;
- coût financier.

D'autres critères, tels que la profondeur atteignable, ne sont pas pris en compte car dans l'état actuel des technologies présentées, ces critères ne sont pas discriminants.

Le lecteur intéressé pourra se reporter également à la revue exhaustive des moyens de manipulation en environnement profond, principalement axée sur les bras hydrauliques et électriques télé-opérés, publiée très récemment par [Sivcev *et al.*, 2018].

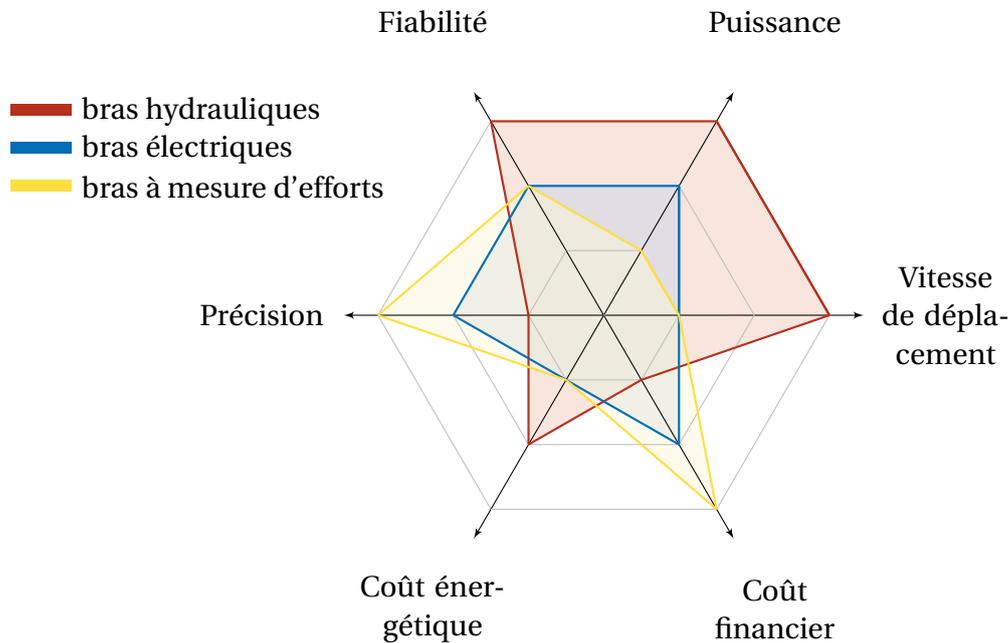


Figure 2.6 – Comparaison des différents types de bras manipulateurs sous-marins.

2.3 Manipulation sous-marine à deux bras

Alors que les premiers engins sous-marins modernes, à savoir les engins habités et les ROV, étaient équipés de deux bras manipulateurs, les engins les plus récents, les I-AUV, n'en possèdent qu'un. On note une évolution similaire en robotique terrestre : bien que quelques travaux précurseurs [Nakano *et al.*, 1974; Takase *et al.*, 1974; Fujii et Kurono, 1975] présentent l'utilisation de deux bras simultanément dès 1974, l'intérêt s'est ensuite très majoritairement porté sur l'étude de la modélisation et de la commande de systèmes à un seul bras manipulateur. Les verrous scientifiques relatifs à l'utilisation d'un bras ont ainsi été levés progressivement jusqu'à la fin des années 1980 (conception [Roth *et al.*, 1974], modélisation géométrique [Denavit et Hartenberg, 1955], cinématique [Paul, 1981], et dynamique [Walker et Orin, 1982], commande [Spong *et al.*, 2004a]). Cela a ensuite permis aux systèmes à deux bras d'être à nouveau étudiés en se concentrant sur les problématiques spécifiques à l'utilisation coordonnée de deux manipulateurs.

L'intérêt principal de la manipulation à deux bras est d'étendre les capacités de manipulation des robots. En effet, utiliser deux bras au lieu d'un seul permet aux robots de manipuler des objets plus encombrants et moins rigides, mais aussi d'augmenter la manipulabilité et la similarité du système avec l'opérateur. Il est ainsi possible d'effectuer des tâches plus complexes et de manipuler des dispositifs initialement destinés à l'être hu-

main. Cependant, l'ajout d'un second bras augmente la complexité du système, du point de vue de sa modélisation mais aussi de sa commande et de la perception de son état.

En termes de modélisation, il est nécessaire de modéliser le comportement des bras séparément mais aussi ensemble lors de leurs interactions avec l'objet manipulé ; et il faut aussi déterminer une façon à la fois compacte et compréhensible de représenter la tâche à effectuer. Concernant la commande du système, les concepts de commande en espace libre sont largement repris de la commande d'un seul bras. Cependant, lorsque les deux bras manipulent un même objet, les approches de commande en espace contraint classiques ne sont pas suffisantes : il faut synchroniser les bras pour que la compensation des erreurs de positionnement se fasse de manière complémentaire, pour éviter notamment des phénomènes d'oscillation. Enfin, la perception de l'état du système doit être améliorée. On doit être capable de déterminer les positions relatives des bras et leurs interactions avec les objets manipulés, afin d'assurer une réalisation correcte des tâches.

2.3.1 Modélisation des bras manipulateurs

La modélisation des bras manipulateurs a pour but d'exprimer la relation entre le comportement des actionneurs et celui de certains organes du bras, en particulier de son organe terminal. Cette relation peut être exprimée du point de vue cinématique ou dynamique. On différencie dans chaque cas le modèle direct, exprimant le comportement de l'organe terminal en fonction de celui des actionneurs, et le modèle inverse, exprimant le comportement des actionneurs en fonction de celui de l'organe terminal. Comme on souhaite généralement conférer un mouvement particulier à l'organe terminal d'un bras, on interprète aussi le modèle inverse comme une équation dont la solution permet de commander le mouvement de l'organe terminal de la façon souhaitée.

Modélisation cinématique

Le modèle cinématique direct d'un bras manipulateur permet d'exprimer le vecteur $\dot{\mathbf{X}}$ des vitesses de translation et rotation de son organe terminal en fonction du vecteur $\dot{\mathbf{q}}$ des vitesses de ses articulations. Il s'exprime usuellement sous la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.1)$$

On note \mathbf{J} la matrice jacobienne du bras, qui est fonction des coordonnées angulaires \mathbf{q} du bras. Cette matrice est de taille $6 \times n$, n étant le nombre de degrés de liberté du bras. Une méthode permettant de déterminer une expression analytique de la matrice jacobienne est proposée dans [Renaud, 1980] et implémentée dans le logiciel OpenSymoro [Khalil *et al.*, 2014]. Lorsque la matrice jacobienne est connue, il devient possible de s'intéresser à la résolution du modèle cinématique inverse, qui donne les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ à appliquer

au bras pour que son effecteur se déplace à la vitesse $\dot{\mathbf{X}}$. Dans le cas idéal, le modèle cinématique inverse peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{X}} \quad (2.2)$$

Cette expression n'est valide que dans le cas où le nombre de degrés de liberté n du bras est égal au nombre de degrés de liberté m de la tâche à réaliser. En effet, cela implique que $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ est carrée et donc inversible, excepté dans certaines configurations singulières, appelées des singularités, où le déterminant de $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ est nul. Dans une configuration singulière et lorsque le nombre de degrés de liberté n du bras n'est pas égal au nombre de degrés de liberté m de la tâche à réaliser, on peut utiliser la pseudo-inverse de Moore-Penrose $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$, définie par $\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T$. Dans ce cas, en remplaçant \mathbf{J}^{-1} par \mathbf{J}^+ , on obtient :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+(\mathbf{q})\dot{\mathbf{X}} \quad (2.3)$$

Lorsque $n > m$, il existe une infinité de solutions au problème et il est possible de choisir une solution respectant des contraintes supplémentaires, telle que l'évitement d'obstacles [Maciejewski et Klein, 1985]. Si $m < n$, il n'existe pas de solution exacte, mais la solution fournie par l'équation 2.3 minimise l'erreur entre le déplacement $\dot{\mathbf{X}}$ souhaité et le déplacement possible du bras. On note que la solution de l'équation (2.3) donnée par la pseudo-inverse de Moore-Penrose minimise toujours la norme 2 de $\dot{\mathbf{q}}$ et donc l'énergie consommée par le système pour réaliser le déplacement requis. Dans le cas d'un système suractionné, la minimisation de l'énergie n'est pas nécessairement un choix optimal dans la mesure où chaque articulation bouge, parfois inutilement, ce qui peut aboutir à des configurations géométriques saugrenues (bien que l'organe terminal soit à la place désirée). La méthode exploitant la parcimonie [Gonçalves et al., 2016; Berthet-Rayne et al., 2018] apporte une solution efficace à ce problème en minimisant les mouvements plutôt que l'énergie, ce qui aboutit à des configurations géométriques plus naturelles et évite au robot de se trouver des configurations extrêmes dans lesquelles plusieurs butées mécaniques sont atteintes.

Modélisation dynamique

Le modèle dynamique permet de relier les couples articulaires aux efforts exercés par le bras sur l'environnement. Ce modèle s'exprime généralement sous la forme suivante, qui est l'expression du modèle dynamique inverse :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{w} \quad (2.4)$$

Dans cette expression, on note :

$\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$, le vecteur des couples articulaires,

$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, la matrice d'inertie,

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, la matrice des forces de Coriolis et des forces d'inertie d'entraînement,
 $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n$, le vecteur des forces de frottement,
 $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$, le vecteur des forces de gravité et de flottabilité,
 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n$, le vecteur des forces et moments de contact avec l'environnement.

Deux approches permettent classiquement de déterminer l'expression analytique des termes du modèle dynamique. D'une part, l'approche de Newton-Euler qui utilise deux récursions. La première récursion parcourt la chaîne cinématique de sa base jusqu'à son extrémité et permet d'exprimer les vitesses et accélérations de chaque lien en fonction des vitesses et accélérations des liens précédents. La seconde récursion parcourt la chaîne cinématique de son extrémité vers sa base et permet d'exprimer les forces que chaque articulation doit appliquer pour maintenir en équilibre le lien qui lui succède. D'autre part, l'approche de Lagrange est basée sur le lagrangien du système qui est calculé à partir des énergies cinétique et potentielle du système. En développant l'expression du lagrangien, il est possible d'identifier l'ensemble de ses termes avec les termes de l'équation (2.4). Bien que la méthode du lagrangien soit plus simple à appréhender, la méthode de Newton-Euler est mieux adaptée pour être implémentée. Ces deux méthodes, leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que leurs extensions sont largement développés dans les livres de robotique ([Khalil et Dombre, 2002b; Siciliano et Khatib, 2016] par exemple).

2.3.2 Principales approches de commande des bras manipulateurs

La commande des bras manipulateurs a été largement traitée dans la littérature depuis la conception du *Stanford Arm* en 1969, l'un des tous premiers bras robotiques conçus pour être commandé par un ordinateur. Deux aspects principaux de la commande des bras manipulateurs ont ainsi pu émerger : d'une part, la commande en espace libre dont le but est de contrôler les mouvements des bras, c'est-à-dire la position et la vitesse de leur effecteur ou de chacune de leurs articulations lorsqu'il n'y a pas de contact avec l'environnement. D'autre part, la commande en espace contraint dont le but est de contrôler les interactions entre les bras, généralement leur effecteur, et leur environnement. Dans ce cas, en plus de la commande de la position et de la vitesse des bras, on considère aussi la commande des efforts d'interaction avec l'environnement. Bien que ces deux modes de commande aient depuis longtemps été conciliés, par exemple par la commande hybride force/position [Chiaverini et Sciavicco, 1993], le passage d'un mode de commande à l'autre, lors du contact ou de la séparation du bras et de l'environnement, peut poser des problèmes de stabilité [Mills, 1990]. Nous présentons dans la suite les principales approches de commande utilisées pour contrôler les bras manipulateurs à ce jour. Les approches dites classiques et robustes sont plutôt utilisées pour la commande en espace libre, tandis que les commandes en effort sont plutôt utilisées pour la commande en espace contraint.

Commande classique

La commande PID proposée par Ziegler et Nichols [Ziegler et Nichols, 1942] est encore largement utilisée de nos jours dans la commande des bras manipulateurs. Cela s'explique par sa simplicité, tant en termes de compréhension qu'en termes de mise en œuvre car cette commande comporte peu de gains à régler. En effet, appliqué à l'asservissement d'un couple articulaire, son expression est la suivante :

$$\tau(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\sigma) d\sigma + K_d \dot{e}(t) \quad (2.5)$$

où les gains K_p , K_i , K_d sont des réels positifs, et e est la différence entre la grandeur de consigne et la grandeur mesurée. Cette grandeur peut être le couple articulaire dans le cas d'une commande en couple, ou la position articulaire dans le cas d'une commande en position par exemple.

Une des faiblesses du PID appliqué à des systèmes non-linéaires est son manque de robustesse. Il est possible d'améliorer ce point en introduisant des gains non linéaires [Kelly et Carelli, 1996]. Au lieu d'être constants, les gains vont donc varier en fonction de l'état du bras et de son erreur de positionnement. Il n'existe pas de méthode systématique permettant de régler ces gains correctement, mais plusieurs alternatives ont été étudiées dans la littérature [Bucklaew et Liu, 1999; Seraji, 1998; Su *et al.*, 2005]. La loi de commande est ainsi plus complexe, mais il n'est plus nécessaire d'utiliser le gain intégral K_i ce qui réduit l'expression (2.5) à :

$$\tau(t) = K_p(\cdot) e(t) + K_d(\cdot) \dot{e}(t) \quad (2.6)$$

Les deux versions du P(I)D présentées précédemment n'utilisent pas le modèle du bras. Pour améliorer ses performances, il est possible d'introduire tout ou partie de la connaissance du système que l'on cherche à commander. Par exemple, la commande PDg [Kelly et Carelli, 1996], à compensation de gravité, estime et compense dans la loi de commande articulaire le couple $g(q)$ dû à la gravité :

$$\tau(t) = K_p(\cdot) e(t) + K_d(\cdot) \dot{e}(t) + g(q) \quad (2.7)$$

Ici, q désigne la coordonnée articulaire de l'articulation commandée.

Si l'on dispose d'un modèle plus complet du système à commander, il est alors possible de l'utiliser dans la loi de commande. La commande *computed torques* [Khosla, 1987], dont l'expression est donnée par (2.8) pour un bras à plusieurs degrés de liberté, en est un exemple simple :

$$\tau(t) = \mathbf{M}(q) \mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(q, \dot{q}) \dot{q} + \mathbf{f}(\dot{q}) + \mathbf{g}(q) \quad (2.8)$$

Ici, $\mathbf{M}(q)$, $\mathbf{C}(q, \dot{q}) \dot{q}$, $\mathbf{f}(\dot{q})$ et $\mathbf{g}(q)$ sont respectivement la matrice d'inertie du bras, le vecteur des forces d'inertie d'entraînement et de Coriolis, le vecteur des forces de frottement, et

le vecteur des forces de gravité, tels qu'on les trouve dans le modèle dynamique du bras présenté dans (2.4). Cette commande permet, dans le cas idéal où le modèle dynamique du bras est parfaitement connu, de commander directement les accélérations articulaires :

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{u}(t) \quad (2.9)$$

On peut alors choisir la loi suivante pour faire converger les accélérations angulaires vers la valeur souhaitée :

$$\mathbf{u}(t) = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}} \quad (2.10)$$

qui impose au système la dynamique suivante en boucle fermée :

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = 0 \quad (2.11)$$

Commande robuste

Lorsqu'on connaît le modèle dynamique du bras, il est intéressant d'utiliser la commande *sliding mode*, proposée par Slotine [Slotine et Li, 1991]. Cette stratégie de commande agit en deux étapes : d'une part, elle utilise le modèle dynamique du système pour amener ce dernier dans un état situé sur une surface de glissement, puis toute déviation de l'état du système par rapport à cette surface de glissement est instantanément corrigée en imposant des valeurs de consigne importantes aux actionneurs du système. La surface de glissement sur laquelle on cherche à maintenir le système peut être vue comme l'ensemble des états du système où l'erreur entre l'état désiré et l'état réel du système est nulle. Cette surface, notée σ , est choisie en fonction de la dynamique souhaitée en boucle fermée. Une fois que le système a rejoint la surface de glissement, on a en effet la dynamique définie par $\sigma = 0$. Ainsi, si $\sigma = \tilde{\mathbf{q}} + \lambda \dot{\tilde{\mathbf{q}}}$, on observe une convergence exponentielle du premier ordre vers la valeur désirée. En raison du risque de « *chattering* » (oscillation rapide et discontinue susceptible d'endommager les actionneurs), le terme $\mathbf{K} \text{sign}(\sigma)$ est la plupart du temps remplacé par un terme plus amorti tel que, par exemple, la tangente hyperbolique. L'utilisation de la commande *sliding mode* permet d'obtenir les performances désirées même en présence d'incertitudes dans le modèle du système et de perturbations extérieures.

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{K} \text{sign}(\sigma) \quad (2.12)$$

La commande *sliding mode* est en particulier appliquée à la commande d'un bras manipulateur sous-marin dans l'espace cartésien par [Barbalata et al., 2018]. Les auteurs montrent que ce schéma de commande permet de réduire l'erreur de positionnement ainsi que l'erreur sur les forces d'interaction avec l'environnement par rapport à l'utilisation d'une commande par impédance. Cette comparaison est effectuée expérimentalement sur un bras HDT-MK3-M.

Commande en effort

Pour commander un manipulateur lors de la réalisation d'une tâche impliquant des interactions avec l'environnement, [Raibert et Craig, 1981] ont proposé le schéma de commande hybride force/position. L'idée fondatrice de ce schéma de commande est qu'au cours d'une tâche de manipulation en espace contraint, certains degrés de liberté de la tâche à réaliser doivent être commandés en position tandis que les autres doivent être commandés en effort. On peut prendre l'exemple du carottage de sédiments sur une portion horizontale du fond de l'océan, pour lequel les degrés de liberté correspondants aux déplacements horizontaux du carottier doivent être commandés en position, alors que le degré de liberté correspondant à l'enfoncement du carottier dans le sol doit être commandé en effort afin de ne pas l'endommager en l'écrasant contre un obstacle. Ainsi, la commande hybride force/position combine une commande en effort $\mathbf{f}_{\text{effort}}$ et une commande en position $\mathbf{f}_{\text{position}}$. Une matrice de sélection \mathbf{S} permet de choisir le type de commande pour chaque articulation du robot, ou pour chaque degré de liberté de la tâche à réaliser. L'idée de cette commande est exprimée par (2.13), où \mathbf{I} désigne la matrice identité :

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{S}\mathbf{J}^+(\mathbf{q})\mathbf{f}_{\text{position}} + (\mathbf{I} - \mathbf{S})\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{f}_{\text{effort}} \quad (2.13)$$

Dans [Chiaverini et Sciavicco, 1993], les auteurs montrent qu'il est possible de se passer de matrice de sélection grâce à une approche parallèle et en donnant la priorité à la boucle de commande en effort sur la boucle de commande en position (figure 2.7). Cela permet de réaliser des tâches spécifiant à la fois une consigne en position et en effort, sans faire apparaître d'instabilité en cas de contradiction entre ces deux consignes, ce qui peut arriver si la connaissance de l'état du bras ou de l'environnement est imparfaite. Pour cela, les régulateurs en effort et en position sont placés en parallèle, comme illustré par la figure 2.7. Le régulateur en position est un proportionnel-dérivé avec un terme d'*acceleration feed-forward* ($f_p = M_d \ddot{x}_d + K_v (\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p (x_d - x)$), et le régulateur en effort est un correcteur proportionnel-intégral utilisant l'erreur en effort e_f ($f_f = K_f e_f + K_i \int_0^t e_f d\tau$). Cela impose au système le comportement dynamique suivant :

$$M_d \ddot{e}_p + K_v \dot{e}_p + K_p e_p + K_f e_f + K_i \int_0^t e_f d\tau = 0 \quad (2.14)$$

donc le terme intégral du régulateur en effort permet bien à ce dernier de dominer le régulateur en position lorsque les deux sont en conflit.

La commande par impédance [Hogan, 1984; Fasse et Broenink, 1997] a pour principe de modéliser l'environnement du bras comme une impédance, et d'imposer la relation entre les efforts exercés par le bras sur l'environnement et le mouvement de ce dernier, plutôt que d'imposer explicitement l'effort à exercer par le bras. Cela permet de définir directement le comportement que l'on souhaite donner à l'objet manipulé, et d'obtenir une loi de commande s'adaptant naturellement aux perturbations subies par le bras et

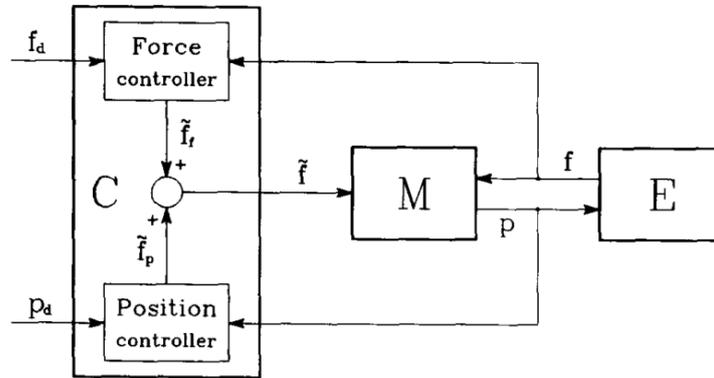


Figure 2.7 – Schéma de principe de la commande hybride force/position proposée par [Chiaverini et Sciavicco, 1993]. Le bloc E représente l’environnement, M le bras manipulateur, et C le calculateur de la commande hybride. (crédit : [Chiaverini et Sciavicco, 1993])

l’objet. De plus, il est possible de définir un comportement différent pour chaque degré de liberté du système, ce qui permet, en choisissant bien le repère de référence dans lequel on exprime la tâche, de spécifier des comportements adaptés en fonction de différents types de tâches. Une expression possible de ce schéma de commande est donnée par (2.15) et exprimée dans l’espace des tâches :

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \left[\mathbf{B}(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) \right] + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) \quad (2.15)$$

Ici, \mathbf{B} et \mathbf{K} sont respectivement les matrices d’amortissement et de raideur du bras, et les effets de la gravité sont compensés par le terme $\mathbf{Q}(\mathbf{q})$.

L’inconvénient majeur des commandes en espace contraint présentées précédemment est, dans notre cas d’application à *Ariane*, qu’elles nécessitent une mesure des efforts exercés par le bras. Cette mesure n’est *a priori* pas envisageable sur les bras d’*Ariane* sans les modifier de manière importante. Nous proposons néanmoins, au le paragraphe 2.4, des systèmes de mesure d’effort au niveau de l’effecteur et leur applicabilité aux bras sous-marins tels que ceux d’*Ariane*.

2.3.3 Stratégies de commande coordonnée d’un système à deux bras

Une part importante des problématiques liées à la manipulation à deux bras, en plus de la commande du système, est la représentation de l’état des deux bras et la formulation de la tâche à réaliser. En effet, plusieurs repères peuvent servir à exprimer les coordonnées des effecteurs et de l’objet, et il faut en trouver un qui simplifie au maximum l’expression à la fois de la tâche, des mouvements et des efforts exercés.

Les travaux de Nakano, Takase, et Fujii [Nakano *et al.*, 1974; Takase *et al.*, 1974; Fujii et Kurono, 1975] sont les premiers ayant pour objectif de manipuler un objet avec plusieurs bras manipulateurs. Leur approche utilise une formulation maître-esclave non symétrique, assignant un rôle différent à chacun des deux bras. En effet, on attribue le rôle de maître à un bras, ce qui signifie qu'il est commandé en position pour contrôler la pose de l'objet manipulé. Le second bras, l'esclave, est commandé en effort pour réguler les forces et moments appliqués à l'objet. Cette méthode a permis à l'époque d'obtenir de bons résultats. Cependant, elle présente l'inconvénient de ne pas être utilisable pour commander les bras avant la saisie d'un objet, puisqu'alors aucun effort n'est mesuré par l'esclave. De plus, il est délicat d'inverser les rôles des bras pendant l'exécution d'une tâche.

Ces travaux préliminaires ont permis de montrer l'intérêt d'utiliser des approches de commande en effort pour limiter les efforts internes subis par les objets manipulés. Ils ont aussi démontré l'importance du choix du repère utilisé pour formuler les tâches à réaliser, afin d'en simplifier l'expression. À l'époque où ont été réalisés ces travaux, la commande d'un bras manipulateur était encore un défi technique non résolu. Il a donc fallu attendre la fin des années 1980 pour que la manipulation à deux bras se développe réellement, après que les lois de commande en espace libre et contraint présentées précédemment eurent été suffisamment étudiées pour un seul bras.

Dans [Uchiyama *et al.*, 1987; Uchiyama et Dauchez, 1988, 1992], les auteurs présentent une formulation symétrique de la commande hybride force/position pour le contrôle coordonné de deux bras. Pour cela, ils étendent cette commande, classique dans le cas du contrôle d'un seul bras, en formulant les expressions du comportement statique et cinématique du système composé des deux bras et de l'objet manipulé, en introduisant le concept des *virtual sticks*. Les *virtual sticks* sont des liens virtuels fixés à l'effecteur de chaque bras et reliant le centre de l'objet manipulé. Leur utilisation a permis de simplifier les expressions de la statique et de la cinématique du système. Ils proposent aussi un système de coordonnées adapté à la formulation du problème, ainsi qu'un unique vecteur d'état composé des vecteurs d'état de chaque bras. Cette méthode est validée avec succès sur un robot *NEC Model-A*.

La formulation du comportement du système présentée dans [Uchiyama et Dauchez, 1992], adaptée à l'implémentation de la commande hybride force/position, ne permet cependant pas d'exprimer simplement les tâches de manipulation. [Chiacchio *et al.*, 1996] propose donc une nouvelle formulation, dans laquelle la description des tâches de manipulation à deux bras est plus aisée et repose sur l'utilisation de coordonnées absolues (la pose du centre de l'objet dans un repère fixe) et de coordonnées relatives (la pose d'un effecteur par rapport à l'autre). Cette solution prend aussi en compte l'éventuelle redondance du système vis-à-vis de la tâche à réaliser. Une validation sur deux bras *PUMA 560* est réalisée.

Les précédentes approches reposent toutes sur l'utilisation des angles d'Euler pour re-

présenter les rotations. Ce formalisme souffre d'un problème de singularité [Hoag, 1963] et donc d'instabilité numérique [Muller *et al.*, 2018]. Pour y remédier, Caccavale propose dans [Caccavale *et al.*, 2000] de représenter les rotations non plus par les angles d'Euler mais par un quaternion. La commande des bras est entièrement formulée avec cette nouvelle représentation, et la stabilité au sens de Lyapunov de cette approche théorique est démontrée.

Par la suite, la représentation de la tâche est encore améliorée par l'utilisation des quaternions duaux dans [Adorno *et al.*, 2010]. Un quaternion dual permet de représenter complètement une pose : cette représentation est donc plus compacte que les matrices de transformation homogène, par exemple, et réduit les temps de calcul. À nouveau, la modélisation et la commande en position du système à deux bras sont reformulées en utilisant uniquement les quaternions duaux. Cette approche basée sur une représentation compacte et sans singularité est validée expérimentalement avec le robot humanoïde *HOAP-3*.

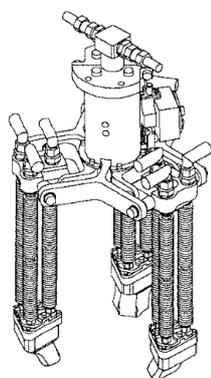
Un inconvénient de la commande hybride force/position est qu'elle peut induire des efforts importants dans l'objet manipulé, à cause d'une connaissance imparfaite des modèles cinématiques des bras. Dans [Caccavale *et al.*, 2008], les auteurs présentent une commande par impédance pour les six degrés de liberté d'un objet manipulé par deux bras afin de résoudre ce problème. Cette commande est composée de deux boucles : une boucle interne pour la commande du mouvement, et une boucle externe utilisant les mesures de force et de couple effectuées par les bras pour réaliser l'impédance désirée. Erhart *et al.* [Erhart *et al.*, 2013] appliquent aussi la commande par impédance pour contrôler plusieurs robots à deux bras manipulant un même objet. Cela leur permet de limiter les efforts que l'objet subit et qui ne participent pas à son déplacement désiré.

Pour compléter ce qui a été présenté dans cette section, on peut se référer à [Kosuge *et Hirata*, 2005; Siciliano *et Khatib*, 2016].

2.4 Préhenseurs pour la manipulation sous-marine

Pour mener à bien une tâche de manipulation, il est commun en robotique terrestre d'adapter une main robotique à la place des pinces des bras. Ces mains ont pour but d'améliorer la qualité de la saisie des objets. Pour cela, les mains possèdent plusieurs doigts à plusieurs degrés de liberté, contrairement aux pinces standards qui possèdent seulement deux mors ; et chaque doigt peut comporter un ou plusieurs capteurs d'efforts. Cependant, les mains utilisées en robotique terrestre ne sont pas adaptées au travail sous-marin, car elles ne sont pas étanches et ne résistent pas nécessairement à des pressions élevées. De ce fait, la quasi totalité des bras présentés précédemment utilisent des pinces à mors dépourvues de capteurs d'effort, faute d'alternative adaptée aux contraintes du monde sous-marin. Afin de combler ce manque, plusieurs projets ont eu pour but au cours des trente

dernières années de concevoir des préhenseurs à mesure d'effort étanches et résistants à la pression.



(a) Le préhenseur



(b) Le système à deux bras

Figure 2.8 – Préhenseur hydraulique à trois doigts et système à deux bras utilisés dans le cadre du projet AMADEUS. Source : [Lane *et al.*, 1997].

Le premier projet notable est le projet AMADEUS [Lane *et al.*, 1999], dont l'objectif était de développer un système complet permettant de manipuler précisément, à deux bras, et à grande profondeur des objets rigides. Ce projet a notamment donné lieu à la conception d'un préhenseur marinisé à trois doigts (fig. 2.8). Le préhenseur développé au cours de ce projet est actionné hydrauliquement et l'extrémité de ses doigts est équipée de capteurs d'efforts et de glissement. Chacun de ses trois doigts est composé de trois soufflets agencés en parallèle (fig. 2.8(a)), dont l'élongation contrôlée par la pression de l'huile située à l'intérieur du soufflet permet de modifier l'orientation et la position de l'extrémité des doigts. Ce principe a permis de manipuler avec succès des objets rigides. Cependant, ce système est encombrant et s'adapte donc difficilement à des engins de petite taille. Il nécessite aussi une adaptation du circuit hydraulique du robot pour permettre l'actionnement des trois soufflets de chacun des trois doigts.

Dans [Qingxin *et al.*, 2006], les auteurs présentent la main HEU II, conçue pour équiper des bras de robots sous-marins. Cette main est faite de trois doigts identiques à trois degrés de liberté placés à 120 degrés les uns des autres. Un capteur d'effort six axes est placé au bout de chaque doigt et permet de mesurer les efforts exercés par les doigts lors de la manipulation d'objets de différentes formes, masses et tailles. Bien qu'elle ait démontré des capacités satisfaisantes en laboratoire, cette main n'a pas été testée en conditions réelles.

Dans le cadre du projet TRIDENT [Bemfica *et al.*, 2013], une main à trois doigts (fig. 2.9) a été adaptée sur un bras manipulateur UMA de GraalTech porté par l'I-AUV *Girona 500*. L'étanchéité de cette main est assurée par une membrane en silicone recouvrant chaque doigt, mais la durabilité de cette membrane semble poser problème pour assurer l'étan-

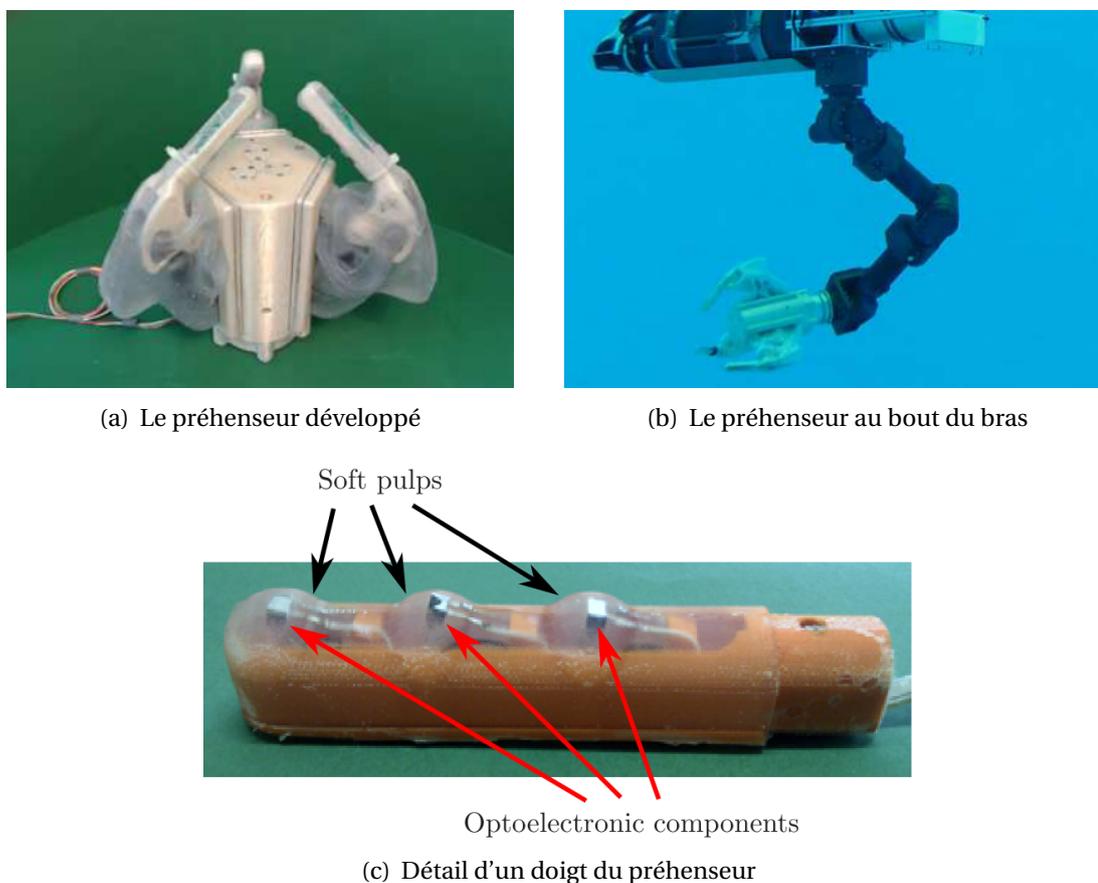
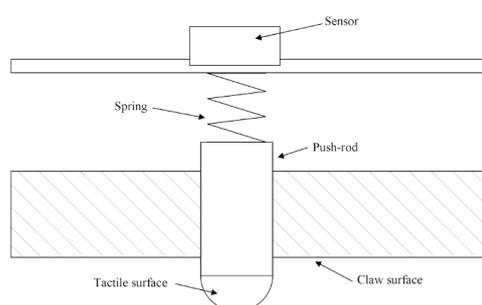


Figure 2.9 – Préhenseur à trois doigts utilisé dans le cadre du projet TRIDENT.
Source : [Bemfica *et al.*, 2013]

chété du système sur le long terme. Les efforts exercés par la main sont mesurés par un capteur *JR3* situé entre le poignet et la main, et chaque doigt possède trois capteurs opto-électroniques permettant de mesurer la force exercée par le doigt sur l'objet saisi.

Afin de limiter l'ampleur des modifications à effectuer sur les bras manipulateurs sous-marins existants pour les équiper de préhenseurs à mesure d'effort, [Kampmann *et al.*, 2015] proposent de nouvelles mâchoires de pince pour remplacer celle existantes ne possédant pas de mesure d'effort (fig. 2.10). Ces mâchoires sont recouvertes de petites tiges repoussées vers l'extérieur par un ressort, et dont l'extrémité située à l'intérieur de la mâchoire est équipée d'un aimant permanent. Lorsque les mâchoires sont en contact avec un objet, les tiges touchées par l'objet se déplacent vers l'intérieur de la mâchoire et des capteurs à effet Hall mesurent ce déplacement, qui est ensuite interprété comme une force de contact. Le principal avantage de cette approche est de simplement remplacer les mâchoires existantes en conservant le reste du bras ; mais aussi de conserver la géométrie des



(a) Détail d'une tige de mesure ponctuelle de l'effort exercé



(b) Vue d'ensemble des pinces à mesure d'effort développées

Figure 2.10 – Préhenseur exploitant des capteurs à effet Hall. Source : [Kampmann et Kirchner, 2015; Kampmann *et al.*, 2015].

mâchoires, ce qui laisse la possibilité d'utiliser les outils habituels munis d'une poignée en T. Cependant, les capteurs à effet Hall sont sensibles aux champs magnétiques parasites qui peuvent fausser la mesure ; et la complexité mécanique et électronique de ces nouvelles mâchoires peut avoir une influence négative sur leur fiabilité.



(a) Version à quatre doigts de la main



(b) Version à trois doigts de la main

Figure 2.11 – Préhenseur développé pour *OceanOne*, avec des doigts aspirant l'eau pour favoriser la saisie d'objets. Source : [Stuart *et al.*, 2015]

Pour équiper le robot humanoïde sous-marin *OceanOne*, des mains compliantes sous-actionnées (fig. 2.11) ont été développées [Stuart *et al.*, 2017]. Ces mains comportent trois ou quatre doigts suivant les versions, et un unique moteur permet d'actionner toute la main. Des ressorts ont été placés sur la partie supérieure des doigts pour leur permettre de s'ouvrir naturellement, et la raideur des différentes parties de chaque doigt a été choisie

pour que les doigts se ferment de manière optimale vis-à-vis de l'objectif de saisie d'un objet. L'extrémité des doigts de ces mains ont la particularité d'aspirer l'eau lors de la saisie d'un objet, afin de maximiser les chances de succès de l'opération et d'augmenter le coefficient de frottement une fois l'objet saisi. L'efficacité de cette main est très dépendante de la configuration et du nombre de ses doigts ; et son intégration n'est pas anodine, car la simplicité de l'actionnement est contrebalancée par la complexité relative du système d'aspiration. Elles peuvent néanmoins être utilisées sans aspiration.

La volonté de mesurer les efforts d'interaction avec l'environnement pour la manipulation sous-marine ne se limite pas aux efforts exercés par l'organe terminal des bras. Les participants au projet ROBOSKIN [Muscolo et Cannata, 2015] s'intéressent en effet au développement d'une peau artificielle pouvant mesurer les forces d'interaction entre un bras sous-marin et son environnement. Cette peau artificielle est constituée d'éléments de base fabriqués à partir d'un matériau diélectrique placé entre deux électrodes. Ces éléments de base ont une forme triangulaire et mesurent 24 mm de long. Lorsqu'un tel élément est en contact avec l'environnement, la couche diélectrique est compressée, ce qui modifie la capacité électrique de l'élément. Cette variation est mesurée et convertie en signal numérique pour être interprétée en termes de force de contact. L'agrégation de plusieurs de ces éléments permet de constituer ce que les auteurs appellent une peau artificielle. Cette solution n'a pas encore été testée en conditions réelles, et comme d'autres approches citées précédemment, son emploi au sein d'un système déjà existant suppose de lourdes modifications préalables.

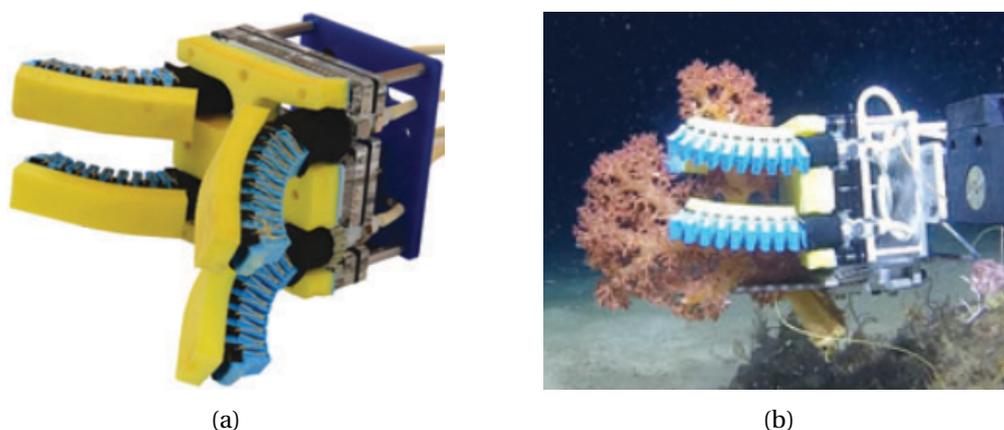


Figure 2.12 – Préhenseur souple. Source : [Galloway *et al.*, 2016]

Enfin, les développements les plus récents tirent partie des matériaux souples ; c'est notamment le cas des travaux présentés dans [Galloway *et al.*, 2016] (fig. 2.12). Dans cet article, une pince souple est présentée : elle se compose de quatre doigts flexibles, fabriqués en polymère flexible moulé. Ces doigts ne sont pas instrumentés, cependant, une loi

reliant la pression du fluide actionnant les doigts à la force exercée par ces doigts sur l'objet saisi a été déterminée expérimentalement. Le fonctionnement de cette pince a été validé au cours d'une douzaine de plongées à des profondeurs comprises entre 100 et 170 m.

Tous ces systèmes sont relativement complexes et ont un inconvénient principal, qui est que la main n'est pas détachable du bras pendant une mission. Il n'est donc pas possible de s'adapter rapidement à différentes tâches de manipulation, et en particulier il n'est pas possible de se servir des outils classiquement utilisés pour l'exploration sous-marine, tels que les carottiers ou les aspirateurs à faune munis d'une poignée en forme de T.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux bras manipulateurs sous-marins utilisables à ce jour, qu'ils soient disponibles à la vente ou développés par des instituts de recherche. Nous avons présenté des méthodes permettant de modéliser leur comportement cinématique et dynamique, et des schémas de commande adaptés à une utilisation en espace libre ou en espace contraint. De plus, nous avons évoqué les principales stratégies de commande d'un système à deux bras. Enfin, nous avons présenté les principaux préhenseurs développés pour tenter de résoudre le problème de la manipulation fine par un robot sous-marin.

Grâce à cela, il apparaît qu'il n'existe pas encore de solution complète et versatile pour la manipulation d'objets fragiles par un robot sous-marin. Dans la suite, nous allons donc présenter les deux contributions de cette thèse, qui ont pour objectif de contribuer à l'élaboration d'une telle solution.

3

Modélisation des bras du HROV *Ariane*

Sommaire

3.1	Introduction	58
3.2	Modélisation cinématique	59
3.3	Étalonnage expérimental des paramètres cinématiques	62
3.4	Modélisation dynamique	70
3.5	Estimation expérimentale des paramètres dynamiques	76
3.6	Conclusion	81

Ce chapitre présente la première contribution de cette thèse, à savoir la modélisation cinématique et dynamique des bras d'*Ariane* et l'identification expérimentale de l'ensemble des paramètres des modèles obtenus. La méthode proposée s'applique au cas spécifique des bras actionnés de manière hétérogène, à savoir les bras dont le comportement cinématique et dynamique des actionneurs est fondamentalement différent d'une articulation à l'autre. En effet, nous montrons comment estimer les paramètres des modèles bras lorsque certaines de leurs articulations pivot sont directement actionnées par des motoréducteurs, alors que d'autres sont actionnées par des actionneurs linéaires. Un ensemble minimal de paramètres identifiables est déterminé et des trajectoires d'excitation adéquates sont générées et utilisées pour identifier l'ensemble des paramètres des modèles. La validation expérimentale en temps-réel sur les bras manipulateurs du véhicule sous-marin *Ariane* d'Ifremer démontre que la méthode proposée est adaptée au type de bras considérés, et que les modèles obtenus sont plus précis que ceux obtenus sans considérer ces différences au niveau de l'actionnement des bras.

3.1 Introduction

La plupart des bras manipulateurs électriques utilisés pour la manipulation autonome ont des articulations directement actionnées par un motoréducteur, ou par l'intermédiaire d'une courroie. Dans les deux cas, on peut écrire pour l'articulation la relation suivante exprimant le couple articulaire τ en fonction du courant d'entrée u du moteur [Kelly *et al.*, 2006; Siciliano *et al.*, 2009] :

$$\tau = B u \quad (3.1)$$

Le facteur constant B regroupe la constante de couple du moteur, le rapport de réduction du réducteur, et s'il y a lieu, le rapport de réduction de la courroie. Une relation similaire exprime la vitesse de rotation \dot{q} de l'articulation en fonction de la vitesse de rotation \dot{q}_m du moteur et du rapport de réduction de l'actionneur K :

$$\dot{q} = K \dot{q}_m \quad (3.2)$$

Cependant, les bras manipulateurs sous-marins électriques développés par ECA (voir le tableau 2.2) utilisés dans le cadre de cette thèse sont équipés d'articulations pivots actionnées par des vérins linéaires. Par conséquent, les relations (3.1) et (3.2) sont fausses pour ces bras, car le gain de conversion entre le courant d'entrée du moteur électrique et le couple articulaire devient fonction non-linéaire de la position articulaire, tout comme le rapport de réduction de l'actionneur :

$$\begin{cases} \dot{q} = K(q) \dot{q}_m \\ \tau = B(q) u \end{cases} \quad (3.3)$$

Il est donc nécessaire, d'une part, d'établir le modèle cinématique de ce type d'actionneurs, afin d'enrichir le modèle cinématique classique d'un bras série ; d'autre part de modéliser leur dynamique, pour deux raisons principales :

- les frottements induits par cette chaîne d'actionnement sont importants par rapport aux frottements de l'articulation elle-même, au point qu'ils ne peuvent pas être négligés ;
- les mouvements de l'actionneur modifient le centre de gravité et l'inertie du lien sur lequel il est fixé, ce qui doit être pris en compte pour assurer une bonne description du comportement dynamique global du bras.

La modélisation cinématique et dynamique de ces actionneurs fait l'objet des sections suivantes. On s'intéresse ensuite à l'identification des paramètres de ces deux modèles, premièrement en déterminant l'ensemble des paramètres effectivement identifiables, puis en proposant des méthodes permettant d'identifier la valeur de ces paramètres en pratique.

3.2 Modélisation cinématique

La modélisation cinématique des bras manipulateurs série a été largement traitée, comme on a pu le voir dans le chapitre 2. Cependant, l'actionnement des articulations pouvant être très différent d'un robot à l'autre, les méthodes classiques permettant d'établir le modèle cinématique d'une chaîne série s'intéressent à la relation liant les mouvements des liens de la chaîne à ceux de ses articulations. Il est évident que ce modèle ne permet pas de travailler correctement avec le bras en pratique, et qu'il faut le compléter avec le modèle de ses actionneurs. Pour un grand nombre de robot terrestres, ces actionneurs ont un modèle linéaire [Kelly *et al.*, 2006], mais certains robots possèdent des actionneurs plus complexes, ce qui est le cas des bras d'*Ariane*. Ces actionneurs, décrits par la figure 3.1 avec les notations du tableau 3.1, fonctionnent de la manière suivante : un motoréducteur entraîne une vis à billes pour faire varier la longueur d'un vérin. Une extrémité du vérin est fixée au corps \mathcal{C}_{i-1} du bras et l'autre extrémité au corps \mathcal{C}_i , donc la variation de la longueur du vérin permet de faire varier la i ème coordonnée angulaire du bras. Cette section présente la modélisation cinématique de ces actionneurs, afin de compléter le modèle cinématique de la chaîne série obtenu par des méthodes classiques.

3.2.1 Modélisation des actionneurs

La modélisation des actionneurs des bras d'*Ariane* a pour but d'exprimer pour chacun d'eux la relation liant la position q_m et la vitesse \dot{q}_m du moteur d'une part à la position q et la vitesse \dot{q} de l'articulation relative à l'actionneur considéré d'autre part.

Tableau 3.1 – Notations utilisées dans ce chapitre

Variable	Description	Unité
ℓ_1	longueur entre l'axe de rotation de l'articulation et le point d'attache du vérin électrique sur \mathcal{C}_{i-1}	m
ℓ_2	longueur entre l'axe de rotation de l'articulation et le point d'attache du vérin électrique sur \mathcal{C}_i	m
q_m	coordonnée relative à l'arbre du moteur	inc
q_p	longueur du vérin électrique	m
q_j	coordonnée articulaire de l'actionneur	rad
α	angle entre la direction de F_{BS} et l'axe principal de \mathcal{C}_i	rad
F_{BS}	force exercée par le vérin sur \mathcal{C}_i	N

Cas des actionneurs indirects

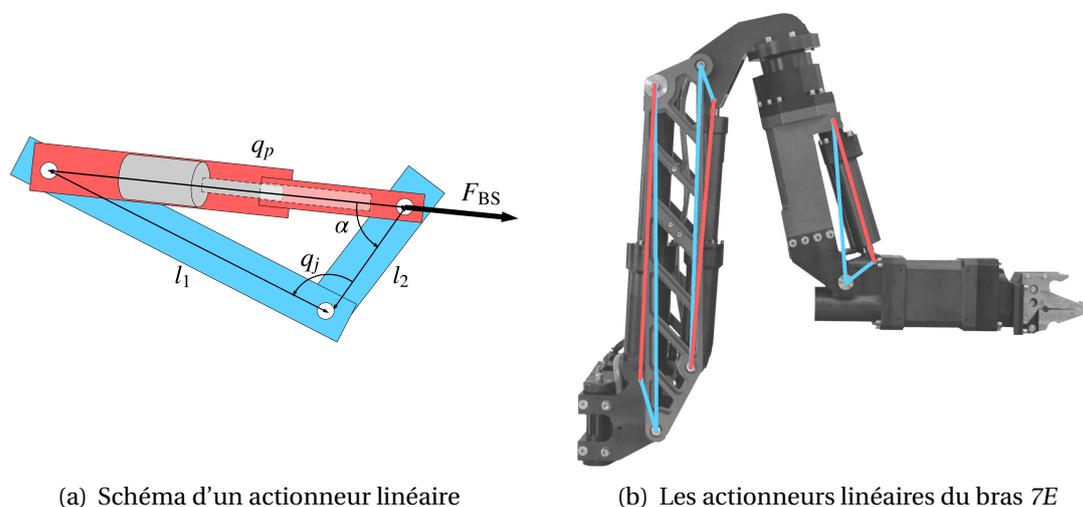


Figure 3.1 – Schéma simplifié d'un actionneur linéaire équipant la plupart des articulations d'*Ariane*, et le placement de ce type d'actionneurs sur le bras 7E d'ECA Group.

Pour modéliser les actionneurs linéaires représentatifs des bras d'*Ariane* (figure 3.1), notre approche consiste à exprimer séparément la relation entre l'entrée et la sortie de chaque étage de la chaîne d'actionnement, en utilisant les notations du tableau 3.1. Ces étages sont les suivants :

1. la conversion de la rotation du moteur en translation du vérin
2. la conversion de la translation du vérin en rotation de l'articulation
3. le changement de convention entre l'angle de rotation interne à l'articulation et le formalisme de Denavit-Hartenberg modifié.

Une fois la relation exprimée pour chaque étage, l'expression de la relation entre la rotation du moteur et la rotation de l'articulation est triviale. Pour le premier étage de conversion, la longueur q_p du vérin électrique en fonction de la coordonnée q_m est donnée par

$$q_p = \frac{q_{p_{\max}} - q_{p_{\min}}}{q_{m_{\max}} - q_{m_{\min}}} (q_m - q_{m_{\min}}) + q_{p_{\min}} \quad (3.4)$$

avec les notations suivantes :

- $q_{p_{\max}}$ et $q_{p_{\min}}$ sont les longueurs maximale et minimale du vérin électrique, mesurées sur l'actionneur ;
- $q_{m_{\max}}$ et $q_{m_{\min}}$, exprimées en pas de moteur (incrément), sont les valeurs données par les variateurs lorsque le vérin électrique est respectivement totalement sorti et totalement rentré.

Ensuite, la coordonnée q_j en fonction de la longueur q_p du vérin est donnée par

$$q_j = \arccos \frac{\ell_1^2 + \ell_2^2 - q_p^2}{2\ell_1\ell_2} \quad (3.5)$$

où ℓ_1 et ℓ_2 sont les longueurs respectives des premier et second entraxes de l'actionneur, comme indiqué sur la figure 3.1. Enfin, la coordonnée articulaire q en fonction de q_j est donnée par

$$q = \text{rev } q_j + q_0 \quad (3.6)$$

en notant

$\text{rev} \in \{-1, 1\}$, l'indication d'une inversion de sens d'évolution entre q_j et q ,
 q_0 , le décalage angulaire entre q_j et q .

L'équation (3.6) permet d'exprimer la coordonnée angulaire dans le formalisme de Denavit-Hartenverg modifié. En regroupant (3.4), (3.5) et (3.6), on obtient l'expression de la coordonnée articulaire q en fonction de la coordonnée moteur q_m . On obtient les expressions de $\dot{q}(q_m, \dot{q}_m)$ et $\ddot{q}(q_m, \dot{q}_m, \ddot{q}_m)$ par dérivation temporelle de $q(q_m)$.

Pour écrire le modèle inverse, il suffit de faire le même travail en écrivant chaque relation de la sortie vers l'entrée :

$$\begin{cases} q_m &= \frac{q_{m\max} - q_{m\min}}{q_{p\max} - q_{p\min}} (q_p - q_{p\min}) + q_{m\min} \\ q_p &= \sqrt{\ell_1^2 + \ell_2^2 - 2\ell_1\ell_2 \cos q_j} \\ q_j &= \text{rev}(q - q_0) \end{cases} \quad (3.7)$$

De même, on obtient les expressions $\dot{q}_m(q, \dot{q})$ et $\ddot{q}_m(q, \dot{q}, \ddot{q})$ par dérivation temporelle de $q_m(q)$.

Cas des actionneurs directs

Pour modéliser les actionneurs composés simplement d'un motoréducteur directement couplé avec l'articulation, nous avons besoin de connaître l'amplitude angulaire de l'articulation, représentée par les deux paramètres q_{\min} et q_{\max} . L'expression de la coordonnée angulaire $q(q_m)$ est alors directement donnée par

$$q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{m\max} - q_{m\min}} (q_m - q_{m\min}) + q_{\min} \quad (3.8)$$

Comme pour les actionneurs indirects, on obtient par simple dérivée temporelle les expressions de $\dot{q}(\dot{q}_m)$ et $\ddot{q}(\ddot{q}_m)$. Et à nouveau, le modèle inverse s'écrit :

$$q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{m\max} - q_{m\min}} (q_m - q_{m\min}) + q_{\min} \quad (3.9)$$

et on obtient par dérivation temporelle les expressions de $\dot{q}_m(\dot{q})$ et $\ddot{q}_m(\ddot{q})$.

3.2.2 Augmentation du modèle cinématique d'un bras série

L'expression du modèle complet du bras, tenant compte de la cinématique de ses actionneurs, s'obtient en complétant avec les expressions déterminées précédemment le modèle cinématique classique d'un bras série obtenu par des méthodes de l'état de l'art [Khalil et Dombre, 2002a] :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}(\mathbf{q}_m)) \dot{\mathbf{q}}(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m) \quad (3.10)$$

Le vecteur \mathbf{q} (respectivement $\dot{\mathbf{q}}$) est défini en choisissant, pour chaque élément, l'expression de $q(\mathbf{q}_m)$ (resp. $\dot{q}(\dot{\mathbf{q}}_m)$ ou $\dot{q}(\mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m)$) adaptée en fonction de la nature de l'actionneur associé à l'articulation considérée. On ajoute que le modèle inverse peut être calculé ainsi :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_m &= \dot{\mathbf{q}}_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ &= \dot{\mathbf{q}}_m\left(\mathbf{q}, \mathbf{J}^+(\mathbf{q}(\mathbf{q}_m)) \dot{\mathbf{X}}\right) \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.3 Étalonnage expérimental des paramètres cinématiques

Une fois l'expression générale du modèle d'un bras obtenu, il est nécessaire de déterminer la valeur numérique de chaque paramètre du modèle afin de pouvoir exploiter ce dernier. Nous nous intéressons ici uniquement à l'étalonnage des paramètres introduits lors de la modélisation cinématique des actionneurs. Ce jeu de paramètres est composé de huit éléments ($\ell_1, \ell_2, q_{p_{\max}}, q_{p_{\min}}, q_{m_{\max}}, q_{m_{\min}}, \text{rev}, q_0$) dont il faut déterminer la valeur avec précision pour décrire le comportement spécifique de chaque actionneur. La valeur des paramètres $\{q_{m_{\max}}, q_{m_{\min}}, \text{rev}, q_0\}$ est simplement lue ou mesurée directement sur le bras. En revanche, il n'est pas possible de faire de même pour les paramètres $\{\ell_1, \ell_2, q_{p_{\max}}, q_{p_{\min}}\}$ car leur mesure directe est délicate et trop peu précise. Pour déterminer leur valeur, nous proposons d'utiliser une méthode d'optimisation ajustant la valeur de chaque paramètre pour minimiser l'erreur entre le déplacement mesuré et le déplacement estimé de l'élément du bras actionné.

La mise en place de cette méthode suit trois étapes :

1. choix d'une trajectoire d'excitation de l'articulation
2. suivi de la trajectoire d'excitation et enregistrement de :
 - la coordonnée moteur q_m , donnée par le variateur

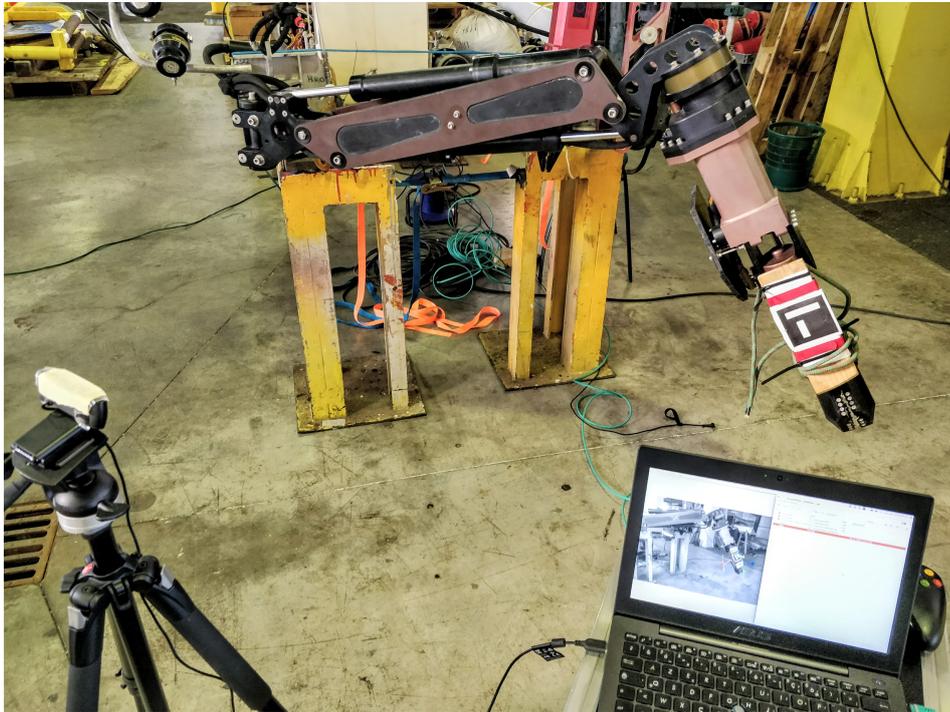


Figure 3.2 – Montage expérimental utilisé pour acquérir les données alimentant l’algorithme d’optimisation des paramètres cinématiques du modèle du bras.

— la coordonnée articulaire réelle q , obtenue par mesure extéroceptive

3. minimisation de l’erreur d’estimation de la coordonnée angulaire en ajustant la valeur des paramètres du jeu $\zeta = \left[\ell_1, \ell_2, q_{p_{\min}}, q_{p_{\max}} \right]$

Pour le choix de la trajectoire d’excitation, nous avons considéré qu’il fallait au moins parcourir toute la gamme angulaire de fonctionnement, dans les deux sens d’évolution pour compenser les jeux mécaniques et autres hystérésis ; et pour moyenner un éventuel bruit sur les mesures, nous avons choisi de répéter cet aller-retour au moins deux fois. Concernant l’enregistrement de la coordonnée moteur q_m , cela se fait par simple lecture de la donnée retournée par le variateur. En revanche pour mesurer directement la coordonnée articulaire q , nous avons choisi d’utiliser un système de vision par ordinateur exploitant la bibliothèque ArUco [Garrido-Jurado *et al.*, 2014, 2016; Romero-Ramirez *et al.*, 2018] et les marqueurs optiques associés, dont on peut voir un exemplaire positionné au bout du bras sur la figure 3.2. ArUco présente les avantages d’être rapide à mettre en œuvre, compatible avec ROS, rapide à l’exécution, et robuste dans les conditions où nous l’utilisons.

Afin de ne pas introduire d’erreur à cause d’une mauvaise estimation du paramètre q_0 intervenant dans le modèle de l’actionneur, nous choisissons de nous baser sur la vitesse de rotation de l’articulation plutôt que sur sa position pour comparer notre estimation

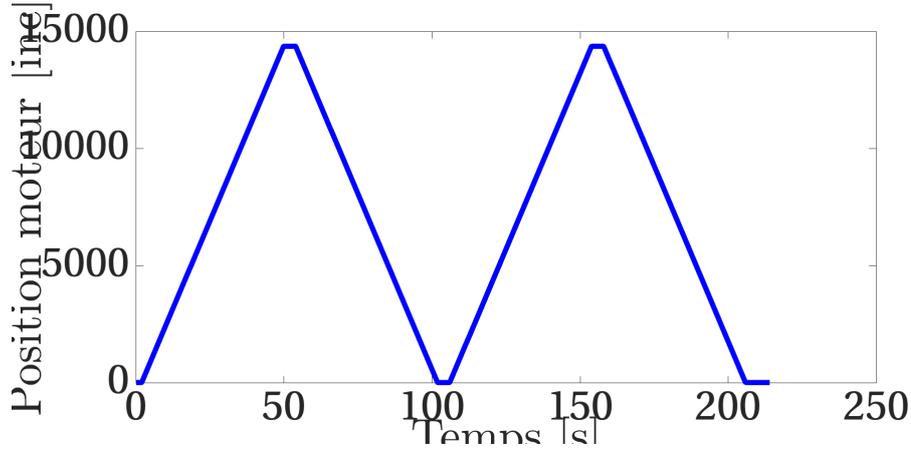


Figure 3.3 – Coordonnée moteur q_m enregistrée lors du suivi de la trajectoire d'excitation par l'articulation 2 du bras 7E d'Ariane.

avec la vérité terrain. Le problème d'optimisation à résoudre s'exprime donc ainsi :

$$\min_{\zeta} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{q}_{\zeta}(i) - \dot{q}(i))^2}, \quad \zeta = [\ell_1, \ell_2, q_{p_{\min}}, q_{p_{\max}}] \quad (3.12)$$

Dans cette expression, $\hat{q}_{\zeta}(i)$ représente la vitesse articulaire à l'instant i estimée en utilisant les valeurs du jeu de paramètres cinématiques ζ . De plus, $\dot{q}(i)$ est la vitesse articulaire obtenue en dérivant par rapport au temps la position articulaire donnée par le système de vision. Nous définissons les contraintes suivantes à partir du jeu de paramètres $\zeta_0 = [\ell_1^0, \ell_2^0, q_{p_{\min}}^0, q_{p_{\max}}^0]$ mesurées sur l'actionneur et de la marge d'ajustement ε que l'on laisse à l'algorithme :

$$\begin{cases} |\ell_1 - \ell_1^0| & \leq \varepsilon \\ |\ell_2 - \ell_2^0| & \leq \varepsilon \\ |q_{p_{\min}} - q_{p_{\min}}^0| & \leq \varepsilon \\ |q_{p_{\max}} - q_{p_{\max}}^0| & \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3.13)$$

Ces contraintes permettent de garantir la cohérence physique des valeurs des paramètres obtenues après l'optimisation, la valeur de ε étant de quelques millimètres. Le problème ainsi défini est résolu grâce à l'algorithme de minimisation *active-set* de la boîte à outils *constr* proposée par MATLAB[®], en initialisant la résolution avec un jeu de valeurs ζ_0 mesurées sur l'actionneur.

Les résultats obtenus pour l'optimisation des paramètres cinématiques des actionneurs du bras 5E d'Ariane sont présentés par les figures 3.5, 3.6, 3.7 et par les tableaux 3.2 et 3.3. La numérotation des actionneurs utilisée pour la présentation de ces résultats est

donnée par la figure 3.4. Les résultats d'optimisation des actionneurs du bras 7E d'Ariane sont quant à eux présentés en annexe A, page 107. On trouve parmi ces résultats une mesure de l'amélioration obtenue en termes de précision de l'estimation de la coordonnée angulaire des articulations : cette amélioration est donnée pour faciliter l'évaluation des résultats, mais dépend de la justesse du jeu de paramètres cinématiques original. On obtient donc une amélioration plus faible sur certaines articulations, pour lesquelles on avait mieux estimé les paramètres avant la phase d'optimisation. Mais en général, on remarque que la phase d'optimisation permet d'atteindre une erreur quadratique moyenne sensiblement identique pour toutes les articulations. Dans la mesure où l'erreur d'estimation de la coordonnée angulaire de chaque articulation est réduite à la suite de l'optimisation des paramètres cinématiques des actionneurs, ces résultats montrent la validité des modèles proposés, et surtout l'intérêt que l'on a à appliquer cette méthode d'optimisation pour déterminer les paramètres cinématiques des actionneurs ; cela en complément d'une mesure expérimentale directe, nécessairement entachée d'erreur. On note toutefois qu'à l'issue du processus d'optimisation, l'erreur d'estimation de la position du bras, bien que réduite, n'est pas nulle. Cela peut s'expliquer par la présence de jeux mécaniques non modélisés, et par le fait que l'on utilise un modèle géométrique standard pour étalonner la caméra, ce qui ne permet pas de corriger parfaitement les distorsions du système optique. Enfin, les pics observables sur les courbes d'erreur d'estimation de la position et de la vitesse des articulations sont dus au passage de 0 à 2π de la position angulaire et à l'arrivée en butée mécanique des articulations. Le traitement de ces phénomènes est complexe, car le fait que la mesure de position angulaire de référence soit bruitée provoque plusieurs passages très rapides de 0 à 2π autour de la position où ce changement se fait réellement, et rendent délicate la détection automatique de l'arrivée en butée.

Tableau 3.2 – Valeurs numériques des paramètres cinématiques des actionneurs du bras 5E d'Ariane obtenues après optimisation.

Articulation	ℓ_1 [m]	ℓ_2 [m]	$q_{p_{\min}}$ [m]	$q_{p_{\max}}$ [m]
1	0.32236	0.0384	0.28664	0.35337
2	0.0531	0.5361	0.51	0.58068
3	0.49061	0.034	0.4579	0.52004

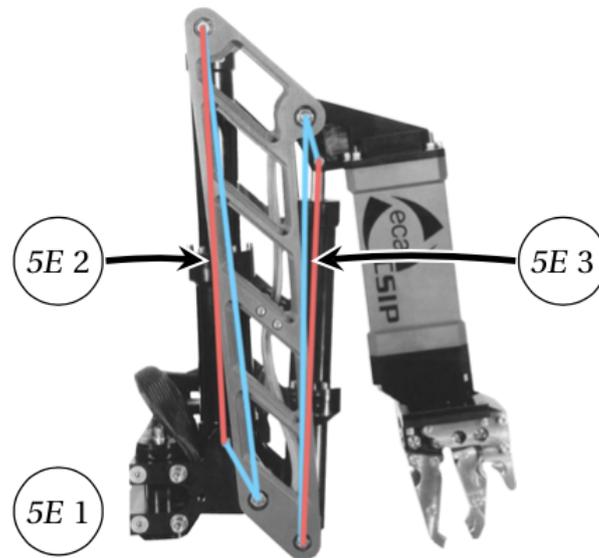
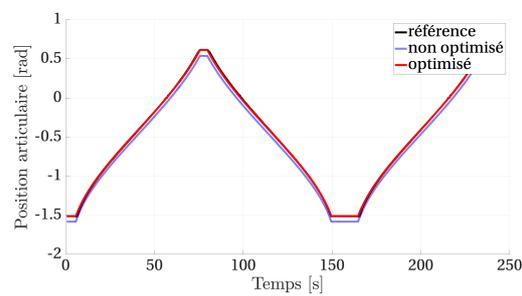


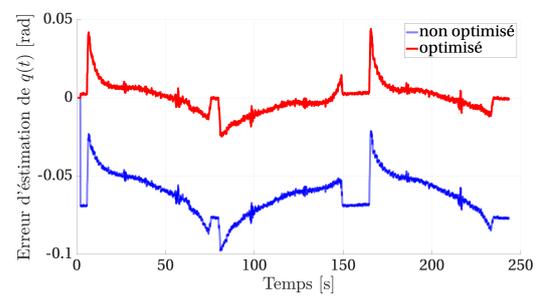
Figure 3.4 – Numérotation des actionneurs sur le bras 5E d'Ariane.

Tableau 3.3 – Comparaison entre l'erreur quadratique moyenne d'estimation de la position articulaire avant et après l'optimisation des paramètres des actionneurs du bras 5E d'Ariane.

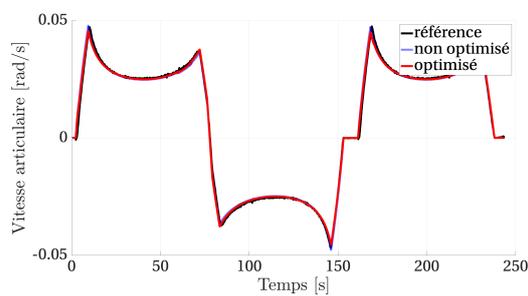
Articulation	RMSE originale [rad]	RMSE optimisée [rad]	amélioration [%]
1	0.0633	0.009	85.5
2	0.172	0.005	96.9
3	0.022	0.01	55.2



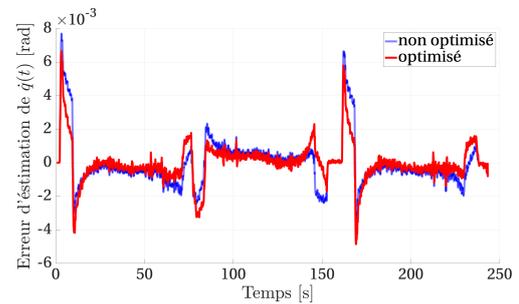
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position



(c) Vitesse articulaire



(d) Erreur d'estimation de la vitesse

Figure 3.5 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 1 du bras 5E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.

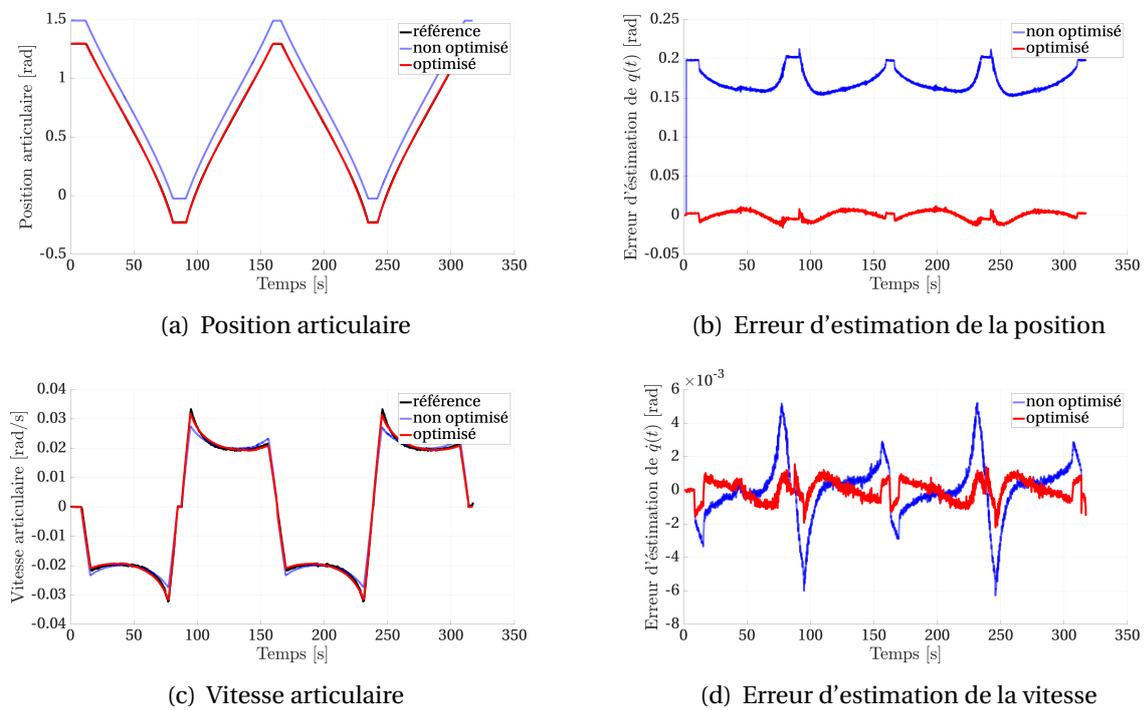
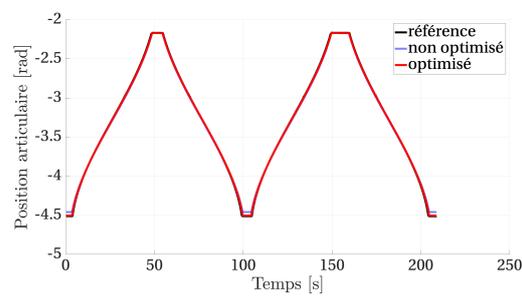
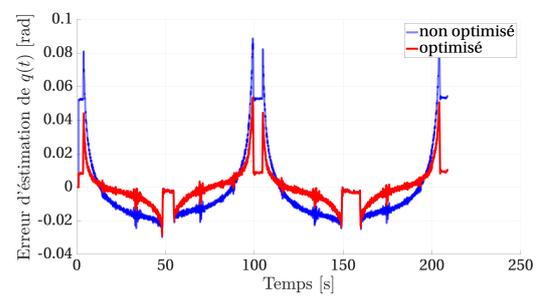


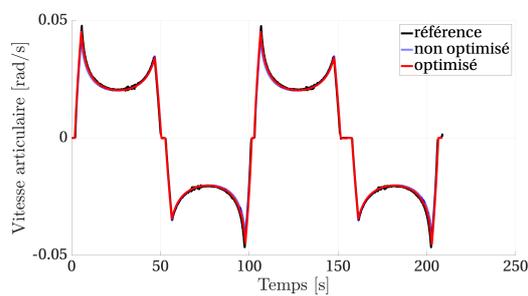
Figure 3.6 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 2 du bras 5E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.



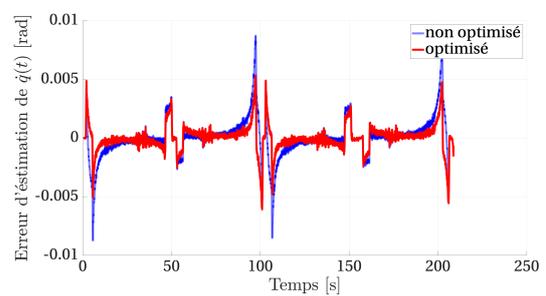
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position



(c) Vitesse articulaire



(d) Erreur d'estimation de la vitesse

Figure 3.7 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 3 du bras 5E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.

3.4 Modélisation dynamique

3.4.1 Modèle dynamique inverse

L'objectif de cette partie est de déterminer le modèle dynamique inverse d'un bras actionné de manière hétérogène, en prenant en compte la dynamique des actionneurs de ce bras. Autrement dit, nous souhaitons détailler l'expression des couples articulaires $\boldsymbol{\tau}$ dans le modèle dynamique inverse classique, donné par la première ligne de (3.14) [Spong *et al.*, 2004b], et l'adapter au cas où la conversion entre le courant d'alimentation du moteur et le couple articulaire est non-linéaire, c'est-à-dire du type $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}(\mathbf{q}) \mathbf{u}$:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}(\mathbf{q}) \mathbf{u} \end{cases} \quad (3.14)$$

Dans 3.14 et dans la suite, \mathbf{u} représente les courants électriques alimentant chaque moteur. La modélisation dynamique d'un bras série en partant des couples articulaires ayant déjà été traitée largement dans la littérature (voir le chapitre 2 page 35), nous nous intéressons dans cette partie à l'étude de la seconde ligne de (3.14). Pour cela, il faut distinguer deux types d'actionneurs : les actionneurs classiques et les actionneurs linéaires utilisés pour actionner des articulations pivot.

Modèle dynamique des actionneurs classiques

En ce qui concerne les actionneurs classiques, c'est-à-dire les actionneurs composés d'un motoréducteur actionnant l'articulation soit directement, soit par l'intermédiaire d'une courroie, le couple appliqué à l'articulation est, à un gain constant près, le couple τ_m produit en sortie du motoréducteur. La modélisation dynamique de tels actionneurs a déjà été étudiée dans [Kelly *et al.*, 2006] par exemple, et on connaît donc l'expression suivante :

$$\tau_m = k_T u - r^2 \left(J_m \ddot{q}_m + f_{v_m} \dot{q}_m + f_{s_m} \operatorname{sgn}(\dot{q}_m) \right) \quad (3.15)$$

dans laquelle u [A] est le courant d'entrée du moteur, k_T [Nm/A] est la constante de couple du moteur, r est le rapport de réduction du réducteur, \dot{q}_m [rad/s] est la vitesse angulaire de l'arbre du moteur, \ddot{q}_m est l'accélération angulaire de ce dernier, et J_m , f_{v_m} et f_{s_m} sont respectivement l'inertie de rotation, le coefficient de frottement fluide et le coefficient de frottement sec du motoréducteur.

Modèle dynamique des actionneurs linéaires

Dans le cas des actionneurs particuliers qui équipent la plupart des articulations des bras d'*Ariane*, la rotation des motoréducteurs est transformée de manière non-linéaire en

rotation de l'articulation, comme détaillé dans la partie précédente traitant du modèle cinématique du bras. De plus, les étages d'actionnement supplémentaires apportent tous une inertie et des frottements additionnels, que l'on cherche à modéliser. Pour cela, nous modélisons séparément chaque étage d'actionnement, et pour chacun d'entre eux nous procédons comme suit :

- premièrement, nous écrivons l'équation basique du sous-système
- ensuite, nous ajoutons les forces d'inertie
- enfin, nous ajoutons les forces de frottement statique et visqueux.

Pour la vis à billes, la force F_{BS} appliquée par l'actionneur linéaire sur le corps \mathcal{C}_i du bras s'exprime de la façon suivante :

$$F_{BS} = \frac{2\pi}{p} \tau_m - I_{BS} \ddot{q}_p - f_{sBS} \operatorname{sgn}(\dot{q}_p) - f_{vBS} \dot{q}_p \quad (3.16)$$

La vis à billes, de pas p , convertit le couple τ_m produit par le motoréducteur en une force avec un gain de conversion de $\frac{2\pi}{p}$. On note I_{BS} l'inertie de translation, f_{sBS} le coefficient de frottement sec, f_{vBS} le coefficient de frottement fluide, \dot{q}_p la vitesse linéaire de la vis à billes, et \ddot{q}_p son accélération linéaire. On remarque que la vis à bille possède aussi des éléments en mouvement de rotation, et une inertie et des frottements liés à ce mouvement de rotation devraient donc apparaître dans 3.16. Cependant, la vis à billes étant directement entraînée par le moteur, nous considérons que ces trois paramètres peuvent être pris en compte dans l'équation de fonctionnement du moteur, ce qui permet en même temps de simplifier l'équation de fonctionnement de la vis à billes.

Le bras de levier convertit la force F_{BS} de la vis à billes en un couple τ_l , multiplié par un gain non-linéaire fonction de la coordonnée angulaire q . Ce couple τ_l est ensuite appliqué à l'articulation :

$$\tau_l = \ell_2 \sin(\alpha) F_{BS} \quad (3.17)$$

Dans cette équation, nous utilisons l'angle α (voir figure 3.1) pour simplifier l'expression. Il n'y a pas de force d'inertie ou de frottement à prendre en compte ici, car ces forces sont déjà considérées au niveau des articulations dans le modèle classique d'un bras manipulateur.

En fusionnant (3.15), (3.16) et (3.17), on peut exprimer le modèle dynamique de l'actionneur linéaire sous la forme :

$$\tau_l = k^L(q_m) u - m_{eq}^L(q_m, \ddot{q}_m) - f_{eq}^L(q_m, \dot{q}_m) \quad (3.18)$$

en définissant les termes suivants :

$$\begin{aligned}
k^L(q_m) &= \frac{2\pi}{p} k_T \ell_2 \sin(\alpha) \\
m_{eq}^L(q_m, \ddot{q}_m) &= \ell_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 J_m + \frac{p}{2\pi} I_{BS} \right) \sin(\alpha) \ddot{q}_m \\
f_{eq}^L(q_m, \dot{q}_m) &= \ell_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 f_{v_m} + \frac{p}{2\pi} f_{v_p} \right) \sin(\alpha) \dot{q}_m \\
&\quad + \ell_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 f_{s_m} + \frac{p}{2\pi} f_{s_p} \right) \sin(\alpha) \operatorname{sgn}(\dot{q}_m)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

où l'exposant L fait référence à une articulation actionnée par un actionneur linéaire.

Modèle dynamique inverse des bras et de leurs actionneurs

L'expression du modèle dynamique d'un bras manipulateur, en considérant les couples articulaires comme entrées du système, est connu et rappelé par (3.14). Afin d'obtenir l'expression de ce modèle en considérant les courants d'alimentation des moteurs comme entrées du système, nous devons remplacer $\boldsymbol{\tau}$ par son expression détaillée. Si l'articulation j est actionnée directement, alors $\tau_j = \tau_m$, avec l'expression donnée par (3.15). Sinon, l'articulation est actionnée par un vérin électrique et $\tau_j = \tau_l$, avec l'expression donnée par (3.18). Afin de respecter la cohérence du modèle, nous exprimons, pour chaque articulation, la coordonnée moteur q_m en fonction de la coordonnée articulaire correspondante q à l'aide des relations données dans le paragraphe 3.2.1 page 59. Ensuite, nous utilisons cette expression pour écrire le modèle de chaque actionneur par rapport aux coordonnées articulaires. Le modèle des actionneurs étant linéaire en \ddot{q} , il est possible de réécrire $\boldsymbol{\tau}$, de (3.14), sous la forme suivante :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}(\mathbf{q}) \mathbf{u} - \mathbf{M}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{N}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \tag{3.20}$$

où $\mathbf{K}(\mathbf{q})$ est une matrice diagonale, avec pour éléments diagonaux :

$$\mathbf{K}_{j,j}(\mathbf{q}) = \begin{cases} k_T^j & \text{si l'actionneur } j \text{ est rotatif} \\ \frac{2\pi}{p^j} k_T^j \ell_2^j & \text{si l'actionneur } j \text{ est linéaire} \end{cases} \tag{3.21}$$

et $\mathbf{M}_{\text{actuators}}$ et $\mathbf{N}_{\text{actuators}}$ sont définis à partir des équations (3.15) et (3.19) tels que :

$$\begin{aligned}
\left(\mathbf{M}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} \right)_i &= \begin{cases} r^2 J_m q_m(q) & \text{si l'actionneur } j \text{ est rotatif} \\ m_{eq}^L(q_m(q), \ddot{q}_m(q, \dot{q}, \ddot{q})) & \text{si l'actionneur } j \text{ est linéaire} \end{cases} \\
\mathbf{N}_{\text{actuators},j} &= \begin{cases} r^2 [f_{v_m} \dot{q}_m + f_{s_m} \operatorname{sgn}(\dot{q}_m)] & \text{si l'actionneur } j \text{ est rotatif} \\ f_{eq}^L(q_m(q), \dot{q}_m(q, \dot{q})) & \text{si l'actionneur } j \text{ est linéaire} \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Ainsi, le modèle d'un bras manipulateur incluant la dynamique de ses actionneurs s'exprime sous la forme suivante :

$$\mathbf{K}(\mathbf{q}) \mathbf{u} = \mathbf{M}^*(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.23)$$

en définissant \mathbf{M}^* et \mathbf{N}^* à partir de \mathbf{M} et \mathbf{N} de l'équation (3.14) :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^*(\mathbf{q}) &= \mathbf{M}(\mathbf{q}) + \mathbf{M}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{N}^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Dans (3.23) et dans ce qui suit, l'exposant \star fait référence à des objets issus des modèles classiques, mais incluant le modèle des actionneurs présenté dans cette section.

3.4.2 Détermination des paramètres de base du modèle dynamique

Le modèle dynamique dont on vient déterminer l'expression comporte des paramètres dynamiques dont il faut estimer la valeur numérique pour représenter le système réel. Cependant, seulement certains de ces paramètres peuvent effectivement être estimés : ce sont les paramètres de base, qui forment le plus petit ensemble de paramètres dynamiques requis pour représenter totalement la dynamique du système [Gautier et Khalil, 1988]. Pour déterminer cet ensemble, notre méthode consiste à obtenir les paramètres de base du modèle classique d'un bras à l'aide de méthodes de l'état de l'art [Khalil et Dombre, 2002b], puis à déterminer l'ensemble des paramètres de base du modèle dynamique d'un actionneur comme nous allons le présenter dans la suite. Enfin, l'ensemble des paramètres de base du système complet s'obtient par l'union des deux ensembles de paramètres suscités.

Paramètres de base du modèle d'un actionneur direct

Dans (3.15), on remarque facilement que l'ensemble (J_m, f_{v_m}, f_{s_m}) est minimum, puisqu'il n'existe pas de relation linéaire entre $\ddot{q}_m(t)$, $\dot{q}_m(t)$, et $\text{sgn}(\dot{q}_m(t))$. De ce fait, tous les paramètres utilisés pour modéliser les actionneurs directs sont identifiables.

Paramètres de base du modèle d'un actionneur indirect

De manière générale, il est possible de générer une trajectoire $q(t)$ telle qu'il n'existe pas de relation linéaire entre $\ddot{q}(t)$, $\dot{q}(t)$, et $\text{sgn}(\dot{q}(t))$. Donc l'inertie, le coefficient de frottement statique et celui de frottement visqueux sont identifiables séparément. En revanche, une relation affine existe entre $q_m(t)$ et $q_p(t)$. Cette relation est $q_m(t) = p q_p(t) - q_{p_{\min}}$, avec p le pas de la vis à billes. Par conséquent, une relation linéaire existe entre $\ddot{q}_m(t)$ et $\ddot{q}_p(t)$, $\dot{q}_m(t)$ et $\dot{q}_p(t)$, et $\text{sgn}(\dot{q}_m(t))$ et $\text{sgn}(\dot{q}_p(t))$. C'est pour cela que dans (3.18), $\ddot{q}_m(t)$ est factorisé, ce qui signifie que les inerties du motoréducteur et de la vis à billes ne peuvent

pas être découplées et par conséquent, ne peuvent pas être identifiées séparément. Ces deux inerties sont donc regroupées au sein d'un même paramètre J_{actuator} :

$$J_{\text{actuator}} = l_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 J_m + \frac{p}{2\pi} I_{\text{BS}} \right) \quad (3.25)$$

De manière similaire, on définit $f_{s_{\text{actuator}}}$ et $f_{v_{\text{actuator}}}$ comme :

$$\begin{aligned} f_{s_{\text{actuator}}} &= l_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 f_{s_m} + \frac{p}{2\pi} f_{s_p} \right) \\ f_{v_{\text{actuator}}} &= l_2 \left(\frac{2\pi}{p} r^2 f_{v_m} + \frac{p}{2\pi} f_{v_p} \right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Paramètres de base du modèle complet

Chaque type d'actionneur peut être représenté par un ensemble de trois paramètres dynamiques : une inertie, un coefficient de frottement visqueux, et un coefficient de frottement sec. De plus, les paramètres de différents actionneurs sont identifiables séparément, puisqu'il n'existe pas de couplage entre ces différents actionneurs. En prenant l'union des ensembles de paramètres de chaque actionneur et du modèle classique du bras, on obtient donc l'ensemble minimum des paramètres identifiables du modèle dynamique augmenté.

3.4.3 Modèle dynamique d'identification et trajectoire d'excitation

Afin de déterminer la valeur numérique des paramètres du modèle, il est nécessaire de réécrire ce dernier pour faire apparaître sa linéarité par rapport aux paramètres dynamiques. Notre approche se base sur les travaux présentés dans [Gautier, 1992] en ce qui concerne l'identification, et dans [Swevers *et al.*, 1997] pour la génération de trajectoires d'excitation du système.

Reformulation du modèle dynamique

Grâce à [Gautier et Khalil, 1990; Mayeda *et al.*, 1990], on sait que le modèle dynamique d'un bras manipulateur série peut s'exprimer sous la forme $\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\tau}$, où $\boldsymbol{\theta}$ est le vecteur colonne des paramètres dynamiques du modèle, et Φ est le régresseur associé à $\boldsymbol{\theta}$. Pour adapter cette expression à notre cas où la dynamique des actionneurs est prise en compte, nous remplaçons $\boldsymbol{\tau}$ par son expression donnée dans (3.20) :

$$\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\theta} + \mathbf{M}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}_{\text{actuators}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{K}(\mathbf{q}) \mathbf{u} \quad (3.27)$$

Avec (3.15) et (3.18), on remarque que le modèle de l'actionneur est linéaire par rapport à ses paramètres dynamiques, donc il existe un régresseur $\Phi_{\text{actuators}}$ et un vecteur de

paramètres dynamiques $\theta_{\text{actuators}}$ tels que (3.27) puisse être réécrite ainsi :

$$\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \theta + \Phi_{\text{actuators}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \theta_{\text{actuators}} = \mathbf{K}(\mathbf{q}) \mathbf{u} \quad (3.28)$$

Cela signifie que l'on peut définir le régresseur Φ^* et le vecteur colonne θ^* des paramètres dynamiques du modèle tels que :

$$\begin{aligned} \Phi^* &= \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{q}) [\Phi, \Phi_{\text{actuators}}] \\ \theta^* &= [\theta^T, \theta_{\text{actuators}}^T]^T \end{aligned} \quad (3.29)$$

afin que le modèle dynamique d'identification d'un bras manipulateur et des ses actionneurs devienne :

$$\Phi^*(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \theta^* = \mathbf{u} \quad (3.30)$$

où \mathbf{u} est le vecteur colonne des courants électriques alimentant les moteurs. On remarque que $\mathbf{K}(\mathbf{q})$ est inversible par construction, comme expliqué dans (3.21).

Génération d'une trajectoire d'excitation

Afin de maximiser la robustesse de l'estimation des paramètres dynamiques, nous enregistrons l'état du bras lors du suivi d'une trajectoire d'excitation et nous utilisons les données recueillies pour créer le système $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \theta^* = \mathbf{b}$, où

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} \Phi^*(\mathbf{q}(0), \dot{\mathbf{q}}(0), \ddot{\mathbf{q}}(0)) \\ \vdots \\ \Phi^*(\mathbf{q}(N), \dot{\mathbf{q}}(N), \ddot{\mathbf{q}}(N)) \end{bmatrix} \\ \mathbf{b} &= [\mathbf{u}(0) \cdots \mathbf{u}(N)]^T \end{aligned} \quad (3.31)$$

Il est important de bien choisir la trajectoire d'excitation $(\mathbf{q}_r(t), \dot{\mathbf{q}}_r(t), \ddot{\mathbf{q}}_r(t))$, afin d'obtenir une matrice $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ qui permettra une bonne estimation des paramètres. Pour cela, nous calculons hors-ligne une trajectoire d'excitation, avec comme objectif de minimiser la condition de la matrice d'observation $\mathbf{F}(\mathbf{q}_r(t), \dot{\mathbf{q}}_r(t), \ddot{\mathbf{q}}_r(t))$, ce qui aura pour conséquence de minimiser l'influence des erreurs de mesure sur le résultat final. Pour pouvoir déterminer des trajectoires d'excitation conditionnant correctement la matrice d'observation \mathbf{F} , nous paramétrons ces trajectoires sous la forme de séries de Fourier :

$$q_r^j(t) = \sum_{k=1}^{N^j} \left[\frac{a_k^j}{\omega^j k} \sin(\omega^j k t) - \frac{b_k^j}{\omega^j k} \cos(\omega^j k t) \right] + q_0^j \quad (3.32)$$

Dans cette expression, l'exposant j fait référence à l'articulation j du bras. Pour le bras complet, nous avons donc n trajectoires à générer, et les variables du problème d'optimisation de la trajectoire sont donc les suivants :

$$\mathbf{x} = \left[\omega^1, \dots, \omega^n, \mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^n, \mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^n \right] \quad (3.33)$$

Cela signifie que l'on peut avoir un nombre d'harmoniques, une pulsation et des amplitudes différents pour chaque articulation. Finalement, le problème d'optimisation et ses contraintes, qui permettent de respecter les limitations mécaniques du bras, s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & \text{cond}(\mathbf{F}_x) \\ \text{s. c.} \quad & \begin{cases} \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q}(k) \leq \mathbf{q}_{\max} & \forall k \in \mathbb{Z} \\ |\dot{\mathbf{q}}(k)| < \dot{\mathbf{q}}_{\max} & \forall k \in \mathbb{Z} \\ |\ddot{\mathbf{q}}(k)| < \ddot{\mathbf{q}}_{\max} & \forall k \in \mathbb{Z} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.34)$$

où $\text{cond}(\mathbf{F}_x)$ désigne le conditionnement de la matrice \mathbf{F}_x , défini à partir des deux valeurs singulières extrêmes de \mathbf{F}_x : $\text{cond}(\mathbf{F}_x) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$.

3.5 Estimation expérimentale des paramètres dynamiques

Dans cette partie, nous déterminons la valeur des paramètres dynamiques du modèle des bras d'*Ariane* tels qu'exprimés dans ce qui précède. Les caractéristiques mécaniques de ces bras sont rappelées dans le tableau 3.4. De plus, nous rappelons, dans les

Tableau 3.4 – Caractéristiques mécaniques des deux bras d'*Ariane*.

	DDL ¹	Levage (kg)	Extension (cm)	Profondeur (m)	Poids (kg)
ECA 5E	4+1	25	100	6 000	18,5
ECA 7E	6+1	40	179	6 000	49

tableaux 3.5 et 3.6, les paramètres cinématiques des ces bras, en accord avec le formalisme de Denavit-Hartenberg modifié [Khalil et Kleinfinger, 1986]. Dans ces deux tableaux, les noms des variables sont ceux communément utilisés avec ce formalisme, mais ne doivent pas être confondus avec d'autres variables précédemment définies.

Dans le cas du bras 5E d'*Ariane*, seuls les trois premiers degrés de liberté sont considérés dans cette validation. En effet, nous n'avons pas de moyen de connaître la coordonnée

1. nombre de degrés de liberté

Tableau 3.5 – Paramètres cinématiques du bras gauche d’Ariane à quatre degrés de liberté.

Articulation	d [m]	r [m]	α [rad]	ℓ_1 [m]	ℓ_2 [m]
1	0	0	0	0,323	0,058
2	0,116	0	$\frac{\pi}{2}$	0,073	0,537
3	0,443	0	0	0,489	0,054
4	-0,1	0,436	$-\frac{\pi}{2}$	-	-

Tableau 3.6 – Paramètres cinématiques du bras droit d’Ariane à six degrés de liberté.

Articulation	d [m]	r [m]	α [rad]	ℓ_1 [m]	ℓ_2 [m]
1	0	0	0	0,323	0,063
2	0,18	0	$\frac{\pi}{2}$	0,099	0,641
3	0,685	0	0	0,616	0,068
4	-0,17	0,488	$-\frac{\pi}{2}$	-	-
5	0,02	0	$\frac{\pi}{2}$	0,306	0,058
6	-0,042	0,3	$-\frac{\pi}{2}$	-	-

angulaire du quatrième degré de liberté, correspondant à la rotation continue de la pince, car le caractère continu de cette rotation empêche de prendre une position fixe comme référence. Cette articulation reste donc bloquée pendant toute la durée de la validation expérimentale.

3.5.1 Expression du modèle dynamique pour l’identification

En pratique, nous calculons le modèle dynamique pour l’identification du bras à l’aide d’OpenSymoro, et nous le complétons avec le modèle dynamique des actionneurs, obtenu à l’aide de la boîte à outils `symbolic` de MATLAB®. Nous obtenons ainsi la matrice Φ^* du bras et de ses actionneurs, comme présenté par l’équation (3.29).

3.5.2 Calcul et suivi d'une trajectoire d'excitation de référence

La trajectoire d'excitation de référence est calculée en suivant la méthode proposée par [Swevers *et al.*, 1997]. Le nombre de degrés de liberté n du bras est 3, le nombre N d'harmoniques pour chaque trajectoire est fixé à 5, car cela offre un compromis viable entre le temps de calcul de la trajectoire et son potentiel d'excitation du système. Les contraintes du problème d'optimisation sont définies pour chaque articulation, et présentées dans le tableau 3.7. Comme nous pouvons commander directement la vitesse des moteurs, nous choisissons de calculer la trajectoire d'excitation dans l'espace des coordonnées moteur, afin de réduire la complexité des calculs effectués en ligne. Cela signifie que la trajectoire $q(t)$ générée représente un nombre d'incrément moteur comptés à partir d'une position de référence. Pour cette raison, nous donnons les contraintes du problème d'optimisation en termes d'incrément moteurs. Cela est d'autant plus pertinent que ces contraintes visent notamment à respecter les limitations physiques des moteurs. Cependant, pour faciliter l'interprétation de ces contraintes, nous donnons aussi leur équivalent dans l'espace des coordonnées articulaires généralisées, dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 – Contraintes utilisées pour le calcul d'une trajectoire d'excitation du bras 5E d'Ariane

	Articulation 1	Articulation 2	Articulation 3
q_m [inc]	[0;20850]	[0;6810]	[0;26750]
$\dot{q}_{m,\max}$ [inc/s]	2 000	600	2 000
$\ddot{q}_{m,\max}$ [inc/s ²]	20 000	6 000	20 000
q [°]	[-90;32]	[7;94]	[110;244]
\dot{q}_{\max} [°/s]	28	9	25

Le calcul de la trajectoire est effectué avec la boîte à outils de MATLAB[®] `constr`, en utilisant l'algorithme *interior-point* [Waltz *et al.*, 2006]. À cause de l'existence de nombreux minima locaux, l'algorithme est initialisé avec des valeurs aléatoires jusqu'à ce qu'il converge vers une solution dont le critère atteint une valeur inférieure à une valeur arbitrairement choisie. Une fois qu'une trajectoire d'excitation satisfaisante est obtenue, elle est utilisée comme trajectoire de référence pour le système réel. Un exemple de ces trajectoires satisfaisantes est donné par la figure 3.8.

Pour suivre cette trajectoire de référence, chaque articulation du bras est commandée par deux régulateurs PI (Proportionnel Intégral). Un premier régule le courant envoyé aux moteurs pour respecter une vitesse de consigne, et le deuxième régule la vitesse cible pour respecter une position de référence. Le premier PI est implémenté dans le variateur ELMO

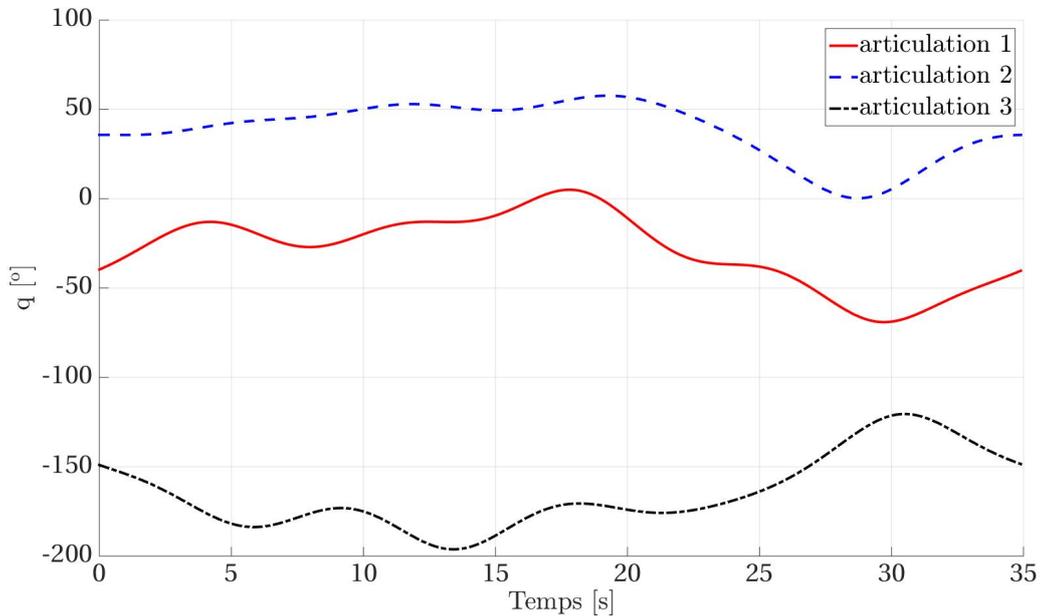


Figure 3.8 – Une trajectoire d’excitation pour le bras 5E d’Ariane satisfaisant les contraintes du tableau 3.7

Whistle[®] pilotant le moteur, tandis que le second est implémenté dans un nœud ROS. Pendant le suivi de la trajectoire de référence, les données de courant et position de chaque moteur sont enregistrées. Ces données proviennent directement des variateurs, et sont datées par ces derniers, ce qui évite tout problème lié aux contraintes temps-réel.

3.5.3 Identification des paramètres dynamiques

Les données enregistrées pendant le suivi de la trajectoire sont traitées avec MATLAB[®] pour créer la matrice d’observation \mathbf{F} et le vecteur \mathbf{b} des courants d’entrée des moteurs, comme présenté dans (3.31). Le vecteur $\hat{\boldsymbol{\theta}}^*$ des paramètres dynamiques estimés est obtenu en résolvant le système $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\theta}^* = \mathbf{b}$ par la méthode des moindres carrés :

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^* = \mathbf{F}^+ (\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \mathbf{b} \quad (3.35)$$

où \mathbf{F}^+ est la matrice pseudo-inverse de Moore-Penrose.

3.5.4 Validation du modèle et de ses paramètres dynamiques

Afin de valider l’estimation des paramètres dynamiques, nous utilisons ces paramètres dans le modèle dynamique pour estimer les courants $\hat{\mathbf{b}}$ d’alimentation des moteurs néces-

saies au suivi d'une trajectoire de validation par le système :

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \hat{\boldsymbol{\theta}}^* \quad (3.36)$$

Nous comparons ensuite l'estimation $\hat{\mathbf{b}}$ aux courants \mathbf{b} réellement fournis au système lors du suivi de la trajectoire de validation.

La position enregistrée est filtrée afin de supprimer le bruit de mesure, en utilisant un filtre de Butterworth d'ordre trois et de fréquence de coupure normalisée 0,1. Le courant enregistré n'est en revanche pas filtré, car son filtrage affecterait l'observabilité de l'effet du frottement sec. Les courants estimés obtenus pour la validation des paramètres dynamiques du modèle du bras 5E sont présentés et comparés aux courants réellement utilisés sur la figure 3.9.

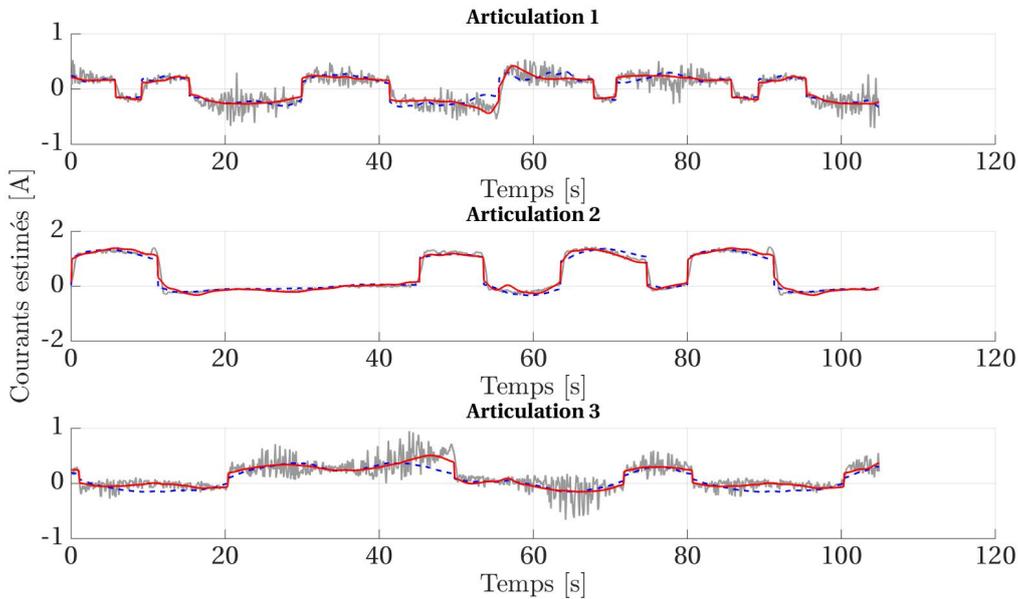


Figure 3.9 – Estimation des courants d'alimentation des moteurs. Les courants réels (trait gris) sont comparés aux courants d'alimentation estimés par le modèle du bras ne prenant pas en compte les actionneurs (pointillés bleus) et prenant en compte les actionneurs (trait rouge).

Afin de comparer quantitativement les deux modèles, nous calculons l'erreur quadratique moyenne d'estimation des courants d'alimentation des moteurs pour chaque articulation considérée :

$$\text{RMSE}(\hat{\mathbf{b}}) = \sqrt{\mathbf{E}\left(\left(\hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b}\right)^2\right)} \quad (3.37)$$

La valeur de l'erreur quadratique moyenne est donnée par le tableau 3.8.

Tableau 3.8 – Erreur quadratique moyenne d'estimation des courants d'alimentation des moteurs lors du suivi de la trajectoire de validation.

	Articulation 1	Articulation 2	Articulation 3
sans les actionneurs [A]	0,129	0,154	0,152
avec les actionneurs [A]	0,117	0,128	0,122
amélioration [%]	9,80	16,8	19,9

La figure 3.9 et le tableau 3.8 montrent que la prise en compte du modèle des actionneurs dans le modèle dynamique des bras manipulateurs d'*Ariane* améliorent notablement la précision de l'estimation de l'état des bras. Cependant, cette amélioration n'est pas aussi bonne qu'attendu au regard des résultats de simulation. Deux raisons principales, liées au matériel utilisé, permettent d'expliquer cela :

- la mesure du courant d'alimentation des moteurs est bruitée, mais surtout, les régulateurs intégrés aux variateurs utilisés ne fournissent pas un courant suffisamment stable. Ainsi, la mesure que l'on fait de l'état des bras ne reflète pas correctement les oscillations permanente des courants d'alimentation, qui sont filtrées par la mécanique du système et ne sont donc pas observables ;
- des phénomènes non modélisés, de jeu mécanique notamment, affectent l'observabilité du comportement du bras pendant de courtes périodes.

Par conséquent, il n'est pas possible de relier parfaitement le courant mesuré au comportement réel du bras. Nous remarquons aussi la différence d'erreur quadratique moyenne pour l'articulation 1 d'une part, et pour les articulations 2 et 3 d'autre part. Cela est dû au fait que l'articulation 1 est verticale, alors que les articulations 2 et 3 sont horizontales. De ce fait, seules ces deux dernières subissent les effets de la gravité, ce qui a pour conséquence une plus grande erreur statique.

3.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une méthode originale permettant de modéliser un bras manipulateur actionné de façon hétérogène, en nous attachant sur la modélisation d'actionneurs linéaires utilisés pour l'actionnement de liaisons pivots.

Nous avons tout d'abord exprimé le modèle cinématique du bras. Pour cela, nous avons modélisé le comportement cinématique de ses actionneurs et proposé une méthode pour optimiser la valeur des paramètres du modèle obtenu en accord avec une vérité terrain.

Nous avons ensuite inclus le modèle des actionneurs dans le modèle cinématique classique d'un bras.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au modèle dynamique du bras. À nouveau, nous avons modélisé le comportement dynamique de ses actionneurs. Nous avons ensuite regroupé certains paramètres du modèle obtenu, afin de déterminer un ensemble minimal de paramètres dynamiques permettant de représenter complètement le système, tout en restant identifiables expérimentalement. Nous avons montré comment inclure le modèle des actionneurs dans le modèle dynamique classique du bras. Cela nous a ensuite permis de proposer une méthode d'identification des paramètres dynamiques du modèle complet du bras.

En appliquant aux bras d'*Ariane* les méthodes proposées, nous avons significativement amélioré la connaissance de leur état, tant au niveau cinématique que dynamique. Les modèles exprimés et identifiés dans cette partie ont pour objectif d'être utilisés dans la simulation, la commande, et l'étude des tâches réalisables par les bras d'*Ariane*, avec pour ambition d'augmenter le degré d'automatisation des tâches de manipulation sous-marine.

4

Manipulation à deux bras à l'aide d'outils compliants

Sommaire

4.1	Introduction	84
4.2	Conception d'outils de préhension compliants	84
4.3	Caractérisation du comportement de l'outil piston	90
4.4	Essais de l'outil piston sur le HROV <i>Ariane</i>	93
4.5	Manipulation à deux bras avec l'outil piston	98
4.6	Conclusion	101

La compliance, en robotique, est la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple, à s'adapter à son environnement durant une tâche d'intervention. Ce type de comportement favorise le succès des tâches de manipulation d'objets fragiles et déformables, car les imprécisions de commande des bras, quelles que soient leurs raisons, sont compensées par la compliance du manipulateur. Cependant, la majorité des bras utilisés par les engins sous-marins actuels ne possèdent pas cette capacité, et sont donc mal adaptés à l'exécution de tâches de manipulation sous-marine d'échantillons fragiles, tels que des organismes vivants ou des artefacts archéologiques. Nous proposons dans cette partie de nouveaux outils compliants, adaptés aux contraintes du monde sous-marin et aux caractéristiques des bras actuels, pour augmenter les capacités de manipulation des engins sous-marins.

4.1 Introduction

Dans le chapitre d'état de l'art, nous avons présenté plusieurs outils de préhension pour la manipulation sous-marine. Parmi ces outils, certains sont hydrauliques et ne permettent pas de contrôler l'effort de serrage. D'autres sont très complexes, ce qui implique un coût de mise en œuvre important et une moindre fiabilité ; enfin, la plupart sont solidaires du bras et ne peuvent donc pas être utilisés en tant qu'outils interchangeable en cours de mission. L'interchangeabilité en cours de mission, ainsi que la simplicité de l'outil, qui permet de garantir sa fiabilité, sont deux critères importants pour qu'un outil puisse être utilisé par le HROV *Ariane*. En effet, les missions d'*Ariane* ont des objectifs multiples qui nécessitent l'utilisation de plusieurs outils différents au cours d'une même plongée. Nous avons donc conçu deux outils compliants, saisissables par la pince, et mesurant les efforts d'interaction entre les bras et leur environnement. Ces outils sont présentés dans ce chapitre, de leur conception à leur mise en œuvre sur *Ariane* pour la manipulation d'objets à deux bras.

4.2 Conception d'outils de préhension compliants

On distingue deux types de compliances en robotique : la compli-ance passive, qui est due aux propriétés d'élasticité des matériaux utilisés pour la fabrication du robot, et la compli-ance active, qui est due à la manière dont est commandé le robot. La commande par impédance, présentée dans l'état de l'art (chapitre 2), est un exemple de commande permettant de donner un comportement compliant à un robot. Ici, nous présentons des outils apportant de la compli-ance passive à la chaîne cinématique, et nous nous servons de la mesure d'effort fournie par ces outils pour commander le robot et donner de la compli-ance active à la chaîne cinématique.

Ces deux outils de préhension sont conçus selon des approches sensiblement différentes, mais ils répondent tous deux aux besoins suivants :

1. apporter de la compli-ance passive dans la chaîne cinématique pour compenser les erreurs de positionnement du bras,
2. fournir une mesure des efforts d'interaction de la pince avec son environnement pour permettre la commande en effort des bras (compli-ance active),
3. posséder une poignée de saisie en forme de T, dite « T-bar », pour être compatible avec les pinces standards des bras électriques sous-marins.

4.2.1 Conception de l'outil « englobant »

Le premier outil proposé est dit englobant, dans le sens où il s'agit d'une baudruche en caoutchouc souple épousant la forme de l'objet manipulé. Cette baudruche est fixée sur

une plaque de métal, terminée par un T-bar compatible avec les pinces d'*Ariane*, comme illustré sur la figure 4.1. À travers cette plaque de métal, on fait passer un raccord hydrau-

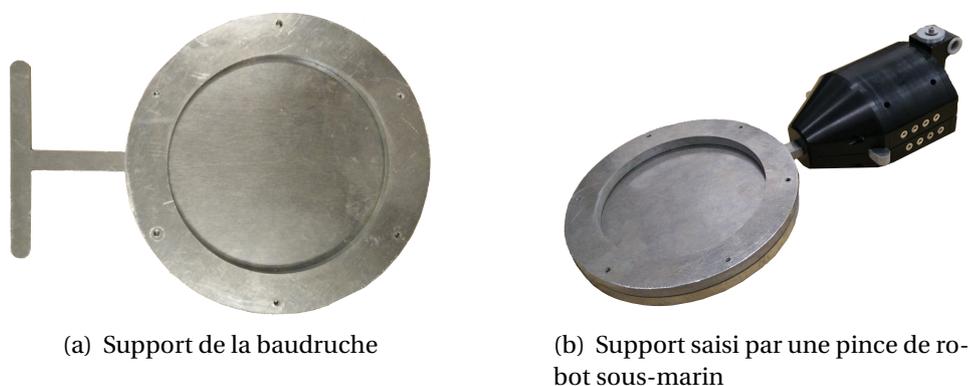


Figure 4.1 – Support de l'outil englobant.

lique pour remplir la boudruche d'huile, ainsi qu'une vanne de décharge. On installe aussi un capteur de pression mesurant la pression d'huile à l'intérieur de la boudruche. Ces trois éléments sont visibles sur la figure 4.2. Lors de la saisie d'un objet, la force de contact dé-

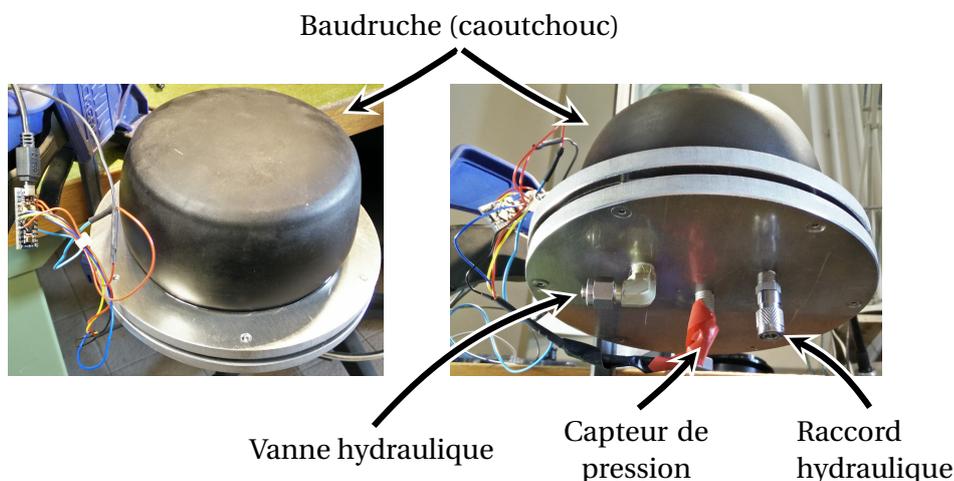


Figure 4.2 – Outil englobant rempli d'huile.

forme la boudruche tout en faisant augmenter la pression à l'intérieur de cette dernière. Cette élévation de pression est mesurée par le capteur de pression, et interprétée en termes de force de contact.

La figure 4.3 montre l'évolution de la valeur de la pression à l'intérieur de l'outil en fonction du temps, pendant un test du fonctionnement de l'outil. Au cours de ce test, l'outil est

orienté comme sur la figure 4.2 : la plaque métallique est à l'horizontale, et la boudruche est orientée vers le haut. La pression mesurée dans l'outil est d'abord de 1 173 mbar, ce qui correspond à la pression de l'outil en l'absence de contact. On pose ensuite un récipient sur l'outil, et la pression augmente jusqu'à 1 185 mbar. Ce récipient est ensuite progressivement rempli d'un litre d'eau, ce qui fait augmenter la pression jusqu'à 1 193 mbar, puis on retire le récipient de l'outil et la pression revient à sa valeur initiale.

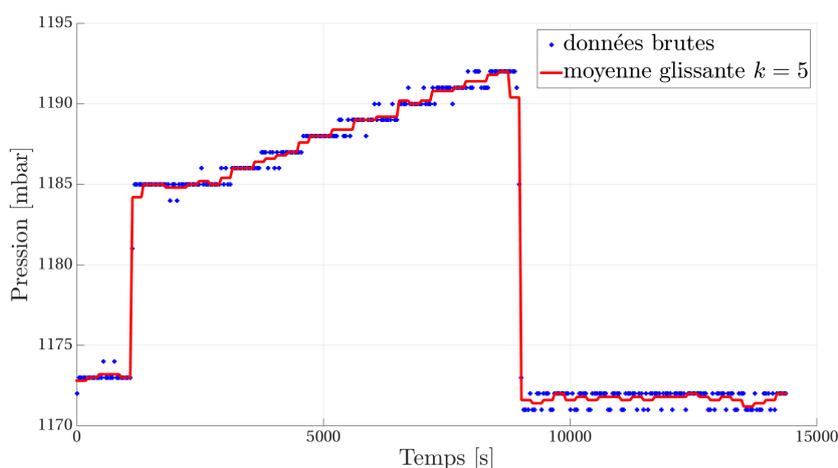


Figure 4.3 – Pression mesurée en fonction du temps lors du remplissage d'un récipient posé sur l'outil englobant.

Cet essai a permis de valider le bon fonctionnement du capteur de pression et son dimensionnement pour notre application. On peut aussi calculer que, pour cet outil, dans les conditions de pression initiales et avec la surface d'application de la force située au centre de la face supérieure de la boudruche, la résolution de la mesure est d'environ 0,83 N. En effet, l'ajout d'un litre d'eau (équivalent à un kilogramme, soit 10 N dans cette configuration) sur l'outil fait augmenter la pression interne de 12 mbar. La résolution du capteur étant d'un millibar, cela nous permet d'estimer l'effort appliqué sur l'outil avec une précision de $10/12 = 0,83$ N dans ces conditions.

Il serait intéressant d'effectuer le même type de mesure en modifiant la surface d'application de la force et sa localisation, par exemple en appliquant une force ponctuelle sur l'arête de la boudruche. Cependant, ces résultats préliminaires sont les seuls que l'on ait pu obtenir pour cette première version de l'outil. En effet, les deux exemplaires de cet outil que nous avons fabriqués ont ensuite été perdus par le transporteur lors de leur expédition du site d'Ifremer à la Seyne-sur-mer au LIRMM à Montpellier.

4.2.2 Conception de l'outil « piston »

Une deuxième version de l'outil de préhension a été proposée. Ce nouveau prototype est composé de trois parties distinctes, comme illustré par la figure 4.4, qui permettent de répondre aux besoins cités en introduction de cette partie :

1. une partie assurant la mesure de pression à l'intérieur de l'outil, illustrée par la figure 4.5,
2. une partie apportant de la compli-ance élastique dans la chaîne cinématique, illustrée par la figure 4.6,
3. une partie assurant le contact avec l'objet manipulé, illustrée par la figure 4.7(a),

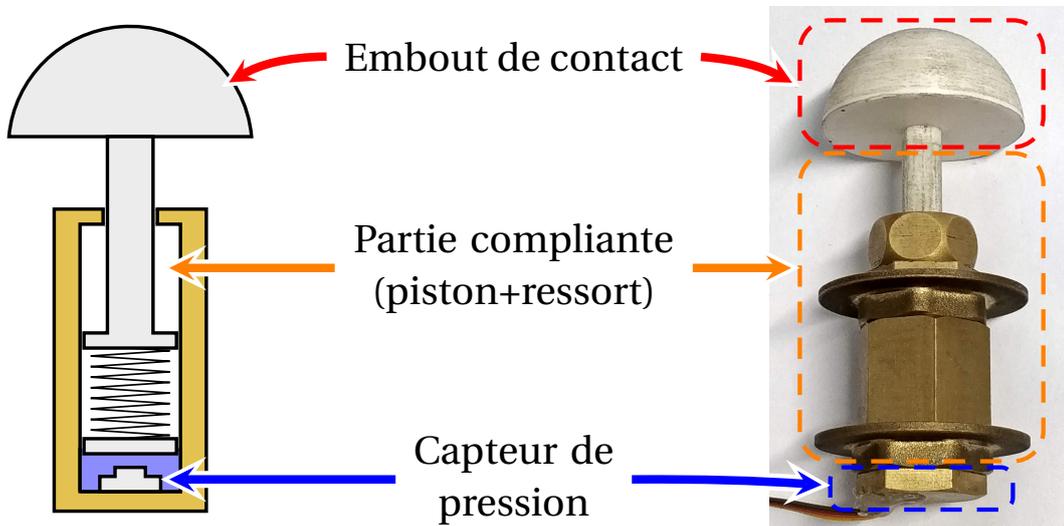


Figure 4.4 – Schéma des trois parties distinctes composant l'outil « piston ».

La partie de mesure de pression (figure 4.5) utilise un capteur de pression immergé dans un gel hydrofuge souple. Ce gel permet de l'isoler électriquement et de le rendre utilisable sous l'eau. De plus, en se déformant très légèrement en compression, il transmet au capteur de pression l'effort qu'il subit. Le modèle de ce capteur de pression est choisi pour que sa gamme de mesure $\Delta p_{\text{capteur}}$ permette de lire les variations de pression dues aux efforts d'interaction de l'outil, et ce malgré la pression ambiante due à la colonne d'eau. En effet, la pression ambiante p_{ambiante} augmentant avec la profondeur, la gamme de mesure effectivement utilisable $\Delta p_{\text{mesurable}}$ pour la mesure des efforts d'interaction se réduit lorsque la profondeur augmente :

$$\Delta p_{\text{mesurable}} = \Delta p_{\text{capteur}} - p_{\text{ambiante}} \quad (4.1)$$

On remarque notamment que l'outil n'est plus utilisable au delà d'une certaine profondeur où la pression ambiante vaut p_{max} , à partir de laquelle cette pression ambiante sature



Figure 4.5 – Partie de mesure de la pression interne : le capteur de pression (cadre rouge) est plongé dans un gel (en bleu) pour réaliser la mesure de pression à l'intérieur de l'outil.

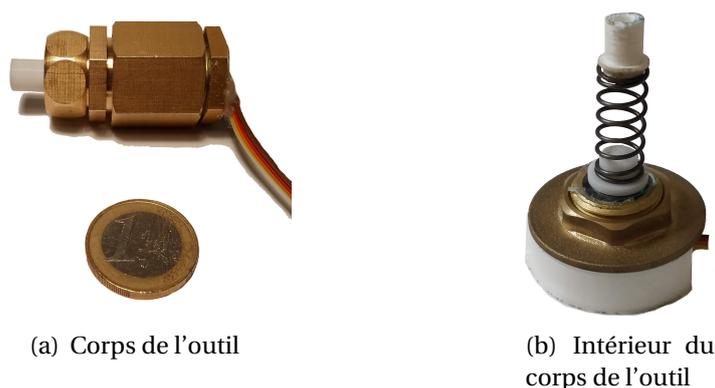


Figure 4.6 – Partie compliant de l'outil : le ressort est placé entre la partie mesurant la pression et la partie en contact avec l'environnement pour apporter de la compliance.

la capteur. On choisit donc la gamme de mesure du capteur en fonction de la gamme de pression que l'on souhaite mesurer :

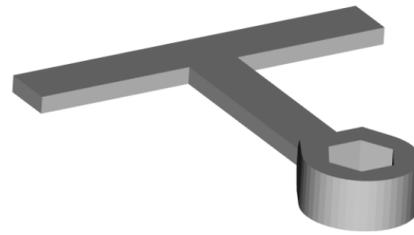
$$\Delta p_{\text{capteur}} \geq \Delta p_{\text{mesurable}} + p_{\text{max}} \quad (4.2)$$

La gamme de pression que l'on souhaite mesurer est déterminée par l'effort maximum f_{max} subi par le capteur et par sa surface S_{capteur} :

$$\Delta p_{\text{mesurable}} = \frac{f_{\text{max}}}{S_{\text{capteur}}} \quad (4.3)$$



(a) Embout hémisphérique assurant le contact entre l'outil et l'environnement.



(b) Support de l'outil adapté aux pinces standards des engins sous-marins.

Figure 4.7 – Interfaces de l'outil avec l'environnement (à gauche) et avec la pince du bras robotique (à droite).

Pour déterminer f_{\max} , on l'interprète comme la force maximale qu'il est possible d'appliquer aux objets manipulés sans les détériorer. Dans notre cas, f_{\max} est arbitrairement choisi à 30 N et la surface du capteur est de $1,76 \text{ cm}^2$, ce qui impose une gamme d'au moins 1,6 bar.

La partie COMPLIANTE de l'outil (figure 4.6) consiste en un ressort placé entre un disque recouvrant la surface du gel entourant le capteur de pression et l'embout de l'outil assurant le contact avec l'environnement. Ce ressort a pour but de rendre l'outil compliant, et sa raideur k doit être choisie en fonction de Δx_{\max} , la pire erreur de position attendue pour le bras qui porte l'outil, ainsi que de la force maximale f_{\max} qu'il est possible d'appliquer aux objets manipulés sans les détériorer.

$$k = \frac{f_{\max}}{\Delta x_{\max}} \quad (4.4)$$

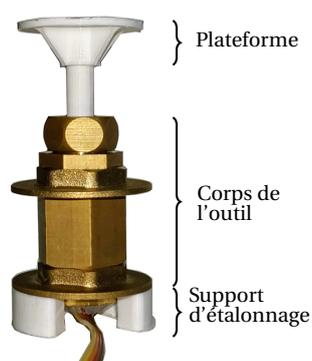
Cela permet d'assurer que même lorsque l'erreur de positionnement du bras est maximale, l'effort appliqué sur l'objet manipulé n'abîmera pas ce dernier. Comme précédemment, la valeur de f_{\max} est arbitrairement choisie à 30 N et l'erreur maximale autorisée pour le positionnement de l'outil est de 2 cm, ce qui donne une raideur de 1500 N/m pour le ressort.

Le contact entre l'outil et l'environnement est réalisé par un embout solidaire du piston. Dans un premier temps, nous choisissons une géométrie hémisphérique pour cet embout, comme illustré par la figure 4.7(a) ; mais avec une géométrie différente, cet embout pourrait permettre d'obtenir des informations sur la qualité de la saisie de l'objet manipulé. Ce choix de géométrie est détaillé dans la partie 4.4. Enfin, la figure 4.7(b) illustre le support permettant à l'outil d'être saisi par les pinces standards des bras manipulateurs sous-marins. L'outil est solidaire de ce support, mais il est possible en cours de mission de saisir cet outil par le T-bar ou de le ranger pour en utiliser un autre.

4.3 Caractérisation du comportement de l'outil piston lors de la saisie d'un objet

La caractérisation du comportement de l'outil proposé a pour but de déterminer une relation liant la force exercée sur l'embout de l'outil à la pression mesurée par le capteur. En premier lieu, nous souhaitons déterminer le type de relation (linéaire, polynômiale) décrivant le mieux le comportement de l'outil, ainsi que mettre en évidence et modéliser une éventuelle hystérésis et étudier l'influence de différents paramètres, tels que la vitesse de déplacement de la partie mobile de l'outil, sur la caractéristique de l'outil.

Pour ce faire, nous avons remplacé l'embout hémisphérique de préhension par une plateforme (figure 4.8(a)) rendant plus aisée la manipulation de la partie mobile et accueillant un marqueur optique. Nous utilisons les marqueurs optiques ArUco, tels qu'illus-



(a) Outil équipé de la plateforme de caractérisation.



(b) Installation expérimentale pour la caractérisation du comportement de l'outil.

Figure 4.8 – Capteur équipé de la plateforme accueillant le marqueur optique pour la détermination de la caractéristique force exercée / pression mesurée et installation expérimentale pour la caractérisation du comportement de l'outil avec prise en compte de la vitesse de déplacement du piston.

tré par la figure 4.8(b), pour mesurer la longueur totale de l'outil et la vitesse de déplacement du piston. On peut ainsi tracer la caractéristique pression mesurée / longueur enfoncée en indiquant pour chaque point de mesure la vitesse de déplacement de la plateforme. Cette méthode permet de caractériser le comportement de l'outil sans avoir recours à des masses calibrées, et a l'avantage de fournir aussi l'information de vitesse de déplacement du piston. La caractéristique obtenue pour cet outil est donnée par la figure 4.9, et le tableau 4.1 donne l'erreur quadratique moyenne de l'estimation de la pression mesurée pour une longueur enfoncée donnée, en choisissant d'approcher la caractéristique par une fonction affine et par des polynômes d'ordre 2 et 3.

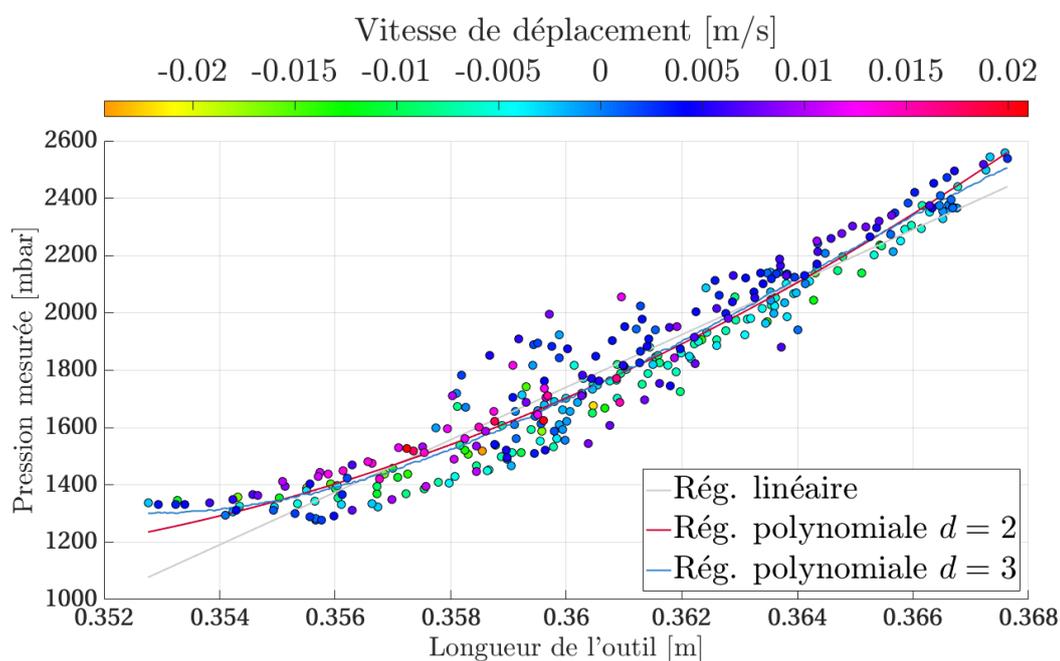


Figure 4.9 – Caractéristique longueur de l'outil / pression mesurée avec indication de la vitesse de déplacement de l'embout.

Tableau 4.1 – Erreur quadratique moyenne de l'estimation de la pression en fonction de la longueur de tige enfoncée pour différents ordres de régression polynomiale.

RMSE rég. linéaire	RMSE rég. polynomiale $d = 2$	RMSE rég. polynomiale $d = 3$
93.0582 mbar	83.9138 mbar	82.2661 mbar

On remarque que les points obtenus au cours de la caractérisation de l'outil sont particulièrement étalés dans le plan longueur enfoncée / pression mesurée, mais que cet étalement n'est pas corrélé au signe de la vitesse de déplacement du piston, indiqué par la couleur utilisée pour chaque point. Cela permet de considérer que l'hystérésis est négligeable. Nous pensons que cet étalement s'explique d'une part par les imprécisions d'estimation de la pose des marqueurs optiques, notamment à cause du bruit sur les images utilisées. Cet étalement s'explique, d'autre part, par les jeux mécaniques et frottements internes à l'outil. En effet, les différents éléments (piston, ressort, gel) ne sont pas fixés les uns aux autres mais simplement maintenus en compression, et l'intérieur de l'outil n'est pas parfaitement lisse, ce qui crée ces jeux mécaniques et frottements d'intensité variable le long de la course du piston. La caractéristique obtenue est néanmoins satisfaisante, puisque

l'erreur d'estimation d'une grandeur par rapport à l'autre ne dépasse pas 5% dans le pire des cas.

Concernant le degré du polynôme approchant le mieux la caractéristique, on remarque que les polynômes de degré 2 et 3 produisent des erreurs quadratiques moyennes meilleures que la régression linéaire, et très proches l'une de l'autre. Cependant, on voit sur la figure 4.9 que le polynôme de degré 3 a tendance à mieux approcher le comportement de l'outil lorsque la longueur enfoncée du piston est très faible et très grande, mais a tendance à être plus éloigné dans la gamme normale de fonctionnement. Pour cette raison, nous lui préférons le polynôme de degré 2, puisque nous sommes surtout intéressés par une bonne approximation dans la gamme normale de fonctionnement. Ici, pour l'expression suivante de la caractéristique, les coefficients obtenus sont donnés dans le tableau 4.2. La pression p est exprimée en millibars, tandis que la profondeur d'enfoncement x est exprimée en mètres.

$$p = \alpha_2 x^2 + \alpha_1 x + \alpha_0 \quad (4.5)$$

Tableau 4.2 – Coefficients du polynôme approchant le mieux la caractéristique déplacement / pression de l'outil « piston ».

α_0 [mbar.m ⁻²]	α_1 [mbar.m ⁻¹]	α_2 [mbar]
-963718	-963718	1543802

En statique, la force exercée sur l'outil est égale au produit de la surface du capteur de pression par la pression mesurée :

$$f = p \cdot s_{\text{capteur}} \quad (4.6)$$

Cela nous permet d'établir la caractéristique force exercée / longueur enfoncée de l'outil, comme présenté par la figure 4.10. Cela permet aussi de déterminer dans quelle gamme de fonctionnement cette caractéristique est à peu près linéaire, c'est-à-dire dans quelle gamme l'outil fonctionne à la manière d'un ressort, malgré les frottements et l'influence du gel entourant le capteur de pression. Ici, cette gamme de fonctionnement linéaire correspond à des efforts compris entre 25 N et 43 N ; dans cette gamme, la constante de raideur de l'outil vaut 1116 N/m.

L'étape de caractérisation du comportement de l'outil effectuée dans cette partie nous permet, lors de son utilisation pour la manipulation d'objets, de déterminer l'effort d'interaction entre l'outil et les objets manipulés en fonction de la pression mesurée, mais aussi de travailler dans une zone où l'outil se comporte comme un système linéaire. Dans la suite, la longueur du corps de l'outil est réduite afin de précontraindre le ressort et d'être par défaut dans la zone linéaire.

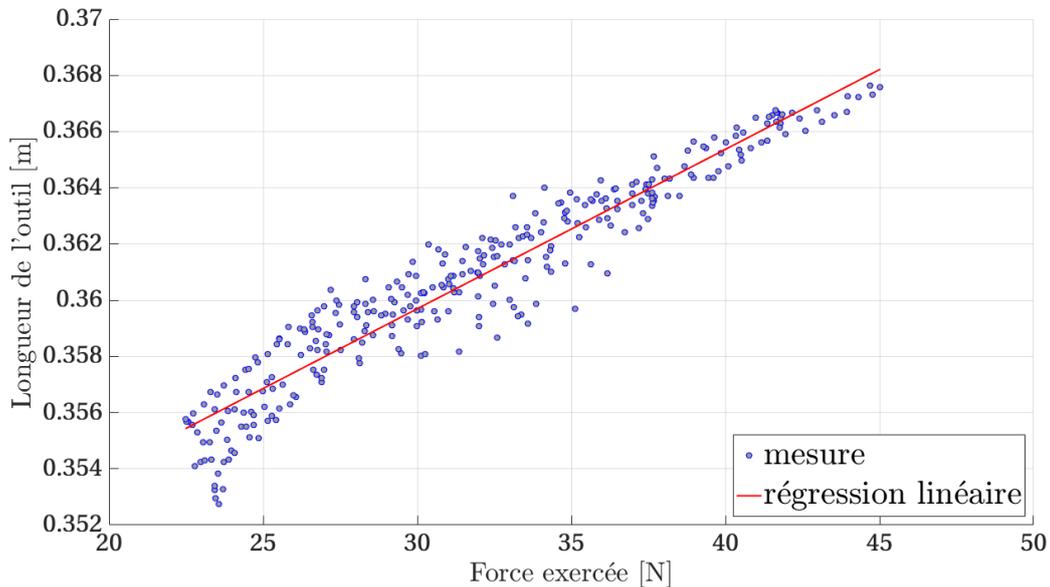


Figure 4.10 – Caractéristique force exercée / longueur de l’outil piston.

4.4 Essais de l’outil piston sur le HROV Ariane

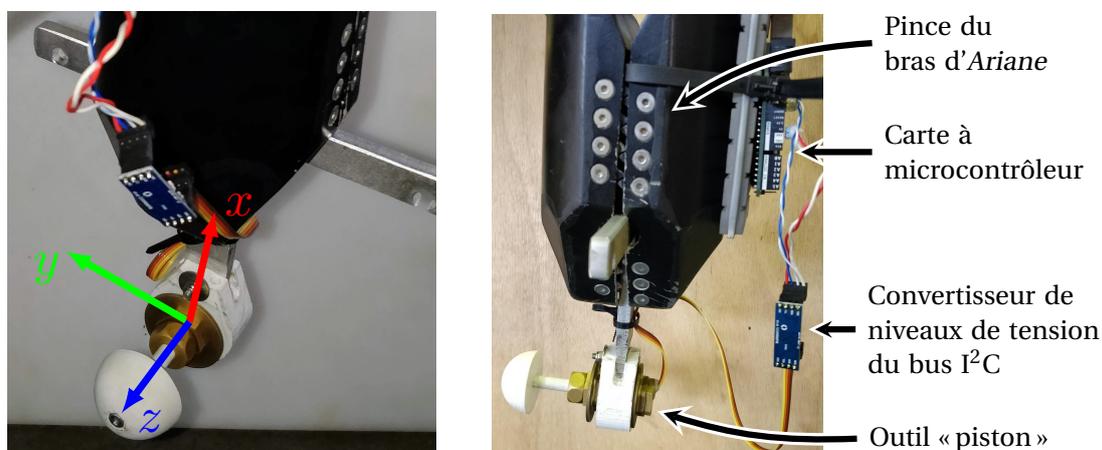
Nous avons mené deux types d’essais dans l’optique de vérifier le bon fonctionnement de l’outil piston développé :

1. la régulation de la pression mesurée par l’outil autour d’une pression de consigne ;
2. le suivi d’une surface à effort constant, ce qui permet de vérifier que l’on arrive à réguler correctement l’effort d’interaction entre l’outil et l’environnement.

Ces deux actions ont été implémentées en Python dans des nœuds ROS [Quigley *et al.*, 2009] pour s’intégrer aisément dans le logiciel du HROV Ariane. La figure 4.11(b) illustre la manière dont l’outil est saisi par la pince d’un bras d’Ariane pour réaliser ces essais, en utilisant l’interface standard de la pince prévue pour accueillir la poignée en forme de T. On note que dans la version de l’outil utilisée pour ces essais, ce dernier est relié au calculateur par un câble USB par lequel transite la donnée de pression mesurée dans l’outil. Dans une autre version, il sera possible de remplacer ce câble par des modules radios¹ permettant la transmission sans fil de la mesure de pression et rendant l’outil amovible et interchangeable en cours de mission.

Pour ne pas détériorer un objet lors de sa manipulation par les bras d’un engin sous-marin, les efforts d’interaction entre les bras et l’objet doivent être bien maîtrisés. Pour

1. Bien que les ondes radios soient fortement atténuées par l’eau, il existe des modules destinés à une application sous-marine offrant une portée de l’ordre de quelques mètres, ce qui est compatible avec notre application.



(a) Repère orthogonal (x rouge, y vert, z bleu) lié à l'outil utilisé pour l'expression des consignes de déplacement.

(b) Le support de fixation de l'outil piston et son utilisation dans la pince du bras 7E d'Ariane.

Figure 4.11 – La saisie de l'outil dans la pince du bras 7E d'Ariane et le repère attaché à l'outil pour les essais menés expérimentalement.

vérifier que l'outil développé permet de réaliser cette tâche correctement, nous réalisons les deux essais suivants :

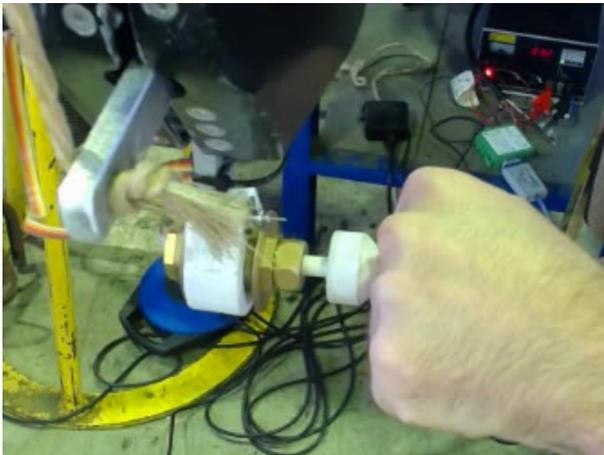
1. premièrement, nous commandons le bras en effort seulement suivant l'axe z de l'outil pour réguler la pression mesurée par l'outil ;
2. deuxièmement, nous fixons une valeur de référence autour de laquelle le bras doit réguler la pression mesurée par l'outil pendant que nous le déplaçons le long d'une surface.

Dans les deux cas, les consignes de déplacement sont données dans un repère orthogonal lié à l'outil (figure 4.11(a)) et sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = \text{cons}_x \\ \dot{y} = \text{cons}_y \\ \dot{z} = K_p e + K_d \dot{e} \end{cases} \quad (4.7)$$

où cons_x et cons_y sont les consignes de vitesses données par l'opérateur, $e = p_{\text{des}} - p_{\text{mes}}$ est la différence entre la pression de consigne (désirée) et la pression mesurée par l'outil, et K_p et K_d sont des gains strictement positifs.

Pour la régulation simple de la pression (point 1.), cons_x et cons_y sont fixées à 0. L'outil est saisi par la pince du bras 7E d'Ariane et on perturbe l'outil manuellement comme illustré par la figure 4.12(a). Après réglage des gains K_p et K_d , on obtient le résultat présenté par



(a) Suivi de la pression de référence



(b) Suivi d'une planche en bois (à gauche sur l'image) à pression constante

Figure 4.12 – Installations expérimentales pour la réalisation des essais de régulation de la pression mesurée par l'outil.

la figure 4.13 pour différentes pressions de consigne. On peut voir que la régulation de la pression dans l'outil est effectuée correctement, malgré les modifications imposées successivement à la pression de consigne (échelons et rampes). Les gains ont été réglés pour assurer un suivi rapide des variations de la pression de consigne. C'est ce qui explique les dépassements et oscillations que l'on observe lors des échelons de pression de consigne. On note toutefois que le système reste stable malgré la présence de ces échelons.

Pour le suivi d'une surface à pression constante (point 2.), les consignes $cons_x$ et $cons_y$ sont données par l'utilisateur pour déplacer l'outil le long de la surface. Ici, l'outil est déplacé à une vitesse de l'ordre d'un à deux centimètres par seconde, et dans un plan non parallèle à la surface pour que l'expérience montre correctement la régulation de l'effort d'interaction. La consigne de déplacement suivant l'axe z est calculée comme indiqué par (4.7). L'installation expérimentale pour cet essai est celle illustrée par la figure 4.12(b).

Les résultats obtenus au cours d'un suivi d'une surface sont présentés par la figure 4.14, et une vidéo de cet essai est disponible². On observe que le bras est capable de réguler l'effort d'interaction avec la surface suivie. On voit néanmoins que la pression mesurée par l'outil oscille, ce qui s'explique ici par la nature des matériaux en contact : du bois pour la surface suivie, et du plastique (ABS) pour l'embout de l'outil. À cause de cela, l'outil accroche à la surface jusqu'à ce que la force de glissement soit assez importante, puis glisse le long de la surface jusqu'à ce que le frottement redevienne suffisamment important pour

2. <https://seafire.lirmm.fr/f/3e97f15f694e41b49fa0/>

arrêter le glissement de l'outil. À chaque fois que ce phénomène se produit, la pression mesurée chute brutalement puis augmente lorsque l'outil accroche à nouveau à la surface. Les pics à 27 secondes et 67 secondes sont, quant à eux, dus à d'importantes irrégularités sur la surface, qui bloquent plus longtemps l'outil que le simple frottement décrit précédemment. Ces vibrations ne sont pas compensées par le bras, car ce dernier est trop lent. Cependant, la pression mesurée oscille autour de la valeur de consigne, avec au plus 500 mbar d'erreur en ce qui concerne les oscillations dues à la rugosité de la surface. Ces 500 mbar équivalent à une force de 0,88 N, soit 88 g.

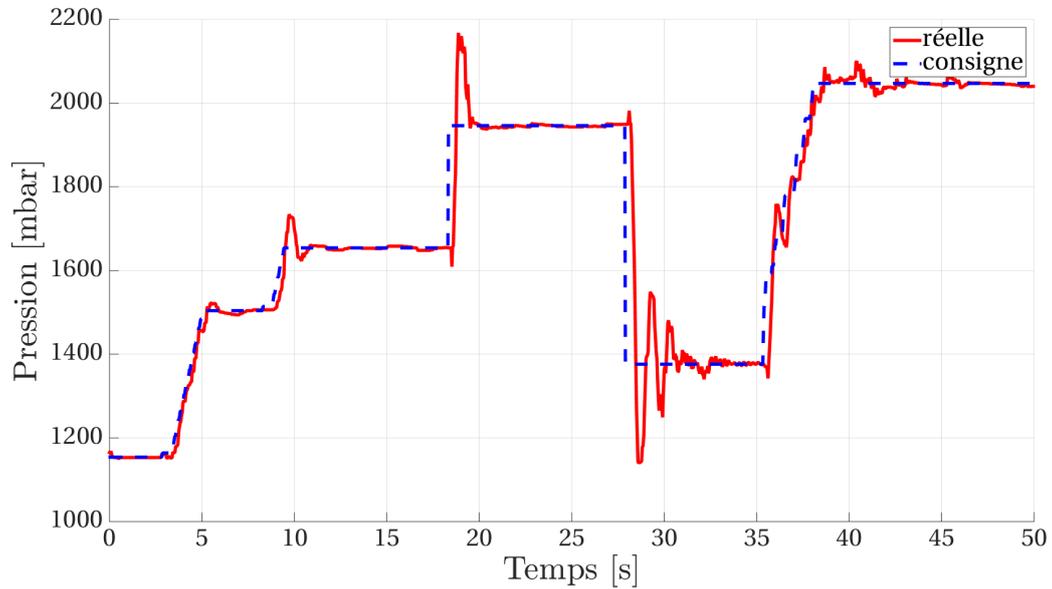


Figure 4.13 – Régulation de la pression mesurée dans l’outil autour d’une pression de consigne, lorsque le bras n’est commandé que suivant l’axe z de l’outil.

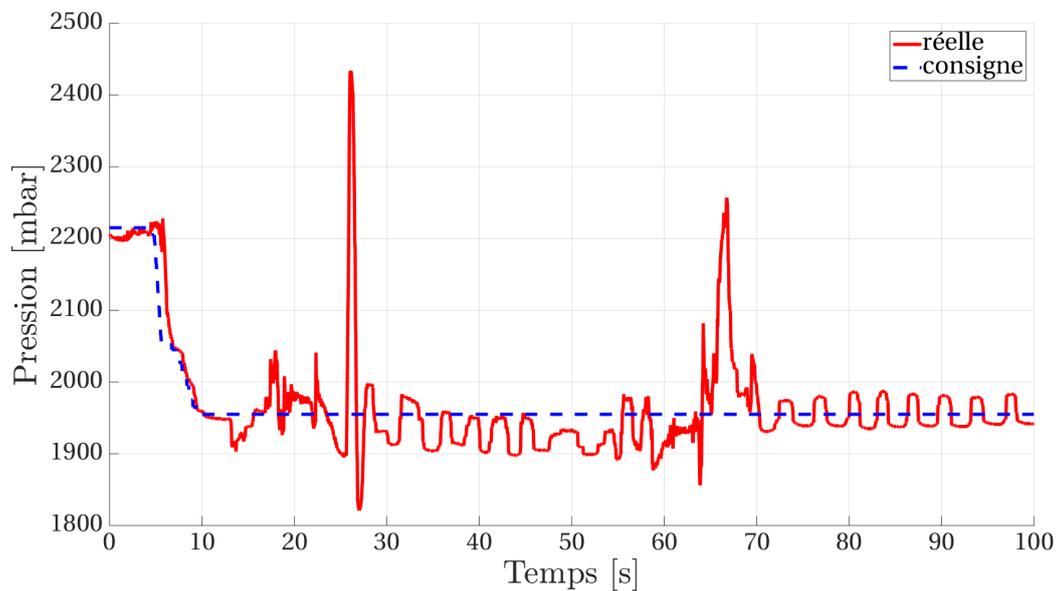


Figure 4.14 – Suivi d’une surface avec régulation de la pression mesurée dans l’outil : le bras est commandé manuellement suivant les axes x et y de l’outil et automatiquement suivant l’axe z .

4.5 Manipulation à deux bras avec l'outil piston

Afin de répondre à la problématique que nous nous étions donnée pour cette thèse, à savoir la manipulations à deux bras d'échantillons encombrants, déformables ou fragiles, l'outil compliant présenté dans ce chapitre est utilisé pour réaliser des tâches de manipulation à deux bras.

Pour cela, nous utilisons les deux bras d'un engin sous-marin : l'un d'eux est commandé en vitesse à partir des consignes données par un pilote humain, comme ce qui est fait aujourd'hui dans le cadre de la télémanipulation sous-marine. L'autre bras est entièrement autonome : ses consignes de vitesse sont calculées à partir de la position relative des deux pinces (pour les maintenir en opposition) et de la pression mesurée dans l'outil, et sont exprimées dans un repère orthogonal lié à la pince (voir figure 4.11(a)). Ce mode de commande est à rapprocher de la stratégie utilisée dans l'essai de suivi d'une surface à effort constant présenté à la section précédente.

Nous notons ${}^0t_{5E}$ et ${}^0t_{7E}$ la position de la pince des bras $5E$ et $7E$ d'*Ariane* respectivement dans le repère 0 associé à la base du bras $7E$, fixe par rapport à *Ariane*. Ces positions sont exprimées sous la forme :

$$t_{5E} = [x_{5E} \quad y_{5E} \quad z_{5E}]^T \quad \text{et} \quad t_{7E} = [x_{7E} \quad y_{7E} \quad z_{7E}]^T \quad (4.8)$$

À chaque instant, nous calculons la différence de position entre les deux pinces :

$${}^0\Delta t = {}^0t_{7E} - {}^0t_{5E} \quad (4.9)$$

que nous comparons à une position relative de référence ${}^0\Delta t_r$, enregistrée lors de la saisie de l'objet, pour calculer l'erreur de positionnement du bras $7E$:

$${}^0\tilde{t} = {}^0\Delta t_r - {}^0\Delta t \quad (4.10)$$

L'objectif est alors de compenser cette erreur de positionnement relatif des pinces afin de conserver une position relative constante au cours de la manipulation d'un objet avec les deux bras. Nous compensons l'erreur de positionnement selon deux axes seulement du repère cartésien lié à l'outil, le troisième axe étant celui le long duquel se déplace le piston lorsqu'un effort lui est appliqué. Suivant ce troisième axe, z , nous commandons le bras afin de réguler l'effort d'interaction entre les bras et l'objet manipulé. Cette régulation est effectuée comme présenté dans la section précédente. Comme les consignes de déplacement pour la régulation de l'effort sont exprimées dans le repère lié à l'outil, nous devons aussi exprimer l'erreur de positionnement relatif, à partir de laquelle sont calculées les consignes de déplacement du bras suivant les deux axes restants, dans le même repère lié à l'outil :

$${}^{7E}\tilde{t} = {}^{0T_{7E}^{-1}} \cdot {}^0\tilde{t} \quad (4.11)$$

avec ${}^0T_{7E}^{-1}$ l'inverse de la transformation homogène entre le repère 0 et le repère lié à l'outil porté par la pince du bras 7E. Enfin, la fusion de la commande en position et de la commande en effort est effectuée de la manière suivante, pour obtenir les consignes de déplacement en vitesse du bras 7E :

$${}^{7E} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p_x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot {}^{7E} \tilde{t} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{p_z} e + K_{d_z} \dot{e} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Dans (4.12), K_{p_x} et K_{p_y} sont des gains strictement positifs permettant d'effectuer une régulation proportionnelle de la position du bras suivant les axes x et y du repère lié à l'outil. K_{p_z} et K_{d_z} sont aussi des gains strictement positifs, utilisés pour réaliser une régulation proportionnelle dérivée de la pression interne de l'outil ; et e est l'erreur entre la pression de consigne et la pression mesurée dans l'outil.

Cette méthode est appliquée à la manipulation d'un objet par les deux bras d'*Ariane*. Pour cela, les bras sont placés comme ils le sont sur l'engin, ce qui est illustré par la figure 4.15. Avant d'utiliser la méthode proposée, nous approchons l'outil porté par la pince



Figure 4.15 – Installation expérimentale des bras 7E (gauche) et 5E (droite) d'*Ariane* pour les tests de manipulation à deux bras.

du bras 7E ainsi que la pince du bras 5E de l'objet à manipuler (figure 4.16(a)), et nous les

positionnons en fonction de la forme de ce dernier pour en assurer une prise équilibrée. Lorsque l'outil et la seconde pince sont correctement positionnés par rapport à l'objet, nous enregistrons la position relative de référence, puis nous donnons une consigne d'effort d'interaction, qui provoque le déplacement de l'outil en direction de l'objet jusqu'à sa saisie (figure 4.16(b)). Dès lors, nous utilisons la méthode décrite précédemment pour manipuler l'objet (figure 4.16(c)).

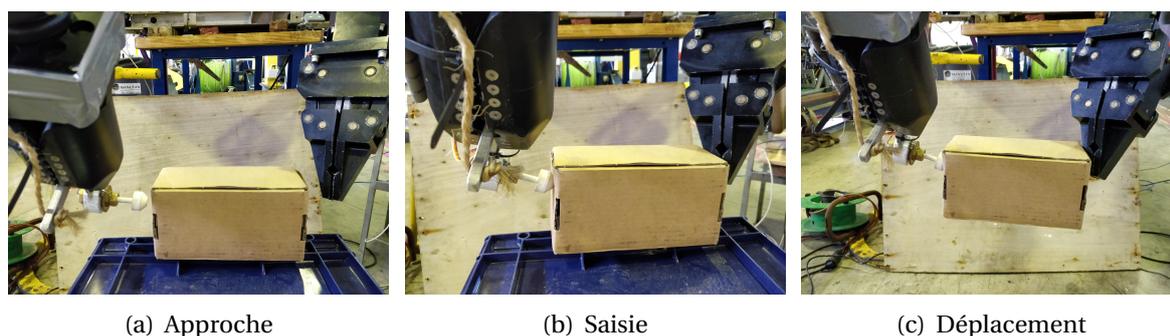


Figure 4.16 – Étapes de la saisie d'un objet pour la manipulation à deux bras.

Lors de la manipulation à deux bras de la boîte visible sur les figures 4.16, nous avons enregistré la pression mesurée à l'intérieur de l'outil, représentative de la force d'interaction suivant l'axe z de l'outil. Cette pression est donnée sur la figure 4.17, où elle est comparée à la pression de consigne, et une vidéo de cet essai est disponible³. On remarque que la stratégie de manipulation proposée est suffisante pour déplacer un objet avec les deux bras sans le perdre ni l'écraser. En effet, on constate que la variation maximale de la pression mesurée par l'outil (de 1650 mbar à 2250 mbar) observée au cours de cet essai correspond à une variation de la force de serrage de 10,56 N, soit 1,56 kg au total, mais au maximum 528 g par rapport à la valeur de consigne. De plus, la pression à l'intérieur de l'outil est globalement correctement régulée autour de la valeur de consigne, malgré les jeux mécaniques des bras et de l'outil qui provoquent les perturbations observées sur la figure 4.17, et malgré la simplicité de la loi de commande utilisée. L'outil compliant et la stratégie proposée sont donc *a priori* utilisables pour la manipulation à deux bras d'échantillons.

3. <https://seafle.lirmm.fr/f/a3d9560adcd24a6ca942/>

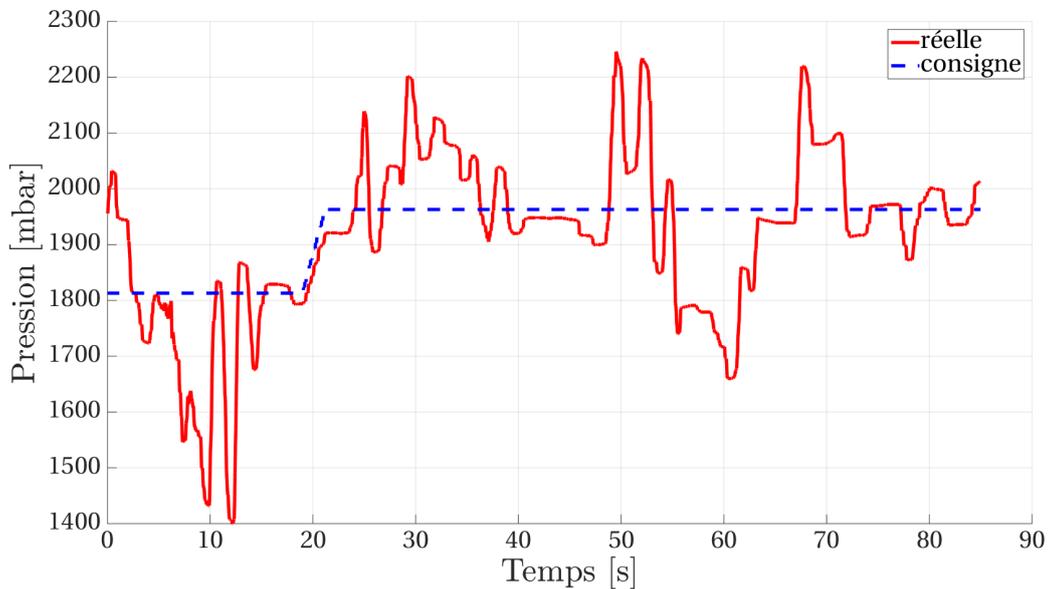


Figure 4.17 – Pression mesurée par l’outil comparée à la pression de consigne au cours de la manipulation à deux bras d’un objet rigide.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le travail mené autour d’un outil de préhension pour la manipulation à deux bras. Nous avons tout d’abord décrit la conception et la réalisation de deux versions d’un outil permettant à la fois la saisie et la mesure d’effort : une première approche basée sur une baudruche en caoutchouc remplie d’huile, et une seconde approche basée sur un piston. Ces deux versions de l’outil mesurent des variations de pression (dans l’huile et dans un gel respectivement) qui ont lieu lors de la manipulation d’un objet, et une caractérisation du comportement des outils nous a permis d’interpréter ces variations de pression en termes d’efforts d’interaction entre les outils et l’environnement.

L’utilisation de l’outil piston pour le suivi d’une surface à effort constant a fourni des premiers résultats positifs permettant de valider son fonctionnement. Dans un second temps, ce même outil a été utilisé avec succès pour manipuler des objets à l’aide des deux bras du HROV *Ariane* en régulant les efforts exercés sur l’objet au cours de sa manipulation. Dans le pire des cas, la force appliquée à l’objet était supérieure de cinq cents grammes à la force de consigne.

Il est important de noter que lors de l’utilisation en conditions réelles d’un outil similaire à ceux présentés ici, la température aura une influence sur son comportement. En effet, la température étant plus faible en profondeur qu’à la surface, les propriétés méca-

niques du gel seront modifiées. De même, l'huile de l'outil « englobant » sera moins visqueuse. Cependant, le capteur de pression étant compensé en température, il sera toujours possible de mesurer correctement les variations de pression qui auront lieu à l'intérieur des outils. L'influence de la température devra donc être étudiée (étalonnage) pour éventuellement ajuster les caractéristiques des outils présentés dans ce chapitre.

5

Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion

L'objectif de ce travail de thèse était de contribuer à l'automatisation des tâches de prélèvement d'échantillons mous, fragiles, ou déformables à partir d'un robot sous-marin équipé de bras manipulateurs. Cet objectif était motivé par les difficultés que rencontrent les pilotes d'engins sous-marins lors de la réalisation de ce type de tâche avec les moyens actuels : mauvaise estimation de la pose relative de la pince de saisie et de l'objet à saisir, absence d'information concernant les efforts d'interaction des bras, erreurs humaines dans le pilotage des bras et de l'engin. Cet objectif était aussi motivé par l'augmentation de la gamme d'objets manipulables depuis un sous-marin d'exploration. En faisant l'hypothèse que l'engin utilisé pour le prélèvement ne se déplace pas par rapport aux objets à manipuler, nous avons proposé deux contributions allant dans le sens de l'automatisation du prélèvement d'objets et de leur manipulation à deux bras.

Tout d'abord, nous avons proposé un modèle cinématique et un modèle dynamique des bras manipulateurs dont les articulations pivot sont actionnées par des vérins électriques. Ce type de bras est de plus en plus utilisé par les engins sous-marins ayant pour objectif la réalisation de tâches de manipulation en autonomie : c'est le cas notamment d'*Ariane* d'Ifremer qui est l'engin sur lequel les développements réalisés pendant cette thèse ont été validés, mais aussi de *Girona 500* de l'Université de Gérone. Les modèles proposés ont été identifiés pour les bras d'*Ariane*. En ce qui concerne le modèle cinématique, son identification a été faite grâce à l'utilisation d'un système de suivi visuel fournissant une vérité terrain et d'un algorithme de minimisation de l'erreur d'estimation de la pose de chaque lien du bras. Le modèle dynamique a, quant à lui, été identifié en minimisant l'erreur d'estimation du courant électrique alimentant les moteurs des bras lors du suivi d'une trajectoire d'excitation. Les paramètres dynamiques du modèle avaient au préalable été regroupés pour former l'ensemble minimal permettant au modèle d'être identifiable expérimentalement. Les modèles ainsi obtenus ont été validés en mission en mer, et sont

désormais utilisés dans un contexte opérationnel pour estimer l'état des bras d'*Ariane* et assister les pilotes de l'engin sur certaines tâches de manipulation.

Dans un second temps, nous avons proposé deux versions d'un outil destiné à être saisi par les pinces des bras d'un robot sous-marin pour permettre la manipulation à deux bras d'échantillons fragiles, mous, ou déformables. Ces outils reposent sur l'utilisation d'un élément compliant (baudruche élastique dans un cas, ressort dans l'autre) pour compenser les erreurs de modélisation et de commande des bras qui peuvent dégrader la qualité du positionnement de ces outils lors de la saisie d'un objet. De plus, nous avons proposé pour chaque outil une méthode pour estimer la force d'interaction à partir d'une mesure de pression embarquée dans l'outil. Le fonctionnement de ces outils a été testé en utilisant les bras d'*Ariane*, et les résultats obtenus ont permis de montrer l'intérêt de ce type d'outils pour la manipulation sous-marine autonome à deux bras.

5.2 Perspectives

À la suite de ce travail de thèse, de nombreux développements restent à réaliser pour effectuer avec succès le prélèvement autonome de tous types d'échantillons pour l'étude du monde sous-marin. Parmi ces développements, on peut citer l'utilisation systématique du modèle dynamique des bras dans leur commande et dans la simulation des missions, afin de planifier au mieux les missions et minimiser les erreurs de commande des bras et donc les risques de dégradation des objets manipulés. Un travail important reste aussi à faire autour de la manipulation d'échantillons à deux bras, pour permettre la manipulation d'objets encombrants ou trop fragiles pour être saisis en un seul endroit. Dans ce cadre, bien qu'ils aient permis de valider les stratégies proposées, les outils pistons devront être remplacés par les outils baudruche. Ces derniers sont en effet plus facilement adaptables à une utilisation à grande profondeur, et leur plus grande surface de contact, dont l'adhérence est aussi meilleure que celle des embouts de l'outil piston, devraient permettre d'assurer une meilleure robustesse lors de la manipulation d'objets à deux bras.

Certains des développements réalisés au cours de cette thèse offrent des perspectives d'amélioration à court terme intéressantes :

- la méthode d'étalonnage des paramètres cinématiques des actionneurs, en utilisant des marqueurs optiques, peut être étendue à l'étalonnage des paramètres cinématiques du bras complet. Cela permettrait de réaliser l'étalonnage d'un bras rapidement et sans matériel spécifique.
- pour l'étalonnage cinématique du bras complet, la trajectoire d'excitation aura une influence dans la précision des valeurs obtenues. Il peut être intéressant de vérifier, à l'aide d'un second type d'excitation, que ça n'est pas le cas pour l'étalonnage des paramètres d'un seul actionneur.

- une analyse de l'incertitude sur les valeurs obtenues pour l'étalonnage cinématique permettrait de quantifier l'influence de chaque étape du processus d'étalonnage, et éventuellement d'améliorer les plus pénalisantes.
- afin de pouvoir utiliser les outils développés comme de véritables outils, c'est-à-dire pouvoir les saisir et les remplacer en cours de mission, il est nécessaire de transmettre la mesure de pression sans fil. La communication optique, technologie en cours de développement notamment par Ifremer [Khalighi *et al.*, 2017], pourrait être une solution à ce problème.

Enfin, on peut espérer que les engins sous-marins d'intervention qui seront développés dans les années à venir auront des bras mieux instrumentés, qui rendront leur utilisation plus fiable et permettront de réaliser une large gamme de tâches de manipulation plus facilement et plus sûrement. De tels bras ne seront pas forcément actionnés comme ceux d'*Ariane* et ne bénéficieront pas du modèle proposé dans notre première contribution, mais on peut imaginer qu'ils seront toujours soumis à la problématique de la diversité des outils à utiliser au cours d'une même mission. Les prototypes d'outils de préhension compliants proposés pourront donc, dans une version améliorée, servir dans l'équipement standard de ces bras pour la manipulation bimanuelle autonome et à grande profondeur.



Étalonnage cinématique des paramètres des actionneurs du bras 7E d'Ariane

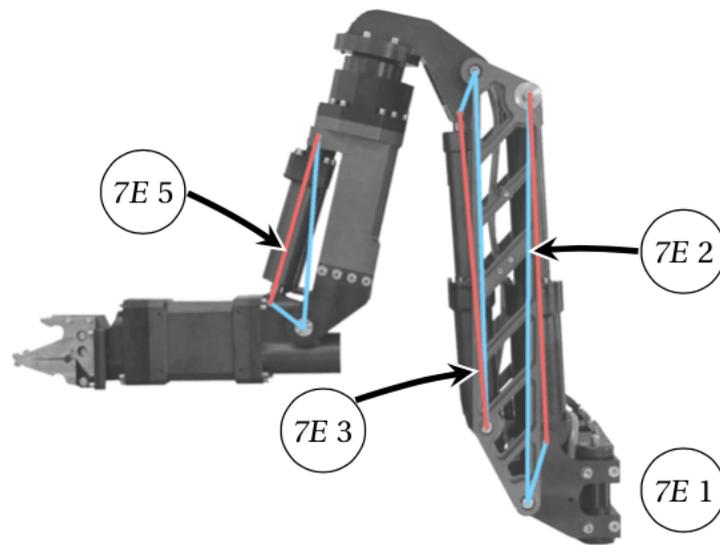


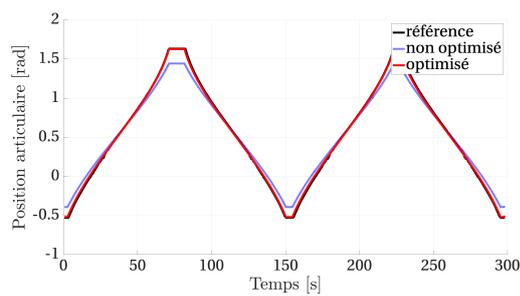
Figure A.1 – Numérotation des actionneurs sur le bras 7E d'Ariane.

Tableau A.1 – Valeurs numériques des paramètres cinématiques des actionneurs du bras 7E d'Ariane obtenues après optimisation.

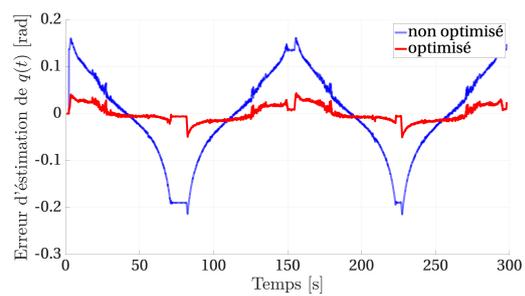
Articulation	ℓ_1 [m]	ℓ_2 [m]	$q_{p_{\min}}$ [m]	$q_{p_{\max}}$ [m]
1	0.3257	0.042968	0.28548	0.3606
2	0.10269	0.64065	0.54908	0.73304
3	0.61786	0.072686	0.55559	0.6799
5	0.30762	0.0384	0.272	0.33958

Tableau A.2 – Comparaison entre l'erreur quadratique moyenne d'estimation de la position articulaire avant et après l'optimisation des paramètres des actionneurs du bras 7E d'Ariane.

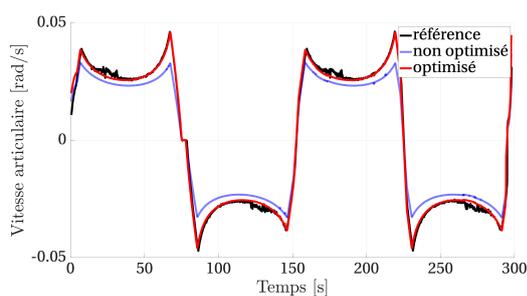
Articulation	RMSE originale [rad]	RMSE optimisée [rad]	amélioration [%]
1	0.092	0.017	81.5
2	0.047	0.02	58.2
3	0.034	0.006	81.8
5	0.034	0.004	87.5



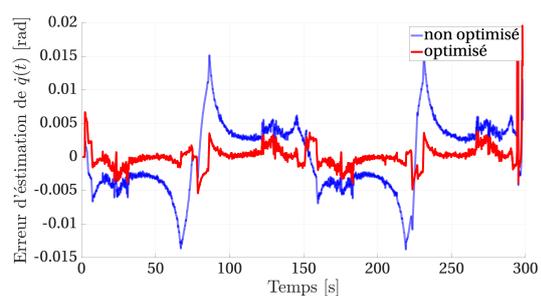
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position

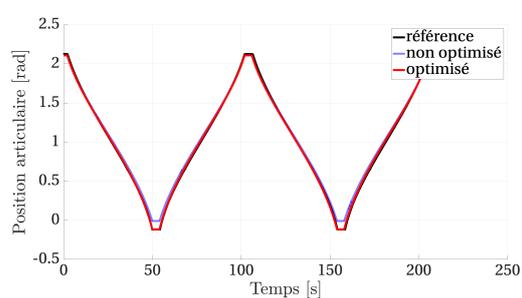


(c) Vitesse articulaire

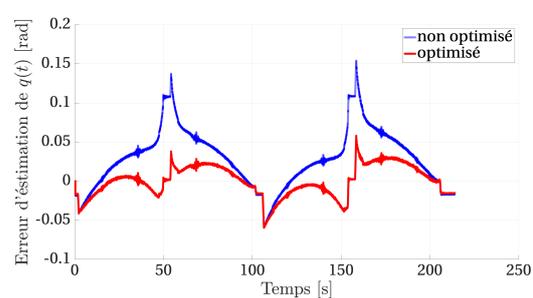


(d) Erreur d'estimation de la vitesse

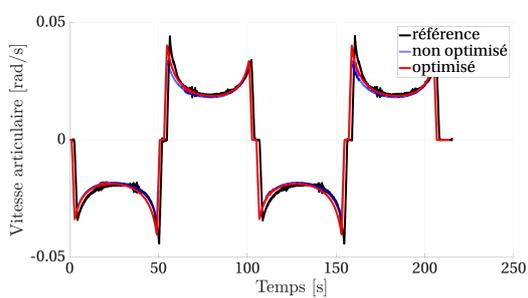
Figure A.2 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 1 du bras 7E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.



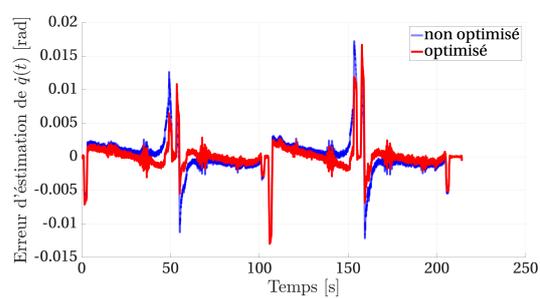
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position

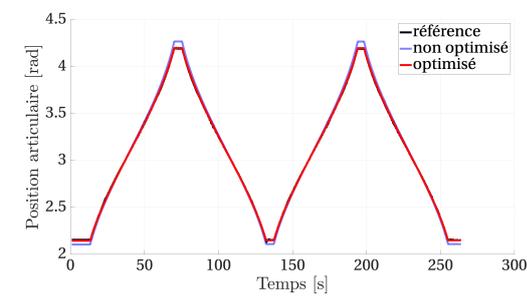


(c) Vitesse articulaire

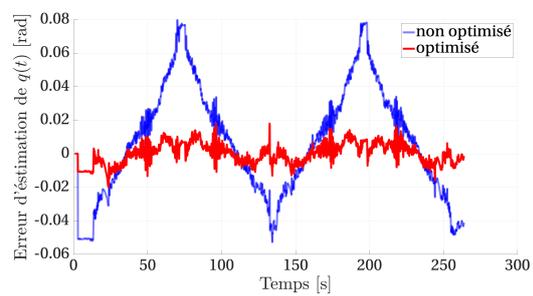


(d) Erreur d'estimation de la vitesse

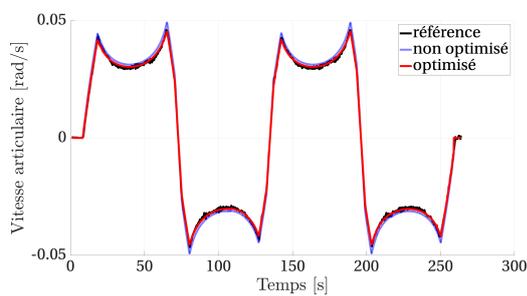
Figure A.3 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 2 du bras 7E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.



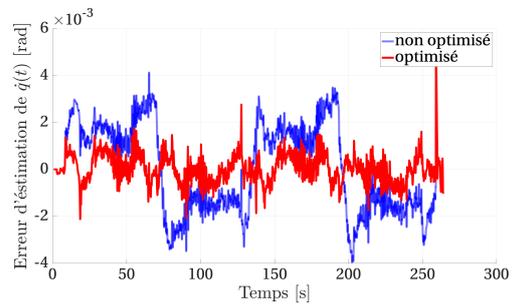
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position

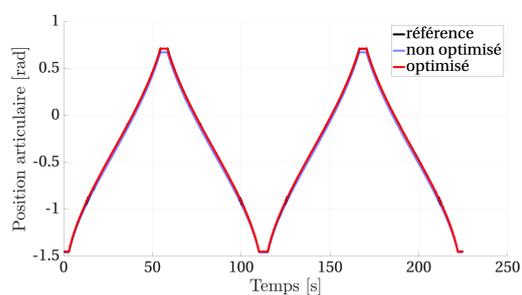


(c) Vitesse articulaire

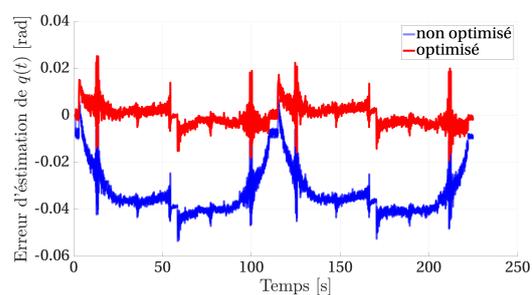


(d) Erreur d'estimation de la vitesse

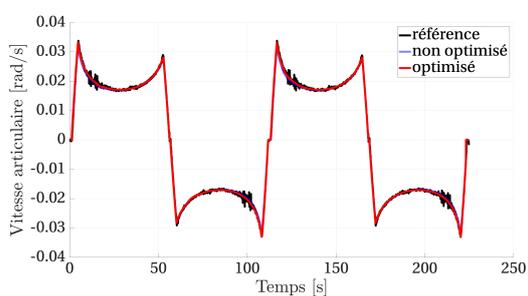
Figure A.4 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 3 du bras 7E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.



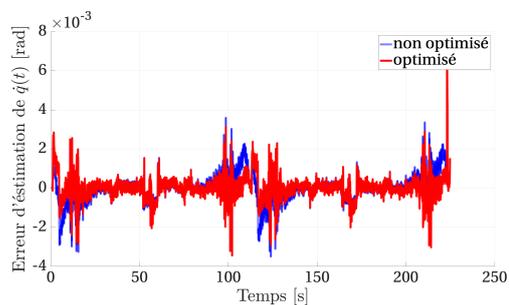
(a) Position articulaire



(b) Erreur d'estimation de la position



(c) Vitesse articulaire



(d) Erreur d'estimation de la vitesse

Figure A.5 – Comparaison de l'estimation de la position et de la vitesse de l'articulation 5 du bras 7E d'Ariane avant et après l'optimisation des paramètres cinématiques de l'actionneur.



Bibliographie

- Bruno V. ADORNO, Philippe FRAISSE et Sébastien DRUON : Dual position control strategies using the cooperative dual task-space framework. *In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3955–3960, 2010. ISBN 9781424466757. Cité page [51](#).
- Damiano ANGELLETTI, Gabriele BRUZZONE, Massimu CACCIA, Giorgio CANNATA, Guiseppe CASALINO, Simone RETO et Gianmarco VERUGGIO : AMADEUS : Dual-Arm Workcell for Co-ordinated and Dexterous Manipulation. ISBN 0780350456. Cité page [40](#).
- Robert D. BALLARD, Dana R. YOERGER, W. Kenneth STEWART et Andrew BOWEN : ARGO/JASON : A Remotely Operated Survey and Sampling System for Full-Ocean Depth. *In OCEANS '91. Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's. Proceedings.*, 1991. ISBN 0780302028. Cité page [15](#).
- Corina BARBALATA, Matthew W. DUNNIGAN et Yvan PETILLOT : Position/force operational space control for underwater manipulation. *Robotics and Autonomous Systems*, 100: 150–159, 2018. ISSN 09218890. Cité page [47](#).
- Gilbert BELLAICHE, Jean-Louis CHEMINEE, Jean FRANCHETEAU, Roger HEKINIAN, Xavier LE PICHON, Hubert David NEEDHAM et Robert D. BALLARD : Inner Floor of the Rift Valley : first submersible study. *Nature*, 250(5467):558–560, 1974. Cité page [10](#).
- Jeferson R. BEMFICA, Claudio MELCHIORRI, Lorenzo MORIELLO, Gianluca PALLI, Umberto SCARCIA et Gabriele VASSURA : Mechatronic design of a three-fingered gripper for underwater applications. *IFAC Proceedings Volumes*, pages 307–312, 2013. Cité pages [52](#) et [53](#).
- Pierre BERTHET-RAYNE, Konrad LEIBRANDT, Gauthier GRAS, Philippe FRAISSE, Andre CROSNIER et Guang-Zhong YANG : Inverse Kinematics Control Methods for Redundant Snake-Like Robot Teleoperation during Minimally Invasive Surgery. *IEEE Robotics and Automation Letters*, pages 1–1, 2018. ISSN 2377-3766. Cité page [44](#).

- Lorenzo BRIGNONE, Ewen RAUGEL, Jan OPDERBECKE, Vincent RIGAUD, Romain PIASCO et Sébastien RAGOT : First sea trials of HROV the new hybrid vehicle developed by IFREMER. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova : Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*, 2015. Cité page 24.
- Tom P BUCKLAEW et Ching-shi LIU : A New Nonlinear Gain Structure for PD-Type Controllers in Robotic Applications. *Journal of Robotic Systems*, 16(11):627–649, 1999. Cité page 46.
- Fabrizio CACCAVALE, Pasquale CHIACCHIO et Stefano CHIAVERINI : Task-space regulation of cooperative manipulators. *Automatica*, 36:879–887, 2000. Cité page 51.
- Fabrizio CACCAVALE, Pasquale CHIACCHIO, Alessandro MARINO et Luigi VILLANI : Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(5):576–586, 2008. Cité page 51.
- Pasquale CHIACCHIO, Stefano CHIAVERINI et Bruno SICILIANO : Direct and Inverse Kinematics for Coordinated Motion Tasks of a Two-Manipulator System. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 118, 1996. Cité page 50.
- Stefano CHIAVERINI et Lorenzo SCIAVICCO : The Parallel Approach to Force/Position Control of Robotic Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(4):361–373, 1993. ISSN 1042296X. Cité pages 45, 48, et 49.
- Jacques DENAVIT et Richard S. HARTENBERG : A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, 22:215–221, 1955. Cité page 42.
- Sebastian ERHART, Dominik SIEBER et Sandra HIRCHE : An impedance-based control architecture for multi-robot cooperative dual-arm mobile manipulation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 315–322, 2013. ISSN 21530858. Cité page 51.
- Jonathan EVANS, Paul REDMOND, Costas PLAKAS, Kelvin HAMILTON et David M. LANE : Autonomous docking for intervention-AUVs using sonar and video-based real-time 3D pose estimation. *In Oceans*, volume 4, pages 2201–2210, 2003. ISBN 0933957300. Cité page 21.
- Ernest D. FASSE et Jan F. BROENINK : A spatial impedance controller for robotic manipulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(4):546–556, 1997. ISSN 1042296X. Cité page 48.
- José Javier FERNÁNDEZ, Mario PRATS, Pedro Jose SANZ, Juan Carlos GARCÍA, Raul MARÍN, Mike ROBINSON, David RIBAS et Pere RIDAO : Grasping for the seabed : Developing a new

- underwater robot arm for shallow-water intervention. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 20(4):121–130, 2013. ISSN 10709932. Cité page 39.
- S. FUJII et Shigeru KURONO : Coordinated computer control of a pair of manipulators. *Proc. 4th IFToMM World Congr.*, page 411–417, 1975. Cité pages 42 et 50.
- Kevin C GALLOWAY, Kaitlyn P BECKER, Brennan PHILLIPS, Jordan KIRBY, Stephen LIGHT, Dan TCHERNOV, Robert J WOOD et David F GRUBER : Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs. 00(00):1–11, 2016. Cité page 55.
- Sergio GARRIDO-JURADO, Rafael MUÑOZ-SALINAS, Francisco J. MADRID-CUEVAS et Manuel J. MARÍN-JIMÉNEZ : Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6):2280–2292, 2014. ISSN 0031-3203. Cité page 63.
- Sergio GARRIDO-JURADO, Rafael MUÑOZ-SALINAS, Francisco J. MADRID-CUEVAS et Rafael MEDINA-CARNICER : Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming. *Pattern Recognition*, 51:481–491, 2016. ISSN 0031-3203. Cité page 63.
- Maxime GAUTIER : Optimal Motion Planning for Robot's Inertial Parameters Identification. *In IEEE Conference on Decision and Control*, pages 70–73, 1992. Cité page 74.
- Maxime GAUTIER et Wisama KHALIL : On the Identification of the Inertial Parameters of Robots. *In IEEE Conference on Decision and Control*, numéro December, pages 2264–2269, 1988. Cité page 73.
- Maxime GAUTIER et Wisama KHALIL : Direct calculation of minimum set of inertial parameters of serial robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3):368–373, Jun 1990. Cité page 74.
- Viniçius Mariano GONÇALVES, Philippe FRAISSE, André CROSNIER et Bruno Vilhena ADORNO : Parsimonious Kinematic Control of Highly Redundant Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1):65–72, 2016. Cité page 44.
- D. HOAG : Consideration of Apollo IMU gimbal lock. *MIT Instrumentation Laboratory*, E-1344, 1963. URL <http://www.hq.nasa.gov/alsj/e-1344.htm>. Cité page 51.
- Neville HOGAN : Impedance Control : An Approach to Manipulation. *IEEE American Control Conference*, pages 304–313, 1984. ISSN 00220434. Cité page 48.
- Yoshiro IWAI, Toshiyuki NAKANISHI et Kenji TAKAHASHI : Sea trials and supporting technologies of manned submersible Shinkai 6500. *Intervention Sous-Marine ISM 90, Toulon (France)*, 3-5 Dec 1990, (December), 1990. Cité page 11.

- Peter KAMPMANN et Frank KIRCHNER : Towards a fine-manipulation system with tactile feedback for deep-sea environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 67:115–121, 2015. ISSN 0921-8890. Cité page 54.
- Peter KAMPMANN, Frank KIRCHNER, Peter KAMPMANN, Timo STOFFREGEN et Frank KIRCHNER : Equipping industrial deep-sea manipulators with a sense of touch Equipping industrial deep-sea manipulators with a sense of touch. (November), 2015. Cité pages 53 et 54.
- Hangoon KANG, Hyungwon SHIM, Bong Huan JUN et Pan Mook LEE : Development of a specialized underwater leg convertible to a manipulator for the seabed walking robot CR200. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 19(8):709–717, 2013. ISSN 19765622. Cité page 19.
- Rafael KELLY et Ricardo CARELLI : A Class of Controllers for Robot Manipulators. *Journal of Robotic Systems*, 13(1 996):793–802, 1996. ISSN 07412223. Cité page 46.
- Rafael KELLY, Victor S. DAVILA et Julio A. PEREZ : Control of robot manipulators in joint space. chapitre 3, pages 59–94. Springer, 2006. ISBN 9781852339944. Cité pages 58, 59, et 70.
- Mohammad-Ali KHALIGHI, Tasnim HAMZA, Salah BOURENNANE, Pierre LEON et Jan OPDERBECKE : Underwater Wireless Optical Communications Using Silicon Photomultipliers. *IEEE Photonics Journal*, 9(4):1–10, 2017. ISSN 1943-0655. Cité page 105.
- Wisama KHALIL et Etienne DOMBRE : Direct kinematic model of serial robots. In Wisama KHALIL et Etienne DOMBRE, éditeurs : *Modeling, Identification and Control of Robots*, chapitre 5, pages 85–115. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002a. ISBN 978-1-903996-66-9. Cité page 62.
- Wisama KHALIL et Etienne DOMBRE : Dynamic modeling of serial robots. In Wisama KHALIL et Etienne DOMBRE, éditeurs : *Modeling, Identification and Control of Robots*, chapitre 9, pages 191–233. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002b. ISBN 978-1-903996-66-9. Cité pages 45 et 73.
- Wisama KHALIL et Jean-François KLEINFINGER : A new geometric notation for open and closed-loop robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 3, pages 1174–1179, 1986. ISBN 0818606959. Cité page 76.
- Wisama KHALIL, Aravindkumar VIJAYALINGAM, Bogdan KHOMUTENKO, Izzatbek MUKHANOV, Philippe LEMOINE et Gaël ECORCHARD : OpenSYMORO : An open-source software package for symbolic modelling of robots. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, pages 1206–1211, 2014. Cité page 43.

- Oussama KHATIB, Xiyang YEH, Gerald BRANTNER, Brian SOE, Boyeon KIM, Shameek GANGULY, Hannah STUART, Shiquan WANG, Mark CUTKOSKY, Aaron EDSINGER, Phillip MUL-LINS, Mitchell BARHAM, Christian R. VOOLSTRA, Khaled Nabil SALAMA, Michel L' HOUR et Vincent CREUZE : Ocean one : A robotic avatar for oceanic discovery. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 23(4):20–29, 2016. ISSN 10709932. Cité pages 19 et 39.
- Pradeep KHOSLA : Real-Time Implementation and Evaluation of Computed-Torque Scheme. 1987. Cité page 46.
- Kazuhiro KOSUGE et Yasuhisa HIRATA : Coordinated Motion Control of Multiple Manipulators. *In Robotics and Automation Handbook*, volume 1, pages 1–12. 2005. Cité page 51.
- David M. LANE, J. B. C. DAVIES, Guiseppe CASALINO, Giorgio BARTOLINI, Giorgio CANNATA, Gianmarco VERUGGIO, M. CANALS, Christian SMITH, Desmond J. O'BRIEN, M. PICKETT, G. ROBINSON, D. JONES, E. SCOTT, A. FERRARA, D. ANGELLETTI, M. COCCOLI, R. BONO, P. VIRGILI, R. PALLAS et E. GRACIA : AMADEUS : Advanced MANipulation for DEep Underwater Sampling. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 34–45, 1997. ISBN 0-7803-3612-7. Cité page 52.
- David M. LANE, J. B. C. DAVIES, Graham ROBINSON, Desmond J. O'BRIEN, Jim SNEDDON, Euan SEATON et Anders ELFSTROM : The AMADEUS Dextrous Subsea Hand : Design, Modeling, and Sensor Processing. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(1):96–111, 1999. Cité page 52.
- Pierre LEON, Jean-François DROGOU, D. CHENOT, C. LEVEQUE, H. MARTINOSSI, A. MASSOL, Vincent RIGAUD, D. SANTARELLI, P. VALDY, C. GOJAK, K. BERNARDET, Z. HAFIDI, Y. LE-NAULT, K. MAHIOUZ, Anne DESCHAMPS, Y. HELLO, Dominique LEFEVRE, Christian TAM-BURINI et J. J. DESTELLE : A new open cabled infrastructure in medsea. *OCEANS 2011 IEEE - Spain*, (November 2010), 2011. ISSN 0197-7385. Cité page 17.
- D. LIDDLE : TROJAN : Remotely operated vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 11(3):364–372, 1986. ISSN 0364-9059. Cité page 18.
- Anthony A. MACIEJEWSKI et Charles A. KLEIN : Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments. *The International Journal of Robotics Research*, 4(3):109–116, 1985. Cité page 44.
- Roger H. MALOOF, Ned C. FORRESTER et Charles E. ALBRECHT : A Brushless Electric Propulsion System for the Research Submersible Alvin. *In IEEE/MTS Oceans '86*, 1986. Cité page 39.
- Giacomo MARANI, Song K CHOI et Junku YUH : Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. 36:15–23, 2009. Cité page 40.

- Hirokazu MAYEDA, Koji YOSHIDA et Koichi OSUKA : Base Parameters of Manipulator Dynamic Models. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3):312–321, 1990. ISSN 1042296X. Cité page 74.
- James K. MILLS : Manipulator transition to and from contact tasks : a discontinuous control approach. *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 440–446, 1990. Cité page 45.
- Rainer MULLER, Matthias VETTE et Ali KANSO : Comparison of practically applicable mathematical descriptions of orientation and rotation in the three-dimensional Euclidean space. In T SCHÜPPSTUHL, K TRACHT et J FRANKE, éditeurs : *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Springer Vieweg, 2018. Cité page 51.
- Giovanni Gerardo MUSCOLO et Giorgio CANNATA : A novel tactile sensor for underwater applications : Limits and perspectives. *Oceans*, (March), 2015. Cité page 55.
- Hidehiko NAKAJOH, Tsuyoshi MIYAZAKI, Takao SAWA, Fumitaka SUGIMOTO et Takashi MURASHIMA : Development of 7000m work class ROV 'KAIKO Mk-IV'. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, OCE 2016*, 2016. Cité page 16.
- Eiji NAKANO, Shotaro OZAKI, Tatsuzo ISHIDA et Ichiro KATO : Cooperational control of the anthropomorphous manipulator melarm. *Proc. 4th Int. Symp. Ind. Robots*, pages 251 – 260, 1974. Cité pages 42 et 50.
- Marc NOKIN : Sea trials of the deep scientific system Victor 6000. *Proc. of Oceans'98*, 3:1573–1577, 1998. ISSN 01977385. Cité page 16.
- Jin-Yeong PARK, Hyungwon SHIM, Hyuk BAEK, Seongyeol YOO, Bong-huan JUN et Panmook LEE : Multi-legged ROV Crabster and an acoustic camera for survey of underwater cultural heritages Preliminary performance experiments in sea. *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 2015. Cité page 19.
- Richard P. PAUL : Robot Manipulator : Mathematics, Programming and Control. *The MIT press*, 1981. Cité page 42.
- Mario PRATS, Juan Carlos GARCIA, Stephan WIRTH, David RIBAS, Pedro Jose SANZ, Pere RIDAO, Nuno GRACIAS et Gabriel OLIVER : Multipurpose autonomous underwater intervention : A systems integration perspective. In *Mediterranean Conference on Control and Automation*, volume 03, pages 1379–1384, 2012. ISBN 9781467325318. Cité page 21.
- Meng QINGXIN, Wang HUA, Li PING, Wang LIQUAN et He ZE : Dexterous underwater robot hand : HEU hand II. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006:1477–1482, 2006. Cité page 52.

- Morgan QUIGLEY, Brian GERKEY, Ken CONLEY, Josh FAUST, Tully FOOTE, Jeremy LEIBS, Eric BERGER, Rob WHEELER et Andrew NG : ROS : an open-source Robot Operating System. *In ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009. Cité page [93](#).
- M. H. RAIBERT et J. J. CRAIG : Hybrid Position/Force Control of Manipulators. *Transaction of the A.S.M.E*, 102, 1981. Cité page [48](#).
- Marc RENAUD : Calcul de la matrice Jacobienne nécessaire à la commande coordonnée d'un manipulateur. *Mechanism and Machine Theory*, 15(2):81–91, 1980. ISSN 0094-114X. Cité page [43](#).
- David RIBAS, Pere RIDAO et Marc CARRERAS : Girona 500 AUV : From Survey to Intervention. 17(1):46–53, 2012. Cité page [21](#).
- David RIBAS, Pere RIDAO, Alessio TURETTA, Claudio MELCHIORRI, Gianluca PALLI, Jose Javier FERNANDEZ et Pedro Jose SANZ : I-AUV Mechatronics Integration for the TRIDENT FP7 Project. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5):2583–2592, 2015. ISSN 10834435. Cité pages [39](#) et [40](#).
- Pere RIDAO, Marc CARRERAS, David RIBAS, Pedro Jose SANZ et Gabriel OLIVER : Intervention AUVs : The Next Challenge. pages 12146–12159, 2014. Cité page [21](#).
- Francisco J. ROMERO-RAMIREZ, Rafael MUÑOZ-SALINAS et Rafael MEDINA-CARNICER : Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing*, 76:38–47, 2018. ISSN 0262-8856. Cité page [63](#).
- Bernard ROTH, Jahangir RASTEGAR et Victor SCHEINMAN : *On the Design of Computer Controlled Manipulators*, pages 93–113. Springer Vienna, Vienna, 1974. ISBN 978-3-7091-2993-7. Cité page [42](#).
- Homayoun SERAJI : A New Class of Nonlinear PID Controllers for Robotic Applications. 15 (3):161–181, 1998. Cité page [46](#).
- Bruno SICILIANO et Oussama KHATIB : *Springer Handbook of Robotics*. 2016. ISBN 9783319325507. Cité pages [45](#) et [51](#).
- Bruno SICILIANO, Lorenzo SCIAVICCO, Luigi VILLANI et Giuseppe ORIOLO : Robotics : Modelling, Planning and Control. chapitre 7, pages 247–302. Springer, 2009. ISBN 9781846286414. Cité page [58](#).
- Satja SIVCEV, Joseph COLEMAN, Edin OMERDIC, Gerard DOOLY et Daniel TOAL : Underwater manipulators : A review. *Ocean Engineering*, 163(2018):431–450, 2018. Cité page [41](#).

- Jean-Jacques E. SLOTINE et Weiping LI : *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall, 1991. ISBN 0130408905. Cité page 47.
- Mark W. SPONG, Seth HUTCHINSON et M. VIDYASAGAR : *Robot Dynamics and Control*. Wiley, 2004a. Cité page 42.
- Mark W SPONG, Seth HUTCHINSON et M VIDYASAGAR : *Robot Dynamics and Control*. chapitre 9, pages 187–224. Wiley, 2004b. Cité page 70.
- Hannah STUART, Shiquan WANG, Oussama KHATIB et Mark R. CUTKOSKY : The Ocean One hands : An adaptive design for robust marine manipulation. *International Journal of Robotics Research*, 36(2):150–166, 2017. ISSN 17413176. Cité page 54.
- Hannah S. STUART, Matteo BAGHERI, Shiquan WANG, Heather BARNARD, Audrey L. SHENG, Merritt JENKINS et Mark R. CUTKOSKY : Suction helps in a pinch : Improving underwater manipulation with gentle suction flow. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2015-Decem:2279–2284, 2015. ISSN 21530866. Cité page 54.
- Y. X. SU, Dong SUN et B. Y. DUAN : Design of an enhanced nonlinear PID controller. *Mechatronics*, 15(8):1005–1024, 2005. ISSN 09574158. Cité page 46.
- Jan SWEVERS, Chris GANSEMAN, Dilek BILGIN TÜKEL, Joris DE SCHUTTER et Hendrik VAN BRÜSSEL : Optimal robot excitation and identification. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(5):730–740, 1997. ISSN 1042296X. Cité pages 74 et 78.
- K. TAKASE, H. INOUE, K. SATO et S. HAGIWARA : The design of an articulated manipulator with torque control ability. *Proc. 4th Int. Symp. Ind. Robots*, pages 261 – 270, 1974. Cité pages 42 et 50.
- Masaru UCHIYAMA et Pierre DAUCHEZ : A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots. pages 350–356, 1988. Cité page 50.
- Masaru UCHIYAMA et Pierre DAUCHEZ : Symmetric kinematic formulation and non-master/slave coordinated control of two-arm robots. *Advanced Robotics*, pages 361–383, 1992. Cité page 50.
- Masaru UCHIYAMA, Naotoshi IWASAWA et Kyojiro HAKOMORI : Hybrid Position/Force Control for Coordination of a Two-Arm Robot. pages 1242–1247, 1987. Cité page 50.
- Michael W. WALKER et David E. ORIN : Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control - Transactions of the A.S.M.E.*, 104, 1982. Cité page 42.
- Richard A. WALTZ, Jose Luis MORALES, Jorge NOCEDAL et Dominique ORBAN : An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. *Mathematical Programming*, 107(3):391–408, 2006. ISSN 1436-4646. Cité page 78.

- H. R. WIDDITSCH : Spurv-the first decade. Rapport technique, WASHINGTON UNIV SEATTLE APPLIED PHYSICS LAB, 1973. Cité page 20.
- J. YUH, Song K. CHOI, C. IKEHARA, G. H. KIM, G. MCMURTRY, M. GHASEMI-NEJHAD, Nilanjan SARKAR et K. SUGIHARA : Design of a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions (SAUVIM). *In Proceedings of 1998 International Symposium on Underwater Technology*, volume 1, pages 63–68, 1998. ISBN 0780342739. Cité page 20.
- John G. ZIEGLER et Nathaniel B. NICHOLS : Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transaction of the A.S.M.E*, 64:759–768, 1942. ISSN 0192303X. Cité page 46.



Liste des publications

Conférence internationale avec comité de lecture et édition des actes

- **François Leborne**, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Lorenzo Brignone. *Dynamic Modeling and Identification of an Heterogeneously Actuated Underwater Manipulator Arm*. ICRA : International Conference on Robotics and Automation, May 2018, Brisbane, Australia. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018.

Communication et publications diverses

- **François Leborne**, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Lorenzo Brignone. *Commande de bras manipulateurs de robot sous-marin pour la manipulation à grande profondeur d'échantillons biologiques déformables*. 5^{ème} Journées Scientifiques du LabEx NUMEV, 5 et 6 octobre 2016, Montpellier, France. Poster.
- **François Leborne**, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Lorenzo Brignone. *Coordinated Control of Two Robotic Arms for Underwater Manipulation of Deformable Biological Specimens*. MOQESM'16 : Monitoring Quantitatif de l'Environnement Sous-Marin, 12 octobre 2016, Brest, France. Communication orale.
- **François Leborne**, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Lorenzo Brignone. *Dynamic Modeling and Identification of a Heterogeneously Actuated Underwater Manipulator Arm*. 6^{ème} Journées Scientifiques du LabEx NUMEV, 13 et 14 novembre 2017, Montpellier, France. Poster.
- **François Leborne**, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Lorenzo Brignone. *Modeling and Identification of an Heterogeneously Actuated Underwater Manipulator Arm*. Journée GT2 « Robotique marine et sous-marine », 15 novembre 2017, Paris, France. Communication orale.

Abstract

The research carried out in the scope of this doctorate degree aims to develop innovative techniques to improve the collection of biological and mineral samples underwater using robotic manipulators. The end goal is to enhance the handling by robotic means in order to maximise sample quality provided to marine scientists. The proposed techniques are based on an in-depth analysis of the robotic arm actuators used in most recent underwater intervention vehicles, in order to improve the accuracy of the positioning of the tools held by the manipulator arms. An instrumented tool has also been developed with the aim to measure the reaction forces and adapt the interaction between the arm's end-effector and its environment to improve samples handling. These methods and the other contributions described in this thesis have been experimentally validated using Ifremer's hybrid-ROV *Ariane* equipped with two electrically actuated heterogeneous robotic arms.

Keywords: *Underwater Robotics, Manipulation, Modeling, Identification, Force Sensing*

Résumé

Dans le cadre de la collecte sous-marine d'échantillons biologiques et minéraux pour la recherche scientifique par un robot sous-marin équipé de bras manipulateurs, ce projet de thèse a pour but principal le développement de nouvelles techniques de manipulation des échantillons, plus fiables, permettant d'en assurer l'intégrité physique et leur exploitabilité par les chercheurs. Les nouvelles techniques de manipulation proposées prennent en compte l'actionnement particulier des nouveaux bras électriques sous-marins équipant les engins récents, afin d'augmenter la précision du positionnement des outils embarqués par le manipulateur. Un outil amovible, compliant, et mesurant les efforts d'interaction entre les bras du sous-marin et leur environnement est aussi proposé, et des méthodes permettant de tirer partie des caractéristiques de cet outil sont développées et testées expérimentalement. L'engin sous-marin hybride HROV *Ariane*, équipé de deux bras électriques hétérogènes, offre la plateforme opérationnelle pour la validation expérimentale des solutions proposées.

Mots-clés : *Robotique sous-marine, manipulation, modélisation, identification, mesure d'effort*