

HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
MINES-TÉLÉCOM ATLANTIQUE BRETAGNE
PAYS-DE-LA-LOIRE - IMT ATLANTIQUE

ÉCOLE DOCTORALE N° 641
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Automatique, productique et robotique*

Par

Vincent Lebastard

**Un parcours en biorobotique, du sens électrique à la robotique
continue**

HDR présentée et soutenue à « IMT-Atlantique », le « Mardi 9 janvier 2024 »
**Unité de recherche : Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), UMR CNRS
6004**

Rapporteurs avant soutenance :

Fabien Candelier HDR, Professeur IUSTI CNRS Aix Marseille University, Marseille, France
Lionel Lapierre HDR, Professeur de l'ENSTA Bretagne, Brest, France
Stéphane Viollet HDR, Directeur de recherche CNRS, ESM, Marseille, France

Composition du Jury :

	Prénom NOM	Fonction et établissement d'exercice (<i>à préciser après la soutenance</i>)
Président :		
Examineurs :	Yannick Aoustin	HDR, Professeur Nantes Université, LS2N, Nantes, France
	Frédéric Boyer	HDR, Professeur IMT-atlantique, LS2N, Nantes, France
	Olivier Chadebec	HDR, Directeur de Recherche CNRS G2Elab, Grenoble, France
	Christian Duriez	HDR, Directeur de Recherche INRIA, Lille, France

SOMMAIRE

Introduction	7
1 Principe du sens électrique : du poisson au capteur	9
1.1 Introduction	9
1.2 Le sens électrique dans la nature	10
1.2.1 Les deux modes de perception des poissons	10
1.2.2 Usage du sens électrique par le poisson	11
1.3 Le sens électrique artificiel	12
1.3.1 Quelques considérations physiques	12
1.3.2 État de l'art des capteurs électriques	13
1.4 Principe du capteur $U - I$	15
1.5 Modèle du capteur $U - I$ pour la conception	17
1.5.1 Modèle des courants	17
1.5.2 Sensibilité	18
1.5.3 Puissance consommée	18
1.6 Evolution du capteur $U - I$	19
1.6.1 Adaptation aux milieux de conductivité variable.	19
1.6.2 Adaptation à la communication	20
1.7 Conclusion	22
2 Modélisation du sens électrique	23
2.1 Introduction	23
2.2 Formulation du problème électrique direct	25
2.3 Résolution du problème directe par la méthode des intégrales de frontière .	27
2.4 Résolution du problème directe par la méthode des réflexions	28
2.5 Modèle de la réponse du capteur	30
2.6 Modèle de la réponse des sondes élançées	32
2.7 δI des petits objets	34
2.7.1 Réponse de l'objet à l'excitation du capteur	35

2.8	δI des grands objets	37
2.8.1	δI d'un mur isolant	37
2.8.2	δI des coins isolants	38
2.9	Tests numériques	39
2.10	Conclusion	41
3	Navigation basée sur le sens électrique	43
3.1	Introduction	43
3.2	Recombinaison des courants pour la navigation	44
3.3	Perception active pour l'évitement des obstacles	46
3.4	Perception passive pour l'agrégation	46
3.5	Organisation de l'activité électrique en groupe	49
3.6	Navigation cinématique réactive d'un aFish	50
3.7	Stratégie de navigation	53
3.8	Résultats expérimentaux	54
3.8.1	Exploration et évitement d'obstacles par aFish.	55
3.8.2	Agrégation et communication entre aFish et aMussel	55
3.9	Conclusion	58
4	Électro-haptique	61
4.1	Introduction	61
4.2	Formalisation du problème étudié	61
4.3	Caractéristiques d'une boucle de rétroaction haptique	63
4.3.1	Transparence	64
4.3.2	Stabilité et passivité	64
4.4	Emulation des forces de rappel électriques	66
4.5	Résultats expérimentaux	68
4.6	Conclusion	69
5	Localisation et identification d'objets.	71
5.1	Introduction	71
5.2	Détection d'un objet	72
5.2.1	Stratégie de détection du poisson	72
5.2.2	Algorithme de détection basé sur les mesures	74
5.3	Localisation d'objets par l'algorithme MUSIC	74

5.4	Reconnaissance de formes par sens électrique	76
5.4.1	Estimation de la forme d'un objet hors ligne	77
5.4.2	Estimation de la forme d'un objet en ligne	78
5.5	Conclusion	81
6	Dynamique des robots continus et mous	83
6.1	Modèle de poutres Cosserat	83
6.2	Paramétrisation des configurations d'une poutre de Cosserat par ses déformations	86
6.3	Dynamique d'un robot continu paramétré par les déformations	88
6.4	Validation du modèle : Simulation de la poutre volante	90
6.5	Application aux TACRs	92
6.6	Au delà des TACRs	94
6.6.1	Article 1 : Modélisation Newtonienne et Lagrangienne des robots continus	94
6.6.2	Article 2 : Extension aux poutres glissantes	94
6.6.3	Article 3 : Commande optimale et théorie Cosserat	95
6.6.4	Article 4 : Modélisation des robots continus à encoches	96
6.6.5	Article 5 : Simulation des robots continus par intégration implicite	96
6.7	Conclusion du chapitre	97
7	Bilans et perspectives	99
	Bibliography	103
8	Curriculum Vitae	111
	Curriculum Vitae	111
8.1	Situation professionnelle	111
8.2	Formation	111
8.3	Expériences professionnelles	112
8.4	Recherche et valorisation	112
8.5	Encadrements	116
8.5.1	Post-Doctorants	116
8.5.2	Doctorants	117
8.5.3	Masters	118

8.5.4	Jurys de thèses	119
8.6	Publications	119
8.6.1	Journaux Internationaux avec comité de lecture	119
8.6.2	Chapitres de livre	121
8.6.3	Brevets	122
8.6.4	Conférences Internationales avec comité de lecture	122
8.7	Animations et rayonnement	125
8.8	Arbitrage de communications scientifiques	125
8.9	Activités d'enseignement	125
8.9.1	Responsabilités pédagogiques.	126
8.9.2	Enseignements	127
8.9.3	Encadrement de projet et de stages en entreprise	129

INTRODUCTION

Dans cette partie, je présente mes activités de recherche effectuées depuis l'obtention de mon détachement de l'éducation nationale à l'IMT Atlantique (ex. École des mines de Nantes) en 2009 dans l'équipe de Frédéric Boyer. La démarche bio-robotique, que j'ai découverte avec le projet européen FET ANGELS, m'a permis de collaborer avec des roboticiens, des physiciens mais surtout des biologistes. C'est au travers de ce projet et des différentes collaborations, que j'ai travaillé sur la compréhension des boucles sensorimotrices chez les poissons faiblement électriques. Les applications de ces connaissances, nous ont permis de mieux comprendre le sens électrique et de les transférer vers des domaines variés de l'ingénierie.

Le manuscrit se compose de sept chapitres donnant un aperçu synthétique du travail de recherche que j'ai mené. Le premier chapitre présente le poisson électrique, notre modèle biologique, et son "alter ego" technologique. Ce chapitre décrit l'utilisation du sens électrique par le poisson et la solution développée aux travers les différents projets auxquels j'ai contribué. Le deuxième chapitre détaille la méthodologie employée pour modéliser le sens électrique afin de produire des algorithmes compacts et embarquables sur des robots sous-marin. La compréhension des modèle de perception nous a permis de répondre à des problématiques de la robotique sous-marine tout en gardant un regard attentif sur notre modèle biologique "le poisson". Le chapitre trois s'intéresse à la navigation sous-marine à savoir l'évitement d'obstacle et la communication. Dans ce chapitre, nous utilisons les mesures électriques pour naviguer et communiquer sans aucune connaissance ou reconstruction de l'environnement. Le chapitre quatre s'intéresse à une des capacités singulières du sens électrique, à savoir le retour haptique sans contact. Le chapitre cinq s'attaque au problème de la localisation et de la reconstruction d'environnement.

Enfin pour le dernier chapitre, j'ai ouvert, depuis 2019, mon horizon de recherche en m'intéressant à la robotique continue. Depuis trois ans, je continue à développer et d'implémenter le modèle des Cosserats en promouvant une nouvelle méthode de réduction basée sur la méthode de Ritz appliquée aux champs de déformation. Cette formulation,

nous permet aujourd'hui de construire des modèles permettant de synthétiser des algorithmes de simulation rapide et de commandes de robots continus, tels que les robots multi-segments actionnés par câble.

PRINCIPE DU SENS ÉLECTRIQUE : DU POISSON AU CAPTEUR

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le sens électrique dans la nature tel que pratiqué par les poissons. Puis, nous donnerons les principes de bases permettant l'utilisation de ce sens dans des applications technologiques liées à la robotique sous marine. Le sens électrique, également appelé électroréception, est la capacité de détecter les champs électriques. Dans la nature le sens électrique a évolué indépendamment sur les continents africain et sud-américain. Il a été développé par plusieurs centaines d'espèces de poissons vivant dans des eaux douces, turbides et peu profondes (LISSMANN et MACHIN 1958 ; MOLLER 1995 ; CAPUTI, BUDELLI et BELL 1998a ; EMDE et al. 1998b). Ces poissons utilisent cette capacité pour percevoir leur environnement, communiquer entre eux, chasser leurs proies ou échapper à leurs prédateurs. Plusieurs autres espèces de poissons d'eau de mer, par exemple les requins et les raies, ont développé cette même capacité et peuvent détecter les variations de champs électriques dans leur voisinage. En plus des animaux aquatiques (et amphibiens), le sens électrique a aussi été observé chez les échidnés, les cafards et les abeilles (CLARKE et al. 2013).

L'environnement des robots sous-marins d'inspection présente des caractéristiques communes avec l'habitat des poissons électriques, en particulier la turbidité et le confinement. Dans ce type d'environnement, la vision et la détection acoustique basée sur le sonar rencontrent des difficultés lorsque les obstacles sont nombreux. C'est pourquoi nous avons décidé de développer des capteurs électriques artificiels afin d'en équiper des robots sous-marins aptes à naviguer dans ces conditions difficiles. Dans ce chapitre, nous discuterons de l'utilisation du sens électrique par les poissons et nous présenterons comment nous avons déployé le sens électrique artificiel sur des robots.

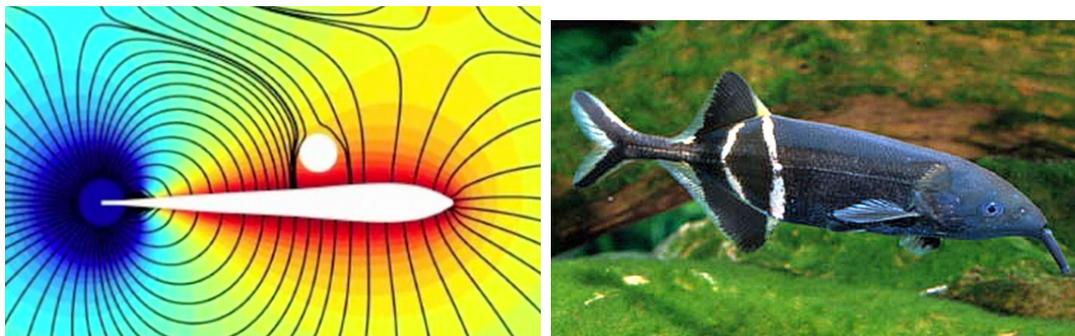


FIGURE 1.1 – (Gauche) Sens électrique actif : illustration du champ électrique généré par un poisson en présence d'un objet isolant qui modifie le champ électrique. Copyright E. Roth. Université John Hopkins. (Droite) *Gnathonemus petersii* - Poisson africain faiblement électrique.

1.2 Le sens électrique dans la nature

1.2.1 Les deux modes de perception des poissons

Chez les poissons, on peut distinguer deux modes de perception : le sens électrique passif et le sens électrique actif (MOLLER 1995). Dans le cas du sens électrique passif, le poisson détecte le champ électrique généré par d'autres poissons (proies ou congénères) et l'utilise pour les localiser et les reconnaître (KALMIJN 1966). Ces champs électriques exogènes sont généralement générés par l'activité des nerfs et des muscles des autres poissons. Le sens électrique passif est utilisé par plusieurs familles de poissons de mer comme les requins et les raies qui ont développé des électro-récepteurs spécifiques appelés ampoules de Lorenzini. Ces récepteurs sont si sensibles que ces poissons les utilisent également pour s'orienter le long des champs telluriques ou pour percevoir les faibles gradients de salinité. Utilisé par les requins pour chasser de nuit, la portée de la perception du sens électrique passif est généralement de quelques mètres (KALMIJN 1966).

Les poissons faiblement électriques utilisant la perception active sont principalement nocturnes et vivent dans les eaux des forêts équatoriales (LISSMANN et MACHIN 1958). Ces eaux immergent de nombreux obstacles tels que les racines des arbres et sont riches en particules en suspension. Dans ces environnements d'eau trouble et saturés d'obstacles, la vision et la détection acoustique sont inutiles pour les poissons. Ils ont donc développé le sens électrique actif pour naviguer et communiquer. Lorsqu'ils utilisent ce sens, ils polarisent d'abord leur corps par rapport à un organe spécifique, appelé organe électrique (OE), situé à la base de la queue, et génèrent un champ électrique de forme dipolaire

dans leur environnement qui est ensuite déformé par les objets proches (voir figure 1.1). Lorsqu'il émet ce champ, le poisson peut mesurer précisément sa distorsion par les objets, grâce à un réseau d'électrorécepteurs répartis le long de son corps. Il en déduit une image tridimensionnelle de son environnement grâce à un traitement neuronal (CAPUTI, BUDELLI et BELL 1998a ; EMDE et al. 1998b). Le *Gnathonemus petersii* (poisson éléphant de la figure 1.1) est l'un des poissons électriques les plus efficaces et les plus intelligents dans le traitement de l'information électrique (EMDE et SCHWARZ 2002). Il appartient à la famille africaine des *Mormyride*, dont la majorité émet des champs dits pulsés (des impulsions généralement bi-phasique au contenu fréquentiel très riche). De l'autre côté de l'atlantique, en Amérique du Sud, d'autres poissons de la famille des *Gymnotide* utilisent le même principe de réception, mais produisent des champs électriques harmoniques (ASSAD, RASNOW et STODDARD 1999). Le sens électrique actif a une portée typique d'environ une longueur de corps. De plus, les poissons faiblement électriques peuvent également utiliser la détection passive afin de chasser leurs proies, d'échapper à leurs prédateurs ou communiquer entre individus de la même espèce. Dans ce cas, le sens électrique passif a une portée typique d'environ trois longueurs de corps.

1.2.2 Usage du sens électrique par le poisson

Lorsqu'il est utilisé pour la navigation, le sens électrique actif, ou "électrolocalisation", peut être comparé à l'écholocation utilisée par les dauphins, où le signal émis n'est plus une onde acoustique mais un champ électrique. Cependant, comme les émetteurs électriques embarqués ne peuvent être des sources, mais seulement des dipôles, la portée du sens électrique est beaucoup plus courte que celle du sonar. Malgré cette faible portée, c'est un sens omnidirectionnel qui permet aux poissons de localiser des objets proches et de reconnaître leur nature électrique (lorsqu'ils sont électriquement contrastés par rapport à l'eau), leur volume (taille) et leur forme (CAPUTI, BUDELLI et BELL 1998a ; B.RASNOW 1996). Dans le premier cas, les poissons peuvent analyser l'influence les modulations d'amplitude et de phase du signal émis afin d'en déduire les propriétés électriques des matériaux qui constituent les objets perturbateurs. En particulier, la réponse électrique des objets morts (pierres, objets manufacturés) n'affecte que l'amplitude du signal en raison de leur composante conductrice. Alors que les objets vivants, comme les plantes et les animaux, ont une forte composante capacitive qui induit un déphasage non négligeable entre les signaux émis et mesurés. Si l'on suit une métaphore visuelle, pour un poisson électrique actif, les objets vivants apparaissent en couleur sur un fond inerte, en noir et blanc (EMDE 1999 ; EMDE

et al. 1998b). Au-delà de la perception, les poissons électriques communiquent également en modulant l'activité électrique de leurs OE, une aptitude connue sous le nom d'électrocommunication. Cette autre capacité confèrent à ces poissons les comportements sociaux complexes mis en jeu dans leurs parades nuptiales ou le marquage de leur territoire. De plus, ces poissons naviguant en petits groupes lors de certains comportements collectifs, ils ont développé des stratégies originales pour éviter les brouillages. Les poissons à impulsions, par exemple, organisent leurs impulsions en séquences ordonnées fixes (prise de parole alternée), tandis que les poissons à ondes modulent leurs fréquences d'émission de manière à éviter les interférences (STAMPER et al. 2012) .

1.3 Le sens électrique artificiel

Dans cette section, nous présentons un bref état de l'art sur les capteurs électriques artificiels et la physique de base sur laquelle ils s'appuient. Ces notions de physique sont illustrées par quelques relations clés qui sont d'une grande aide dans la conception d'un capteur électrique. Nous commencerons par présenter la détection électrique active et passerons progressivement à la détection électrique passive. L'utilisation d'un modèle dipolaire simple appliqué à un capteur (sonde/robot) fournira une première estimation des exigences imposées à la chaîne d'instrumentation et de traitement.

1.3.1 Quelques considérations physiques

Dans les développements suivants, nous considérons les ondes électromagnétiques se propageant dans l'eau. Fondamentalement, ces ondes sont régies par les équations de Maxwell. Cependant, dans la gamme de fréquence des champs électriques produits ($\frac{\omega}{2\pi} \lesssim 50$ kHz), et à nos échelles de longueur (de l'ordre du mètre), les équations de Maxwell peuvent être remplacées par leur approximation quasi-statique électrique dans laquelle un champ électrique $\hat{E} = Ee^{i\omega t} \in \mathbb{C}^3$ peut être entièrement paramétré par $\hat{\phi} \in \mathbb{C}$ à travers $\hat{E} = -\nabla\hat{\phi}$, où $\hat{\phi} \in \mathbb{C}$ est le champ de potentiel électrique, $i \in \mathbb{C}$ le nombre imaginaire. Pour prédire la succession des états d'équilibre qui décriront les phénomènes électriques dans ces conditions, il faut ajouter au potentiel électrique, la conservation des courants électriques et la loi d'Ohm du milieu dans lequel est plongé le capteur. Cette loi, qui fait intervenir la nature électrique du milieu, est simplement donnée par $\hat{j} = \sigma\hat{E}$, où \hat{j} est le champ des courants électriques qui traversent le milieu, et σ est une impédance complexe telle que

$\sigma = \gamma + i\epsilon\omega$, avec γ et ϵ la conductivité et la permittivité du milieu. Ainsi, dans le contexte général, la loi d'Ohm est dépendante de la fréquence et introduit un déphasage et une atténuation d'amplitude des champs électriques qui traversent le milieu. Tous les effets produits par γ sont appelés effets conductifs, tous les effets produits par ϵ sont appelés effets capacitifs.

Cela signifie que la phase et l'amplitude des courants électriques pourraient être toutes deux exploitées par un capteur pour percevoir son environnement. Malgré cette possibilité, nous nous limiterons dans la suite du rapport à la seule mesure des amplitudes. Dans ces conditions restreintes, tous les phénomènes électriques se comportent comme des effets conductifs, même si les amplitudes mesurées des courants contiennent l'influence de ϵ . En d'autres termes, nous ne chercherons pas à extraire la composante conductrice réelle des courants électriques mais considérerons directement leur module. En résumé, dans tout ce qui va suivre, nous ignorerons la dépendance en fréquence des phénomènes et ne parlerons que de conductivités dans des environnements perçus en "noir et blanc".

1.3.2 État de l'art des capteurs électriques

Le premier système robotique pour la détection inspiré des poissons électriques a été conçu par (SOLBERG, LYNCH et MACIVER 2008). Il était composé de quatre électrodes ponctuelles, deux d'entre elles étant mises sous tension, tandis que la tension entre les deux autres était mesurée. Bien qu'étant le premier capteur électrique artificiel, ce dispositif éludait l'influence du corps, typiquement d'un robot, portant le capteur et interagissant électriquement avec lui et l'environnement. Depuis lors, d'autres conceptions de capteurs, embarqués sur des véhicules réalistes (et réels), ont été développées en utilisant une stratégie $U - U$ (BAI et al. 2012) ou $U - I$ (BOYER et al. 2012a ; SERVAGENT et al. 2013a). La première lettre désigne ici la grandeur électrique contrôlant l'émission du champ (ici une tension U), la seconde désigne la variable de mesure (U ou I , I désignant un courant). Dans tous les cas, le capteur est une coque isolante axisymétrique (en plastique), sur laquelle est disposé un ensemble d'électrodes conductrices (métalliques). Disposées selon une symétrie bilatérale (gauche-droite), toutes ces électrodes sont en contact avec l'eau. Dans les deux cas de figure $U - U$ ou $U - I$, le champ électrique dipolaire est généré par la mise sous tension de l'une des deux électrodes extrêmes qui définit la queue du robot. Dans le mode $U - U$, la seconde électrode extrême (dite de tête) est mise à la masse, tandis que toutes les autres électrodes sont dites réceptrices. Dans le mode $U - I$ toutes

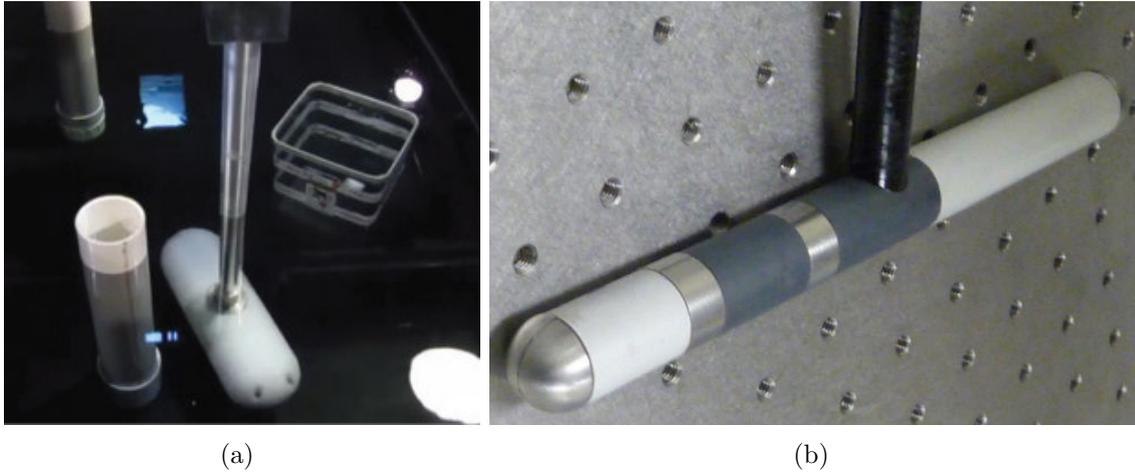


FIGURE 1.2 – Les capteur sont des coquilles isolantes avec électrodes obéissant à une symétrie gauche/droite. a) Technologie $U - U$ du groupe de MacIver (BAI et al. 2012) b) Technologie $U - I$ du groupe de Boyer (SERVAGENT et al. 2013a). L'émission est la même pour les deux technologie, U est imposée par un générateur d'ondes. La réception est différente : dans un cas on mesure U (a), dans l'autre on mesure I (b).

les autres électrodes autres que celle en queue, sont mises à la masse et jouent le rôle de récepteur. Bien que les deux techniques ($U - U$ et $U - I$) partagent un même principe d'émission (U), dans le mode $U - U$, les électrodes réceptrices sont flottantes et l'on mesure leur potentiel. Alors que dans le mode $U - I$, toutes les électrodes, à l'exception de l'émetteur, sont mises à la masse, et les courants qui circulent à travers chacune d'elles sont mesurés. Une illustration de ces deux systèmes est présentée sur la figure 1.2.

Dans notre cas, nous utiliserons la mesure $U - I$ qui présente entre autre avantages, de :

1. Retrouver la portée des poissons qui est d'environ une longueur de corps en mode actif et de trois longueurs de corps en mode passif.
2. Mieux correspondre aux poissons qui ne mesurent pas des différences de potentiel gauche-droite, mais plutôt des courants transcutanés.
3. Être plus adapté à l'extension du sens électrique artificiel de l'eau douce à l'eau de mer.

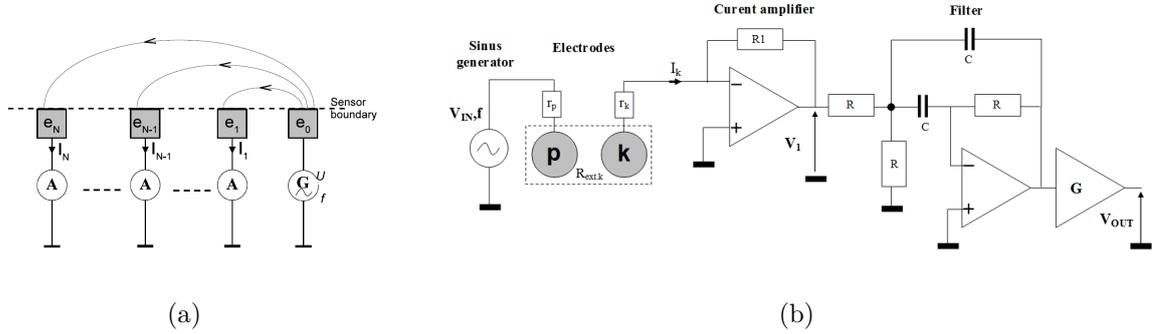


FIGURE 1.3 – Principe global des mesures (a) et circuit ampèremétrique (b) tels qu'ils ont été présentés dans (SERVAGENT et al. 2013a) pour l'eau du robinet.

1.4 Principe du capteur $U - I$

Nous considérons un capteur $U - I$ à $N + 1$ électrodes, i.e. une émettrice et N réceptrices tel qu'introduit précédemment. En mode actif (SERVAGENT et al. 2013a), la tension U entre les récepteurs e_1, e_2, \dots, e_N et l'émetteur e_0 , est produite par un générateur de tension alternatif. Notons ici qu'une tension continue ne peut fonctionner car elle génère une électrolyse indésirable. Les récepteurs mis à la masse, sont quant à eux équipés de circuits ampèrométriques, et les mesures de courant indépendantes qu'ils délivrent, définissent le vecteur des courants mesurés $I = (I_1, I_2, \dots, I_N)^T$. Le principe de mesure est résumé dans la figure 1.3-a), tandis qu'un circuit ampèremétrique est schématisé dans la figure 1.3.b).

Dans la suite du manuscrit, tout capteur $U - I$ est compris comme un robot, et réciproquement, tout robot est un capteur $U - I$. Ainsi une fois fixée à une canne, pilotée par un robot cartésien, la sonde des figures 1.2(b) et 1.4(a) peut être considérée comme un robot autonome. De même, une fois le capteur $U - I$ implanté sur un AUV sous-marin, ce robot deviendra un capteur électrique tel que discuté jusqu'ici. A titre illustratif, considérons les deux types de robot équipés de notre capteur, que nous avons contribué à développer pour le projet Européen subCULTron. Les premiers, appelés a-Mussels ou Moules artificielles (cf. figure 1.4(b)), sont des amphores se tenant à la verticale sur le fond de la lagune de Venise. Les seconds, appelés aFish, pour "poissons artificiels" (cf. figure 1.4(c)), sont des AUVs assimilables à des unicycles aptes à naviguer en eaux libre dans les trois dimensions. Sur ces deux types de robot, on a pris $N = 5$, avec e_0 localisée dans la queue de chacun, et e_1, e_2, e_3 et e_4 disposé symétriquement dans les quatre cadrants de leur tête. Une fois

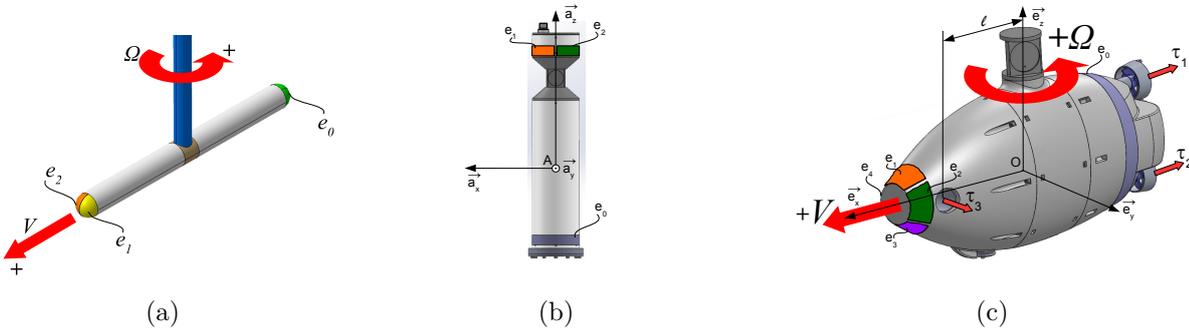


FIGURE 1.4 – Vue CAO d’une sonde élancée, d’une aMussel et d’un aFish.

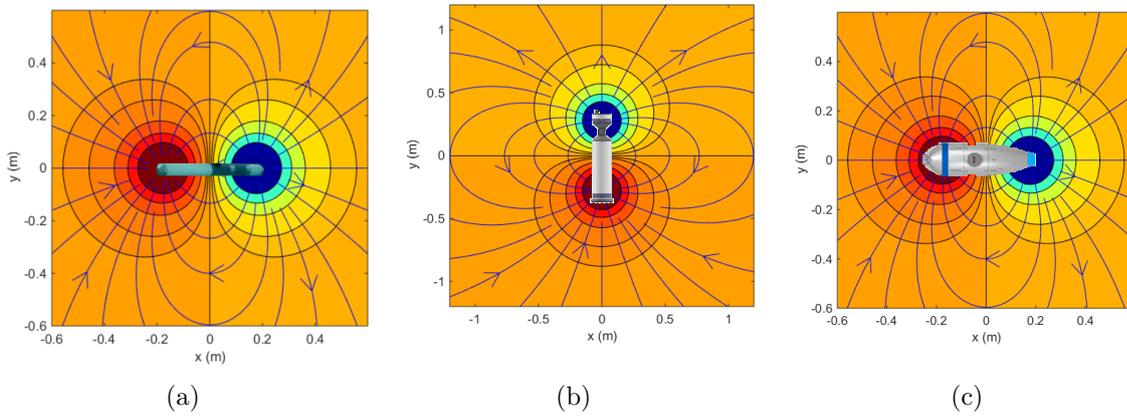


FIGURE 1.5 – Portrait du champ électrique d’une sonde élancée (a), d’une aMussel (b) et d’un aFish (c).

sous tension, le capteur produit comme attendu un champ dipolaire tel que représenté sur la figure 1.5 pour les deux systèmes.

Jusqu’ici, le capteur reproduit la détection électrique active. Cependant, nous voulons également utiliser la détection électrique passive comme le font les poissons. Pour imiter la détection électrique passive, la même électronique peut être utilisée, dans ce cas, le champ électrique n’est pas généré par le générateur du capteur mais par un dipôle actif externe qui peut être un autre robot ou une station d’accueil par exemple. En d’autres termes, l’électronique de mesure fonctionne indifféremment dans les deux modes, comme cela a été montré dans (BOYER et al. 2015) pour l’amarrage sous-marin. Dans ce dernier cas, on dit que le mode $U - I$ dégénère en $0 - I$, le zéro signifiant que le capteur n’émet aucun signal. Dans les développements suivants, nous privilégions le mode actif et discuterons

plus tard du mode passif.

1.5 Modèle du capteur $U - I$ pour la conception

1.5.1 Modèle des courants

Lorsqu'il n'y a aucun objet dans la scène entourant la sonde, ces courants sont entièrement modélisés par l'équation vectorielle suivante

$$I^{(0)} = C^{(0)}U, \quad (1.1)$$

où $C^{(0)}$ est un vecteur $N \times 1$ modélisant la conductivité basale (indexée (0)) des chemins de courant entre l'émetteur et les récepteurs. Ce vecteur ne dépend que de la géométrie du capteur et de la conductivité de l'eau ambiante γ par la relation :

$$C^{(0)} = \gamma S^{(0)}, \quad (1.2)$$

où $S^{(0)}$ est un vecteur $N \times 1$ modélisant l'influence de la forme du capteur sur la conductance entre l'émetteur et les N récepteurs. La modification de la géométrie des électrodes est un degré de liberté encodé dans $S^{(0)}$. Par exemple, la diminution de la taille des électrodes fait diminuer $C^{(0)}$. Notons également que $C^{(0)}$ peut être obtenu une fois pour toutes soit par calcul numérique, soit in situ, via une phase de calibration préalable. Lorsqu'un objet (obstacle, autre robot) apparaît dans l'environnement du capteur, le vecteur des courants mesurés I devient

$$I = I^{(0)} + \delta I = (C^{(0)} + \delta C)U = CU, \quad (1.3)$$

où δI représente la composante perturbatrice des courants mesurés qui encode la présence de l'objet, et δC est sa contribution à la conductivité externe entre l'émetteur et les récepteurs notée C . Cette conductivité perturbatrice δC dépend de la distance entre l'objet et le capteur, de la géométrie de l'objet, ainsi que du nombre sans dimension $\lambda = \gamma_o/\gamma$, appelé coefficient de contraste et dans l'expression duquel γ_o dénote la conductivité de l'objet. À cet égard, notez que lorsque $\lambda = 1$, $\delta C = 0$, l'objet est électriquement transparent.

1.5.2 Sensibilité

Sur la base des relations et définitions ci-dessus, nous pouvons estimer la sensibilité de notre capteur actif $U - I$. Intuitivement, cette sensibilité quantifie les plus petites variations de courant électrique que le capteur est capable de détecter par rapport au courant basal qu'il produit. Mathématiquement, on peut l'écrire comme suit :

$$s = \frac{\|\delta I\|}{\|I^{(0)}\|}. \quad (1.4)$$

Cette quantité est un paramètre clé de la conception de notre capteur car elle permet de relier les exigences en termes d'utilisation (portée, résolution) à celles imposées à l'électronique (signal/bruit). Une fois complétée d'un modèle de la réponse électrique de l'environnement donnant une expression de δI , cette relation permet de lier la sensibilité du capteur à sa portée de détection, et peut être utilisée dans la phase de conception préliminaire d'un robot équipé de notre capteur.

1.5.3 Puissance consommée

Pour concevoir les batteries de notre capteur actif, nous devons quantifier la puissance que son champ basal consomme. En utilisant les lois de base de l'électrocinétique, cette puissance notée $P^{(0)}$ est donnée par le produit de la tension imposée, par le courant $I_0^{(0)}$ qui sort de l'électrode émettrice notée e_0 . En utilisant la conservation des courants, nous avons $I_0^{(0)} = -I_1^{(0)} - I_2^{(0)} - I_3^{(0)} \dots - I_N^{(0)}$, et nous pouvons écrire :

$$P^{(0)} = UI_0^{(0)} = -(1_N^T I^{(0)})U \quad (1.5)$$

où 1_N est le vecteur $N \times 1$ dont toutes les composantes sont égales à un. Notons que cette expression ne vaut que pour la puissance requise par le champ électrique. En particulier, elle ne représente pas la puissance consommée par l'électronique du capteur. De plus, en utilisant (1.3) en l'absence d'objet perturbateur, nous avons également :

$$P^{(0)} = UI_0^{(0)} = -(C_1^{(0)} + C_2^{(0)} + \dots + C_N^{(0)})U^2 = \sum_{i=1}^N (-C_i^{(0)})U^2 \quad (1.6)$$

où $C_i^{(0)}U^2$ représente la puissance consommée par l'électrode i lorsqu'elle est placée sous une tension U , le signe moins indiquant que cette puissance est perdue dans l'environ-

nement. En utilisant la factorisation $C^{(0)} = \gamma S^{(0)}$, avec $S^{(0)} = (S_1^{(0)}, S_2^{(0)}, \dots, S_N^{(0)})^T$, la puissance requise par le capteur est de la forme :

$$P^{(0)} = \gamma \sum_{i=1}^N (S_i^{(0)} U^2) \quad (1.7)$$

Cette expression générale montre que la puissance varie linéairement avec la conductivité du milieu, et comment elle est également influencée par la forme du capteur. Sur la base de cette dernière dépendance, remarquons qu'une façon de compenser l'augmentation de la conductivité du milieu est de construire des capteurs avec des formes complexes ou de réduire la taille des électrodes. Enfin, notons que cette estimation de la puissance est réalisée sans objet perturbateur dans l'environnement du capteur. Dans le cas plus général où un objet perturbateur se trouve dans le champ du capteur, la consommation est alors modélisée par :

$$P = P^{(0)} + \delta P = \sum_{i=1}^N (C_i^{(0)} + \delta C_i) U^2, \quad (1.8)$$

où δC_i est déduit d'un modèle de la réponse de l'objet au champ basal que nous détaillerons dans la suite. Sans entrer dans ces détails, notons dès à présent, que si le capteur/robot est proche d'un grand objet conducteur comme la coque d'un bateau, δC_i va augmenter considérablement et le capteur sera ébloui. C'est un cas critique qui peut être comparé à celui d'un capteur conçu pour l'eau douce, soudainement immergé dans l'eau de mer, un cas que nous allons considérer dans la section suivante.

1.6 Evolution du capteur $U - I$

1.6.1 Adaptation aux milieux de conductivité variable.

En exploitant la physique de base introduite précédemment, nous pouvons déduire les conséquences du passage du capteur électrique de l'eau du robinet ($\gamma = 0,04$ S/m) à l'eau de mer, soit $\gamma = 4$ S/m. Premièrement, en raison de la salinité de l'eau de mer (100 fois supérieure à celle de l'eau du robinet), si nous immergeons le capteur électrique, conçu pour l'eau douce, dans l'eau de mer, les équation (1.1,1.2), et (1.7) montrent que les courants mesurés ainsi que la consommation électrique sont tous deux, 100 fois plus importants. Ceci est bien sûr critique puisque dans ce cas la batterie va se décharger rapidement alors que la chaîne de mesure des courants va être saturée et finalement les

performances du capteur vont chuter de manière incontrôlée. Par conséquent, nous devons adapter le capteur à la conductivité de l'eau de mer tout en gardant une puissance constante. Pour cela, remarquons que d'après (1.7), P peut être maintenu constant, si la tension U est divisée par 10. Dans ces conditions, (1.3) montre que I est seulement multiplié par 10, ce qui, de toute façon, n'affecte pas la sensibilité (1.4) ni la portée du capteur. En outre, la multiplication des courants par 10 ne nécessite aucun changement de la technologie électronique de mesure. Ce qui est plus critique, c'est de générer une tension de faible amplitude avec une bonne précision et stabilité.

Enfin, on peut maintenant expliquer pourquoi le mode $U - I$ s'adapte plus facilement à l'eau de mer que le mode $U - U$. En effet, dans le mode $U - U$, on construit une boucle de courant qui produit le champ basal dipolaire. Même si nous ne mesurons pas le courant rentrant dans un seul récepteur de courant, cette boucle de courant obéit toujours aux relations (1.4) et (1.7), et nous pouvons lui appliquer le même raisonnement que celui utilisé dans le modèle $U - I$. Cependant, en mode $U - U$, les mesures ne sont plus les courants mais les valeurs du potentiel réfléchi par les objets sur des électrodes de tension flottante. Ainsi, dans ce cas, diminuer la tension pour maintenir la puissance constante, diminuera l'amplitude des potentiels mesurés, et finalement la portée du capteur d'un facteur 10. En d'autres termes, lorsqu'il est immergé dans l'eau de mer, un capteur $U - U$ fonctionnant dans l'eau du robinet devient aveugle, alors que dans les mêmes conditions, un capteur $U - I$ est ébloui. Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes inspirés des poissons électriques (HOPKINS 2009), et avons conçu un dispositif d'émission capable d'auto-adapter l'amplitude de sa tension d'onde émise U aux variations de la conductivité de l'eau γ afin que les courants de base de $I^{(0)}$, restent toujours dans une plage d'amplitude optimale pour la chaîne de mesure du capteur (voir figure 1.6.b).

1.6.2 Adaptation à la communication

Dans le projet européen subCULTron, les fonctionnalités attendues d'un essaim de robots ont nécessité le développement d'un nouveau matériel capable d'assurer à un robot de naviguer en mode actif, et de communiquer en mode passif avec d'autres robots.

Cette fonctionnalité nécessite de préserver l'utilisation des signaux électriques à la fois pour la communication et la navigation. Pour concilier ces deux fonctionnalités, nous avons d'abord développé un algorithme de désynchronisation qui permet d'éviter le brouillage des signaux d'émission. Ensuite, le contenu informationnel d'un champ électrique a été

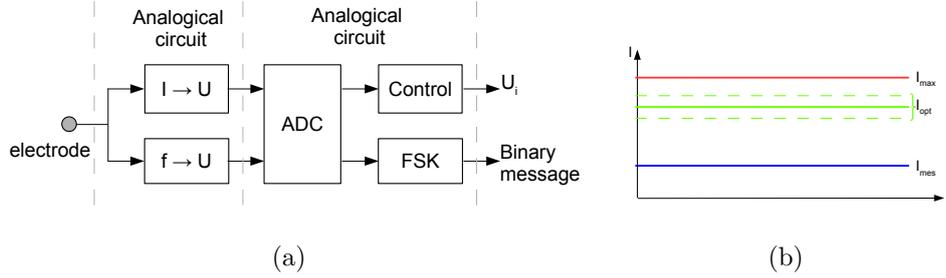


FIGURE 1.6 – (a) Mesure de l’amplitude (I) et de la fréquence (f). (b) Auto-calibrage de l’émission par rapport à la conductivité de l’eau. Le capteur effectue une première mesure des courants I_{mes} et redimensionne sa tension d’émission U avec un gain I_{opt}/I_{mes} , où I_{opt} représente une mesure optimale de sa chaîne de mesure. N_f représente la période du signal harmonique mesuré.

séparé en deux : son amplitude et sa fréquence qui doivent toutes deux être mesurées indépendamment (voir figure 1.6.a). Sur la base de ce principe, l’amplitude des courants électriques mesurés est utilisée pour la navigation réactive (BOYER et al. 2013a ; LEBASTARD, BOYER et LANNEAU 2016), tandis que leur fréquence est utilisée pour coder des messages pour la communication. Concrètement, la technologie de (SERVAGENT et al. 2013a) a été dotée d’un nouveau circuit permettant de mesurer la fréquence d’un signal, tandis que la fréquence du générateur sinusoïdales peut être modulée selon trois fréquences f_0 , f_1 et f_n . Cette évolution a permis de mettre en œuvre un algorithme de décodage basé sur le protocole de modulation par déplacement de fréquence (FSK) (KENNEDY et DAVIS 1985). Avec un tel protocole, un message binaire est traduit en une séquence temporelle de signaux d’ondes de fréquence variable. Trois fréquences sont utilisées, à savoir une haute fréquence ($f_0 = 15$ KHz) qui code un 0-bit, une basse fréquence ($f_1 = 6$ KHz) codant un 1-bit. Un signal transitoire de fréquence ($f_n = 10$ KHz) est systématiquement inséré entre deux signaux de codage successifs, afin de préserver la robustesse du décodage (voir figure 1.7.a). La mesure de fréquence est réalisée par un circuit analogique qui convertit le signal harmonique en un signal continue, image de la période du signal, et est ensuite numérisée par un convertisseur analogique/numérique (ADC) (N_{f_i}). Sur la base de ce principe, lorsque la distance d entre deux robots (l’un parlant, l’autre écoutant) augmente, le rapport signal/bruit (SNR) de ce circuit diminue et les images des fréquences mesurées diminuent également (voir figure 1.7.b). Pour surmonter ce problème, et rendre la communication indépendante de la distance, nous avons utilisé les rapports de fréquence N_{f_1}/N_{f_n} et N_{f_0}/N_{f_n} au lieu des mesures directes des N_{f_1} et N_{f_0} . Comme prévu, la mesure de ces

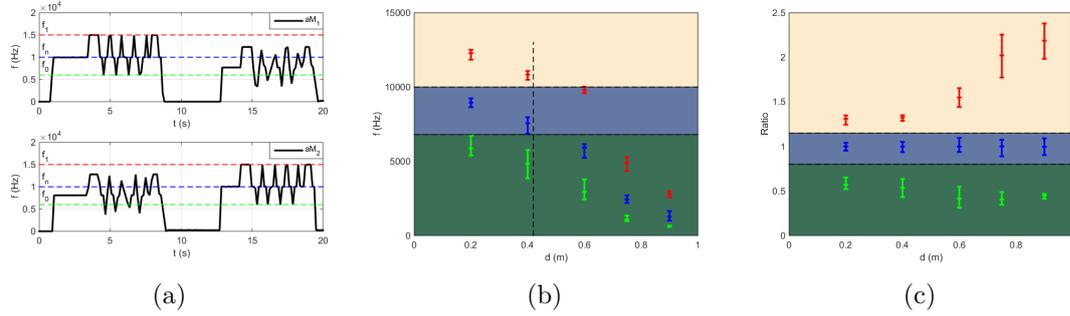


FIGURE 1.7 – (a) Illustration d’une communication entre deux moules aM_1 à une distance $d = 0,35\text{m}$: Entre $t = 0\text{s}$ et 10s , la moule aM_1 émet un message binaire qui est mesuré par l’autre (aM_2) avec une certaine distorsion due au milieu. Entre $t = 15\text{s}$ et 20s , aM_2 renvoie le message qui est reçu par aM_1 . (b) Fréquences mesurées et (c) rapport mesuré, lorsque la distance entre les deux moules aM_1 augmente. N_{f_1} (rouge), N_{f_n} (bleu) et N_{f_0} (vert) sont proportionnels à $1/f_1$, $1/f_n$ et $1/f_0$ respectivement.

rapports ne dépend plus de d , tout en préservant la séparation requise pour le décodage (voir figure 1.7.c).

1.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le sens électrique naturel chez les poissons faiblement électriques, ainsi que sa reproduction technologique, ou sens électrique artificiel. Nous avons défini les grandeurs permettant de concevoir nos cartes de mesure embarquée et d’estimer leur consommation ainsi que les briques technologies développées pour la robotique sous-marine. Pour pouvoir exploiter ces briques, il nous faut un modèle des mesures dans différents environnements cibles. C’est l’objet du chapitre suivant que de présenter ce modèle.

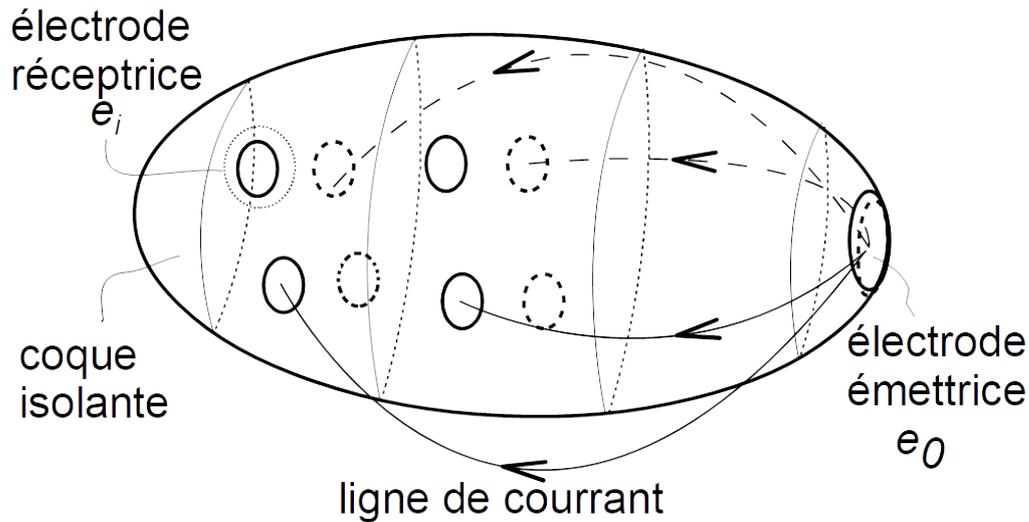
MODÉLISATION DU SENS ÉLECTRIQUE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle réduit de la perception par sens électrique. Ce modèle nous permettra de faire le lien entre les paramètres physique de la scène (nature, taille et position des objets dans la scène) et les mesures de courants venant de notre capteur $U - I$. Fondamentalement, le sens électrique est basé sur la mesure des perturbations de l'émission d'un champ électrique induit par l'environnement (LISSMANN et MACHIN 1958). Un premier modèle appliqué à des "petits objets" (une sphère de rayon a et de centre O), pour lesquels le champ appliqué est quasi uniforme dans la région occupée par l'objet, peut être expliqué physiquement par l'équation suivante (B.RASNOW 1996) :

$$\delta\phi = -a^3\chi \frac{\nabla\phi_0 \cdot r}{\|r\|^3}, \quad (2.1)$$

où $\delta E = -\nabla(\delta\phi)$ représente la perturbation au point M d'un champ électrique uniforme exogène $E_0 = -\nabla\phi_0$ induit par la sphère centrée à O , avec $r = \overrightarrow{OM} \in \mathbb{R}^3$, et χ un "facteur de contraste" codant la conductivité relative de la sphère par rapport à l'eau. Dans un tel modèle, l'eau et les objets sont considérés comme des milieux ohmiques isotropes homogènes. Dans le contexte de l'électrolocation, ϕ_0 modélise le champ produit par le poisson, tandis que $\delta\phi$ représente la différence de potentiel avec et sans objet, mesurée en un point de la peau du poisson situé à r de l'objet. Au début des années 2000, Mc Iver et al. (MACIVER, FONTAINE et BURDICK 2004; NELSON, MACIVER et COOMBS 2002; SOLBERG, LYNCH et MACIVER 2007; SOLBERG, LYNCH et MACIVER 2008) ont construit un dispositif expérimental permettant une démonstration directe du modèle de Rasnow (2.1). Ce dispositif consistait en une fourchette à quatre électrodes de forme aiguille. En écludant la présence d'un corps physique supportant les électrodes, ce dispositif a permis à ses auteurs de développer les premiers algorithmes d'électrolocalisation de petites sphères, et de démontrer ainsi la faisabilité du principe.

FIGURE 2.1 – Vue schématique d'un capteur $U - I$.

Poursuivant des objectifs similaires, nous avons développé dans (SERVAGENT et al. 2013b) une technologie alternative basée sur le contrôle en tension et la mesure des courants, et nommée pour cette raison $U - I$. Telle qu'évoquée dans le chapitre précédent, cette solution nécessite de prendre en compte les effets non-négligeables du corps du robot sur les mesures de courant. Pour aborder ces nouvelles difficultés, nous avons utilisé la méthode des réflexions telle qu'elle fut développée dans le domaine de l'hydrodynamique des bas nombres de Reynolds (HAPPEL et BRENNER 1965). Cette méthode nous a permis de révéler certains aspects fondamentaux du sens électrique. Nous allons dans ce qui suit rappeler les grandes lignes de ces travaux publiés dans BOYER et al. 2012b. Développée à l'origine sur les sondes élancées, l'approche de modélisation proposée se veut suffisamment générique pour être généralisée à des géométries plus complexes telles que les aFish de subCULTron. Au bout du compte, cette modélisation va nous fournir les expressions analytiques des courant mesurés δI , lorsque le capteur interagit avec des objets perturbateurs. De ce point de vue, il est impossible de produire de tels modèles dans le cas général (seule la simulation numérique peut le faire). Aussi, nous sommes nous concentrés sur quelques primitives d'objet pertinentes avec les applications et pour lesquels le calcul analytique explicite du modèle des mesures reste accessible. Ces primitives sont dans l'ordre de l'exposé qui suit : les petits objets conducteurs ou isolants, les murs isolants, les coins isolants. Avant de rappeler ces travaux en modélisation, nous allons présenter le context général du problème direct du sens électrique.

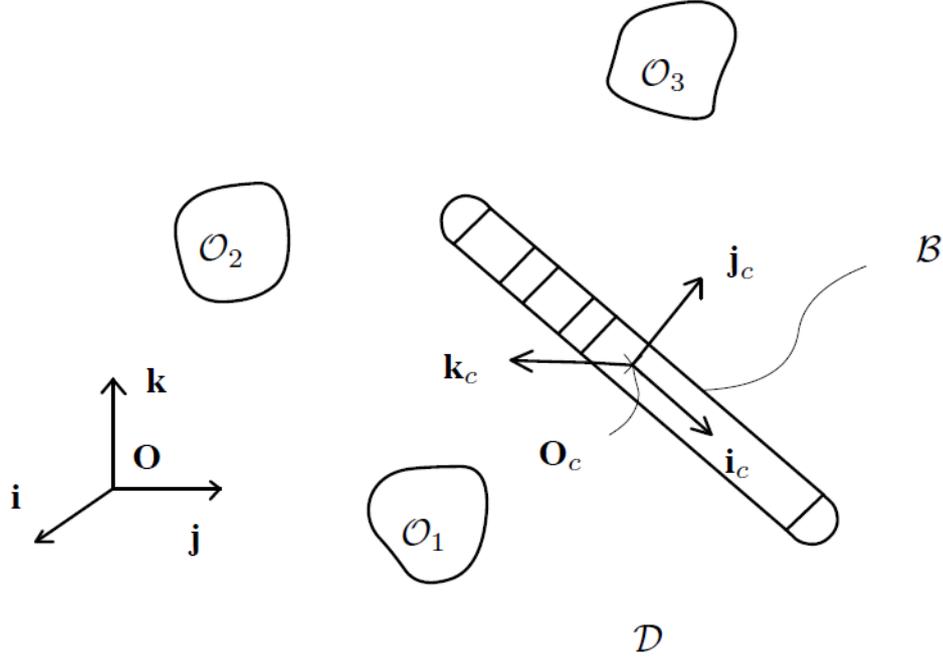


FIGURE 2.2 – Vue schématique d’une scène constituée d’une sonde élançée et de trois objets.

2.2 Formulation du problème électrique direct

Dans tout ce qui suit, pour tout sous-ensemble tridimensionnel $\mathcal{S} (\subset \mathbb{R}^3)$, nous désignons par $\partial\mathcal{S}$ sa frontière définie comme un sous-ensemble bidimensionnel de \mathbb{R}^3 , et par $\mathcal{S}_o = \mathcal{S} - \partial\mathcal{S}$, l’ensemble des points intérieurs à \mathcal{S} .

Considérons un ensemble d’objets passifs $\mathcal{O} = \cup_{k=1}^p (\mathcal{O}_k)$ chacun étant constitué d’un matériau homogène isotrope ohmique de conductivités respectives $\gamma_{1,2,..,p}$. Ces objets sont immergés dans de l’eau ordinaire de conductivité γ . Nous ajoutons un objet actif noté \mathcal{B} aux objets passifs déjà présents dans la scène. Cet objet, qui n’est autre que notre capteur, est une mosaïque de $N + 1$ électrodes définies comme des conducteurs idéaux dont les limites humides sont notées $e_{i=0,1,..,N}$ (voir Fig. 2.1). Ces électrodes sont disposées sur les frontières isolantes du capteur notées \mathcal{I} . En accord avec le principe de notre capteur $U - I$, dans la conception de la Fig. 2.1, chacun des récepteurs e_i , $i = 1, 2, \dots, N$ est à la masse et équipé d’un circuit amperométrique permettant de mesurer le courant qui le traverse. Lorsque e_0 est mise sous tension par rapport aux autres électrodes, le capteur est dit polarisé (ici de manière contrôlée). La polarisation de ce capteur est reconfigurable.

Par "reconfigurable", nous voulons dire que le rôle de l'émetteur e_0 est interchangeable, ce qui multiplie les possibilités d'excitation de la scène. Le domaine de la scène est noté \mathcal{D} . Ses limites se trouvent sur les objets (y compris le capteur) ou sont infiniment éloignées d'eux avec une normale extérieure sur $\partial\mathcal{D}$ notée n . Dans ~~ce cas~~ ce contexte, les équations de la physique, qui régissent l'évolution des mesures pour toute scène schématisée sur la Fig. 2.2, peuvent être formulées comme le problème électrique direct suivant :

Trouvez le potentiel électrique ϕ solution du jeu d'équations suivant :

- Équation de Laplace pour le potentiel électrique :

$$\Delta\phi = 0, \quad \forall x \in \mathcal{D}_o. \quad (2.2)$$

- Loi d'Ohm dans l'eau, avec $j \in \mathbb{R}^3$ le champ de densité du courant :

$$j = -\gamma\nabla\phi, \quad \forall x \in \mathcal{D}_o. \quad (2.3)$$

- Conditions sur les limites du capteur :

— Sur les conducteurs (électrodes), le potentiel est connu (il est imposé) à partir de :

$$\phi(x) = U_i(t), \quad \forall x \in e_{i=0,1..N}, \quad (2.4)$$

où $U_0(t) = u(t)$ et $U_1(t) = U_2(t) = \dots U_N(t) = 0$, (e_0 est l'émetteur et les autres sont à la "masse").

— Sur les corps **isolantes**, nous avons :

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}(x) = 0, \quad \forall x \in \mathcal{I}, \quad (2.5)$$

où pour toute fonction f , $\partial f/\partial n = \nabla f \cdot n$, le point désignant le produit scalaire dans \mathbb{R}^3 .

- Aux frontières des objets (en fixant $x_{\pm} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0}(x \pm \varepsilon n)$) :

— Conservation des courants normaux à travers les frontières :

$$\gamma \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right) (x_-) = \gamma_k \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right) (x_+), \quad \forall x \in \partial \mathcal{O}_{k=1, \dots, p}. \quad (2.6)$$

— Continuité du potentiel à travers les frontières :

$$\phi(x_-) = \phi(x_+), \quad \forall x \in \partial \mathcal{O}_{k=1, \dots, p}. \quad (2.7)$$

Enfin, pour compléter la formulation du modèle direct, les expressions des mesures doivent être énoncées. Elles peuvent être facilement déduites de l'état électrique de la scène ϕ , comme :

$$\text{Pour } k = 1, 2, \dots, N, \quad I_k = - \int_{e_k} j \cdot n \, ds = \gamma \int_{e_k} \frac{\partial \phi}{\partial n} \, ds, \quad (2.8)$$

où, en raison de l'orientation de n , un courant est considéré comme positif lorsqu'il sort du capteur et négatif lorsqu'il y entre.

2.3 Résolution du problème **directe** par la méthode des intégrales de frontière

Excepté à de rares exceptions prêt, tels les murs et coins que nous aborderons ci après, le problème électrique **directe** du sens électrique ne peut être généralement résolu analytiquement. Aussi dans le cas général, on doit recourir à des simulations numériques, telle que la méthode des éléments finis de frontière ou **BEM**, basée sur les formules de Green :

$$\forall x \in \mathcal{D} : \phi(x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\partial \mathcal{D}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial(1/r)}{\partial n} \right) ds, \quad (2.9)$$

et :

$$\forall x \in \partial \mathcal{D} : \phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\partial \mathcal{D}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial(1/r)}{\partial n} \right) ds. \quad (2.10)$$

En discrétisant la frontière du domaine \mathcal{D} en éléments finis, sur chacun desquels, on approxime les champs, (2.10) se change en un système d'équations implicites linéaires qui une fois résolu par rapport aux inconnues du problème sur la frontière, permet de reconstruire ϕ dans tout le domaine grâce à (2.9). Dans le cadre du projet Angels, j'ai contribué à développer un simulateur basée sur cette approche (POREZ et al. 2011)(cf.

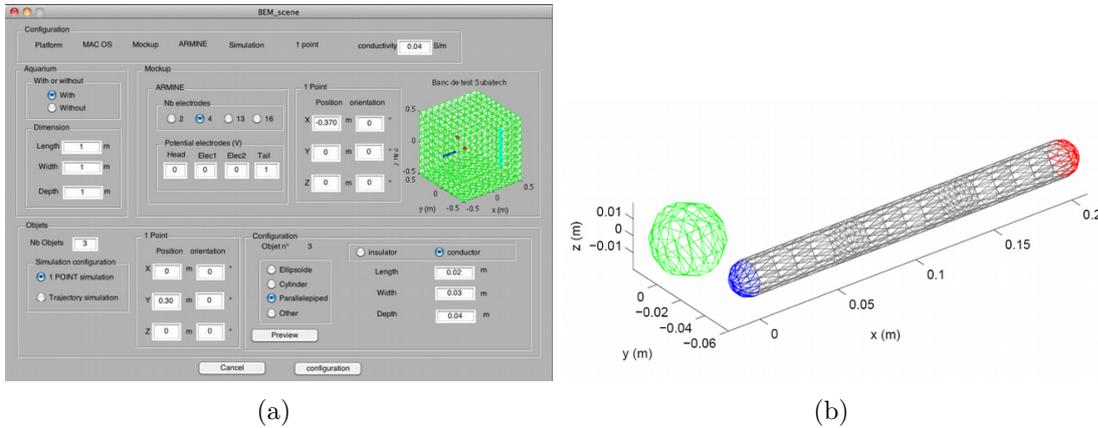


FIGURE 2.3 – Capture d’écran de l’implémentation de la BEM, sous matlab (a), maillage typique d’une simulation BEM (b). Dans cette scène, le capteur, constituée de deux électrodes (bleu et rouge) et d’un cylindre isolant (gris), est placée à proximité d’un objet isolant (sphère verte).

figure 2.3). Cet outil numérique nous a été (et est encore aujourd’hui) dès plus précieux, car il nous sert de référence pour produire nos modèles analytiques dédiés aux calculs temps réels. Le reste du chapitre est dédié à ces modèles analytiques.

2.4 Résolution du problème directe par la méthode des réflexions

Dans des conditions restreintes mais acceptables, une bonne approximation de la solution du problème directe peut être obtenue analytiquement par la méthode dite des réflexions (HAPPEL et BRENNER 1965). Avant d’introduire le principe de la méthode, nous allons préciser ces restrictions. Tout d’abord, nous considérerons des capteurs de géométrie compressée, i.e. si l et d dénotent leur longueur et leur épaisseur latérale, leur rapport de compression d/l sera supposé petit. Les objets sont petits par rapport à la longueur l du capteur, i.e. leur dimension typique a est de l’ordre du rayon du capteur d . Malgré ces simplifications, l’intégration analytique exacte du problème direct (2.2-2.7) n’est toujours pas possible¹. Néanmoins, en raison de la forte décroissance des interactions électriques avec la distance, on peut approcher la solution exacte du problème direct par un développement en série analytique, comme suit :

1. De sorte que la méthode généralement admise serait de recourir à une simulation numérique assez lourde pour chaque configuration des objets.

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 + \phi_2 + \dots = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i. \quad (2.11)$$

Lorsque i augmente, $|\phi_i|$ décroît comme l'inverse d'une certaine puissance notée s (s est un entier strictement positif) de la distance typique séparant le capteur et l'objet, notée r et qui est telle que $r \gg d$. Dans ces conditions, un tel développement est accessible en recourant aux schémas généraux de perturbation bien établis en physique théorique (MORSE et FESCHBACH 1953). Nous suivrons ici la méthode des réflexions successives telle qu'elle est aujourd'hui utilisée en hydrodynamique à faible nombre de Reynolds pour modéliser les interactions entre particules d'un écoulement diphasique (HAPPEL et BRENNER 1965). Dans le contexte actuel, cette méthode itérative est appliquée comme suit :

1. Étape 0 ("Emission par le capteur") : Nous ignorons l'objet en le retirant de la scène et calculons la réponse du capteur que nous notons ϕ_0 et qui est la solution du problème direct sans objet :

$$\Delta\phi_0 = 0, \quad \forall x \in \mathcal{D}_o. \quad (2.12)$$

Conditions aux limites :

$$\phi_0(x) = U_i(t), \quad \forall x \in e_{i=0,1..N}, \quad \frac{\partial\phi_0}{\partial n}(x) = 0, \quad \forall x \in \mathcal{I}. \quad (2.13)$$

2. Étape 1 ("Première réflexion se propageant de l'objet vers le capteur") : ϕ_0 étant connu de l'étape précédente, on retire le capteur de la scène et on calcule ϕ_1 de telle sorte que les conditions aux limites sur l'objet soient vérifiées par $\phi_0 + \phi_1$. Le système à résoudre devient alors :

$$\Delta\phi_1 = 0, \quad \forall x \in \mathcal{D}_o \quad (2.14)$$

avec les conditions aux frontières des objets, sur les courants :

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial\phi_1}{\partial n}(x_-) - \gamma_k \frac{\partial\phi_1}{\partial n}(x_+) &= \gamma_k \frac{\partial\phi_0}{\partial n}(x_+) - \gamma \frac{\partial\phi_0}{\partial n}(x_-) \\ &= (\gamma_k - \gamma) \frac{\partial\phi_0}{\partial n}(x), \quad \forall x \in \partial\mathcal{O}_k, \end{aligned} \quad (2.15)$$

et sur les potentiels, $\forall x \in \mathcal{O}$:

$$\phi_1(x_-) - \phi_1(x_+) = \phi_0(x_+) - \phi_0(x_-) = 0. \quad (2.16)$$

3. Étape 2 ("Deuxième réflexion se déplaçant du capteur vers l'objet") : Encore une fois, ϕ_1 est connu de l'étape 1 et nous enlevons l'objet et calculons ϕ_2 de sorte que les conditions aux limites sur le capteur soient vérifiées par $\phi_0 + \phi_1 + \phi_2$. En d'autres termes, ϕ_2 est la solution du système :

$$\Delta\phi_2 = 0, \quad \forall x \in \mathcal{D}_o, \quad (2.17)$$

avec les conditions limites :

$$\begin{aligned} \phi_2(x) &= -\phi_1(x), \quad \forall x \in e_{i=0,1,\dots,N}, \\ \frac{\partial\phi_2}{\partial n}(x) &= -\frac{\partial\phi_1}{\partial n}(x), \quad \forall x \in \mathcal{I}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

... et ainsi de suite...

Le principe de cette méthode itérative est résumé dans la Fig. 2.6. Dans ce développement en perturbations, chacun des ϕ_i représente la réponse aux $\phi_0 + \phi_1 + \dots + \phi_{i-1}$ alternativement réfléchis par l'objet et le capteur à travers leurs conditions aux limites lorsque le nombre de réflexions i augmente (voir Fig. 2.6). Cette interprétation de la méthode est à l'origine de son nom. Notons que ces réflexions successives ont en fait un sens physique fort, puisque pendant des temps transitoires très courts, **la célérité du signal ne peut être supposée infinie** et l'équation de Laplace de ϕ se transforme en une véritable équation de propagation. Ainsi, dans ce court laps de temps, les réflexions successives de la méthode existent bien, mais interfèrent très rapidement de manière constructive et destructive afin de générer la solution stationnaire ϕ .

2.5 Modèle de la réponse du capteur

Afin d'appliquer la méthode des réflexions, il nous faut un modèle des courants mesurés par le capteur lorsque celui-ci est soumis à un potentiel externe tel que les reflets successifs

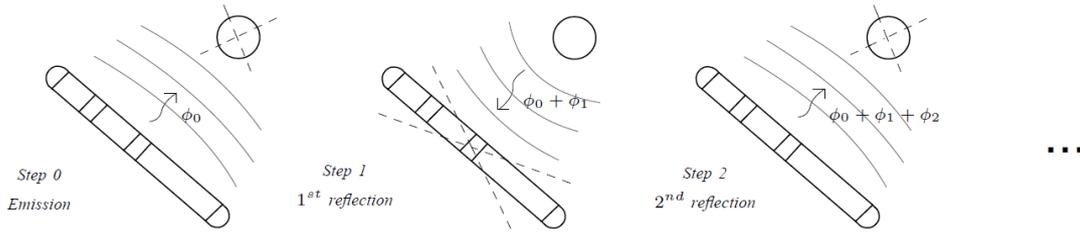


FIGURE 2.4 – La méthode des réflexions successives. Première étape (en haut à gauche) : on ignore l’objet et on résout l’équation de Laplace pour ϕ_0 . Deuxième étape (en haut à droite) : cette fois, nous ignorons le capteur et nous résolvons l’équation de Laplace pour $\phi_0 + \phi_1$ où ϕ_1 est la perturbation de ϕ_0 induite par l’objet. Troisième étape (en bas à gauche) : nous résolvons l’équation de Laplace pour $\phi_0 + \phi_1 + \phi_2$ en ignorant cette fois l’objet, ϕ_2 étant la perturbation de $\phi_0 + \phi_1$. Chaque nouveau champ de potentiel peut être représenté comme une nouvelle contribution (à ϕ) réfléchié par l’objet ou le capteur. La méthode peut être poursuivie mais comme les interactions diminuent avec l’inverse d’une puissance positive de la distance, il n’y a aucun intérêt à le faire.

renvoyés par les objets perturbateurs de la scène. Pour cela, nous allons commencer par donner le modèle de cette même réponse lorsque le capteur est seul et soumis à son vecteur potentiel de commande U .

Réponse du capteur actif sans objet

Ce modèle est essentiel car il permet de calculer le vecteur **les courants basal** $I^{(0)}$ ainsi que le champ de potentiel basal $\phi^{(0)}$, lorsque le capteur est soumis au vecteur des tensions U . Pour une géométrie de capteur arbitraire, seule la simulation numérique répond à ce problème. Ainsi, en utilisant la formule de Green sur la frontière du robot (2.9), il est possible d’obtenir un modèle des courants **basals** sous la forme matricielle :

$$I^{(0)} = C^{(0)}U, \quad (2.19)$$

où $C^{(0)}$ est une matrice $(N + 1) \times (N + 1)$ appelée matrice des conductances. Chaque vecteur colonne de cette matrice est du type du vecteur $C^{(0)}$ de (1.1), et représente la réponse du capteur à l’une **des polarisations possibles de ses électrodes**. Une fois $I^{(0)}$ connu via (2.19), la formule de Green (2.9) permet d’exprimer le champ basal $\phi^{(0)}$ en tout point du domaine.

Réponse du capteur à un potentiel appliqué

En notant $\delta\phi$, la réponse en potentiel du capteur, le problème direct du capteur soumis à un potentiel appliqué (imposé et connu) ϕ_a est donné par les équations de Laplace du second reflet ("Étape 2"), où ϕ_1 et ϕ_2 doivent être remplacés par ϕ_a et $\delta\phi$ respectivement. Les détails des développements de ce modèle sont donnés dans le cas des sondes élançées dans BOYER et al. 2012a. Ce calcul est assez difficile et réclame la formulation des intégrales de Green du capteur (2.9). Pour aller au plus court, remarquons qu'à l'ordre dominant, $-\phi_a$ s'applique au capteur comme le fait U dans le modèle du capteur isolé (2.19), aussi est-t'il légitime d'écrire :

$$\delta I = -C^{(0)}\Phi_a, \quad (2.20)$$

où Φ_a est le vecteur des valeurs de ϕ_a sur les récepteurs e_i . C'est un vecteur comparable à U , mais de nature exogène. Dans le chapitre suivant, le sens passif sera abordé, et ϕ_a pourra modéliser le champ exogène (noté par la suite ϕ_e), produit par un autre robot. Au contraire, dans la suite de ce chapitre, on ne s'intéresse qu'au sens électrique actif. Dans ce contexte, le modèle de la réponse du capteur à un champ externe (2.20), peut être utilisé dans la méthode des réflexions à chaque fois qu'un potentiel élémentaire rebondit sur le capteur, i.e. pour chacun des reflets pairs. Dans ce cas, le modèle de la conductance $C^{(0)}$ inclus l'effet de ces reflets sur la frontière du capteur et ses mesures, et l'on peut donc ignorer leur effet dans le modèle de la réponse. En résumé, pour calculer δI , on pourra utiliser la relation :

$$\delta I = -C^{(0)}\delta\Phi. \quad (2.21)$$

où $\delta\Phi$ est le vecteur des valeurs de :

$$\delta\phi = \phi_1 + \phi_3 + \phi_5 + \dots \quad (2.22)$$

sur les récepteurs. Dans la suite, nous utiliserons cette relation pour quelque unes des primitives que nous avons considérées dans nos travaux.

2.6 Modèle de la réponse des sondes élançées

Dans le cas général, l'expression intégrale de $\phi^{(0)}$ ne peut être appréhendée que numériquement (e.g. par la BEM). Néanmoins, pour les sondes élançées, il est possible de tirer

des expressions simples des formules de Green (2.9) en les développant par rapport au rapport d'aspect du capteur. De ce point de vue, les sondes élancées ont joué un rôle primordial dans toutes nos recherches sur le sens électrique en offrant la possibilité de calculer analytiquement le modèle du capteur et de sa réponse. Par "sondes élancées", on entend des tubes cylindriques le long desquels les électrodes e_i sont regroupées en m paquets annulaires, notés ε_α , et appelés "macro-électrodes" dans BOYER et al. 2012b. Dans ce cas, l'expression de $\phi^{(0)}$ peut être approchée par la formule simplifiée :

$$\phi_0(x) \simeq \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{\alpha=0}^m \frac{I_{\text{ax},\alpha}^{(0)}}{\|r_\alpha\|}, \quad (2.23)$$

où l'on reconnaît le champ produit par un ensemble de sources de courant ponctuelles, où chaque $I_{\text{ax},\alpha}^{(0)}$ est un courant dit "axial", défini comme la somme des courants pénétrant la macro-électrode ε_α . De la même manière en ne polarisant que les macro-électrodes les unes par rapport aux autres avec un vecteur tension $m \times 1$ dit axial et noté U_{ax} , on définit aisément une version réduite de (2.19) :

$$I_{\text{ax}}^{(0)} = C_{\text{ax}}^{(0)} U_{\text{ax}}, \quad (2.24)$$

où $C_{\text{ax}}^{(0)}$ est la matrice de conductivité "axiale" du capteur sans objet. De taille réduite ($m \times m$), elle modélise la réponse du capteur en courant, à des polarisations relatives des macro-électrodes le long de l'axe **rostro-caudal** de la sonde. De même que dans le cas général, la polarisation de la sonde peut être générée par un champ appliqué de l'extérieur, et l'on a aussi, à la suite de (2.20) :

$$\delta I_{\text{ax}} = -C_{\text{ax}}^{(0)} \Phi_{a,\text{ax}}, \quad (2.25)$$

où $\Phi_{a,\text{ax}}$ est le vecteur $m \times 1$ des valeurs de ϕ_a sur les m macro-électrodes réceptrices ε_α . Dans le langage des sondes élancées, nous avons appelé ce modèle, le modèle de la réponse axiale du capteur. Pour achever la modélisation de la réponse d'une sonde, ce modèle doit être complété de celui de sa réponse latérale. Dans ce cas, les électrodes e_i composant une même macro-électrode ε_α sont suffisamment rapprochées, pour que l'influence d'un potentiel appliqué ϕ_a se manifeste latéralement (i.e. perpendiculairement à l'axe rostro-caudal) via son champ $E_a = -\nabla\phi_a$ par des relations de polarisation comparables à celle d'un objet de taille réduite immergé dans un champ. Aussi, est-t'on en droit d'écrire pour

chaque anneau ε_α une relation du type BOYER et al. 2012b :

$$\delta I_{\text{lat},\alpha} = p_{\perp,\alpha} E_{a,\perp}(x_{c\alpha}), \quad (2.26)$$

où $\delta I_{\text{lat},\alpha}$ représente le courant latéral de ε_α , i.e. la différence des courants gauche-droite, mesurés par la **pair** des e_i composant ε_α , $x_{c\alpha}$ dénote la position absolue (dans le repère fixe de la scène) du centre de ε_α , $E_{a,\perp} = E_a \cdot e_\perp$ est la composante latérale de E_a , où e_\perp est le vecteur unitaire perpendiculaire à l'axe rostro-**caudale** de la sonde. Enfin, les $p_{\perp,\alpha}$ sont des coefficients dits de polarisation latérale, qui dépendent de la géométrie des anneaux et de la conductivité de l'eau ambiante et encodent la réponse de chaque anneau à la composante **latéral** du champ appliqué. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, ce second modèle joue un rôle primordial dans le contrôle réactif de l'orientation d'une sonde, et plus généralement d'un AUV de géométrie latéralement **compressée**. Finalement, les deux modèles (2.25) et (2.26) réalisent le modèle de la réponse d'une sonde élançée à un champ appliqué de l'extérieur. Ce modèle réclame de calculer ou **identifier** les paramètres intrinsèques au capteur, que sont les composantes indépendantes de conductivité axiale $C_{\text{ax}}^{(0)}$ et les m coefficients de polarisation latérale $p_{\perp,\alpha}$.

2.7 δI des petits objets

Lorsque les objets perturbateurs sont petits et le capteur **compressé latéralement**, la méthode des réflexions fournit une bonne approximation du modèle électrique direct. En effet, dans ce cas, à chaque "rebond" sur l'objet ou le capteur, le signal réfléchi est atténué. Plus précisément, si nous définissons $|\phi_{i+1}/\phi_i|$ comme le facteur d'atténuation introduit par la $i^{\text{ème}}$ réflexion et mesuré en un point intermédiaire situé entre le capteur et l'objet, nous pouvons montrer que ce facteur est de l'ordre de $(a/r)^3$ si i est pair (réflexion sur l'objet) ou de l'ordre de (d/r) si i est impair (réflexion sur le capteur). Aussi est-il raisonnable de négliger les interactions **mutuels** entre plusieurs objets et d'adopter pour chacun d'entre eux, l'approximation tronquée suivante :

$$\phi \simeq \phi_0 + \phi_1 + \phi_2 . \quad (2.27)$$

Une telle approximation est appelée "approximation du second reflet". Si de surcroît, on utilise le modèle de la réponse (2.21), l'influence du deuxième reflet est "absorbé" par le

modèle de la conductivité $C^{(0)}$ et l'on aura simplement :

$$\delta I = -C^{(0)}\Phi_1, \quad (2.28)$$

où Φ_1 est le vecteur des valeurs de ϕ_1 sur les récepteurs. Pour l'appréhender, on commence par modéliser le premier reflet ϕ_1 , renvoyé par l'objet, c'est à dire la réponse de l'objet soumis à un champ exogène.

2.7.1 Réponse de l'objet à l'excitation du capteur

Pour un objet centré sur y_c , il est montré dans (JACKSON 1999) que pour tout x dans l'environnement du capteur, on a :

$$\phi_1(x) = \frac{p \cdot r}{\|r\|^3}, \quad (2.29)$$

Où $r = x - y_c$ et p est le vecteur dipolaire de l'objet polarisé par le champ électrique basal $E_0 = -\nabla\phi_0$. Dans l'expression (2.29), le vecteur dipolaire se détaille comme :

$$p = -P \cdot \nabla\phi_0, \quad (2.30)$$

où P est le tenseur de polarisation de l'objet ici exprimé dans le repère absolu de la scène. Selon (KHAIRUDDIN et LIONHEART 2013), la réponse électrique d'un objet quelconque au premier ordre est la réponse d'un objet ellipsoïdal à un champ électrique uniforme E_0 . Cette réponse est caractérisée par son tenseur de polarisation généralisé du premier ordre P , ou tenseur de Polya-Szego, qui, dans la base principale de l'objet (O_o, b_1, b_2, b_3) , peut être exprimé sous la forme d'une matrice diagonale 3×3 , notée P (AMMARI et KANG 2007). Pour les objets à haute conductivité (conducteurs) ou à faible conductivité (isolants) par rapport à l'eau, P ne dépend que du volume de l'objet V et du rapport d'aspect $\eta = a/b$ via l'expression de la forme :

$$P = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} f(\eta) & 0 & 0 \\ 0 & g(\eta) & 0 \\ 0 & 0 & g(\eta) \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

où $(f, g) = (1/A, 1/B)$, ou $(f, g) = (1/(A-1), 1/(B-1))$ selon que l'objet est conducteur ou isolant, tandis que les deux fonctions A et B , sont des intégrales elliptiques définies

comme suit

$$\begin{cases} A, B: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \\ A(\eta) = \eta^{-2} \int_1^{+\infty} \frac{1}{t^2 (t^2 - 1 + \eta^{-2})} dt, \\ B(\eta) = \eta^{-2} \int_1^{+\infty} \frac{1}{(t^2 - 1 + \eta^{-2})^2} dt. \end{cases} \quad (2.32)$$

Le grand axe de l'ellipsoïde étant incliné d'un angle θ_o autour de l'axe vertical par rapport à l'axe principal du capteur, la matrice des composantes du tenseur dipolaire dans le repère capteur, notée P^c , comme

$$P^c = R(\theta_o) P R(\theta_o)^T, \quad (2.33)$$

où $R(\theta_o)$ est la matrice de rotation 3×3 de l'angle θ_o autour de l'axe vertical. Dans le cas particulier où l'objet est sphérique $P = \chi a^3 1_{3 \times 3}$, où a est le rayon de la sphère tandis que $\chi = (\gamma_o - \gamma)/(2\gamma - \gamma_o)$ est le facteur de contraste entre les deux matériaux composant la scène, c'est-à-dire l'eau, de conductivité γ et l'objet \mathcal{O} de conductivité γ_o (B.RASNOW 1996). Enfin, pour calculer le δI d'un objet, il faut calculer l'expression du potentiel (2.29) sur tous les récepteurs du capteur afin de construire le vecteur des potentiels Φ_1 .

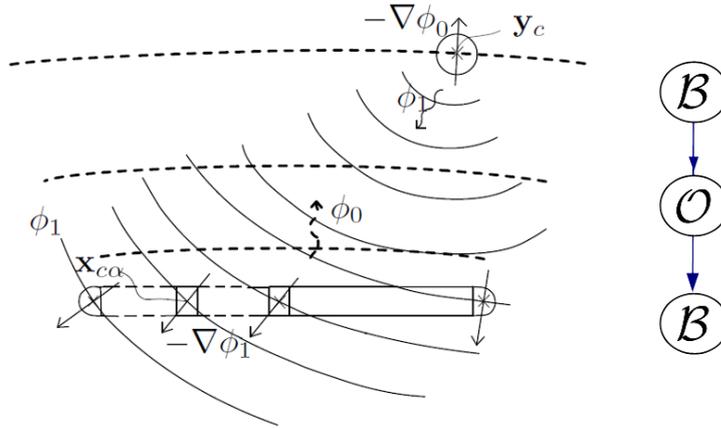


FIGURE 2.5 – A gauche : La réponse du capteur à un objet perturbateur est due à l'addition de deux composantes. L'une est due à la polarisation axiale entre les ε_α par l'isopotential $\phi_1(x_{c\alpha})$, la seconde est due à la polarisation latérale de chaque ε_α par $\nabla\phi_1(x_{c\alpha})$. A droite : Représentation topologique des interactions entre la sphère \mathcal{O} et le capteur \mathcal{B} : il n'y a qu'un seul passage en transit par l'objet et nous symbolisons le chemin comme $\mathcal{B} - \mathcal{O} - \mathcal{B}$.

2.8 δI des grands objets

Lorsque les objets sont grands, ceux ci n'atténuent plus les reflets qu'ils renvoient, et il faut s'attendre à ce que la méthode des réflexions converge plus lentement ou même plus du tout. Néanmoins, si ces grands objets sont des plans ou des combinaisons de plans, on peut montrer que la méthode des réflexions se change en la méthode bien connue, dite des images (JACKSON 1999), qui livre en un unique reflet ϕ_1 , la solution exacte du problème électrique directe.

2.8.1 δI d'un mur isolant

Selon cette méthode, pour modéliser l'influence d'un plan isolant représentant un mur (en verre, par exemple), un capteur virtuel identique au réel, nommé image, est placé symétriquement par rapport au plan. Cet artifice permet de superposer au champ électrique réel, celui de son image, et du fait de la symétrie, le champ total satisfait aux conditions de limites imposées par le mur (il est tangent au mur). Comme dans le cas d'un objet, ϕ_0 désigne le potentiel produit par le capteur en l'absence de paroi lorsqu'il est soumis au vecteur de tension U et ϕ_1 représente le potentiel en tout point de l'espace réfléchi par la paroi. Par conséquent, ϕ_1 doit être calculé de manière à ce que $\phi_0 + \phi_1$ satisfasse les conditions aux limites sur la paroi isolante, c'est-à-dire qu'en tout point de cette paroi, on aura :

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_1}{\partial n} \quad (2.34)$$

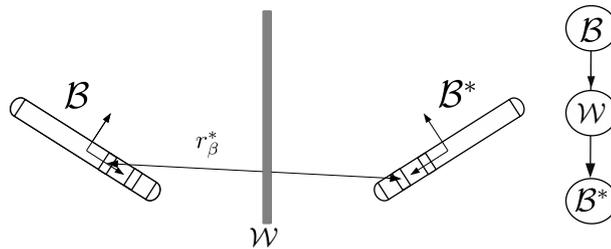


FIGURE 2.6 – Approche des charges images appliquée au capteur près d'un mur : (Gauche) \mathcal{B}^* est le capteur virtuel, symétrique du capteur réel \mathcal{B} , par rapport au mur \mathcal{W} . (Droite) Topologie des interactions. Avec une réflexion sur le mur, $\mathcal{B} - \mathcal{W}$. \mathcal{B} la trajectoire suivie par le signal électrique.

En remplaçant maintenant le mur par l'image symétrique \mathcal{B}^* du capteur \mathcal{B} par rapport aux limites du mur (voir Fig. 2.6), le potentiel ϕ_1 reçu par \mathcal{B} est le potentiel produit par l'agent virtuel \mathcal{B}^* pendant que l'agent réel est retiré de la scène. On a alors, en appliquant ces dernières considérations au cas d'une sonde élançée (et si les distances minimales entre \mathcal{B} et \mathcal{B}^* sont suffisamment grandes par rapport à la dimension caractéristique transverse de \mathcal{B}) :

$$\phi_1(x) = \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{\beta=0}^m \frac{I_{\text{ax},\beta}^{(0)}}{\|r_{\beta}^*\|}, \quad (2.35)$$

avec x , la position dans laquelle ϕ_1 est évalué, et $r_{\beta}^*(x)$, le rayon vecteur qui sépare cette position, du centre de l'anneau β de l'image \mathcal{B}^* du capteur \mathcal{B} . Notons que les courants de base de (2.35) sont ceux du capteur réel puisque son image est dans le même état électrique. Finalement, et comme précédemment, pour calculer le δI d'un mur, il suffit de calculer l'expression du potentiel (2.35) sur tous les récepteurs du capteur afin de construire le vecteur des potentiels Φ_1 .

2.8.2 δI des coins isolants

Dans ce qui suit, nous considérons également le cas où les primitives sont des coins à deux et trois dimensions. Dans le premier cas, le coin est le résultat de l'intersection de deux plans orthogonaux, alors que dans le second cas, trois plans orthogonaux se croisent en un seul sommet. La physique du problème direct étant linéaire, il est donc de superposer la réponse d'un seul mur pour construire celle de ces deux types de coin. Dans le coin 2D, il suffit de superposer la réponse des deux images symétriques planes par rapport aux deux murs avec une troisième image, correctement liée au coin et déduite en symétrisant les images des deux murs par rapport aux deux plans prolongés au-delà de leurs limites matérielles (voir Fig. 2.7). Enfin, comme un coin 3D est formé de 3 coins 2D et d'un sommet ponctuel, le premier potentiel réfléchi est généré par $3 \times 3 = 9$ images du type précédent (coin 2D), plus une image proprement due au coin 3D et obtenue en appliquant au capteur réel une symétrie centrale par rapport au point sommet. Finalement, toutes ces considérations correspondent à ajouter plusieurs fois la réponse d'un mur de (2.35) avec les configurations appropriées de l'image miroir du capteur.

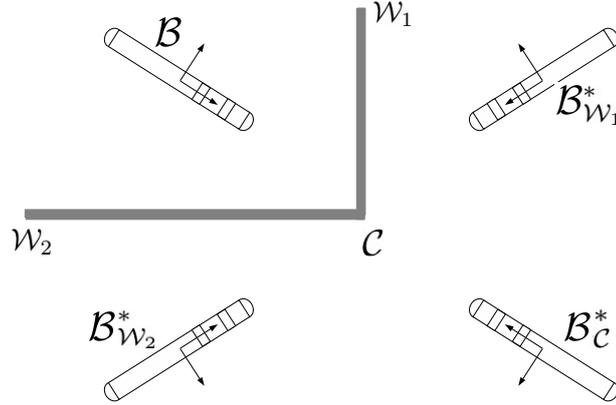


FIGURE 2.7 – Images miroir du capteur dans le cas d’un coin 2D. Chacune des images est utilisée pour modéliser les réflexions par la paroi des signaux incidents produits par le capteur. Pour la contribution du coin le capteur virtuel \mathcal{B}_c^* est le capteur image de $\mathcal{B}_{w_1}^*$ au mur \mathcal{W}_2 , les perturbations provenant des murs et du coin sont interprétées selon la méthode des charges images par réflexions électriques.

2.9 Tests numériques

Pour toutes les simulations, nous avons considéré la sonde élançée à 7 électrodes représenté sur la figure 1.2 (b). Les dimensions du capteur sont : $l = 22\text{cm}$, $d = 1\text{cm}$. Ce capteur est immergé dans un aquarium de 1m^3 rempli d’une eau de conductivité $\gamma = 0.04\text{ S/m}$. Toutes les primitives considérées sont des conducteurs ou des isolants idéaux avec un facteur de contraste $\chi = 1$ et $\chi = -1/2$ respectivement. Le vecteur des tensions contrôlées U est tel que l’anneau de queue ε_0 est fixé à $1V$ par rapport aux autres qui sont connectés à la masse ($U = (0, 0\dots 0, 1)^T$). La matrice de conductance axiale $C_{\text{ax}}^{(0)}$ du capteur en l’absence d’objet, ainsi que les coefficients de polarisation de ses macro-électrodes annulaires $p_{\perp, \alpha}$, sont mesurés in situ une fois pour toutes, dans une phase préliminaire de calibration. Alternativement, la BEM (Boundary element method) peut être mise à contribution pour les calculer (POREZ et al. 2011).

Dans ce test, nous plaçons dans la scène des sphères à 3 \mathcal{O}_1 , \mathcal{O}_2 et \mathcal{O}_3 avec : $a_1 = a_2 = a_3 = 9\text{mm}$, \mathcal{O}_1 , \mathcal{O}_3 sont des isolants ($\chi_1 = \chi_3 = -0,5$) et \mathcal{O}_2 est un conducteur ($\chi_2 = 1$). Deux simulations ont été réalisées, la première avec les sphères dans l’aquarium et la seconde avec le même parcours mais sans les sphères.

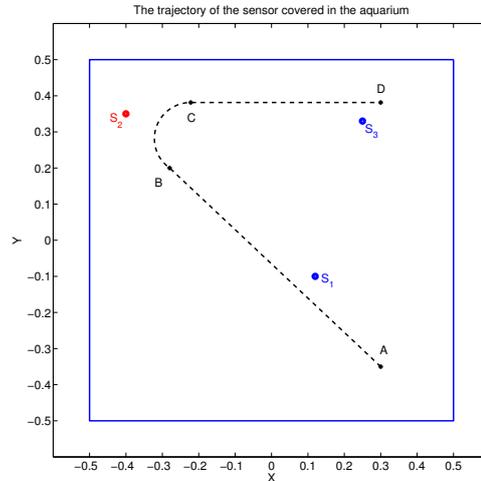
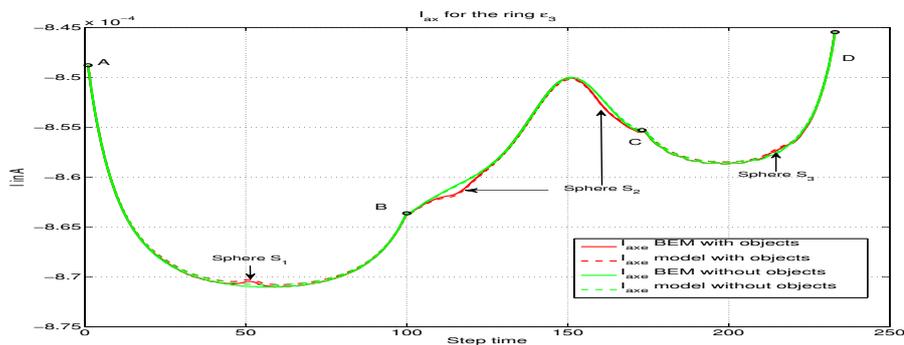


FIGURE 2.8 – Trajectoire du capteur dans le réservoir avec trois sphères.

Les figures 2.9 et 2.10 montrent respectivement les courants axiaux et latéraux calculés par le modèle analytique et la BEM avec et sans les sphères. Les résultats montrent un bon accord du modèle avec la BEM dans les deux cas. Notez que les courants latéraux calculés avec le modèle montrent un petit décalage avec la BEM. Comme le montre la vue zoom de la Fig. 2.10, cet écart est dû aux parois et non à la sphère. Elle se produit lorsque le capteur est proche des parois et est probablement due à certains effets dipolaires négligés qui pourraient être corrigés en poussant plus loin (à un ordre supérieur) l'expansion de (2.23).


 FIGURE 2.9 – Évolution temporelle des courants axiaux mesurés par l'anneau ε_3 lorsque le capteur se déplace dans le réservoir avec (rouge) et sans (vert) les sphères.

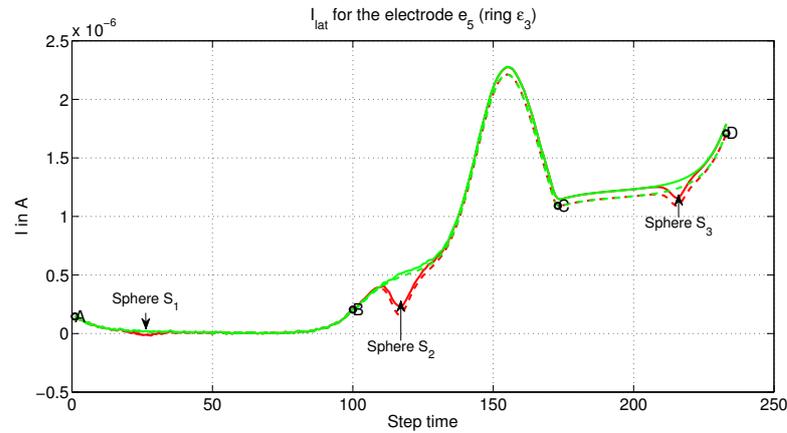


FIGURE 2.10 – Evolution temporelle des courants latéraux mesurés par l'anneau ε_3 lorsque le capteur se déplace dans le réservoir avec (rouge) et sans (vert) les sphères.

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle réduit permettant de mieux appréhender nos mesures et donc la compréhension du sens de l'électrique. De plus, la méthode des réflexions apporte une méthodologie itérative qui permet de séparer, de la mesure du courant, les contributions due aux objets de celle due au capteur. Une fois passer la phase de calibration de $C^{(0)}$, les paramètres du modèle ne dépendent plus que de la géométrie de la scène et obéissent à des relations simples, aisément utilisables pour des calculs embarqués, tels que ceux requis par un observateur.

NAVIGATION BASÉE SUR LE SENS ÉLECTRIQUE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principes de perception par sens électrique utilisés pour la navigation et la communication. Pour illustrer nos propos, nous considérons les aFish et aMussels du "swarm" subCULTron. Pour réaliser la communication en groupe dans un environnement non structuré avec des obstacles, nous avons doté nos AUVs (aFish) de deux comportements de base. Le premier est l'évitement d'obstacles (OA), le second est l'agrégation avec d'autres robots. Dans le premier cas, le sens électrique est utilisé dans sa modalité active tandis que dans le second, les robots sont passifs et détectent les champs électriques des autres robots autour d'eux. Nous allons expliquer dans ce chapitre comment nous avons procédé pour exploiter les mesures de courant dans ce **contexte** multi-robot. L'approche développée pour l'évitement d'obstacles en mode actif est une prolongation des résultats de (BOYER et al. 2013a; BOYER et al. 2015) au cas où la vitesse axiale V du robot n'est plus constante mais peut être modulée par un retour électrique. En mode passif, l'agrégation sera abordée en deux étapes ordonnées, chacune consistant en un sous-comportement. La première étape, nommée alignement (A), consiste à aligner un robot avec le champ d'une autre robot avec un contrôle de direction uniquement, la seconde est nommée Hooking (H) car elle maintient l'axe du robot aligné avec le champ, tout en stabilisant son centre à une distance donnée d_h d'un autre robot afin de préparer la communication entre eux. Ces deux sous-comportements d'agrégation prolongent d'autres introduits dans (BOYER et al. 2015) pour l'amarrage de robots sous-marins **basés** sur un sens électrique passif.

3.2 Recombinaison des courants pour la navigation

Retournant à la figure 1.4(c), le aFish de subCultron est équipé de deux anneaux conducteurs, l'un localisé à l'arrière, sert d'émetteur, le second localisé dans le nez est divisé en quatre électrodes réceptrices identiques e_1, e_2, e_3 et e_4 , disposées symétriquement par rapport aux plans (O, x, z) et (O, x, y) du aFish. Plongé dans une scène (cf. figure 3.1), le centre des **quatre récepteur** est noté x_r , celui de l'émetteur est noté x_e dans le repère de la scène. Cette disposition des électrodes permet d'indiquer la direction (droite-gauche-haut-bas), d'où provient un champ, ainsi que son intensité, qui dépendent toutes deux de la distance aux obstacles polarisés et/ou aux autres robots actifs, ainsi que de leur forme et de leur nature électrique tel qu'indiqué dans le chapitre précédent pour le cas d'un objet. Les quatre courants de $\delta I = I - I^{(0)}$ peuvent être avantageusement recombinaisonnés pour construire d'autres mesures plus adaptées à la navigation d'un AUV à symétrie bilatérale dont la locomotion est du type de celle d'un unicycle (BOYER et al. 2012a). Ces combinaisons sont nommées "axiales" ("ax") et "latérales" ("lat"), et données par la somme ou la différence des courants mesurés individuellement à travers les électrodes, selon les relations :

$$\delta I_{ax} = \sum_{k=1}^4 (I_k - I_k^{(0)}) = \sum_{k=1}^4 \delta I_k \quad , \quad \delta I_{lat} = I_2 - I_4 = \delta I_2 - \delta I_4. \quad (3.1)$$

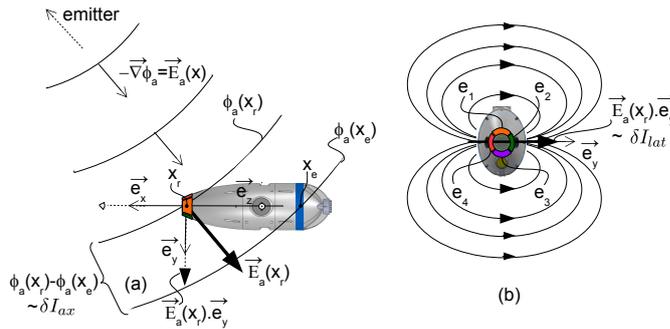


FIGURE 3.1 – aFish dans un champ électrique : (a) Vue de dessus. (b) Vue frontale.

Pour analyser le contenu informationnel de ces combinaisons, il nous faut d'abord invoquer le modèle de la réponse du capteur à un champ appliqué E_a tel que rappelé dans le chapitre 2, où $E_a = -\nabla\phi_a$ s'identifie ici soit au champ réfléchi $\delta E = -\nabla\delta\phi$ en mode

actif, soit au champ exogène (produit par un autre robot) $E_e = -\nabla\phi_e$ en mode passif. En appliquant ce modèle au **context** géométrique de la figure 3.1, il apparaît alors que d'une part, $\delta I_{ax} = I_{ax} - I_{ax}^{(0)} = -C_{ax}^{(0)}\Phi_{a,ax}$, avec $\Phi_{a,ax} = \phi_a(x_e) - \phi_a(x_r)$, mesure à quel point le capteur étend son axe rostro-caudal perpendiculairement aux iso-potentielles de ϕ_a . D'autre part, que si p_\perp dénote le coefficient de polarisation latérale du nez conducteur du aFish, alors $\delta I_{lat} = I_{lat} - I_{lat}^{(0)} = I_{lat} = p_\perp E_{a,y}$ image l'angle entre l'axe rostro-caudal du aFish e_x , et le champ électrique (δE ou E_e) évalué au droit de son "nez". En résumé, δI_{ax} est un indicateur de la distance entre le robot et l'émetteur (objet ou robot), tandis que δI_{lat} est un indicateur de leur orientation relative. Aussi, dans le **context** d'une navigation réactive, δI_{ax} peut être utilisé comme un "capteur de proximité", et δI_{lat} comme une boussole électrique s'orientant dans le champ réfléchi ou exogène (BOYER et al. 2012a; BOYER et al. 2015).

Finalement, notons que les aFish ont été conçus pour évoluer vers la navigation 3D. Ces conditions plus générales nécessiteraient alors de contrôler leur profondeur avec le dispositif de contrôle de la flottabilité et/ou les deux hélices de queue indépendantes. De plus, les courants (3.1) devraient alors être complétés par le courant vertical défini par :

$$\delta I_{ver} = I_1 - I_3 = \delta I_1 - \delta I_3 = p_\perp E_{a,z}, \quad (3.2)$$

ce qui permettrait à un poisson de percevoir la composante verticale (selon (O, z)) du champs δE ou E_e , et de s'orienter dans le plan vertical en conséquence.

δI_{ax}	δI_{lat}	Perception	Règle	Réaction : $\delta\bar{\eta}_d = (\delta V_d, \Omega_d)^T$
> 0	> 0	Conducteur à gauche	Tourner à droite	$\delta\Omega_d < 0, \delta V_d < 0$
> 0	< 0	Conducteur à droite	Tourner à gauche	$\delta\Omega_d > 0, \delta V_d < 0$
< 0	> 0	Isolateur à droite	Tourner à gauche	$\delta\Omega_d > 0, \delta V_d < 0$
< 0	< 0	Isolateur à gauche	Tourner à droite	$\delta\Omega_d < 0, \delta V_d < 0$
> 0	$=0$	Conducteur en face du capteur	Aller en arrière	$\delta\Omega_d = 0, \delta V_d < 0$
< 0	$=0$	Isolateur devant le capteur	Aller en arrière	$\delta\Omega_d = 0, \delta V_d < 0$
$=0$	$=0$	Aucun obstacle autour	Explorer	$\delta\Omega_d = 0, \delta V_d = 0.$

TABLE 3.1 – Perception active pour l'évitement des obstacles : Perception basée sur des mesures (3 premières colonnes). Règles et réactions pour l'évitement des obstacles (2 dernières colonnes).

3.3 Perception active pour l'évitement des obstacles

En mode actif, les deux vecteurs $\delta I_{\text{ax}} = I_{\text{ax}} - I_{\text{ax}}^{(0)}$, et $\delta I_{\text{lat}} = I_{\text{lat}}$, ont un contenu informationnel complémentaire (BOYER et al. 2012a) qui peut être résumé comme suit. $\delta I_{\text{ax}} \neq 0$ signifie qu'un obstacle électriquement contrasté se trouve dans le champ du capteur. Lorsque c'est le cas, le signe de δI_{ax} indique si l'obstacle est un conducteur ($\delta I_{\text{ax}} > 0$), ou un isolant ($\delta I_{\text{ax}} < 0$). De plus, en se référant à (BOYER et al. 2012a), puisque les robots ont une symétrie bilatérale (gauche/droite), δI_{ax} ne change pas lorsque la position de l'obstacle est déplacée symétriquement de gauche à droite par rapport au plan vertical (O, e_x, e_z) . Pour ce qui est de, $\delta I_{\text{lat}} = I_{\text{lat}}$, il représente le déséquilibre de conductivité entre les côtés gauche et droit du robot, et de fait, son contenu informationnel dépend fortement de la direction sous laquelle l'obstacle apparaît depuis (O, e_x) . En particulier, de simples considérations de symétrie montrent que $\delta I_{\text{lat}} = 0$ signifie que l'obstacle fait face au capteur, tandis que le déplacement du même obstacle de gauche à droite, change le signe de δI_{lat} (BOYER et al. 2012a). Enfin, en positionnant le repère du robot (ici l'aFish du projet subCULTron) comme sur la figure 3.2, et avec la définition (3.1) de δI_{lat} , la combinaison des informations contenues dans δI_{ax} et δI_{lat} , permet de déduire si un obstacle est conducteur ou isolant, et s'il se trouve à gauche ou à droite du capteur (par rapport à (O, e_x, e_z)), comme cela est indiqué dans le tableau 3.1 et illustré dans la figure 3.2.

3.4 Perception passive pour l'agrégation

Comme nous l'avons montré dans (BOYER et al. 2015), la complémentarité des courants axiaux et latéraux tient toujours en mode passif. Dans ce cas, $I_{\text{ax}}^{(0)} = 0$, et $\delta I_{\text{ax}} = I_{\text{ax}} \neq 0$ signifie qu'un robot est présent dans la zone d'un autre robot, tandis que δI_{lat} code directement la façon dont l'axe du capteur (O, e_x) est aligné par rapport à la ligne électrique du champ E_e , qui traverse les électrodes réceptrice du robot. Dans notre exemple, le champ électrique généré par un robot actif (aMussel du projet subCULTron) étant radial, ces lignes électriques sont droites et δI_{lat} mesure à quel point l'axe du aFish (O, e_x) est loin de croiser l'axe vertical de l'aMussel (O, e_z) . En particulier, de simples considérations de symétrie montrent que lorsque $\delta I_{\text{lat}} = 0$, l'axe du aFish est aligné avec la ligne joignant l'axe de l'aMussel et le centre du aFish O . Lorsque cet alignement est assuré, le signe de δI_{ax} indique alors si le nez ou la queue du aFish fait face à l'aMussel. Dans le premier cas, on dit que l'aFish pointe vers l'aMussel, dans le second, il lui "tourne le dos". Avec notre

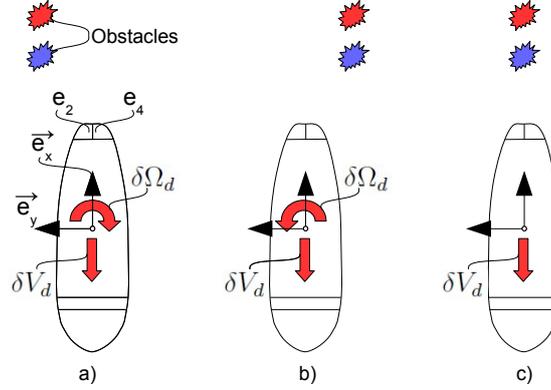


FIGURE 3.2 – Différents scénarios de perception pour l'évitement d'obstacles. En se référant à (BOYER et al. 2013a), δI_{ax} image la présence d'un obstacle électriquement contrasté dans la portée du capteur, tandis que δI_{lat} indique une différence de conductivité entre la gauche et la droite. La combinaison de ces informations permet de déduire la présence d'un obstacle isolant ou conducteur dans le champ du capteur, et s'il se trouve à gauche ou à droite.

choix du repère du aFish (voir figure 3.3), et avec la définition (3.1) de δI_{lat} , ces différents scénarios perceptifs, qui sont liés au comportement d'alignement (A), sont résumés dans le tableau 3.2 et la figure 3.3 (rappelons que le champ d'une aMussel est radial et divergent).

δI_{ax}	δI_{lat}	Perception	Règle	Réaction : $\delta \bar{\eta}_d = (\delta V_d, \Omega_d)^T$
> 0	> 0	robot actif à l'avant-droit	Tourner à droite	$\delta \Omega_d > 0$
> 0	< 0	robot actif en avant-gauche	Tourner à gauche	$\delta \Omega_d < 0$
< 0	> 0	robot actif à l'arrière-droit	Tourner à droite	$\delta \Omega_d > 0$
< 0	< 0	robot actif en arrière-gauche	Tourner à gauche	$\delta \Omega_d < 0$
> 0	$= 0$	robot actif devant	ne rien faire	$\delta \Omega_d = 0$
< 0	$= 0$	robot actif à l'arrière	ne rien faire	$\delta \Omega_d = 0$
$= 0$	$= 0$	Pas de robot actif dans les environs	ne rien faire	$\delta \Omega_d = 0$

TABLE 3.2 – Perception passive pour l'alignement (agrégation) : Perception basée sur des mesures (3 premières colonnes). Règles et réactions pour l'alignement (2 dernières colonnes).

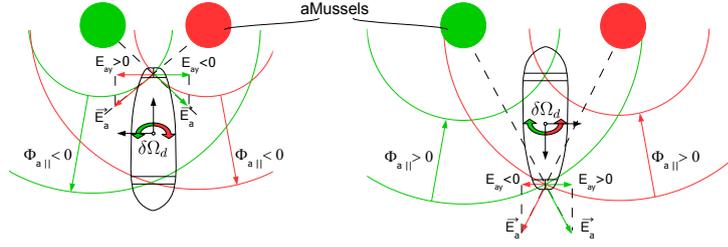


FIGURE 3.3 – Différents scénarios de perception pour l'alignement. Les disques rouges (par rapport aux verts) représentent une moule à droite (par rapport aux gauches) d'un aFish avec ses lignes électriques radiales divergentes. Puisque $\delta I_{\text{lat}} = p_{\perp} E_{a,y}$ avec $p_{\perp} > 0$, δI_{lat} a le signe de la projection de E_e sur le vecteur e_y du repère du aFish, c'est-à-dire de $E_{a,y}$. De plus, $\delta I_{\text{lat}} = 0$ lorsque l'aFish pointe vers l'aMussel. Puisque $I_{\text{ax}} = \delta I_{\text{ax}} = -C_{\text{ax}}^{(0)} \Phi_{a,\text{ax}}$, avec $C_{\text{ax}}^{(0)} \in \mathbb{R}^+$ et $\Phi_{a,\text{ax}} \in \mathbb{R}$ la différence de tension exogène entre l'émetteur et le récepteur. On a $\delta I_{\text{ax}} > 0$ ou $\delta I_{\text{ax}} < 0$, selon que l'aFish fait face ou tourne le dos à l'aMussel respectivement.

Alors que les considérations ci-dessus sont liées à la détection et à l'orientation relative des aFish et aMussel, d'autres informations relatives à la distance entre ces robots peuvent être extraites des mesures en mode passif. En effet, en exploitant le feuilletage de l'espace en surfaces iso-potentielles (voir la figure 3.4), lorsque le nez du aFish pointe vers la aMussel, c'est-à-dire lorsque $\delta I_{\text{lat}} = 0$, l'amplitude de $\delta I_{\text{ax}} > 0$ quantifie alors la distance entre l'aFish et l'aMussel. Plus précisément, toute valeur δI_{ax}^h définit une certaine distance d_h entre les deux, tandis que le signe de la différence $\delta I_{\text{ax}} - \delta I_{\text{ax}}^h$ indique si cette distance relative est inférieure ou supérieure à d_h . Ce contexte, qui est détaillé dans le tableau 3.3 et illustré dans la figure 3.4, a été exploité pour obtenir le comportement d'accrochage (H) de l'agrégation entre un Poisson et une Moule.

δI_{ax}	δI_{lat}	Perception	Règle	Réaction : $\delta \bar{\eta}_d = (\delta V_d, \Omega_d)^T$
=0	=0	Distance aFish/aMussel = d_h	Ne rien faire	$\delta V_d = 0$
> 0	=0	Distance aFish/aMussel < d_h	Aller en arrière	$\delta V_d < 0$
< 0	=0	Distance aFish/aMussel > d_h	Aller en avant	$\delta V_d > 0$

TABLE 3.3 – Perception passive pour la régulation de la distance lorsque l'aFish pointe vers l'aMussel : Perception basée sur les mesures (3 premières colonnes). Règles et réactions pour la régulation de la distance (2 dernières colonnes).

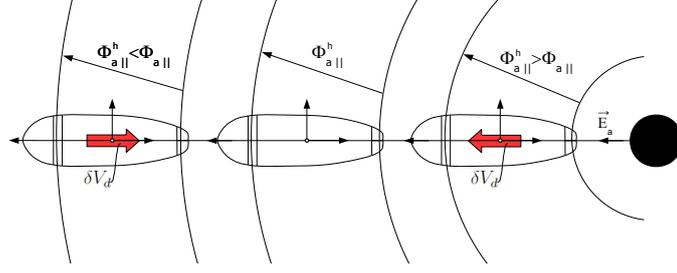


FIGURE 3.4 – Différents scénarios de perception pour la régulation de la distance radiale. Les isopotentiels qui traversent les électrodes sont indiqués par des lignes noires. Puisque l'aFish pointe vers l'aMussel (disque noir), et $I_{ax} = \delta I_{ax} = -C_{ax}^{(0)} \Phi_{a,ax}$. On a $\delta I_{ax} > \delta I_{ax}^h$ ou $\delta I_{ax} < \delta I_{ax}^h$ selon que la distance d entre l'aFish et l'aMussel est supérieure ou inférieure à d_h . De plus, lorsque $\delta I_{ax} = \delta I_{ax}^h$, on a $d = d_h$.

3.5 Organisation de l'activité électrique en groupe

La modalité passive du sens électrique est requise par la communication, tandis que le sens électrique actif est requis par la navigation. Aussi, dans le cas d'un essaim tel que subCULTron, chacun des robots doit bénéficier de ces deux modalités. A cette fin, il est nécessaire de respecter certaines règles afin de préserver l'exploitabilité des signaux. En effet, si deux robots émettent un champ harmonique de même fréquence au même moment, les signaux sont mélangés et inutilisables pour la navigation et la communication. Si l'on se réfère à la nature, les poissons émettant des signaux périodiques peuvent être simultanément actifs, en décalant leur fréquence d'émission afin d'éviter le brouillage de fréquence : (BULLOCK, HAMSTRA et SCHEICH 1972). Quant aux poissons à impulsions, ils ont développé des stratégies d'évitement de brouillage directement sur l'axe temporel. En groupe, ces poissons émettent un champ d'impulsions l'un après l'autre dans une séquence ordonnée qui se répète tant qu'ils sont dans la même zone de détection (SCHUMACHER et EMDE 2012). Dans notre cas, chaque robot est équipé d'un générateur d'ondes de tension qui peut générer un champ harmonique le long de fenêtres temporelles dont le timing est contrôlé. Ces fenêtres, qui sont illustrées par les tracés de U dans la figure 3.5, peuvent être comparées aux impulsions du poisson électrique pulsé, et ne doivent pas se chevaucher. Ainsi, le paradigme que nous avons utilisé pour organiser l'activité électrique en groupe s'inspire de ces poissons. Dans ce cas, l'activité électrique des robots s'auto-synchronise grâce à leur interactions selon un processus auto-émergeant. L'algorithme d'évitement du

brouillage qui en résulte est basé sur l'idée simple que lorsqu'un robot détecte le champ d'un autre autour de lui, cette détection inhibe sa propre activité électrique. Cette règle simple, est ~~un~~ implémentée via un algorithme de désynchronisation inspiré des lucioles qui synchronisent leur clignotement pour attirer les partenaires sexuels : (TYRRELL, AUER et BETTSTETTER 2006). Dans notre cas, l'activité électrique de chaque robot est régie par l'évolution temporelle d'un oscillateur dont la phase φ évolue en fonction de la séquence d'instructions :

Algorithm 1 Algorithme de l'oscillateur

```
Require:  $\varphi(0) \leftarrow \varphi_0$ ;  
while 1 do  
  if  $D = 1$  then  $\dot{\varphi}(t) = 0$ ;  
  else if then  $\dot{\varphi}(t) = \omega$ ;  
  end if  
  if  $\varphi = 2\pi$  then  $\varphi(0) \leftarrow 0$ ;  
  end if  
end while
```

où φ_0 et $\omega = 2\pi/T$, sont la phase à l'origine, qui est choisie aléatoirement, et la pulsation de l'oscillateur avec $1/T$ sa fréquence. Lorsque sa phase atteint 2π , le robot est actif pendant une durée réglable T_a , alors qu'il reste passif le reste du temps. Ceci est illustré dans la figure 3.5.a où P et D sont deux variables booléennes discrètes internes telles que $P = 1$ si le robot est passif et $D = 1$ si le robot a détecté un champ exogène autour de lui. Dès que le robot détecte un champ exogène dans sa portée, la phase de son oscillateur est verrouillée dans sa valeur courante, c'est-à-dire que $\omega = 0$ est forcé dans les relations ci-dessus, tandis que son activité électrique est inhibée et retardée (voir figure 3.5.b). De manière remarquable, en dépit de sa simplicité, ce principe fonctionne en toutes circonstances (n'importe quel nombre de robots) et est facile à mettre en œuvre sur des systèmes embarqués sans recourir à aucune horloge absolue à l'échelle du swarm.

3.6 Navigation cinématique réactive d'un aFish

Le contrôle de navigation du aFish est structuré en trois sous-objectifs : évitement d'obstacles (OA); (2) alignement avec un robot actif (A); (3) accrochage au robot actif (H). Dans le comportement OA, l'aFish doit explorer son environnement sans heurter d'obstacles. Dans le comportement A, l'aFish a détecté une aMussel active et aligne son corps

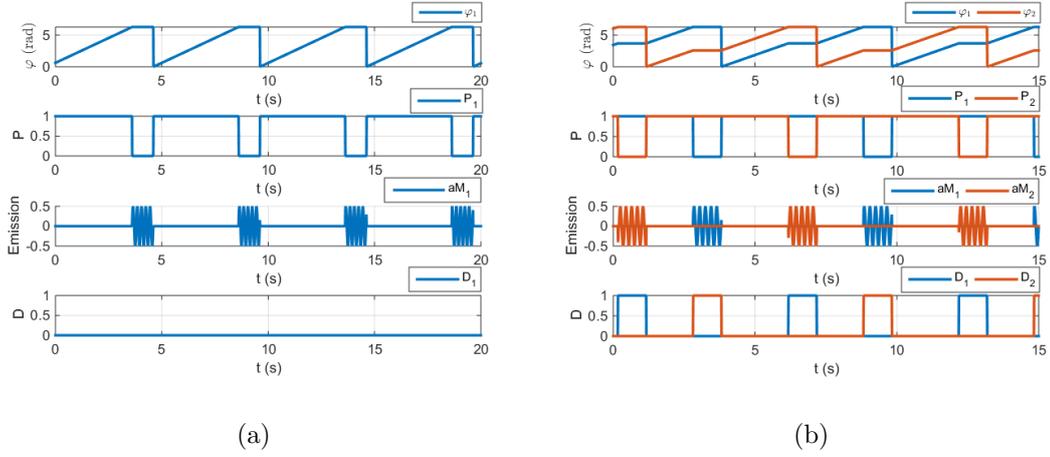


FIGURE 3.5 – Évolution temporelle de l'activité électrique d'un robot seul (a) et de deux robots (b). De gauche à droite : évolution temporelle de la phase φ , de la variable booléenne P ($P = 1$ lorsque le robot est passif), de la tension d'émission U et de la variable booléenne D ($D = 1$ lorsque le robot détecte un champ exogène dans son rayon d'action).

sur le champ radial de cette dernière. Dans le comportement H, l'aFish s'accroche à l'aMussel à une distance donnée d_h compatible avec la communication entre les deux robots, tout en restant aligné avec le champ radial de l'aMussel. En se basant sur les idées de la section 3.2, on peut facilement concevoir des lois de contrôle de navigation simples assurant que l'aFish suive ces comportements élémentaires. Pour les présenter, nous abordons d'abord le cas où l'aFish peut être contrôlé cinématiquement, c'est-à-dire qu'il est équipé d'un capteur de vitesse et se meuve suffisamment lentement pour que les effets dynamiques puissent être négligés. En raison de la morphologie compressée du aFish et de son actionnement, on peut l'assimiler à un unicycle, i.e. un véhicule se déplaçant dans un plan et soumis à la contrainte cinématique non intégrable de non dérapage latéral $V_y = 0$. Avec cette simplification, son mouvement est régi par le modèle cinématique réduit :

$$\dot{g} = g(B\bar{\eta}_d)^\wedge, \quad B^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

où $g \in SE(2)$ est la pose inertielle du repère aFish, et $\bar{\eta}_d = (V_d, \Omega_d)^T \in \mathbb{R}^2$ désigne une vitesse désirée que nous supposons être le vecteur de contrôle de ce système cinématique. Pour réaliser les trois comportements (OA,A,H), il suffit de compléter les 3 premières colonnes des tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 des deux suivantes (de gauche à droite) spécifiant un

	Electric mode	V_r	\tilde{K}	I_{ax}^d	I_{lat}^d
OA	Active	$V_r > 0$	$-\text{sign}(\delta I_{ax})\text{diag}(1, 1)$	I_{ax}^0	0
A	Passive	$V_r = 0$	$\text{diag}(0, 1)$	0	0
H	Passive	$V_r = 0$	$\text{diag}(-1, 1)$	I_{ax}^h	0

 TABLE 3.4 – Definition de V_r , \tilde{K} , I_{ax}^d and I_{lat}^d pour les trois comportements : OA, A, H.

jeu de règles réactives garantissant les objectifs de contrôle attendus. Pour traduire ces règles en lois de commande, nous introduisons le vecteur des erreurs électriques suivant :

$$e = \begin{pmatrix} e_{ax} \\ e_{lat} \end{pmatrix} = \frac{1}{|I_{ax}|} \left(\begin{pmatrix} I_{ax} \\ I_{lat} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} I_{ax}^d \\ I_{lat}^d \end{pmatrix} \right), \quad (3.4)$$

dans laquelle la division par $|I_{ax}|$ représente une normalisation des mesures qui s'adapte aux variations de la conductivité de l'eau. Avec ce choix, chacun des trois objectifs (OA,A,H) peut être atteint individuellement avec un simple contrôleur cinématique linéaire de la forme générale :

$$\bar{\eta}_d = \bar{\eta}_r + \delta\bar{\eta}_d = \bar{\eta}_r + K e, \quad (3.5)$$

où $\bar{\eta}_r = (V_r, \Omega_r)^T$ est une composante de feedforward poussant l'aFish à explorer son environnement, tandis que $\delta\eta_d = (\delta V_d, \delta\Omega_d)^T$ est une composante de feedback assurant au aFish de réagir à la présence d'obstacles ou d'aMussels selon les comportements attendus. En définissant K comme une matrice diagonale de gains telle que :

$$K = \begin{pmatrix} k_t & 0 \\ 0 & k_s \end{pmatrix} = \tilde{K} \begin{pmatrix} c_t & 0 \\ 0 & c_s \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

avec c_t et c_s , deux constantes positives, et \tilde{K} une matrice carrée. En utilisant les valeurs de (I_{ax}^d, I_{lat}^d) , V_r et \tilde{K} comme indiqué dans le tableau 3.4, on s'assure que le poisson accomplisse les comportements OA, A et H. En résumé, la loi de contrôle définie par (3.4), (3.5), (3.6) et le tableau 3.4 remplit toutes les règles de perception/réaction des tableaux 3.1, 3.2 et 3.3. En particulier, la valeur de \tilde{K} pour OA permet d'éviter les obstacles devant l'aFish, quelle que soit leur conductivité électrique (conducteurs ou isolants). En ce qui concerne l'alignement (comportement A), $\tilde{K} = \text{diag}(0, 1)$ oriente l'aFish de manière à ce que sa tête soit dirigée vers l'axe vertical de l'aMussel. Enfin, avec $\tilde{K} = \text{diag}(-1, 1)$ le comportement d'accrochage (H), est réalisé en hybridant les réactions des tableaux 3.2 et

3.3, ce qui signifie que la commande réactive assure à la fois l'alignement et la régulation autour de la distance de communication d_h (voir figures 3.3-3.4).

Remarque : Dans OA, l'utilisation de (3.5) dans (3.3), garantit que la cinématique en boucle fermée du robot est :

$$g' = g \left(B \begin{pmatrix} 1 + \xi_t e_{\text{ax}} \\ \xi_s e_{\text{lat}} \end{pmatrix} \right)^\wedge, \quad (3.7)$$

où le **nombre premier** indique maintenant la dérivation par rapport à l'abscisse curviligne le long de la trajectoire du aFish, tandis que $\xi_t = k_t/V_r$ et $\xi_s = k_s/r$ sont les réactivités d'avance et de direction qui règlent la vitesse avec laquelle le robot réagit (avec k_t et k_s) aux obstacles qu'il découvre (avec V_r) dans le comportement OA. En utilisant une métaphore automobile, en OA, le capteur se comporte comme une voiture, avec V_d la vitesse d'avance gouvernée par la pédale d'accélérateur, et Ω_d la vitesse angulaire contrôlée par le volant. Pour poursuivre l'analogie, $k_t e_{\text{ax}}$ est une rétroaction de distance frontale qui module le système d'entraînement des roues de la voiture, tandis que $k_s e_{\text{lat}}$ représente une rétroaction basée sur la vision binoculaire, qui aide au contrôle de la direction.

3.7 Stratégie de navigation

Utilisée pour chaque aFish, la stratégie de navigation consiste tout d'abord à explorer un espace libre avec un contrôleur d'évitement d'obstacles (OA) rigide (très réactif) \mathcal{C}_1 . Dès que le robot a détecté la présence d'obstacles, il passe à un contrôleur d'évitement d'obstacles souple (à faible réactivité) noté \mathcal{C}_2 , avec lequel il explore lentement son environnement jusqu'à détecter la présence d'une aMussel active. Il s'agrège alors avec elle et communique. Cette deuxième phase nécessite deux autres contrôleurs : l'un pour aligner (A) l'aFish avec le champ de l'aMussel (\mathcal{C}_3), l'autre pour accrocher l'aFish (H) à ce champ (\mathcal{C}_4). Enfin, toute la stratégie de navigation est mise en œuvre par le biais d'un contrôleur à structure variable qui dépend des mesures électriques, et de six variables internes booléennes P , D , O_1 , O_2 , A et M , comme définies dans le tableau 3.5. D indique qu'un champ externe a été détecté ($D = 1$) ou non, O_2 et O_1 indiquent si l'aFish s'approche trop rapidement d'un obstacle ($O_1 = 1$) ou en est suffisamment éloigné ($O_2 = 1$), A indique si l'aFish est aligné avec le champ de l'aMussel ($A = 1$) ou non, et M s'il a un message

Boolean \ Value	1	0
P	Passive	Active
D	Quelqu'un aux alentours	Personne aux alentours
O_1	Évitement rigide des obstacles	-
O_2	Évitement doux des obstacles	-
A	Aligné	désaligné
M	A un message à délivrer	N'a pas de message

TABLE 3.5 – Tableau des variables booléennes. Les variables P , D et M sont communes à aFish et aMussels, les autres ne sont valables que pour aFish.

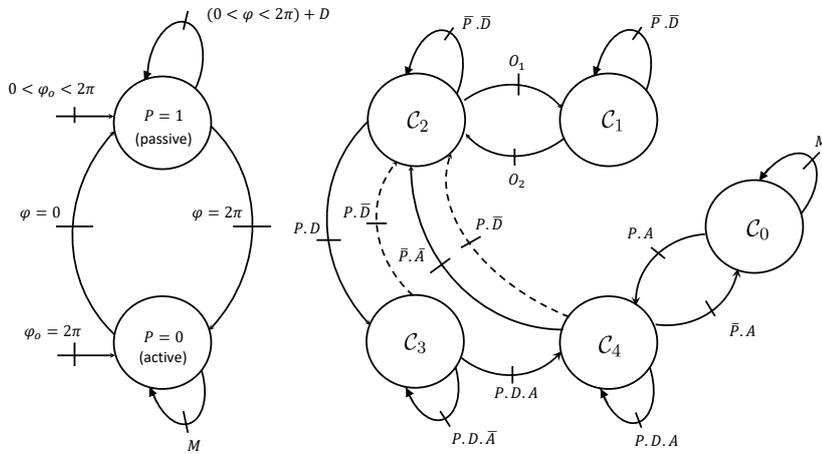


FIGURE 3.6 – Contrôleur de structure variable : Graph des événements pour la désynchronisation (à gauche) et la navigation aFish (à droite).

à délivrer ($M = 1$) ou non. Notez que D , O_1 , O_2 et A sont liés aux mesures électriques, tandis que les autres sont des variables internes relatives à l'algorithme de désynchronisation (P), qui ordonne toute la stratégie, et à la communication (M). Cette stratégie est résumée dans le contrôleur à structure variable de la figure 3.6.

3.8 Résultats expérimentaux

Des tests expérimentaux avec des aMussels et un aFish ont été effectués dans un aquarium cubique de 2m de large, rempli d'eau salée avec une conductivité $\gamma \cong 3,5$ S/m. Nous rapportons ci-dessous deux expériences représentatives. La première illustre l'évitement d'obstacles par un aFish, tandis que la seconde consiste en un scénario complet comprenant l'évitement d'obstacles, l'agrégation (alignement et accrochage) et la communication

d'un aFish et de deux aMussels.

3.8.1 Exploration et évitement d'obstacles par aFish.

Ce comportement est décrit par les figures 3.8.a et 3.9.a. La figure 3.8.a montre le chemin d'un aFish naviguant dans l'aquarium dans lequel nous avons placé deux parois (l'une isolante, l'autre conductrice), et deux aMussels passives. Le contrôleur à structure variable peut être représenté par le graph d'état de la figure 3.6, tandis que la figure 3.9.a montre lequel des contrôleurs est utilisé à chaque instant lors des deux tests rapportés. Les aMussels sont passives tout le temps, et l'aFish les considère comme des obstacles qu'il faut éviter. L'activité électrique du aFish est gérée par l'oscillateur de la section 8.2, avec $(T, T_a) = (0.5, 1)$ s. Comme attendu, lorsque l'espace environnant est suffisamment libre d'obstacles, le robot utilise le contrôleur nominal \mathcal{C}_1 qui lui permet d'explorer rapidement son environnement avec un fort V_r et une faible réactivité. Dès que le robot fait face ou s'approche trop près d'un obstacle, la composante axiale de \mathcal{C}_1 le fait freiner brutalement, c'est-à-dire que la vitesse axiale V diminue rapidement jusqu'à l'activation de la transition O_2 , qui fait passer l'aFish de \mathcal{C}_1 à \mathcal{C}_2 . Lorsque ce deuxième contrôleur est activé, le robot recule lentement et est dirigé vers la gauche ou la droite, avant d'avancer à nouveau. Cela donne à sa trajectoire l'allure de celle observée pour une voiture dans les mêmes conditions. Lorsque l'aFish n'est plus dans une zone à risque de collision avec les obstacles, ce contrôleur assure l'avance lente tout en slalomant mollement entre les obstacles. Dès que les objets sont suffisamment éloignés, O_1 est activé et l'aFish revient à son mode d'exploration plus impétueux \mathcal{C}_1 . Enfin, il convient de rappeler que tous ces comportements sont mise à jour en mode actif à partir du mode passif.

3.8.2 Agrégation et communication entre aFish et aMussel

Dans cette seconde expérience, le scénario complet de la communication est réalisé. Un aFish est présent dans le bassin avec deux aMussels suffisamment éloignées l'une de l'autre pour ne pas pouvoir communiquer directement. L'aFish joue le rôle d'un "insecte collecteur de miel" qui extrait des informations des aMussels, tout en évitant les parois du réservoir. Les aFish et les aMussels sont électriquement actifs et leur activité électrique est désynchronisée par l'algorithme de la section 3.5. Les figures 3.8.b et 3.9.b montrent les trajectoires et les contrôleurs utilisés par l'aFish au fil du temps. Dans cet exemple, étant proche d'un mur au temps initial t_0 , l'aFish commence par commuter entre \mathcal{C}_1 et



(a)

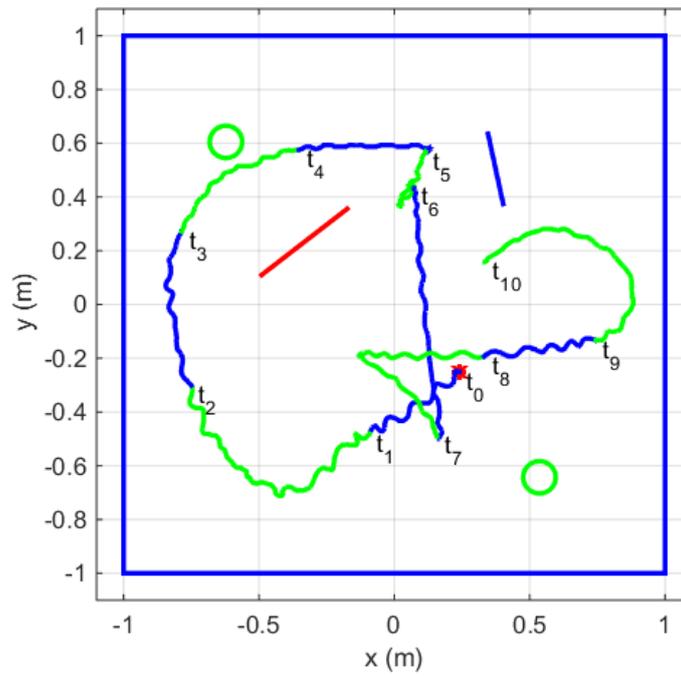


(b)

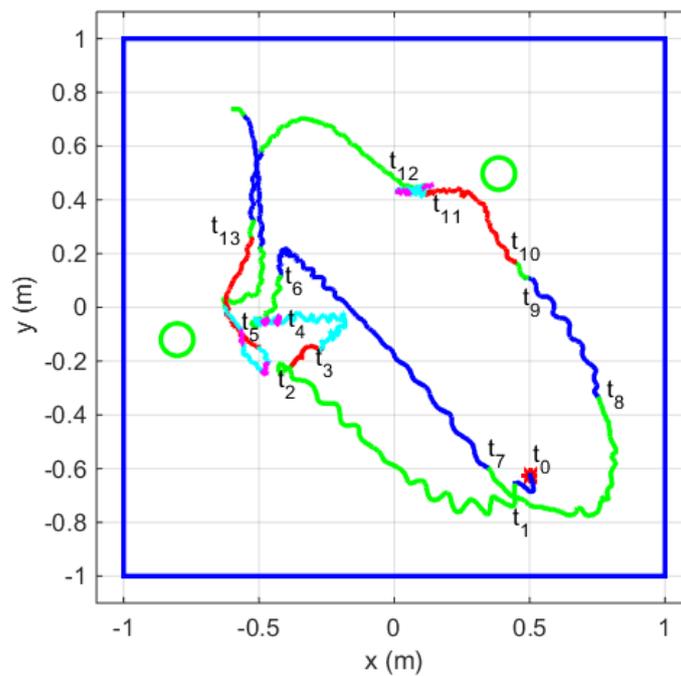


(c)

FIGURE 3.7 – Illustration des conditions expérimentales utilisées pour l’exploration, l’évitement d’obstacles et la communication par aFish. (a) Image de aFish, (b) Image du scénario d’exploration et d’évitement d’obstacles par aFish (à $t_5 < t < t_6$). (b) Image de l’agrégation du scénario et de la communication de aFish avec aMussel (à $t_{10} < t < t_{11}$).



(a)



(b)

FIGURE 3.8 – Trajectoires du aFish navigant avec le contrôleur flou à structure variable \mathcal{C}_1 (bleu), \mathcal{C}_2 (vert), \mathcal{C}_3 (rouge), \mathcal{C}_4 (cyan) et \mathcal{C}_0 (magenta). (a) : Évitement d'obstacles. (b) Évitement d'obstacles, alignement, croc-

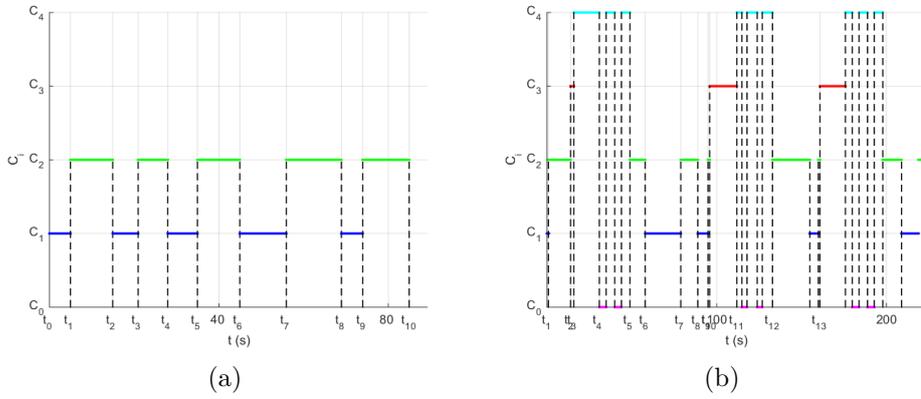


FIGURE 3.9 – Activation des contrôleurs au fil du temps dans un poisson naviguant avec le contrôleur flou à structure variable \mathcal{C}_1 (bleu), \mathcal{C}_2 (vert), \mathcal{C}_3 (rouge), \mathcal{C}_4 (cyan) et \mathcal{C}_0 (magenta). (a) : Évitement d’obstacles. (b) Scénario complet pour la communication : Évitement de l’obstacle, alignement, crochetage.

\mathcal{C}_2 , afin d’éviter le mur. Lorsque l’aFish entre dans la plage de détection de l’aMussel. La aMussel détecte la présence du aFish et commence l’agrégation en envoyant un champ de longue durée autour d’elle (voir figure 3.9.b). L’aFish reste passif et aligne son corps le long de ces lignes de champs grâce au contrôle réactif \mathcal{C}_3 . Comme prévu, l’aFish tend à pointer son nez vers l’aMussel tout en s’en approchant lentement par inertie. Dès que les courants latéraux sont proches de zéro, l’alignement est assuré ($A = 1$) et l’aFish mémorise les courants axiaux I_{ax}^h . Ensuite, il s’accroche électriquement à l’aMussel avec le contrôleur réactif \mathcal{C}_4 , qui assure la condition $I_{ax} = I_{ax}^h$. Étant suffisamment proche de l’aMussel pour communiquer (voir figure 3.8.b), l’aFish reçoit un message de l’aMussel. Il passe alors en mode \mathcal{C}_0 et renvoie le message à l’aMussel qui vérifie s’il est correct. Lorsque c’est le cas, la aMussel passe en mode passif ce qui met fin à la communication. L’aFish est alors libéré et repasse en mode d’évitement d’obstacles \mathcal{C}_2 . Une fois ceci fait, la même histoire se répète, une fois avec l’autre aMussel, et une autre fois avec la même aMussel.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué le sens électrique artificiel à la navigation réactive et la communication sous-marine. La connaissance du modèle des courants et de leur recombinaison en courants axiaux et latéraux ont permis de réaliser grâce à de simples lois réactives, des comportements de navigation se rapprochant de ceux des poissons. Pour

la communication, les modalités actives et passives du sens électrique sont mobilisées et organisées dans le temps grâce à un algorithme de désynchronisation délocalisé inspiré des lucioles. Nous avons validé ces approches sur différents robots. L'évitement d'obstacle a été développé dans le projet européen Angels, tandis que les autres comportements motivés par la communication ont été implémentés et testés expérimentalement sur l'essaim de robots hétérogène du projet européen subCULTron.

ÉLECTRO-HAPTIQUE

4.1 Introduction

Ce chapitre relate des travaux menés dans le cadre d'un contrat région avec le CEA dont le but était d'exploiter la modalité haptique du sens électrique (CAPUTI et al. 2013) afin d'assister la télé-opération sous-marine. Contrairement à l'unique publication sur le sujet (FANG, PESHKIN et MACIVER 2016), la dite assistance n'est pas basée sur le retour visuel et la réalité virtuelle, mais sur l'inclusion directe du sens électrique dans une boucle télé-haptique, émulant une sorte de "toucher sans contact". Pour illustrer ce concept, nous avons montré dans BOYER et al. 2019 comment un opérateur peut utiliser un capteur $U - I$ (SERVAGENT et al. 2013b) de géométrie élancée, comme un doigt électrique, en la déplaçant le long des limites des objets à une distance donnée, tout en ayant la sensation de toucher leur surface (voir figure 4.1-a-gauche).

4.2 Formalisation du problème étudié

Pour cela, nous avons considéré le contexte idéalisé suivant. Un manipulateur **esclave** télécommandé par une interface haptique maître, est équipé d'une sonde active à son extrémité. La sonde est immergée dans l'eau en présence d'une paroi isolante infinie **4.2**. Connaissant les courants électriques mesurés par la sonde, l'idée centrale a été de construire un ensemble de forces qui, une fois renvoyées à l'opérateur par l'interface haptique, lui donnent la sensation que :

1. Parallèlement au mur, la sonde peut être déplacée en translation sans aucun effort.
2. Le long des deux autres degrés de libertés (ddl) dans $SE(2)$, des forces de rappel apparaissent dès que la sonde n'est plus perpendiculaire au mur et à une distance prescrite d de celui-ci (voir figure 4.1-a-right).

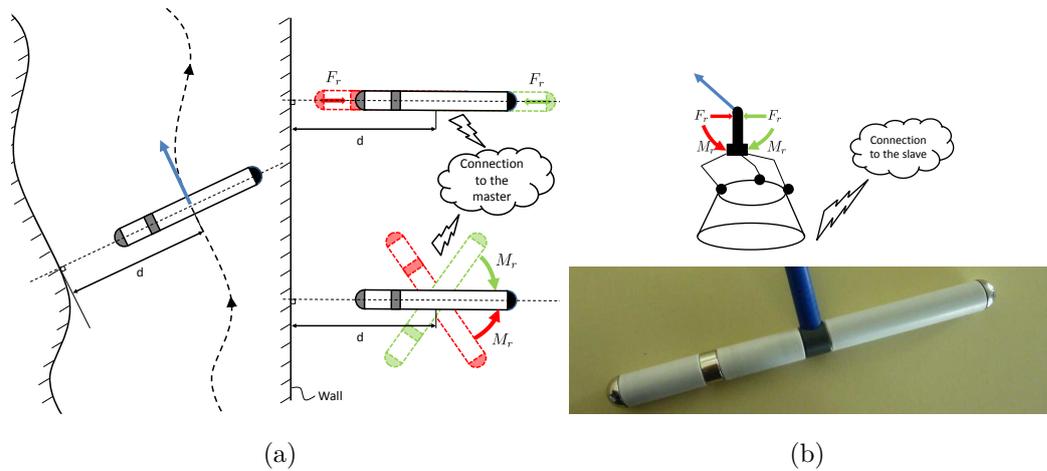


FIGURE 4.1 – Schématisation du scénario visé avec force et couple électrique de rappel F_r et M_r (flèches vertes et rouges) et direction de la force libre (flèches bleues) dans les espaces esclave (a) et maître (b-haut). Image d’une sonde à 3 électrodes (b-bottom).

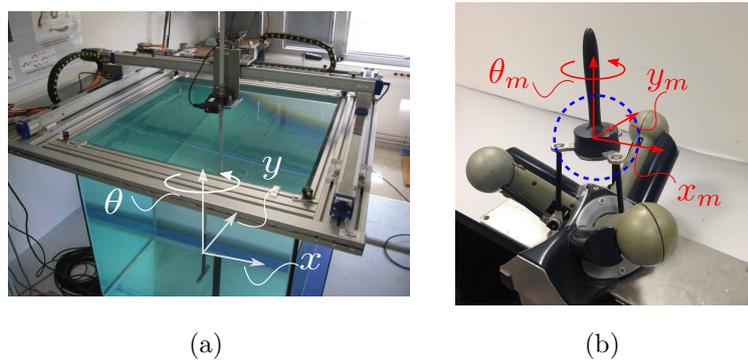


FIGURE 4.2 – (a) Aquarium de 1 m^3 avec le portique au-dessus. (b) Interface haptique 6D Desktop de Haption avec sa zone de contrôle de position (sphère bleue).

Ce problème aurait pu être résolu en électro-localisant la sonde dans un environnement virtuel et en fournissant à l’opérateur un retour haptique basé sur ce modèle géométrique (MITRA et NIEMEYER 2004). Cependant, dans des conditions réalistes, la reconstruction géométrique de l’environnement aurait **nécessiter** de résoudre des problèmes inverses complexes qui restent largement non résolus à ce jour. Pour contourner cette difficulté, nous avons privilégié une approche par retour de mesures qui évite le recours à un tel modèle virtuel. Dans cette approche, les forces et les couples exercés sur la sonde, sont générés par un ensemble de charges électriques et de dipôles virtuels disposés le long de son axe,

qui réagissent au champ électrique réfléchi par l'environnement. Pour assurer la stabilité de la boucle, le modèle de ces forces est passif et émule ~~à l'échelle macroscopique~~, les forces conservatives attractives-répulsives dérivant du potentiel dit de Lennard-Jones (cf. figure 4.3) étudié en physique, pour rendre compte des interactions microscopiques entre les atomes des gaz et des liquides (HIRSCHFELDER, CURTISS et ROBERT 1966). Bien que conceptuellement développée pour un mur infini, nous avons montré que cette approche reste robuste dans des conditions expérimentales plus réalistes incluant des coins, des murs finis, des objets...

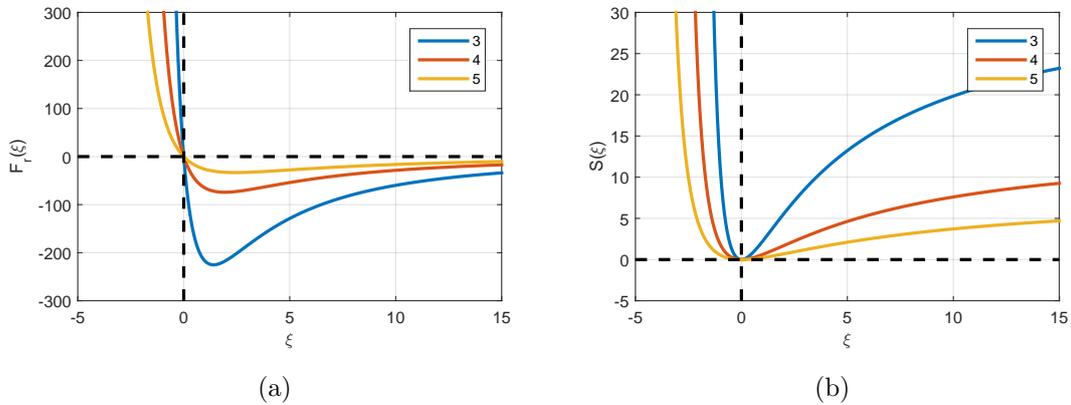


FIGURE 4.3 – Illustration de la forces de rappel (a) et potentiel attractif-répulsif (b) de type Lennard-Jones pour $q = 1$, $l = 0.03$ et $\eta_d = 3, 4, 5$.

4.3 Caractéristiques d'une boucle de rétroaction haptique

Une boucle de téléopération à retour de force est composée de cinq éléments : un opérateur humain, un manipulateur maître, un manipulateur esclave et un contrôleur de couplage entre les deux manipulateurs et l'environnement (voir figure 4.4). Le sous-système "maître-coupleur-esclave" est appelé système de téléopération (TS). Une fois inclus dans la boucle, l'opérateur échange des forces, des positions et des vitesses avec le maître, et souhaite avoir la sensation d'interagir directement avec l'environnement. Dans la plupart des applications industrielles, les bras maître et esclave sont couplés par des dispositifs mécaniques et l'environnement est constitué d'objets réels plus ou moins rigides et lourds. Dans notre cas particulier, le couplage est réalisé par un ordinateur (GEFFARD et al.

2012), et l'environnement est constitué d'une scène donnée en interaction avec un capteur électrique actif par le biais de forces émulées qui restent à définir. (voir figure 4.4).

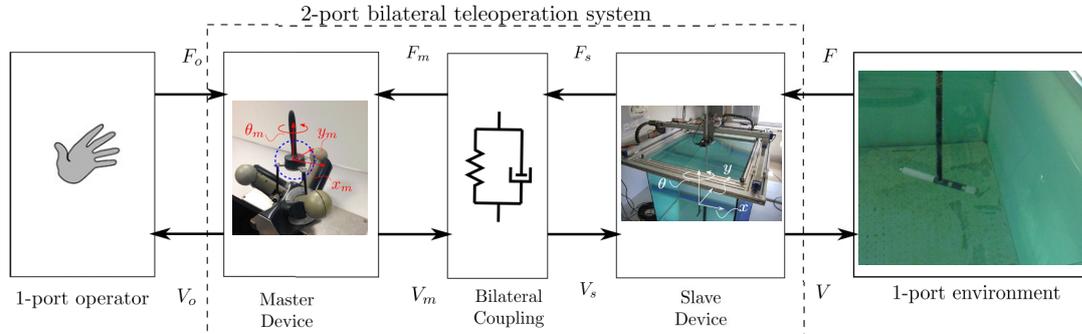


FIGURE 4.4 – Architecture de la boucle de télé-opération : un réseau de blocs multiport échangeant des paires de variables doubles (force-vitesse) (F, V) , avec o, m, s pour "opérationnel", "maître" et "esclave".

4.3.1 Transparence

Intuitivement, un système téléopéré est parfaitement transparent si l'opérateur a le sentiment d'agir directement sur l'environnement. En se référant à la représentation du réseau de la figure 4.4, cela signifie que les relations entre les forces et les vitesses sont identiques dans les espaces esclave et maître. Dans le cas linéaire (c'est-à-dire si tous les blocs de la figure 4.4 peuvent être modélisés par des matrices de transfert), la transparence idéale est donc atteinte lorsque nous avons $Z_t = Z_e$, où $Z_t = F_o/V_o$ et $Z_e = F/V$ sont les impédances de transmission et d'environnement (HANNAFORD 1989). Assurer la stabilité avec une transparence parfaite est en général impossible. Ainsi, en pratique, la performance globale d'une boucle de téléopération est le résultat d'un compromis entre ces deux objectifs idéaux antagonistes.

4.3.2 Stabilité et passivité

La stabilité des systèmes haptiques est intuitivement satisfaite lorsqu'un opérateur peut interagir avec l'environnement distant par le biais d'une interface haptique sans aucune oscillation parasite. Il existe plusieurs façons de tester la stabilité d'un tel système. L'une des plus intuitives consiste à utiliser le concept de passivité. Il permet de garantir la

stabilité sans une connaissance exacte du modèle du système et des valeurs des paramètres. En bref, un système est dit passif, si l'intégrale de la puissance qui en est extraite, au cours du temps, n'excède pas l'énergie initiale stockée dans le système (COLGATE et BROWN 1994). Pour aller plus loin, considérons un système dynamique régi par la dynamique d'état :

$$\dot{x} = f(x, u) , y = h(x, u), \quad (4.1)$$

avec $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ et $y \in \mathbb{R}^m$, les vecteurs des variables d'état, d'entrée et de sortie respectivement. L'application entrée-sortie associée à (4.1) est dite dissipative, s'il existe une fonction réelle non négative $S(.) : x \in \mathbb{R}^n \mapsto S(x) \in \mathbb{R}^+$, nommée fonction de stockage telle que pour tout état initial $x(0) \in \mathbb{R}^n$ et toute loi de contrôle $u(.) : \nu \in [0, t] \mapsto u(\nu) \in \mathbb{R}^m$, nous avons :

$$S(x(t)) - S(x(0)) \leq \int_0^t s(u, y) d\nu , \forall t \geq 0 , \quad (4.2)$$

où s est une fonction à valeur réelle localement intégrable. Dans ces conditions, en utilisant l'analogie avec un système physique, on peut interpréter l'intégrale de (4.2) comme l'énergie W fournie extérieurement au système, tandis que S représente l'énergie stockée dans celui-ci, et la différence $W - (S(x(t)) - S(x(0))) = W - \Delta S$ représente une énergie dissipée. Lorsque $W = \Delta S$, on dit que le système est sans perte. Une propriété importante dans l'étude de la stabilité des systèmes haptiques consiste dans le fait que la connexion en série de deux éléments passifs est également passive (HANNAFORD et RYU 2002). En particulier, en considérant le réseau de la figure 4.4, on peut montrer (LLEWELLYN 1972) que le fait d'assurer la passivité (ou la stabilité absolue) du réseau à 2 ports TS, ainsi que celle des réseaux à 1 port de l'environnement et de l'opérateur, garantit automatiquement la stabilité de l'ensemble du système couplé. Dans les développements suivants, nous utiliserons ces propriétés pour garantir la stabilité de notre boucle électro-haptique. Pour cela, nous implémenterons l'architecture passive inconditionnellement stable du TS position-position (ALIAGA, RUBIO et SANCHEZ 2004), et nous concevrons un modèle de l'environnement sous la forme de forces électriques qui remplissent le critère de passivité (4.2). La passivité de tous les composants de la figure 4.4 (y compris celle de l'opérateur qui sera supposé), assurera alors la stabilité de l'ensemble du système.

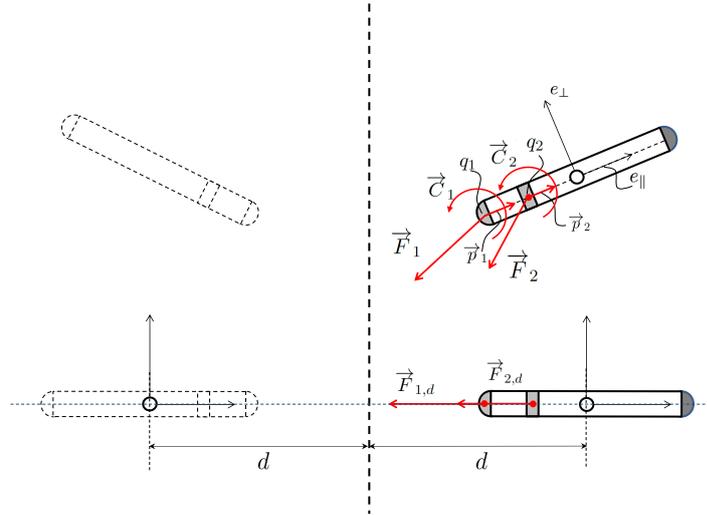


FIGURE 4.5 – Modèle des charges et dipôles électriques virtuelles placés sur la sonde réelle. Ces charges et dipôle sont choisis de sorte que la pose désirée de la sonde par rapport au mur soit une position d'équilibre stable sous l'influence du champ réfléchi par le mur (cf. Chapitre 2).

4.4 Emulation des forces de rappel électriques

Pour émuler correctement un système de forces externes exercées par l'environnement sur la sonde, on peut utiliser le modèle des forces conservatives de Coulomb. En particulier, il est bien connu qu'une charge électrique $q \in \mathbb{R}$ et un dipôle p localisés en $x \in \mathbb{R}^3$ et plongés dans un champ électrique $E \in \mathbb{R}^3$, sont soumis à une force F et un couple C localisés en x , de nature conservative, et définis par JACKSON 1999 :

$$F(x) = q E(x) \quad , \quad C(x) = p \times E(x). \quad (4.3)$$

Notons qu'en jouant sur le signe de q et l'orientation de p , F peut être répulsive ou attractive alors que C peut être un couple d'alignement stable ou instable. L'idée clé consiste donc à utiliser les mesures de la sonde pour émuler un ensemble de charges et de dipôles de Coulomb virtuels rigidement attachés à la sonde considérée comme une boussole qui peut se déplacer et tourner librement sous l'influence du champ électrique ambiant, ici assimilé au champ réfléchi par le mur (cf. la méthode des images du chapitre 2). Ces charges de Coulomb et dipôles virtuels peuvent être positionnés arbitrairement au centre des groupes d'électrodes de mesure ε_k , $k = 1, 2$, c'est-à-dire que tout ε_k peut

être associé à une charge électrique virtuelle q_k et à un dipôle électrique virtuel ${}^p p_k \in \mathbb{R}^2$. En ce qui concerne les dipôles, on impose qu'ils soient alignés avec l'axe de la sonde, c'est-à-dire, ${}^p p_k = (p_k, 0)^T$ afin de générer un couple d'alignement avec la valeur locale du champ électrique ambiant. Par conséquent, nous pouvons définir pour tout ε_k la force et le couple suivants, déduit de l'expression de (4.3) dans le repère de la sonde

$${}^p F_k = q_k {}^p E_k, \quad C_k = p_k E_{k\perp}, \quad (4.4)$$

où nous avons utilisé le fait qu'un dipôle virtuel est aligné avec la sonde, tandis que par souci de concision, nous noterons désormais ${}^p E({}^s x_k) = {}^p E_k = (E_{k\parallel}, E_{k\perp})^T$. Dans le cas de la sonde à 3 électrodes représentée sur la figure 4.1-b, seules les électrodes de la tête et du cou peuvent être utilisées pour imager les composantes latérales et axiales du champ électrique, le torseur des forces électriques virtuelles sera défini par le principe de superposition, selon l'expression générale suivante

$${}^p \mathbb{F} = \begin{pmatrix} {}^p F \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^p F_1 + {}^p F_2 \\ C_1 + C_2 - l_1 F_{\perp 1} - l_2 F_{\perp 2} \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

où $l_1 = L/2$ et $l_2 = (L/2) - l$ sont les distances entre ε_1 et O_p , et ε_2 et O_p . Une telle configuration de charges et de dipôles est illustrée sur la figure 4.5. À partir de cette configuration générale, nous avons cherché des conditions sur (q_1, p_1) , (q_2, p_2) pour que la pose désirée du capteur par rapport au mur (sonde perpendiculaire à une distance désirée d) soit une pose d'équilibre de notre retour haptique. Plus précisément, nous avons montré dans (BOYER et al. 2019) que cette pose d'équilibre est le minimum d'un potentiel attractif-répulsif de type Lennard-Jones (cf. figure 4.3). Ces conditions sont développées et résolues dans (BOYER et al. 2019) et se résument pour nos quatre paramètres de conception (q_1, q_2, p_1, p_2) à :

$$p_1 = l_1 q_1, \quad p_2 > l_2 q_2 = -l_2 \alpha_{Ed} q_1. \quad (4.6)$$

avec :

$$\alpha_{Ed} = E_{1\parallel}^d / E_{2\parallel}^d, \quad (4.7)$$

un scalaire dont la valeur est fixée par la distance d désirée lorsque la sonde est orthogonale au mur. Pour implémenter ce modèle, il nous a fallu reconstruire les valeurs du champ réfléchi aux endroits où sont placées ces charges et dipôles, i.e. les $(E_{k\parallel}, E_{k\perp})^T$, à partir des

mesures δI du capteur (BOYER et al. 2019). Ceci permet de changer les forces et couples de Coulomb (4.5), en des forces et couples réactifs fonctions des courants, du type des commandes cinématiques réactives du chapitre précédent. Au bout du compte, l'approche est très simple à implémenter pratiquement, puisqu'elle réclame tout d'abord de mettre la sonde perpendiculairement au mur à une distance donnée, puis de mesurer l'image en courant de α_{Ed} (notée α_{Id}), et enfin de régler les valeurs des charges et dipôles virtuels afin de garantir un ressenti confortable et stable à l'opérateur.

4.5 Résultats expérimentaux

Dans cette illustration du retour haptique, la tâche consiste à suivre, sans retour visuel, les limites de l'environnement tandis que la sonde est maintenue perpendiculaire à celles-ci à une distance fixe. Le but de l'opérateur est de bouger la sonde le plus loin possible selon le ddl de translation, en se laissant guider par le fait que ces mouvements n'offrent aucune force de résistance apparente sur le bras maître (joystick). Sur les deux autres ddl (translation dans la direction du mur et rotation d'axe parallèle au mur), au contraire, l'opérateur se laisse guider par une force et un couple de rappel le ramenant dans la pose d'équilibre désirée. La sonde est d'abord positionnée dans sa position d'équilibre au milieu d'un mur. Le joystick est positionné près de sa position neutre et son repère est apparié au repère de la sonde dans la position d'équilibre.

Dans ce test, une sphère conductrice de 6cm de diamètre est placée à 10cm du mur comme illustré sur la figure 4.6. La sonde part d'une pose d'équilibre A au milieu d'un mur. Le test comprend deux phases de translation $A \rightarrow B$ et $C \rightarrow D$, et une rotation de coin $B \rightarrow C$. La sonde évite la sphère tout en étant éloignée de la paroi au-delà de la distance désirée d (voir $D \rightarrow F$). Cependant, dans ce cas, l'orientation de la sonde change fortement entre D et F . Cette rotation est générée par le couple de rappel M_r qui augmente et puis diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que lorsque la sonde s'approche de la sphère, celle-ci est polarisée par le champ de la sonde qui génère un autre champ électrique perturbateur presque parallèle à la paroi, le long duquel la sonde essaie de s'aligner (grâce à M_r). Lorsque la sonde dépasse la sphère, sa polarisation est inversée, ce qui change le signe de M_r . Juste après avoir passé la sphère, la paroi devient dominante et la sonde se réoriente rapidement vers elle et le prochain coin. L'opérateur ressent alors un "bourrelet" lors du passage de la sphère conductrice.

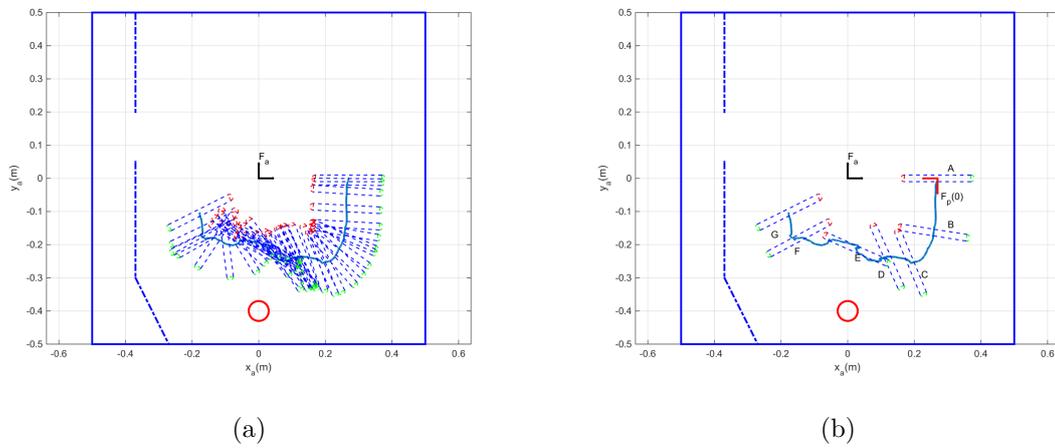


FIGURE 4.6 – Test 3 : Trajectoire de la sonde dans l'espace esclave (a), avec quelques poses distinguées (b).

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une implementation du sens électrique dans un système de télé-opération. Dans ce cas, nous avons utilisé la modalité haptique du sens électrique, pour émuler des forces pré-touchés. Les résultats expérimentaux confirment les prédictions théoriques et montrent que le sens électrique pourrait être utile pour assister les opérateur dans la télé-opération sous-marine.

LOCALISATION ET IDENTIFICATION D'OBJETS.

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la détection et la localisation sous-marine dans des conditions turbides qui reste aujourd'hui un défi pour la robotique sous-marine. Dans les eaux boueuses encombrées d'obstacles, ni les caméras ni le sonar sont utiles à un robot pour effectuer les tâches habituelles de navigation réactive, de planification de trajectoire ou de reconnaissance de formes. Des expériences biologiques récentes ont montré que les poissons électriques peuvent effectuer des tâches cognitives complexes telles que la reconnaissance d'objets (EMDE et SCHWARZ 2002 ; EMDE et al. 2010 ; HOFMANN et al. 2013). Ceci est remarquable, car les images électriques projetées sur la peau des poissons sont fondamentalement floues et a priori difficiles à interpréter (CAPUTI, BUDELLI et BELL 1998b ; EMDE et al. 1998a ; EMDE 2006). De plus, la réponse électrique des objets polarisés montre que leur position et leur géométrie intrinsèque (forme, taille) sont intimement liées les unes aux autres dans la mesure des courants transcutanés qui traversent la peau (RASNOW et BOWER 1996). Les stratégies développées par les poissons pour reconnaître la forme d'un objet restent encore une question ouverte, bien que celles-ci soient probablement effectuées séparément après les déterminations initiales de la nature électrique, de la direction et de la distance. Les travaux que nous avons menés sur le sujet de la localisation et reconnaissance d'objet ont commencé dès le lancement du projet Angels avec nos recherches sur la modélisation (résumé dans le chapitre 2), et une première solution au problème de la navigation (non-réactive) basée sur le filtrage de Kalman et le modèle des objets sphériques LEBASTARD et al. 2010. Après Angels, et avant subCULTron, ils ont été étendus au cas des objets ellipsoïdaux dans le contexte de la thèse de Sylvain Lanneau LANNEAU et al. 2017a. Le but ultime de ce qui suit est la reconnaissance de ces objets. Pour cela, nous relatons la stratégie que nous avons implémentée qui se structure selon

la hiérarchie suivante : (1) détection, puis (2) localisation, et enfin (3) identification d'un objet. Dans un second temps, nous verrons que la détection et localisation peuvent être avantageusement remplacées par un positionnement réactif (sans modèle) du robot par rapport à l'objet.

5.2 Détection d'un objet

Dans toute la suite, les objets considérés, sont des ellipsoïdes isolantes ou conductrices de taille relativement importante par rapport aux dimension du capteur : une sonde élançée à 4 macro-électrodes (cf. figure 5.1(a)). Les objets utilisés pour nos expériences sont représentés sur la figure 5.1(b).

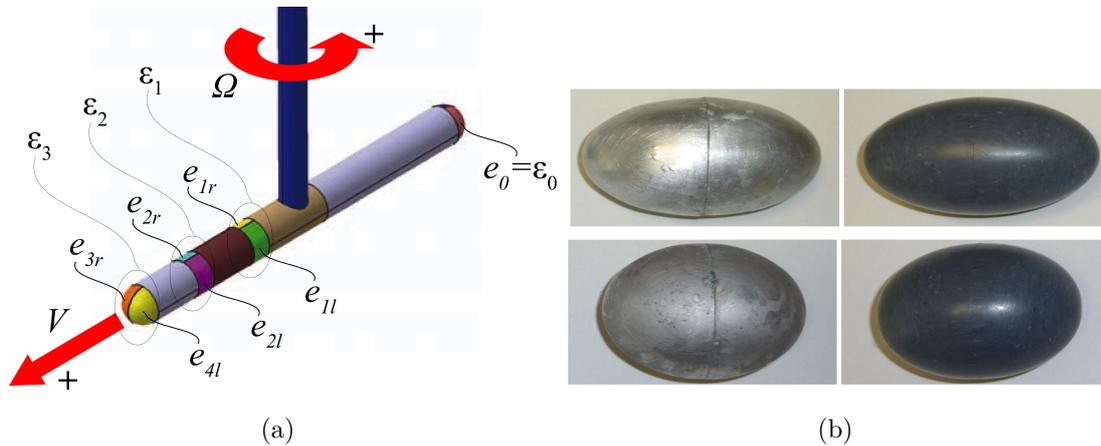


FIGURE 5.1 – (a) : Schéma de la sonde avec ses 4 macro-électrodes divisées en électrodes de mesure gauche-droite.(b) Ellipsoïdes testées expérimentalement.

5.2.1 Stratégie de détection du poisson

Les biologistes ont montré que lorsqu'ils effectuent une reconnaissance d'objets, les poissons électriques localisent les objets avant d'identifier leurs propriétés intrinsèques (EMDE et SCHWARZ 2002). Pour effectuer la localisation, les poissons utilisent une séquence hiérarchique d'indices qu'ils extraient des images électriques statiques projetées des objets sur leur peau, dont les transects d'amplitude ont une forme de chapeau mexicain (CAPUTI, BUDELLI et BELL 1998b; EMDE et al. 1998a). Ces indices nécessitent un réseau de récepteurs plus dense que les quelques électrodes de notre capteur. Cependant, des études biologiques plus récentes (HOFMANN et al. 2013), ont montré que des résultats similaires

peuvent être obtenus avec beaucoup moins de récepteurs en déplaçant le capteur par rapport à l'objet selon des mouvements stéréotypés. Dans ce contexte dynamique, les signaux électriques sont mesurés au cours du temps, et non dans l'espace, et créent des images temporelles ou "t-images" dont les maximums et minimums relatifs, ou peak-position (PP) permettent de détecter la nature électrique et la présence d'un objet au droit d'un seul récepteur. Dans la section qui suit, nous expliquons comment nous avons implémenté ces idées sur notre capteur $U - I$.

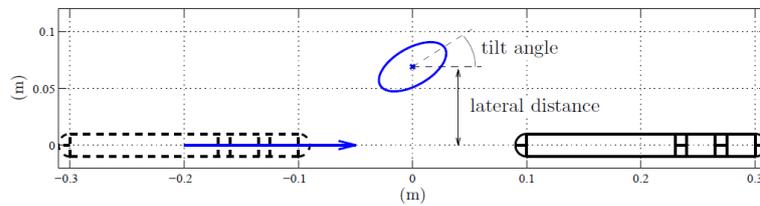


FIGURE 5.2 – La sonde passe devant un objet (ligne bleue continue) en ligne droite. Lignes noires pointillées (resp. pleines) : position initiale (resp. finale) de la sonde.

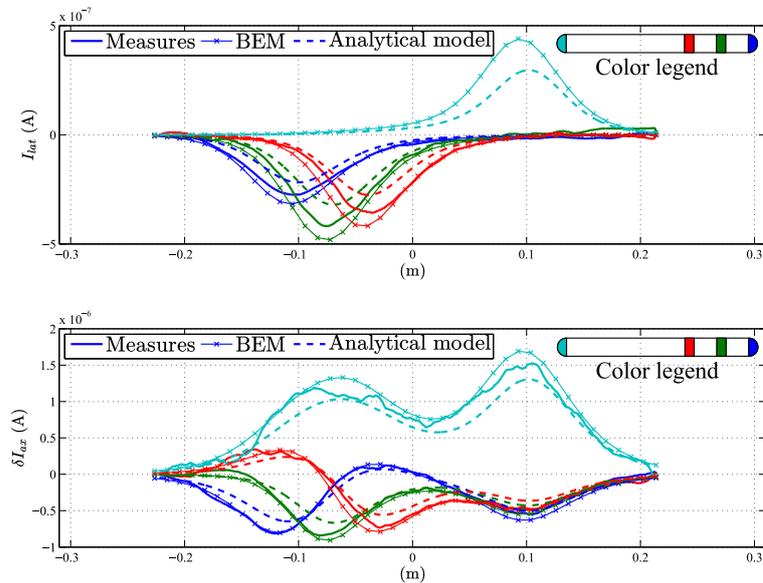


FIGURE 5.3 – Courants I_{lat} en fonction de la position longitudinale du centre de la sonde par rapport au centre de l'objet.

5.2.2 Algorithme de détection basé sur les mesures

Comme chez le poisson, il est aisé de montrer grâce aux modèles du chapitre 2, ou directement par expérimentation (cf. figures 5.2 et 5.3) que lorsque le courant latéral $I_{\text{lat},k}$ mesuré par la macro-électrode ε_k , d'une sonde élançée en translation axiale, atteint son maximum, un objet conducteur fait face à cette macro-électrode à gauche (ou un objet isolant à droite). Réciproquement, lorsque ce même courant latéral atteint un minimum, un objet isolant fait face à l'électrode de gauche (ou un objet conducteur à droite). Sur cette base, nous avons mis en oeuvre un petit algorithme très simple, basé sur les règles suivantes :

Algorithm 2 Algorithme de détection

Require: $\Sigma\delta I_{\text{ax}}, \Sigma I_{\text{lat}}$;

pour les courants axiaux

if $\Sigma\delta I_{\text{ax}} = 0$ **then** il n'y a pas d'objet dans la scène ;

else if $\Sigma\delta I_{\text{ax}} > 0$ **then** l'objet est un conducteur ;

else if $\Sigma\delta I_{\text{ax}} < 0$ **then** l'objet est un isolant ;

end if

pour les courants latéraux

if $\Sigma I_{\text{lat}} = 0$ **then** il n'y a pas d'objet ou il y en a un face à l'électrode de tête ;

else if $\Sigma I_{\text{lat}} > 0$ **then** un conducteur est à gauche ou un isolant est à droite ;

else if $\Sigma I_{\text{lat}} < 0$ **then** un conducteur est à droite ou un isolant est à gauche.

end if

En pratique, la valeur nulle des courants doit être remplacée par un seuil fixé par le niveau de bruit de la sonde (SERVAGENT et al. 2013b). Comme attendu, cet algorithme détecte la présence d'un objet dans la scène ainsi que sa nature électrique (isolant/conducteur) et de quel côté de la sonde il est situé. Cet algorithme fournit une localisation préliminaire (pré-localisation) de l'objet.

5.3 Localisation d'objets par l'algorithme MUSIC

Après lancement de l'algorithme de détection précédent, l'étape suivante avant l'estimation de la forme consiste à localiser l'objet indépendamment de ses propriétés intrinsèques et de son orientation. Des travaux en mathématiques appliquées ont récemment montré qu'il était possible de localiser des objets indépendamment de leur forme, en utilisant

l'algorithme MUSIC (AMMARI, BOULIER et GARNIER 2013 ; BOULIER 2013). MUSIC a été développé dans les années 1980 par la communauté du traitement du signal (KRIM et VIBERG 1996), pour estimer la direction d'incidence d'une onde électromagnétique ou sonore par un réseau d'antennes passives (SCHMIDT 1986). Devaney a montré que le principe de l'algorithme pouvait être étendu à un réseau d'antennes actives, afin de localiser des diffuseurs dans un milieu homogène (DEVANEY 2000). En émettant séquentiellement une onde de polarisation depuis chaque antenne du réseau, et en mesurant les réponses des diffuseurs polarisés à l'aide des autres récepteurs, une matrice de données appelée matrice de réponse multi-statique, ou MSRM, est enregistrée. La matrice de variation de conductance δC de notre modèle, qui relie U à I décomposé en δI_{ax} et I_{lat} , définit de ce point de vue deux matrices MSRM. Dans (AMMARI, BOULIER et GARNIER 2013 ; BOULIER 2013), cet algorithme de localisation a été appliqué à un modèle numérique (BEM) de poisson électrique doté d'un réseau dense de récepteurs. Dans (LANNEAU, LEBASTARD et BOYER 2016) et (LANNEAU et al. 2017b), l'algorithme MUSIC a été appliqué à nos sondes élancées, avec beaucoup moins de mesures, et un large ensemble d'objets en simulation dans (LANNEAU, LEBASTARD et BOYER 2016), et expérimentalement dans (LANNEAU et al. 2017b). La figure 5.4 montre un exemple représentatif des résultats numériques obtenus pour un objet ellipsoïdal isolant.

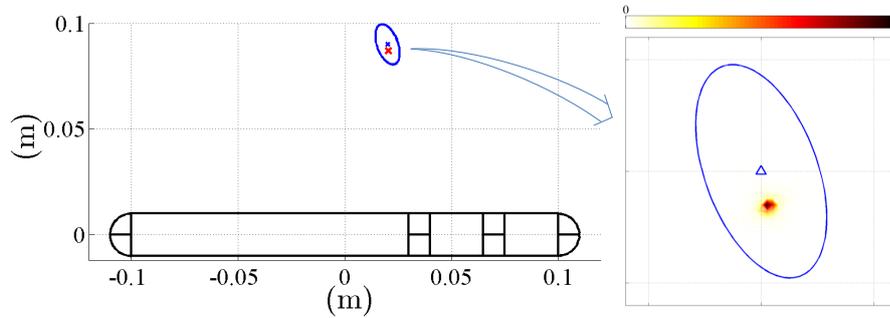


FIGURE 5.4 – Exemple représentatif de l'application de MUSIC à un petit objet isolant, avec les courants BEM en entrée. A gauche, la croix rouge représente la localisation estimée. A droite, vue focalisée de l'objet avec le pic de la fonction d'imagerie (normalisée).

Dans tous les cas, MUSIC sous-estime la distance latérale entre le capteur et l'objet. Cela provient du modèle analytique qui estime la réponse électrique d'un objet par sa composante dipolaire. En réalité, la non-uniformité du champ électrique basal E_0 excite d'autres composantes de la réponse multipolaires de l'objet (modélisée par les GPT),

que nous négligeons dans notre modèle tronqué. Intuitivement, parce que E_0 diminue fortement avec la distance latérale capteur-objet, MUSIC tend à sur-estimer la partie de l'objet la plus proche de la sonde. Cette tendance est illustrée dans la figure 5.5, qui montre comment l'erreur de localisation faite par MUSIC augmente avec le volume de l'objet.

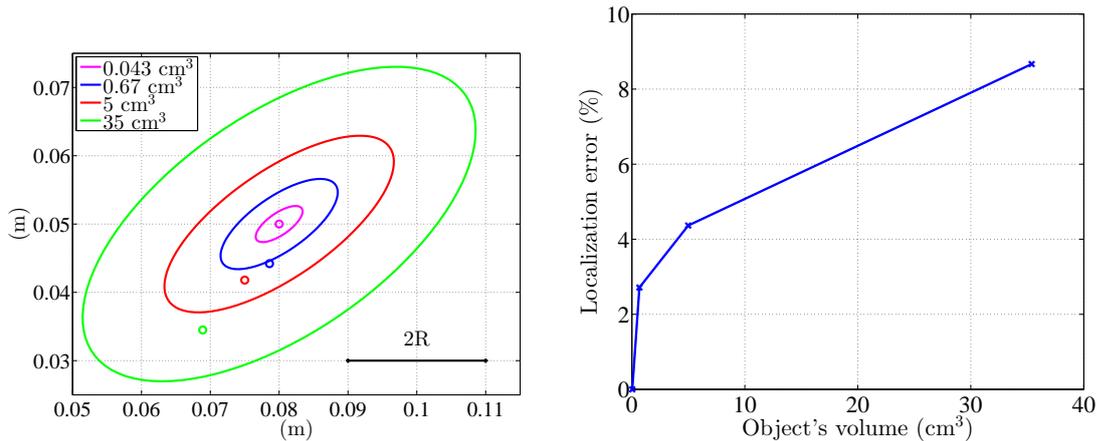


FIGURE 5.5 – (a) Localisations MUSIC pour plusieurs objets avec le BEM. (b) Erreur de localisation en fonction du volume de l'objet.

5.4 Reconnaissance de formes par sens électrique

Une fois la localisation achevée, la reconnaissance de formes peut être abordée. Réputé dès plus difficiles dans la communauté des problèmes inverses, des succès prometteurs ont été récemment obtenus en mathématiques appliquées sur ce sujet (AMMARI et al. 2014b). En modélisant la réponse électrique des objets par des tenseurs de polarisation généralisés (GPT) (AMMARI et al. 2014a), les auteurs de ces travaux ont pu montré qu'il était possible de classer un ensemble d'objets 2D de forme complexe en utilisant deux algorithmes différents. Le premier exploite la réponse dipolaire dépendant de la fréquence d'objets ayant une composante capacitive non négligeable, tels les organismes vivants (EMDE 2006). Le second exploite la propriété purement conductrice (qui est indépendante de la fréquence) des objets inertes, mais nécessite l'estimation des termes multipolaires supérieurs de leur réponse électrique. Les deux algorithmes ont été testés en simulation BEM sur des poissons numériques plan de forme elliptique dotés d'un réseau dense de récepteurs modélisant le poisson (BOULIER 2013). En robotique sous-marine, les auteurs

de (BAI et al. 2015) ont abordé le problème de l'estimation expérimentale de forme, taille, orientation et position d'objets inertes ellipsoïdaux (isolants ou conducteurs) placés dans le champ équatorial d'un capteur $U-U$. En exploitant les symétries du capteur par rapport à l'objet, ce dernier est d'abord aligné et centré par rapport au capteur. Ensuite, à l'aide d'abaques construites au préalable par simulation, son rapport d'aspect est déterminé. Enfin, la distance latérale et la taille de l'objet sont estimées à l'aide d'un modèle de sphère équivalente et d'un modèle de régression par processus gaussien (RASMUSSEN et WILLIAMS 2006).

5.4.1 Estimation de la forme d'un objet hors ligne

Dans LANNEAU et al. 2017a, nous supposons que le matériau de l'objet (conducteur ou isolant) et le côté de la sonde sur lequel il se trouve ont été déterminés à l'aide de l'algorithme de détection décrit dans la section 5.2.2, tandis que l'emplacement de l'objet dans le repère du capteur est estimé à l'aide de l'algorithme de localisation de la section 5.3. L'estimation de la forme de nos objets elliptiques est basée sur celle des trois paramètres de leurs tenseurs dipolaires dont l'expression générale a été rappelée au chapitre 2. Les deux premiers sont strictement liés à la forme et peuvent être soit la longueur du demi-axe (a, b) , soit le volume V et le rapport d'aspect η . Le troisième paramètre est l'angle de l'ellipsoïde θ_o par rapport à l'axe de la sonde. Bien qu'il soit extrinsèquement lié à l'objet (c'est un paramètre de la pose), cet autre angle est estimé parallèlement à la forme. Sur la base de cette paramétrisation, l'algorithme d'estimation de la forme est réalisé en deux étapes. Premièrement, les composantes du tenseur de polarisation dans le repère du capteur sont estimées avec un algorithme d'optimisation de type moindres carrés. Ensuite, les paramètres de l'objet (V, η, θ_o) ou (a, b, θ_o) sont calculés en inversant les expressions analytiques des composantes du tenseur (2.31-2.33). Pour les essais expérimentaux (LANNEAU et al. 2017a), l'erreur de forme globale est de l'ordre de 16% alors qu'elle ne dépassait pas 10% sur les simulations BEM réalisées avec de petits objets (LANNEAU, LEBASTARD et BOYER 2016). Les différences entre les résultats numériques et expérimentaux ont deux origines majeures. L'une est liée aux défauts expérimentaux inévitables, la seconde est due à l'approximation introduite par le modèle d'objets sur lequel l'estimateur est basé. Au-delà des défauts expérimentaux, pour tout volume d'objet donné, les résultats expérimentaux montrent les deux tendances suivantes : (1) Les performances de l'estimation de forme diminuent lorsque le rapport d'aspect de l'objet augmente ; (2) l'estimation de l'angle d'inclinaison est toujours difficile.

5.4.2 Estimation de la forme d’un objet en ligne

Positionnement réactif

En reconsidérant les conclusions précédentes, la première difficulté s’explique par le fait que lorsque le rapport d’aspect augmente, l’objet s’étend de plus en plus dans le champs, et l’hypothèse d’uniformité de ce dernier sur son étendue n’est plus justifiée. Cette source d’erreur s’exprime lorsque le grand axe de l’objet est perpendiculaire au capteur, alors qu’au contraire, elle s’atténue, lorsque le grand axe et le capteur **son** parallèles. Pour palier cette difficulté, deux améliorations peuvent être explorées et combinées. La première est basée sur **une** enrichissement du modèle électrique de l’objet basé sur sa réponse quadripolaire (voir **au delà**). La seconde, consiste à ne lancer l’algorithme en ligne, que lorsque le capteur et l’un des axes de l’objet sont alignés. C’est cette seconde piste que nous avons explorée. La stratégie adoptée est basée sur la commande réactive (BOYER et al. 2013b) et répond entièrement à la seconde difficulté mentionnée en fin de section précédente (le problème de θ_0). En effet, elle consiste à piloter en ligne le capteur via un bouclage réactif sans modèle, de manière à ce qu’il s’aligne avec l’un des axes de symétrie de l’objet (le petit axe, en fait). La loi réactive que nous avons mise au point est la suivante :

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \delta I_{ax,2} \\ k_2 I_{lat,1} \\ k_2 I_{lat,2} \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

Une analyse basée sur les modèles du chapitre 2, montre que l’on peut toujours choisir un jeu de gains $k_{i=1,2,3}$ capable de diriger le capteur dans une pose stable alignée avec le petit axe de l’ellipsoïde (LEBASTARD, BOYER et LANNEAU 2016) (cette même loi rend le grand axe instable). En recourant à cette stratégie réactive, on remplace le problème de localisation de l’objet par rapport au capteur (précédemment résolu par MUSIC), par celui de leur positionnement relatif. Un tel positionnement réactif est illustré sur la figure 5.6 qui montre une trajectoire simulée obtenue avec la loi (5.1) lorsque $k_1 = 1$, $k_2 = 10$ et $k_3 = 100$. Par conséquent, l’angle θ_0 , qui nous gênait dans l’identification précédente, disparaît. Entre autre avantage, nous avons découvert qu’une fois le capteur aligné sur le petit axe, l’annulation du courant **axiale** de l’électrode de cou (l’anneau juste après la tête) assure au capteur d’être à une distance fixée par rapport au centre de l’objet, et ce indépendamment de sa taille et de sa nature électrique. Cette propriété remarquable des courants mesurés définit ce que les biologistes appellent un invariant, i.e. une combinaison

des mesures ne dépendant que d'un paramètre de localisation. Notons que cette propriété explique que nous parlions de "positionnement" et non pas (seulement) d'"alignement" réactif (LEBASTARD, BOYER et LANNEAU 2016). Une fois qu'une telle phase réactive est achevée, on sait que l'angle d'inclinaison du capteur est nul, et on peut commander le capteur en boucle ouverte afin qu'il rejoigne une trajectoire droite désirée avec un θ_o et une distance latérale d désirés (rappelons que la localisation est connue de l'étape de positionnement précédente).

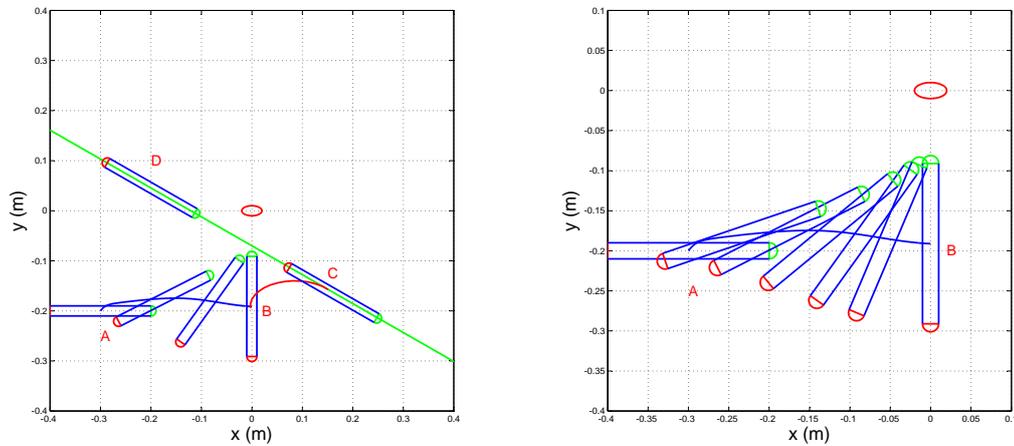


FIGURE 5.6 – Gauche : Commande de mouvement simulée de la sonde pour la stratégie d'estimation de forme améliorée (les lignes AB, BC, CD indiquent la trajectoire du centre de la sonde). La sonde part d'une pose A. Grâce à la loi de contrôle (5.1), elle est dirigée vers la pose B, dans laquelle son corps est aligné avec le petit axe de l'ellipsoïde. L'angle θ_o est alors connu pour être nul et la sonde est dirigée vers la pose C à partir de laquelle elle commence une trajectoire en ligne droite avec un θ_o prescrit, ici égal à -30° . À droite : instantanés de la sonde lorsqu'elle est dirigée de la pose A à la pose B, c'est-à-dire lorsqu'elle s'aligne automatiquement avec l'objet.

Finalement, on peut réappliquer l'algorithme d'estimation de forme précédent mais en connaissant θ_o , ce qui améliore l'erreur d'estimation de la forme qui tombe à 10,3%. Dans ce cas, l'objet se trouve à une distance optimale entre le bruit de mesure et les critères de validité du modèle. De plus son grand axe est proche d'être aligné avec le champ basal E_0 , favorisant ainsi la réponse dipolaire de l'objet.

Estimation de la forme par filtre de Kalman

Alternativement à l'identification en deux temps rappelée ci-dessus, une approche plus classique basée sur l'utilisation du même modèle (dipolaire) mais intégré à un filtre de Kalman a été appliquée. Le filtre a tout d'abord été appliqué avec un certain succès au problème de la navigation dans un aquarium par reconstruction de l'environnement, où les objets sont modélisés par des primitives de type "sphères", "murs" et "coins" (LEBASTARD et al. 2013). Ils montrent l'efficacité de l'approche notamment pour la localisation 3D de petits objets. Notons que d'autres approches basées respectivement sur le filtre particulaire (SOLBERG, LYNCH et MACIVER 2008) et les filtres bayésiens (SILVERMAN et al. 2012) ont également été proposées. Pour illustrer l'efficacité de l'approche pour la reconstruction de forme, un test avec des données expérimentales est présenté pour l'une de nos ellipsoïdes isolantes. Ce test porte sur la capacité du filtre à extraire les paramètres de l'objet (pose, taille). La figure 5.4.2 représente les pose et forme réelles de l'ellipsoïde (bleu) et ses forme et pose estimées (rouge) à différents moments. Le capteur mesure les perturbations de courant dues à l'objet et les paramètres estimés par l'observateur, convergent bien vers leurs valeurs réelles. Lorsque l'objet s'approche de la "tête" du capteur (sa "fovea"), i.e. là où la densité d'électrodes est maximale, il est très bien localisé et la convergence de la reconstruction en est d'autant plus rapide.

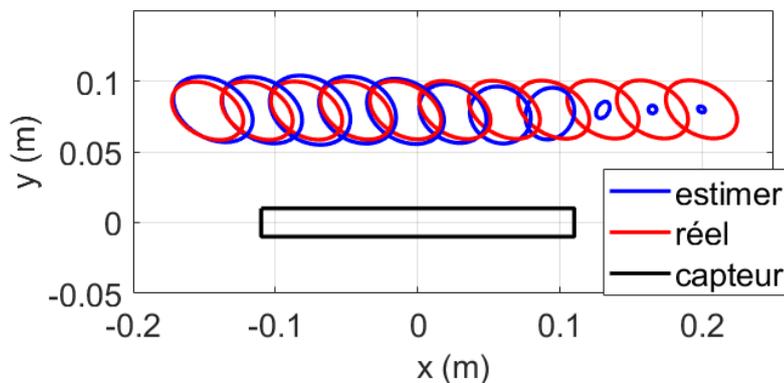


FIGURE 5.7 – Reconstruction d'une ellipsoïde par observateur.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la localisation d'objet par MUSIC, puis l'avons remplacée par un auto-positionnement réactif du capteur par rapport à l'objet. Sur ce dernier point, nous avons développé une loi dont les positions d'équilibre stables assure au capteur de s'aligner sur l'un des axes de l'objet à une distance de son centre indépendante de ses **paramètre** physiques (taille, nature électrique, rapport d'aspect). Une fois l'objet localisé dans le repère capteur, nous avons aussi abordé le problème de l'estimation de sa forme par inversion de son tenseur dipolaire et filtrage de Kalman. Malgré ces premiers succès, l'approche ci-dessus suppose que les mouvements du véhicule soient parfaitement contrôlés, ce qui n'est pas le cas pour un AUV. Dans ce contexte, les mesures électriques pourraient être fusionnées avec d'autres mesures, de natures inertielles.

DYNAMIQUE DES ROBOTS CONTINUS ET MOUS

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle dynamique de poutres de Cosserat en vue de son application à la manipulation et à la locomotion en robotique continue et souple. Contrairement aux approches habituelles, ce modèle est basé sur la paramétrisation non linéaire de la forme de la poutre par ses champs de déformation et leur réduction sur une base fonctionnelle de modes de déformation. Tout en restant géométriquement exacte, l'approche nous fournit un ensemble minimal d'équations différentielles ordinaires sous la forme habituelle d'un modèle lagrangien qui peut être exploitée pour l'analyse et la conception de commandes de robot continu et mous. Inspiré de la robotique rigide, le calcul des matrices de ce modèle lagrangien est effectué avec un nouvel algorithme inverse réduit de Newton-Euler. Pour évaluer l'approche, ce modèle lagrangien est comparé à une méthode d'éléments finis et validée aux travers de plusieurs tests statique et dynamique non linéaires.

6.1 Modèle de poutres Cosserat

Par souci de concision, nous utilisons quelques-unes des notations des groupes de Lie de (MURRAY, LI et SASTRY 1994). Nous considérons ici une poutre hyper-élastique soumise à des déplacements finis et à de petites déformations. Dans l'approche de Cosserat, un tel milieu est modélisé par un ensemble continu de sections transversales rigides empilées le long d'une ligne matérielle paramétrée par une coordonnée $X \in [0, 1]$ qui joue le rôle d'un label continu pour les sections transverses. À chaque section transverse X , un repère mobile $\mathcal{F}(X) = (O, t_1, t_2, t_3)(X)$ est attaché, où $O(X)$ et $t_1(X)$ coïncident avec le centre de la section transverse et son vecteur normal unitaire, respectivement. Dans ce contexte, la configuration de toute section transverse est définie par l'action d'un élément de $g \in SE(3)$ sur un repère inertiel unique \mathcal{F}_s . Plus précisément, $g(X) = (R, r)(X)$, où $R(X) \in SO(3)$

et $r(X) \in \mathbb{R}^3$ sont respectivement la matrice d'orientation (ou de rotation) de $\mathcal{F}(X)$ et le vecteur de position de $O(X)$ dans \mathcal{F}_s . Par conséquent, l'espace de configuration est naturellement défini comme suit :

$$\mathcal{C} = \{g : X \in [0, 1] \mapsto g(X) \in SE(3)\}, \quad (6.1)$$

qui représente un espace fonctionnel de courbes dans $SE(3)$. Dans la suite, les dérivées partielles $\partial./\partial X$ et $\partial./\partial t$ sont indiquées par un " \bullet' " et un " $\dot{\bullet}$ ", respectivement. Le champ g dépendant à la fois de X et de t , ses variations spatio-temporelles peuvent être entièrement décrites par les deux champs de vecteurs η et ξ :

$$\eta = (g^{-1}\dot{g})^\vee, \quad \xi = (g^{-1}g')^\vee, \quad (6.2)$$

où $\eta = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, V_1, V_2, V_3)^T = (\Omega^T, V^T)^T$ représente le champ de vitesse des sections transversales dans leurs repères mobiles, tandis que $\xi = (K_1, K_2, K_3, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3) = (K^T, \Gamma^T)^T$ est la contrepartie géométrique exacte de η lorsqu'on remplace t par X . Par un léger abus de terminologie, ce champ sera souvent nommé champ de déformation, puisque tout jeu de mesures des déformations doit dépendre de la configuration courante g par l'intermédiaire de ce champ uniquement (BOYER et RENDA 2016). Par exemple, si g_o définit la configuration de référence de la poutre dans laquelle son énergie de déformation interne est nulle, un champ de déformation est simplement fourni par $\xi - \xi_o$ avec $\xi_o = (g_o^{-1}g'_o)^\vee$. Les champs de vitesse et de déformation η et ξ ont leurs équivalents duaux dans $se(3)^* \cong \mathbb{R}^6$. Noter $\Sigma = (\Upsilon_1, \Upsilon_2, \Upsilon_3, P_1, P_2, P_3)^T = (\Upsilon^T, P^T)^T$ et $\Lambda = (C_1, C_2, C_3, N_1, N_2, N_3)^T = (C^T, N^T)^T$, ces deux autres champs modélisent respectivement les moments cinétiques de la section transversale et les contraintes le long de la poutre. Dans l'hypothèse des petites déformations, ces deux paires de champs duaux sont liées par les relations constitutives (généralisées) :

$$\Sigma = \mathcal{M}\eta, \quad \Lambda = \mathcal{H}(\xi - \xi_o), \quad (6.3)$$

où $\mathcal{M} = \text{diag}(\rho J_1, \rho J_2, \rho J_3, \rho A, \rho A, \rho A)$ et $\mathcal{H} = \text{diag}(GJ_1, EJ_2, EJ_3, EA, GA, GA)$ sont deux champs de tenseurs dans $se(3)^* \otimes se(3) \cong \mathbb{R}^6 \otimes \mathbb{R}^6$, qui représentent les tenseurs d'inertie de section transversale et le tenseur de Hooke le long de la poutre. En appliquant le principe de Hamilton dans ce contexte géométrique, on obtient l'équation aux dérivées partielles (EDP) d'une poutre de Cosserat soumise à une densité d'effort externe dépen-

dant de l'état $\bar{F} = (\bar{C}^T, \bar{N}^T)^T$ sur $]0, 1[$ et deux efforts externes d'extrémité F_0 et F_1 à $X = 0$ et 1 respectivement (BOYER et RENDA 2016) :

$$\dot{\Sigma} - ad_{\eta}^T \Sigma = \Lambda' - ad_{\xi}^T \Lambda + \bar{F}, \quad (6.4)$$

avec des conditions aux limites (BC) à $X = 0$ et $X = 1$:

$$\Lambda(0) = -F_0, \text{ ou } g(0) = g_0, \text{ et } : \Lambda(1) = F_1, \text{ ou } g(1) = g_1, \quad (6.5)$$

selon que l'on impose le mouvement ou le torseur des forces aux extrémités. À partir de (6.3), l'introduction de $\Sigma = \mathcal{M}\eta$ dans (6.4) fournit une EDP en accélération $\dot{\eta}$ qui régit l'évolution temporelle de η et doit être complétée par l'équation de reconstruction (un modèle cinématique) sous la forme :

$$\dot{g} = g\hat{\eta}. \quad (6.6)$$

Enfin, la formulation de Cosserat (6.3-6.6) correspond au modèle des poutres de Reissner (REISSNER 1973), qui est à la base de la méthode des éléments finis géométriquement exacte de (SIMO et VU-QUOC 1988).

Dans tous les développements ultérieurs, nous considérerons que la cinématique interne de la poutre qui définit les mouvements entre sections transversales peut être contrainte par certaines restrictions. Par exemple, si on néglige le cisaillement transversal et l'extensibilité, et si on utilise la longueur de l'arc comme label X , on a $\Gamma = (1, 0, 0)^T$, et la cinématique de la poutre peut être réduite des 6 **dofs** internes d'une poutre de Reissner aux 3 **dofs** internes de celles d'une poutre de Kirchhoff (ANTMAN 2006). Pour traiter de manière générique ce type de restriction, nous pouvons utiliser la décomposition suivante du champ ξ :

$$\xi = B\xi_a + \bar{B}\xi_c, \quad (6.7)$$

où pour toute $n_a \leq 6$, ξ_a (respectivement ξ_c) est le champ vectoriel $n_a \times 1$ des déformations libres autorisées par la cinématique de la poutre (respectivement, le champ vectoriel $(6 - n_a) \times 1$ des déformations interdites), tandis que B et \bar{B} sont deux matrices de sélection complémentaires, constituées de 1 et 0, telles que $B^T B = 1$, $B^T \bar{B} = 0$ et $\bar{B}^T \bar{B} = 1$. Par exemple, pour une poutre de Kirchhoff inextensible, si X est la longueur de l'arc, nous avons :

$$\xi_a = (K_1, K_2, K_3)^T, \quad \xi_c = (1, 0, 0)^T, \quad (6.8)$$

et donc :

$$B = \begin{pmatrix} 1_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}, \bar{B} = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} \\ 1_{3 \times 3} \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

Enfin, la décomposition (6.7) a sa contrepartie sur la contrainte :

$$\Lambda = B\Lambda_a + \bar{B}\Lambda_c, \quad (6.10)$$

où Λ_a est le champ des composantes de contrainte régies par la loi constitutive réduite :

$$\Lambda_a = B^T \Lambda = \mathcal{H}_a(\xi_a - \xi_{ao}), \quad (6.11)$$

avec $\mathcal{H}_a = B^T \mathcal{H} B$, la matrice des coefficients de Hooke réduits, et ξ_{ao} la valeur de ξ_a dans la configuration de référence. Enfin, dans (6.10), Λ_c représente un ensemble de champs de multiplicateurs de Lagrange (forces et couples de réaction internes), chargés d'imposer les contraintes internes $\bar{B}^T \xi = \xi_c$.

6.2 Paramétrisation des configurations d'une poutre de Cosserat par ses déformations

Dans le modèle original de Cosserat, l'espace de configuration d'une poutre est défini comme (6.1), c'est-à-dire que chaque configuration de la poutre est définie comme le champ de transformations homogènes g paramétrant la pose de ses repères transversaux par rapport à un repère inertiel unique. Dans (BOYER, POREZ et KHALIL 2006), nous avons introduit une définition alternative de l'espace de configuration d'une poutre de Cosserat basée sur la remarque simple suivante. Si l'on connaît à chaque instant la pose $g(0) \triangleq g_0$ du repère de la section de base ($X = 0$) noté $\mathcal{F}(0) \triangleq \mathcal{F}_0$, par rapport au repère inertiel, ainsi que le champ de déformation ξ le long de la poutre, on peut alors facilement reconstruire le champ de g le long de celle-ci, en intégrant en avant (c'est-à-dire de $X = 0$ à 1), le modèle géométrique continu :

$$g' = g\hat{\xi}. \quad (6.12)$$

avec la condition initiale $g(0) = g_0$. Par conséquent, on peut paramétrer la configuration d'une poutre de Cosserat par (g_0, ξ) , où l'on rappelle que ξ est un champ de vecteurs 6×1

dans $se(3) \cong \mathbb{R}^6$. Ceci conduit à la deuxième définition de l'espace de configuration d'une poutre flottante :

$$\mathcal{C} = SE(3) \times \mathbb{S}, \quad (6.13)$$

ou :

$$\mathbb{S} = \{\xi : X \in [0, 1] \mapsto \xi(X) \in \mathbb{R}^6\}. \quad (6.14)$$

Géométriquement, un tel espace définit un fibré principal $SE(3) \times \mathbb{S}$, où la fibre $SE(3)$ représente ici l'espace de configuration de \mathcal{F}_0 , tandis que l'espace \mathbb{S} est l'espace de configuration de ses formes, ou "espace de formes". La poutre étant un système continu, \mathbb{S} est un espace fonctionnel, c'est-à-dire un espace de dimension infinie de courbes paramétrées par X dans \mathbb{R}^6 . En pratique, la reconstruction de la configuration d'une poutre dans l'espace peut être facilement réalisée par intégration numérique (6.12) comme suit. En paramétrant la matrice de rotation R de $g = (R, r)$, avec un quaternion unitaire $Q \in \mathbb{R}^4$, on peut intégrer (6.12) sous la forme alternative :

$$\begin{pmatrix} Q \\ r \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} (1/2)A(K)Q \\ R(Q)\Gamma \end{pmatrix}, \quad (6.15)$$

à partir de $Q_0(R_0)$ et r_0 , tous deux déduits de $g_0 = (R_0, r_0)$. Dans (6.15), nous avons introduit l'opérateur usuel :

$$A(K) = \begin{pmatrix} 0 & -K_1 & -K_2 & -K_3 \\ +K_1 & 0 & +K_3 & -K_2 \\ +K_2 & -K_3 & 0 & +K_1 \\ +K_3 & +K_2 & -K_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6.16)$$

ainsi que $R(Q) \in SO(3)$ et $Q(R) \in \mathbb{R}^4$, qui représentent respectivement la paramétrisation usuelle par quaternion des rotations et son inverse (MURRAY, LI et SASTRY 1994). Pour toute cinématique de la poutre de Cosserat définie par (6.7), on peut adopter (6.13) comme définition de l'espace de configuration, avec maintenant :

$$\mathbb{S} = \{\xi_a : X \in [0, 1] \mapsto \xi_a(X) \in \mathbb{R}^{n_a}\}, \quad (6.17)$$

ce qui inclut le cas général des poutres de Reissner pour lesquels $n_a = 6$. Enfin, à des fins

de résolution numérique, nous discrétisons maintenant le champ ξ_a comme :

$$\xi_a(X, t) = \xi_{ao}(X) + \Phi(X)q(t), \quad (6.18)$$

où $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n)$ définit une matrice $n_a \times n$ de fonctions de base n ou "fonctions de forme" puisqu'elles paramètrent l'espace de forme \mathbb{S} de (6.13) avec le vecteur q (de dimension $n \times 1$) de coordonnées généralisées de déformation. Avec cette réduction supplémentaire, l'espace de configuration d'une poutre de Cosserat s'écrit simplement :

$$\mathcal{C} = SE(3) \times \mathbb{R}^n. \quad (6.19)$$

Cet espace de configuration est bien connu de la locomotion robotique rigide (KELLY et MURRAY 1995). Dans cet autre contexte, l'espace de forme de dimension finie de (6.19) représente les coordonnées qui paramètrent les n articulations reliant un ensemble de $n+1$ corps rigides $\mathcal{B}_0, \mathcal{B}_1 \dots \mathcal{B}_n$, tandis que la fibre $SE(3)$ est l'espace de configuration d'un corps de référence arbitrairement distingué \mathcal{B}_0 . Notons enfin que (6.18) s'interprète comme une réduction du champ de déformation $\epsilon = \xi_a - \xi_{ao}$ sur une base de Ritz.

6.3 Dynamique d'un robot continu paramétré par les déformations

Nous pouvons maintenant nous appuyer sur le contexte géométrique précédent et chercher un modèle dynamique régissant la configuration (g_0, q) au cours du temps d'un robot continu. Pour cela, nous supposons que le robot est actionné de manière interne, par un dispositif adhoc tel qu'un jeu de tendons, des chambres contenant un fluide sous pression etc. Dans ce cas, l'influence de l'actionnement peut simplement être capturé en ajoutant au champ de contrainte interne élastique une composante active exogène pilotée en temps $\Lambda_{ad}(\cdot, t)$, de sorte que la loi constitutive passive de la poutre (6.11), se change en :

$$\Lambda_a = B^T \Lambda = \Lambda_{ad}(X, t) + \mathcal{H}_a(\xi_a - \xi_{ao}). \quad (6.20)$$

Ceci fait, une application directe du principe des travaux virtuels dans l'espace de configuration (6.19) fournit le modèle dynamique d'un robot continu sous forme lagrangienne :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ Q_{ad} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{M}_0 & M_{0\epsilon} \\ M_{\epsilon 0} & M_{\epsilon\epsilon} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\eta}_0 \\ \ddot{q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_c(q, g_0) \\ Q_c(q, g_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_v(q, \dot{q}, \eta_0) \\ Q_v(q, \dot{q}, \eta_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ K_{\epsilon\epsilon}q + D_{\epsilon\epsilon}\dot{q} \end{pmatrix}, \quad (6.21)$$

qui doit être complétée par l'équation de reconstruction temporelle $\dot{g}_0 = g_0\hat{\eta}_0$, c'est-à-dire un modèle cinématique permettant de récupérer l'évolution temporelle de g_0 à partir de celle de η_0 régie par le modèle dynamique (6.21). En raison de notre définition (6.19) de l'espace de configuration, toutes ces matrices sont organisées en sous-blocs et la ligne supérieure de l'égalité matricielle ci-dessus représente un équilibre de torseurs (de vecteurs (6)) par rapport au repère de référence \mathcal{F}_0 , tandis que la ligne inférieure représente un équilibre de vecteurs ($n \times 1$) forces généralisées dans l'espace des formes (ici paramétré par les coordonnées de déformation de q). En entrant dans les détails, dans le second membre de (6.21), nous trouvons de gauche à droite, la matrice d'inertie généralisée du robot, le vecteur de ses accélérations, celui de toutes les forces dépendant de la vitesse, qui incluent les forces de Coriolis et centrifuges ainsi que d'éventuelles forces externes dépendant de la vitesse comme celles exercées sur un robot nageur. Le vecteur suivant représente celui des forces externes dépendant de la configuration, comme les forces gravitationnelles, ou un ensemble de forces imposées variant dans le temps, apparaissant d'abord dans les deux forces concentrées F_0, F_1 et/ou la densité de forces \bar{F} . Ensuite, nous trouvons les forces élastique et d'amortissement, où nous avons introduit les matrices de rigidité et d'amortissement généralisées :

$$K_{\epsilon\epsilon} = \int_0^1 \Phi^T \mathcal{H}_a \Phi dX, \quad D_{\epsilon\epsilon} = \int_0^1 \Phi^T \mathcal{D}_a \Phi dX. \quad (6.22)$$

Grâce à la paramétrisation par déformations, les matrices de rigidité et d'amortissement de (6.22) ainsi que la matrice d'actionnement de (6.25), sont particulièrement simples et les deux premières peuvent être calculées une fois pour toutes en dehors de la boucle temporelle d'une simulation. En revanche, le calcul explicite des autres matrices est beaucoup plus complexe et en fait irréalisable analytiquement.

Enfin, au premier membre de (6.21), Q_{ad} représente le vecteur des forces généralisées d'actionnement interne :

$$Q_{ad}(t) = - \int_0^1 \Phi(X)^T \Lambda_{ad}(X, t) dX. \quad (6.23)$$

Le modèle (6.21) est suffisamment général pour englober plusieurs cas en dynamique structurelle non linéaire, biomécanique et robotique. Par exemple, lorsque le robot est un manipulateur souple, il suffit de supprimer les **d.o.f.** du repère flottant \mathcal{F}_0 (c'est-à-dire la ligne supérieure de (6.21)). Si l'on veut considérer le cas idéal d'un robot hyper-redondant actionné intérieurement, il suffit de supprimer les forces de rappel et d'amortissement. Au contraire, si l'on a affaire à une poutre de Cosserat passive, il suffit de supprimer les forces d'activation Q_{ad} . De plus, si dans ce dernier cas la matrice de rigidité est nulle, le même modèle peut être utilisé pour décrire une chaîne rigide continue tridimensionnelle se balançant dans la gravité. Plus généralement, l'utilisation du modèle complet (6.21) permet de décrire la dynamique de locomotion d'un animal allongé comme un poisson ou un serpent actionné par un modèle musculaire capturé par Λ_{ad} dans (6.20). Enfin, pour des systèmes spécifiques développés récemment pour la robotique souple et médicales (RENDA et al. 2014 ; WEBSTER et al. 2006), le côté droit de (6.21) reste inchangé, tandis que l'effort de modélisation se limite au calcul de Λ_{ad} dans Q_{ad} .

En passant de la paramétrisation g à la paramétrisation en déformation, les non-linéarités géométriques sont transférées du modèle des forces de rappel à celui des forces d'inertie. En conséquence, dans le modèle (6.21), alors que nos matrices de rigidité sont facilement calculables, les matrices de masse et les forces dépendant de la vitesse sont hautement non linéaires et a priori difficiles à calculer. Inspiré de travaux antérieurs en robotique rigide (WALKER et ORIN 1982), nous avons proposé dans (BOYER et al. 2020) une approche computationnelle basée sur un algorithme de la dynamique inverse de Newton-Euler du système ou *IDM* pour reconstruire numériquement toutes les matrices de son modèle lagrangien. Dans la même référence, l'approche est a été étendue au cas d'un robot réalisé par la connection sérielle de plusieurs poutres actionnées de manière interne.

6.4 Validation du modèle : Simulation de la poutre volante

Le modèle précédent a été validé par comparaison avec la **GE-FEM** au travers d'une série de **bench** en statiques et dynamique. A titre illustratif, nous rapportons ici le test emblématique de la poutre volante qui permet à lui seul de valider les dynamiques couplées des ddls internes et externes dans un mouvement tridimensionnel. Ce test est un classique de la méthode GE-FEM et a été introduit dans (SIMO et VU-QUOC 1988) pour les poutres de Reissner, et étudié avec la méthode GE-FEM basé sur les déformations dans

(CESAREK, SAJE et ZUPAN 2013).

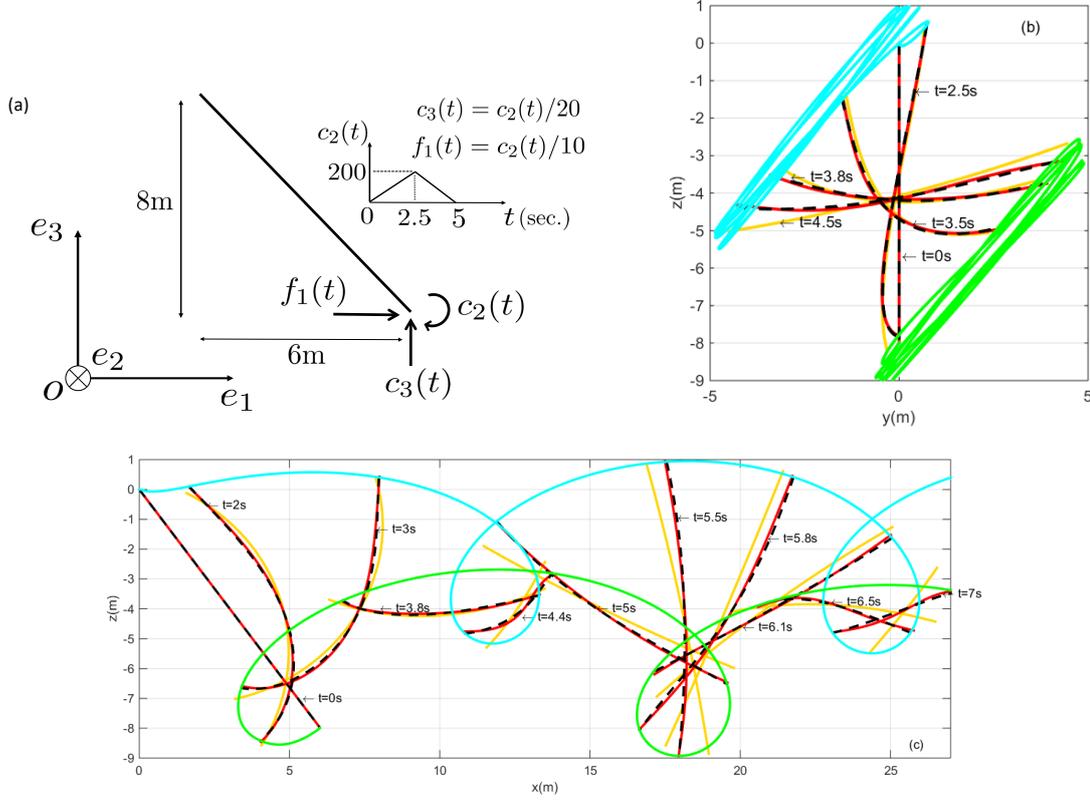


FIGURE 6.1 – (a) Conditions de l’essai. Instantanés de la poutre volante sur (e_2, e_3) (b), et (e_1, e_3) (c) : avec 1 (jaune), et 5 (rouge) modes / déformation, les deux incluant l’étirement. Ligne noire pointillée : poutre inextensible avec 3 modes / déformation.

Elle a également été simulée avec différents paramètres inertiels, et avec le GE-FEM des poutres de Reissner et de Kirchhoff dans (BOYER et PRIMAULT 2004). L’essai consiste en une poutre de 10 mètres de long, libre à ses deux extrémités, flottant dans le vide sans gravité. Elle est initialement inclinée dans le plan d’inertie (o, e_1, e_2) (voir figure 6.1.a). A $t = 0$, une force concentrée f_1 (selon e_1) et deux couples c_2 et c_3 selon e_2 et e_3 respectivement, sont appliqués à l’extrémité inférieure ($X = 10$) selon les lois temporelles représentées sur la figure 6.1. a. Dans (SIMO et VU-QUOC 1988) et (CESAREK, SAJE et ZUPAN 2013), les paramètres sont $\mathcal{H} = \text{diag}(10^2, 10^2, 10^2, 5, 5, 5)10^2$, et $\mathcal{M} = \text{diag}(10, 10, 10, 1, 1, 1)$ (tous en unités SI). Nous abordons ici cet exemple avec le modèle de Kirchhoff. La poutre est éventuellement extensible, et chacun de ses champs de déformation autorisés (2 courbures, 1 torsion et 1 étirement possible), est réduit sur une base

de Legendre de dimension croissante jusqu'à convergence. La figure 6.1.b,c montre des instantanés projetés dans les plans (o, e_1, e_3) et (o, e_2, e_3) des premiers 7s de simulation de la poutre de (SIMO et VU-QUOC 1988) pour différents ordre de la base pour chaque déformation. Comme illustré, la convergence est atteinte avec 3 polynômes pour chaque champ de déformation et les résultats correspondent parfaitement à ceux du GE-FEM (SIMO et VU-QUOC 1988; CESAREK, SAJE et ZUPAN 2013).

6.5 Application aux TACRs

Les premiers systèmes proprement liés à la robotique auxquels nous avons appliqué notre modélisation sont les TACRS ou "Tendon Actuated Continuum Robots". Dans leur principe, ces systèmes consistent en une colonne vertébrale élastique modélisée par une poutre Cosserat, sur laquelle sont fixés des disques rigides. Les disques sont percés de trous au travers desquels sont passés des câbles ou "tendons" dont la traction à la base permet de déformer le système de manière contrôlée. Pour illustrer l'application du modèle précédent à ces systèmes, nous considérons une poutre de Kirchhoff actionnée par un seul câble. La poutre est encastree en $X = 0$, libre de toute force extérieure sur toute sa longueur. Pour simuler l'effet de l'imposition d'une tension donnée T le long du câble, nous devons intégrer l'équilibre statique amorti :

$$D_{\epsilon\epsilon}\dot{q} + K_{\epsilon\epsilon}q = Q_{ad}(q, t), \quad (6.24)$$

avec $Q_{ad}(q, t) = L(q)T(t)$ le vecteur des forces d'actionnement internes générées par la tension du câble $T \in \mathbb{R}^+$ et L défini par le routage des câbles défini par :

$$Q_{ad} = - \sum_{i=1}^N \left(\int_0^1 \frac{\Phi^T(D_i \times \Gamma_{c,i})}{\|\Gamma_{c,i}\|} dX \right) T_i(t) = LT, \quad (6.25)$$

où $\Gamma_{c,i} = E_1 + K \times D_i + D'_i$, avec $E_1 = (1, 0, 0)^T$, où l'indice "c" signifie ici "câble" et $L(q)$ représente la matrice $(N \times N)$ d'actionnement, et $T = (T_1, T_2, \dots, T_N)^T$ est le vecteur des variables de contrôle. Notez que grâce à la paramétrisation basée sur les déformations, les matrices de la simulation de (6.24) sont facilement calculables. La figure 6.2 présente les solutions numériques obtenues avec différents routages du câble défini par $X \mapsto D(X) = (0, D_Y(X), D_Z(X))^T$, avec D_Y et D_Z pris comme indiqué dans le tableau 6.1. Ces routages, nommés parallèle, convergent, croisé, spiralé et parallèle-tronqué, sont

définis lorsque la poutre est dans sa configuration rectiligne de référence.

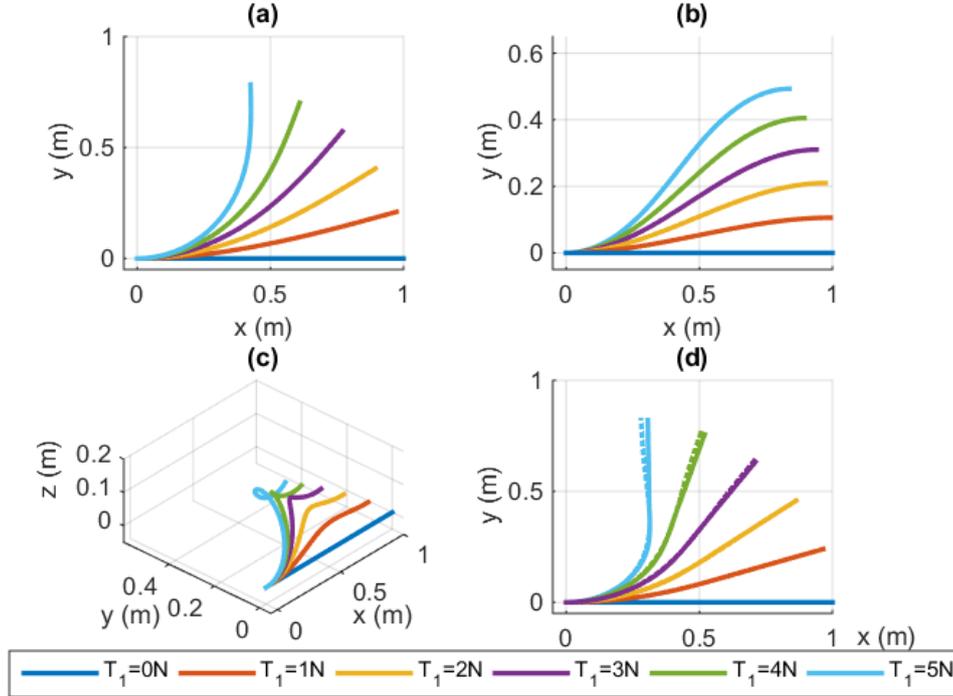


FIGURE 6.2 – Poutre actionnée intérieurement par un seul câble. Configurations obtenues en augmentant la tension T pour différents cheminements : (a) Convergent. (b) Croisé. (c) Spirale. (d) Parallèle tronqué avec 5 (lignes pointillées) et 10 modes (lignes pleines).

Routing	D_Y	D_Z	Figure
Convergent	$R_b(1 - X)/2$	0	6.2.a
Cross	$R_b(1 - 2X)/2$	0	6.2.b
Spiral	$\sin(2\pi X)$	$\cos(2\pi X)$	6.2.c
Parallel-truncated	$D_Y = R_b/2, X \in [0, 1/2]$ $D_Y = 0, X \in]1/2, 1]$	0	6.2.d

TABLE 6.1 – Plusieurs routages d’une poutre entraînée par un seul câble.

Les figures 6.2(a,b,c,d) montrent plusieurs configurations de poutre obtenues avec $T = 1, 2, 3, 4, 5N$ pour chaque routage. Toutes les déformations sont planes sauf celles du routage en spirale dont la figure 6.2.c illustre une vue en perspective. Toutes les simulations sont effectuées avec 5 modes pour chaque champ de déformation, sauf dans la figure 6.2.d, c’est-à-dire pour le routage parallèle-tronqué, pour lequel nous avons représenté les

résultats obtenus avec 5 et 10 modes. En fait, à l'exception du routage parallèle tronqué, l'approximation de Ritz a convergé avant 5 modes (les déformations ne changent pas significativement en ajoutant des modes supplémentaires), alors qu'en raison de la discontinuité, le routage parallèle tronqué a besoin de 10 modes pour converger. Enfin, les temps de simulation pour ces 4 essais (parallèle, convergent, croisé, spirale, tronqué) sont $T_s = 47, 47, 50$ et 62 s respectivement pour chacun des 5 étapes de chargement.

6.6 Au delà des TACRs

Sur la base du modèle précédent, nous avons depuis lors abordé plusieurs problèmes liés à la théorie Cosserat et ses applications à la robotique. Ces différentes contributions ont été pour la plus part publiées. Elles peuvent se résumées en quatre articles dont nous allons brièvement rappeler le contenu.

6.6.1 Article 1 : Modélisation Newtonienne et Lagrangienne des robots continus

Au cours de la dernière décennie, le modèle des poutres Cosserat s'est peu à peu imposé comme un standard en matière de modélisation et simulation des robots continus. Malgré ces résultats, la mise en œuvre de cette théorie est loin d'être unique et simple. Considérant l'exemple illustratif des robots continus actionnés par des tendons (ou TACRs), dans TUMMERS et al. 2023a nous avons détaillé les deux granges approches proposées à ce jour. L'une basée sur la modélisation newtonienne l'autre sur la lagrangienne. Pour cela, nous avons fourni un guide complet permettant la dérivation théorique et l'implémentation numérique de ces deux approches, ainsi qu'une preuve de leur équivalence dans le cas des TACRs. Cette étude comparative a été complétée par de nouvelles contributions et extensions de chaque approche et par une discussion approfondie de leurs performances et de leur applicabilité. En particulier, le cas des TACRs à plusieurs segments a été détaillé.

6.6.2 Article 2 : Extension aux poutres glissantes

Afin d'étendre la théorie Cosserat à des systèmes robotiques tels que les robots continus à tube concentriques, ou les robots pendulaires à câbles, nous avons décidé de nous attaqué au problème réputé difficile de la modélisation dynamique des poutres Cosserat coulissantes. Contrairement aux poutres ordinaires, ces systèmes nécessitent de prendre en

compte des domaines non matériels variables dans le temps, pour lesquels le point de vue lagrangien de la mécanique des solides n'est plus approprié. Dans un article récemment publié dans le Journal of Sound and Vibrations BOYER et al. 2022a, nous avons développé un modèle géométriquement exact des poutres de Kirchhoff inextensibles glissant le long d'un domaine non matériel dont les variations temporelles ne sont pas nécessairement imposées, mais régies par une dynamique dépendante de la configuration de la poutre. Pour obtenir ce nouveau modèle, nous avons utilisé le calcul des variations sur les groupes de Lie tel qu'introduit par H. Poincaré, et l'avons appliqué à une extension du principe d'Hamilton pour les systèmes matériels uni-dimensionnels (poutres), dits "ouverts". Ce principe variationnel étendu, réclame de déclarer un tube immatériel en mouvement le long duquel la poutre matérielle glisse. La formulation fermée de la dynamique qui en résulte, prend la forme d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles nouvelles, appelées "équations non-matérielles de Cosserat-Poincaré", couplées à une équation différentielle ordinaire de Lagrange gouvernant le mouvement de glissement de la tige au travers du dit tube. Bien que l'accent soit mis sur les formulations dynamiques, l'approche de modélisation est illustrée numériquement sur quelques exemples liés au problème des spaghettis glissants.

6.6.3 Article 3 : Commande optimale et théorie Cosserat

Dans un article récemment paru dans IEEE-Transactions on Robotics BOYER et al. 2022b, nous avons exploré la relation entre la théorie de la commande optimale et celle des poutres de Cosserat du point de vue de la résolution de la dynamique directe et inverse (et de la statique en tant que sous-cas) des manipulateurs continus et des locomoteurs bioinspirés des serpents. En invoquant le principe de l'énergie potentielle minimale et le principe de Gauss de la moindre contrainte, nous avons montré que l'évolution quasi-statique et dynamique de ces robots sont des solutions de problèmes de contrôle optimal dans la variable d'espace, qui peuvent être résolus à chaque pas (de chargement ou de temps) d'une simulation, avec la méthode de tir. En plus d'offrir un point de vue alternatif sur plusieurs approches de simulation proposées récemment dans la littérature roboticienne, le point de vue de la commande optimale permet d'améliorer certaines d'entre elles, tout en offrant une meilleure compréhension de leurs propriétés numériques. En particulier, ce point de vue a permis de montrer que dans le cas de la dynamique : (1) le problème aux deux bouts jusqu'ici résolu par la méthode de tir, dérive d'un problème de commande optimal singulier faisant obstacle à l'application de l'algorithme de Featherstone. (2) Que ce problème peut être régularisé par un intégrateur implicite en temps. (3) Qu'à mesure que le pas de temps

de la simulation ou que la raideur du système diminuent, cette régularisation devient inopérante. (4) Que par conséquent, l'approche basée sur la méthode de tir appliquée à la simulation dynamique, devient instable dans la plus part des cas relatifs à la robotique souple. Ces résultats ont été illustrées par un ensemble d'exemples numériques validés par rapport au simulateur de référence de BOYER et al. 2021.

6.6.4 Article 4 : Modélisation des robots continus à encoches

Diverses approches et structures sont apparues récemment pour concevoir des robots continus. L'une des conceptions des plus prometteuses concerne les robots continus à encoches de type "push-pull" ou CAAR, qui ont la caractéristique de combiner plusieurs des avantages clés des robots à actionnement par tendon et des robots à tubes concentriques (actionnement direct de la courbure, faible rapport diamètre extérieur/intérieur, lumière libre, etc.). Les modèles géométriques exacts de ces robots récemment introduits n'ont pas encore été développés. Dans un article récemment soumis dans IEEE-Transactions on Robotics TUMMERS et al. 2023b, nous avons proposé sur la base de nos travaux sur les poutres coulissantes BOYER et al. 2022a, un modèle mécanique des robots continus push-pull plans, basé sur le modèle des Cosserat dans sa formulation lagrangienne. Ce modèle est capable de prendre en compte une géométrie arbitraire de la conception des lignes neutres des poutres ainsi que des chargements externes quelconques. La validation expérimentale sur quatre robots différents montre une précision très satisfaisante avec des erreurs opérationnelles de 1,47% de la longueur du robot.

6.6.5 Article 5 : Simulation des robots continus par intégration implicite

Actuellement soumis au TRO, cet article propose un nouvel algorithme pour résoudre la dynamique directe des systèmes multicorps constitués de corps rigides connectés dans des topologies arbitraires, par des articulations localisées et/ou des liaisons souples, éventuellement actionnées ou non. La simulation est basée sur l'intégration temporelle implicite du modèle lagrangien de ces systèmes, où les liaisons souples sont modélisées par des poutres Cosserat paramétrées par des modes de déformation supposés, comme introduits dans BOYER et al. 2021. Ce choix impose une structure prédicteur-correcteur à l'algorithme de simulation, et nécessite le calcul du vecteur des résidus des équations de la dynamique et des contraintes de fermeture de boucles, ainsi que la matrice jacobienne de ce vecteur,

sous contrainte de l'intégrateur temporel. Ces calculs supplémentaires sont réalisés avec un nouvel algorithme de la dynamique inverse récursif de type Newton-Euler ou *IDM*, ainsi que sa version linéarisée ou *TIDM* pour "modèle dynamique inverse tangent". L'approche est illustrée par des exemples numériques tirés de la littérature des poutres de Cosserat, et d'applications robotiques récentes.

6.7 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons introduit un modèle dynamique de poutres de Cosserat en vue de son application à la manipulation et à la locomotion en robotique continue et souple. La méthodologie décrite dans ce chapitre a été appliquée aux TACR et étendue par la suite à de nombreux problèmes allant des systèmes coulissants tels les CAAR, les robots parallèles continus ou CPR.

BILANS ET PERSPECTIVES

Dès mon arrivée à l'IMT atlantique (École des Mines de Nantes), j'ai rejoint le projet Européen FET Angels et le projet ANR RAAMO, dans lesquels j'ai commencé à reprendre et utiliser les simulateurs numériques basés sur la méthode des éléments finis de frontières (BEM) **POREZ** et al. 2011. Ces premiers travaux, même s'ils étaient un peu fastidieux, m'ont permis de m'approprier la physique du sens électrique. Grâce à cela, j'ai pu par la suite mobiliser mes connaissances acquises en thèse sur les observateurs afin de développer les premières versions de la commande de navigation des robots du projet Angels, alors basées sur des modèles de la réponse électrique de l'environnement (LEBASTARD et al. 2013). Stimulé par les concepts "d'intelligence incarnée" et de "calcul morphologique", tels qu'encouragés par le programme FET finançant Angels, j'ai dû acquérir de nombreuses compétences en bio-inspiration. Ce changement de point de vue m'a conduit à me lancer dans la synthèse et l'implémentation de stratégies de commande sans modèles, dites réactives (BOYER et al. 2013b), qui du point de vue bio-inspiré, réalisent les boucles "sensories-motrices" des neuro-biologistes (LEBASTARD, BOYER et LANNEAU 2016). Je tiens à souligner ici que la synthèse de ces commandes sans modèle n'a pu être faite que grâce à un gros travail de modélisation (BOYER et al. 2012a). Ceci peut paraître paradoxal, mais c'est grâce à la compréhension par la modélisation et son accord avec l'expérimentation que nous avons compris comment nous pouvions déporter "l'intelligence des modèles" sur la morphologie du robot-capteur (LEBASTARD, BOYER et LANNEAU 2016). Ces lois ont été un point de bascule et nous ont permis d'aborder avec plus de confort de nombreux autres problèmes. De ce point de vue, en exploitant les différentes modalités du sens électrique, j'ai pu abordé plusieurs des problèmes fondamentaux de la robotique, tels que l'évitement d'obstacles (BOYER et al. 2013b), la reconstruction d'environnement (LEBASTARD et al. 2013; BAZEILLE, LEBASTARD et BOYER 2020), la commande télé-opérée par retour haptique (BOYER et al. 2019), la robotique en essaim (CHEVALLEREAU et al. 2013)... Par ailleurs, le sens électrique a également attisé mon goût pour les méthodes numériques (BEM, MUSIC...). Au delà de la modélisation et des

méthodes numériques, ma formation d'IUT en mesures physiques a été des plus précieuse. En effet, elle m'a permis d'ancrer dans la robotique expérimentale, les idées que je développais en collaboration étroite avec d'autres disciplines (physiciens et biologistes) et mes collègues roboticiens, plus théoriciens. C'est au bout du compte ce travail en équipe qui a permis d'appliquer le sens électrique à la robotique sous-marine pour la navigation (projets Angels et subCULTron), la télé-manipulation (projet CEA), et la communication (projets subCULTron). Les développements technologiques (SERVAGENT et al. 2013b) que j'ai portés dans ces projets, nous permettent aujourd'hui de transférer nos connaissances sur le sens électrique vers les applications industrielles. Ce transfert se réalise au travers de la startup Elwave à laquelle j'ai contribué dès la naissance, et pour laquelle aujourd'hui je mène une activité de consulting.

Au delà de mon expertise sur le sens électrique, depuis trois ans, je me suis totalement reconverti sur la thématique de la robotique continue. A cette fin, il m'a fallu réapprendre la mécanique que j'avais pratiquée dans mes recherches de thèse sur les robots marcheurs, et dans une moindre mesure, dans mes travaux sur la navigation sous-marine réactive, en la reformulant dans le langage de la géométrie différentielle sur les groupes de Lie. Ainsi, j'ai du et pu acquérir une expertise sur des sujets divers et nouveaux pour moi, tels que la théorie des poutres Cosserat, la locomotion géométrique, la dynamique Lagrangienne des structures non-linéaires, l'algorithmique de Newton-Euler des systèmes multi-corps BOYER et al. 2021... Au delà de ces théories, j'ai du monter en compétences dans le domaine de l'analyse numérique et m'approprier de nombreuses nouvelles méthodes liées à la simulation des systèmes multi-corps en grandes déformations (intégration numérique sur les groupes, algorithmes prédicteurs-correcteurs, réduction modale, méthode spectrale, intégration par quadrature sur les groupes...). Sur ces sujets, c'est dans le contexte de l'ANR COSSEROOTS dont je suis work-package leader, que je contribue. Une fois encore, en collaboration étroite avec les modélisateurs, j'y développe des algorithmes de simulation et de commande. Outre ce travail technique, je contribue également à animer et diriger les travaux de recherche de plusieurs doctorants travaillant sur ces sujets.

Mes perspectives de recherche se déploient en premier lieu dans le champ de la robotique continue. Sur ce premier sujet, je souhaite contribuer à la conception et au développement d'outils de modélisation et simulation efficaces pour la conception, l'analyse et la commande de nouveaux concepts de robots continus (médicaux, parallèles, à câbles ...).

De ce point de vue, mes travaux sur les robots **continus à encoches** sont emblématiques de ce que j'aimerais faire sur le sujet. Au delà des robots continus, les robots suspendus à câbles sont aussi en ligne de mire dans le sillage de nos travaux sur les poutres glissantes. Enfin ces modèles et simulateurs seront aussi utilisés en bio-robotique, pour modéliser la locomotion d'animaux allongés continus, comme les serpents et les poissons. L'idée est ici de comprendre les performances de ces animaux afin de les reproduire sur des artefacts robotiques. Un autre champ d'investigation dans le domaine de la robotique continue est la conception de nouveaux principes d'actionnement et des lois de commande associées. Un aspect qui me tient à coeur est d'interféconder la robotique bio-inspirée et continue. Par exemple, en robotique médicale, le robot ne doit pas (ou peu) entrer en contact avec les tissus vivants. Cela implique que tout le corps du robot doit passer au même endroit que son organe terminal comme le fait un serpent en ondulation latérale. Aussi, l'inspiration de la reptation et son étude, est un aspect qui, je pense, devrait nous mener à terme à proposer des solutions innovantes au problème de la commande cinématique de type "follow the leader" des robots continus. Dans ce cas, c'est la locomotion bio-inspirée qui peut aider la robotique médicale. Réciproquement, la mise en oeuvre sur des robots serpents des nouveaux concepts d'actionnement issus de la robotique continue, tels que ceux à base de tendons, devrait permettre de réaliser des robots serpents réellement continus, capables de reproduire les allures observées chez les animaux dont ils s'inspirent avec un nombre limité d'actionneurs.

Sur le sujet du sens électrique, outre ~~que~~ d'aider la société Elwave, mes perspectives de recherche s'inscrivent dans la continuité de nos investigations sur la navigation et la reconstruction de l'environnement. Par exemple, nous avons vu lors de nos travaux sur la reconnaissance de forme, comment la réponse quadripolaire des objets s'invite dans les mesures et ne peut être ignorée sans compromettre l'identification de forme. Ainsi, la capture de ces modèles plus précis est une piste sur laquelle j'aimerais travailler. Dans le cadre du projet ANR Électro Karst, dont j'ai la charge d'un work-package, nous allons travailler sur la construction de carte aquifère en milieux karstiques. Outre que de fusionner le sens électrique avec d'autres capteurs pour adresser le problème du SLAM, la difficulté, sera d'exploiter le sens électrique sur un robot anguilliforme de géométrie variable afin de naviguer sans collision dans des boyaux souterrains exigus. L'impact de la déformée du corps sur la perception par sens électrique sera un nouveau défi pour cette technologie. D'autres perspectives telles la spectroscopie d'impédance et le sens électrique

dans l'air, que j'ai tour à tour prospecté à l'occasion de projets étudiants, et pour un contrat AREVA respectivement, sont autant de pistes prometteuses, que nous voulons explorer avec Elwave afin d'enrichir notre collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

- ALIAGA, I., A. RUBIO et E. SANCHEZ (2004), « Experimental Quantitative Comparison of Different Control Architectures for Master-Slave Teleoperation », in : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12.1, p. 2-11.
- AMMARI, H., T. BOULIER et J. GARNIER (2013), « Modeling Active Electrolocation in Weakly Electric Fish », in : *SIAM Journal on Imaging Sciences* 6.1, p. 285-321.
- AMMARI, H. et H. KANG (2007), *Polarization and moment tensors, with applications to inverse problems and effective medium theory*, Springer-Verlag New York.
- AMMARI, H. et al. (2014a), « Generalized polarization tensors for shape description », in : *Numerische Mathematik* 126.2, p. 199-224, ISSN : 0945-3245.
- AMMARI, H. et al. (2014b), « Shape recognition and classification in electro-sensing », in : *Proceedings of the National Academy of Science (PNAS)* 111.32, p. 431-444.
- ANTMAN, S. (2006), *Nonlinear Problems of Elasticity*, Applied Mathematical Sciences, Springer New York.
- ASSAD, C., B. RASNOW et P.K. STODDARD (1999), « Electric organ discharges and electric images during electrolocation », in : *Journal of Experimental Biology* 202.10, p. 1185-1193.
- BAI, Y. et al. (2012), « Sensing capacitance of underwater objects in bio-inspired electrosense », in : *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 1467-1472.
- BAI, Yang et al. (2015), « Finding and identifying simple objects underwater with active electrosense », in : *The International Journal of Robotics Research*.
- BAZEILLE, Stéphane, Vincent LEBASTARD et Frédéric BOYER (2020), « A Purely Model-Based Approach to Object Pose and Size Estimation With Electric Sense », in : *IEEE Transactions on Robotics* 36.5, p. 1611-1618, DOI : 10.1109/TR0.2020.3000285.
- BOULIER, T. (2013), « Modélisation de l'électro-localisation active chez les poissons faiblement électriques. », thèse de doct., Ecole Polytechnique.
- BOYER, F., M. POREZ et W. KHALIL (2006), « Macro-continuous computed torque algorithm for a three-dimensional eel-like robot », in : *Robotics, IEEE Transactions on* 22.4, p. 763-775.

- BOYER, F. et D. PRIMAULT (2004), « Finite element of slender beams in finite transformations : A geometrically exact approach », in : *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 59.5, p. 669-702.
- BOYER, F. et F. RENDA (2016), « Poincaré's Equations for Cosserat Media : Application to Shells », in : *Journal of Nonlinear Science*, DOI : 10.1007/s00332-016-9324-7.
- BOYER, F. et al. (2012a), « Model for a Sensor Inspired by Electric Fish », in : *IEEE Transactions on Robotics* 28.2, p. 492-505, ISSN : 1552-3098, DOI : 10.1109/TR0.2011.2175764.
- BOYER, F. et al. (2012b), « Model for a sensor inspired by electric fish », in : *IEEE transactions on robotics* 28.2, p. 492-505.
- BOYER, F. et al. (2013a), « Underwater Reflex Navigation in Confined Environment Based on Electric Sense », in : *IEEE Transactions on Robotics* 29.4, p. 945-956.
- (2013b), « Underwater Reflex Navigation in Confined Environment Based on Electric Sense », in : *Robotics, IEEE Transactions on* 29.4, p. 945-956.
- BOYER, F. et al. (2015), « Underwater navigation based on passive electric sense : New perspectives for underwater docking », in : *The International Journal of Robotics Research*, p. 0278364915572071.
- BOYER, F. et al. (2019), « Underwater pre-touch based on artificial electric sense », in : *International Journal of Robotics Research (IJRR)* 39.6, p. 729-752.
- BOYER, F. et al. (2020), « Dynamics of Continuum and Soft Robots : A Strain Parameterization Based Approach », in : *IEEE Transactions on Robotics*.
- BOYER, Frederic et al. (2021), « Dynamics of Continuum and Soft Robots : A Strain Parameterization Based Approach », in : *IEEE Transactions on Robotics* 37.3, p. 847-863, DOI : 10.1109/TR0.2020.3036618.
- BOYER, Frédéric et al. (2022a), « Extended Hamilton's principle applied to geometrically exact Kirchhoff sliding rods », in : *Journal of Sound and Vibration* 516, p. 116511, ISSN : 0022-460X, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116511>, URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X21005411>.
- BOYER, Frédéric et al. (2022b), « Statics and Dynamics of Continuum Robots Based on Cosserat Rods and Optimal Control Theories », in : *IEEE Transactions on Robotics*, p. 1-19, DOI : 10.1109/TR0.2022.3226112.
- B.RASNOW (1996), « The effects of simple objects on the electric field of apteronotus », in : *Journal of Comparative Physiology A* 178.3, p. 397-411.

- BULLOCK, T.H., R.H. HAMSTRA et H. SCHEICH (1972), « The jamming avoidance response of highfrequency electric fish, part I & II », in : *J Comp Physiol* 77, p. 1-48.
- CAPUTI, A., R. BUDELLI et C.C. BELL (1998a), « The electric image in weakly electric fish : physical images of resistive objects in *Gnathonemus petersii* », in : *Journal of Experimental Biology* 201.14, p. 2115-2128.
- (1998b), « The electric image in weakly electric fish : physical images of resistive objects in *Gnathonemus petersii* », in : *Journal of Experimental Biology* 201.14, p. 2115-2128.
- CAPUTI, A. et al. (2013), « On the haptic nature of the active electric sense of fish », in : *Brain research* 1536, p. 27-43, ISSN : 0006-8993, DOI : 10.1016/j.brainres.2013.05.028, URL : <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.05.028>.
- CESAREK, P., M. SAJE et D. ZUPAN (2013), « Dynamics of flexiblebeams : Finite-element formulation based on interpolation of strain measures », in : *Finite Elements in Analysis and Design* 72, p. 47-63.
- CHEVALLEREAU, C. et al. (2013), « Electric sensor based control of underwater robot groups », in : *IEEE Transactions on Robotics*.
- CLARKE, Dominic et al. (2013), « Detection and learning of floral electric fields by bumblebees », in : *Science* 340.6128, p. 66-69.
- COLGATE, J. et J. BROWN (1994), « Factors affecting the z-width of a haptic display », in : *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, p. 3205-3210.
- DEVANEY, A. J. (2000), « Super-resolution Processing of Multi-static Data Using Time Reversal and MUSIC », in : *Unpublished*, <http://ece.neu.edu/fac-ece/devaney/preprints/paper02r>
- EMDE, G. von der (2006), « Non-visual environmental imaging and object detection through active electrolocation in weakly electric fish », in : *Journal of Comparative Physiology A* 192.6, p. 601-612, ISSN : 1432-1351, DOI : 10.1007/s00359-006-0096-7.
- EMDE, G. von der et S. SCHWARZ (2002), « Imaging of Objects through active electrolocation in *Gnathonemus petersii* », in : *Journal of Physiology-Paris* 96.5 :6, p. 431-444.
- EMDE, G. von der et al. (1998a), « Electric fish measure distance in the dark », in : *Nature* 395.6705, p. 890-894.
- EMDE, G. von der et al. (2010), « 3-Dimensional Scene Perception during Active Electrolocation in a Weakly Electric Pulse Fish », in : *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 4, p. 26.

- EMDE, G. Von Der et al. (1998b), « Electric fish measure distance in the dark », in : *Letters to Nature, Nature* 395, p. 890-894.
- EMDE, G.V.D. (1999), « Active electrolocation of objects in weakly electric fish », in : *The Journal of Experimental Biology* 202, p. 1205-1215.
- FANG, S., M. PESHKIN et M. MACIVER (2016), « Human-in-the-loop active electrosense », in : *Bioinspiration & Biomimetics* 12, p. 014001, DOI : 10.1088/1748-3190/12/1/014001, URL : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/12/1/014001/meta>.
- GEFFARD, F. et al. (2012), « TAO2000 V2 computer-assisted force feedback telemanipulators used as maintenance and production tools at the AREVA NC–La Hague fuel recycling plant », in : *Journal of Field Robotics* 29.1, p. 161-174.
- HANNAFORD, B. (1989), « A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback », in : *IEEE transactions on Robotics and Automation* 5.4, p. 426-434.
- HANNAFORD, B. et J.-H. RYU (2002), « Time-domain passivity control of haptic interfaces », in : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18.1, p. 1-10.
- HAPPEL, J. et H. BRENNER (1965), *Low Reynolds number hydrodynamics*, Prentice Hall.
- HIRSCHFELDER, J., C. CURTISS et B. ROBERT (1966), *Molecular Theory of Gases and Liquids*, John Wiley et Sons.
- HOFMANN, Volker et al. (2013), « From static electric images to electric flow : towards dynamic perceptual cues in active electroreception », in : *Journal of Physiology-Paris* 107.1, p. 95-106.
- HOPKINS, C. (2009), « Electrical Perception and Communication », in : *Encyclopedia of Neuroscience*, t. 3, New York : Oxford : Academic Press, p. 813-831.
- JACKSON, J. D. (1999), *Classical electrodynamics*, 3rd, New York : Wiley.
- KALMIJN, A.J. (1966), « Electro-perception in Sharks and Rays », in : *Nature* 212.5067, p. 1232-1233.
- KELLY, Scott D et Richard M MURRAY (1995), « Geometric phases and robotic locomotion », in : *Journal of Robotic Systems* 12.6, p. 417-431.
- KENNEDY, G. et B. DAVIS (1985), *Electronic communication systems*, t. 20, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi.
- KHAIRUDDIN, T. K. A. et W. R. B. LIONHEART (2013), « Fitting ellipsoids to objects by the first order polarization tensor », in : *Malaya Journal of Matematik* 1, p. 44-53.
- KRIM, H. et M. VIBERG (1996), « Two decades of array signal processing research : the parametric approach », in : *Signal Processing Magazine, IEEE* 13.4, p. 67-94.

- LANNEAU, S. et al. (2017a), « Model based estimation of ellipsoidal object using artificial electric sense », in : *The International Journal of Robotics Research* 36.9, p. 1022-1041.
- (2017b), « Model based estimation of ellipsoidal object using artificial electric sense », in : *The International Journal of Robotics Research* 36.9, p. 1022-1041.
- LANNEAU, Sylvain, Vincent LEBASTARD et Frederic BOYER (2016), « Object shape recognition using electric sense and ellipsoid's polarization tensor », in : *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 4692-4699.
- LEBASTARD, V., F. BOYER et S. LANNEAU (2016), « Reactive underwater object inspection based on artificial electric sense », in : *Bioinspiration & Biomimetics* 11.4, p. 45003-45020.
- LEBASTARD, V. et al. (2010), « Underwater robot navigation around a sphere using electrolocation sense and Kalman filter », in : *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*.
- LEBASTARD, V. et al. (2013), « Environment reconstruction and navigation with electric sense based on a Kalman filter », in : *International Journal of Robotic Research* 32, p. 172 -188.
- LISSMANN, H.W. et K.E. MACHIN (1958), « The mechanism of object location in *Gymnarchus niloticus* and similar fish », in : *The Journal of Experimental Biology* 35, p. 451-486.
- LLEWELLYN, F. (1972), « Some Fundamental Properties of Transmission Systems », in : *Proc. IRE*, t. 40, p. 271-283.
- MACIVER, M., E. FONTAINE et J. BURDICK (2004), « Designing future underwater vehicles : principles and mechanisms of the weakly electric fish », in : *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, p. 651-659.
- MITRA, P. et G. NIEMEYER (2004), « Dynamic proxy objects in haptic simulations », in : *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004*. T. 2, 1054-1059 vol.2, DOI : 10.1109/RAMECH.2004.1438065.
- MOLLER, P. (1995), *Electric Fishes : History and Behavior*, Chapman & Hall, p. 583.
- MORSE, M. et H. FESCHBACH (1953), *Mathematical methods in physics*.
- MURRAY, R. M., Z. LI et S. S. SASTRY (1994), *Robotic Manipulation*, CRC Press.
- NELSON, M., M. MACIVER et S. COOMBS (2002), « Modeling electrosensory and mechanosensory images during the predatory behavior of weakly electric fish », in : *Brain, Behavior and Evolution* 59, p. 199-210.

- POREZ, M. et al. (2011), « Multy-physics model of an electric fish-like robot : Numerical aspects and application to obstacle avoidance », in : *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, p. 1901-1906.
- RASMUSSEN, C. E. et C. K. I. WILLIAMS (2006), *Gaussian Processes for Machine Learning*, the MIT Press.
- RASNOW, B. et J. M. BOWER (1996), « The Electric Organ Discharges of the Gymnotiform Fishes », in : *Journal of Comparative Physiology A* 178.3, p. 383-396.
- REISSNER, E. (1973), « On a one-dimensional large displacement finite-strain beam theory », in : *Studies in Applied Mathematics* 52.2, p. 87-95.
- RENDA, F. et al. (2014), « Dynamic Model of a Multibending Soft Robot Arm Driven by Cables », in : *Robotics, IEEE Transactions on* 30.5, p. 1109-1122.
- SCHMIDT, R. (1986), « Multiple emitter location and signal parameter estimation », in : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 34, p. 276-280.
- SCHUMACHER, S. et G. von der EMDE (2012), « Jamming avoidance during active electrolocation of objects in the weakly electric fish, *Gnathonemus petersii* », in : *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 00230.
- SERVAGENT, N. et al. (2013a), « Electrolocation Sensors in Conducting Water Bio-Inspired by Electric Fish », in : *IEEE Sensor Journal* 13.5, p. 1865-1882.
- SERVAGENT, N. et al. (2013b), « Electrolocation Sensors in Conducting Water Bio-Inspired by Electric Fish », in : *Sensors Journal, IEEE* 13.5, p. 1865-1882.
- SILVERMAN, Y. et al. (2012), « Location and orientation estimation with an electrosense robot », in : *Workshop on IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 4218-4223.
- SIMO, J. C. et L. VU-QUOC (1988), « On the dynamics in space of rods undergoing large motions - A geometrically exact approach », in : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 66.2, p. 125 -161, ISSN : 0045-7825, DOI : DOI:10.1016/0045-7825(88)90073-4, URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782588900734>.
- SOLBERG, J., K. LYNCH et M. MACIVER (2007), « Robotic Electrolocation : Active Underwater Target Localization », in : *International Conference on Robotics and Automation*.
- SOLBERG, J.R., K.M. LYNCH et M.A. MACIVER (2008), « Active Electrolocation for Underwater Target Localization », in : *The International Journal of Robotics Research* 27.5, p. 529-548.

- STAMPER, SA. et al. (2012), « Beyond the Jamming Avoidance Response : weakly electric fish respond to the envelope of social electrosensory signals. », in : *The Journal of Experimental Biology* 215.23, p. 4196-4207.
- TUMMERS, Matthias et al. (2023a), « Cosserat Rod Modeling of Continuum Robots from Newtonian and Lagrangian Perspectives », in : *soumis á IEEE Transactions on Robotics*.
- TUMMERS, Matthias et al. (2023b), « Planar Push-Pull Continuum Robots : Cosserat Rod Modeling », in : *soumis á IEEE Transactions on Robotics*.
- TYRRELL, Alexander, Gunther AUER et Christian BETTSTETTER (2006), « Synchronization inspired from nature for wireless meshed networks », in : *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006. WiCOM 2006. International Conference on*, IEEE, p. 1-4.
- WALKER, Michael W. et David E. ORIN (1982), « Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms », in : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 104.3, p. 205-211.
- WEBSTER, Robert J. et al. (2006), « Nonholonomic Modeling of Needle Steering », in : *Int. J. Rob. Res.* 25.5-6, p. 509-525.

CURRICULUM VITAE

Vincent Lebastard

Né le 13 mars 1977 à Nantes.

IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire, Campus de Nantes.

Département Automatique, Productique et Informatique.

4 rue Alfred Kastler - La Chantrerie

44307 Nantes France

Téléphone : (33) 2.51.85.83.07

Courriel : vincent.lebastard@imt-atlantique.fr

8.1 Situation professionnelle

Maître Assistant de l'Institut Mines-Télécom au Département Automatique, Productique et Informatique d'IMT Atlantique Bretagne Pays de Loire depuis Septembre 2009, hors classe 5^{ème} échelon.

Membre de l'équipe de recherche Robotique et Vivant (ReV) du Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N) - UMR CNRS 6004.

Responsable de la Thématique d'Approfondissement Robotique et interactions (TAF ROBIN) de la filière ingénieure d'IMT Atlantique.

8.2 Formation

2004-2008 **Thèse de Doctorat** de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes sous la direction de Yannick Aoustin et Franck Plestan
Titre : La robotique à pattes : un champ d'application pour les observateurs non linéaires à convergence en temps fini.
Date de soutenance : 26 Octobre 2008.

- 2003 **DEA** Automatique Informatique Appliqué (mention assez bien) à École Centrale de Nantes, option Automatique et robotique.
Titre : Observateurs appliqués à un robot bipède.
- 2002 **Agrégation** génie électrique à l'ENS Cachan (Antenne de Bretagne)
Option électronique et informatique industrielle.
- 2001 **Maîtrises EEA** à UFR sciences de Caen, options :
Automatique Informatique Industrielle (mention assez bien).
Électronique Micro-électronique (mention assez bien).
- 2000 **Licence** à UFR sciences de Caen, option Ingénierie Electrique (mention bien).
- 1999 **DUT** Mesures Physiques à l'IUT de Saint-Nazaire, option Techniques instrumentales.

8.3 Expériences professionnelles

- 2009-... **Maître Assistant de l'Institut Mines-Télécom** au Département Automatique, Productique et Informatique d'IMT Atlantique Bretagne Pays de Loire
- 2006-2009 **Titulaire en zone de remplacement** (TZR) au lycée Jacques de Vaucanson (Tours). Matières enseignées (de la Seconde à la Terminale) : Sciences de l'ingénieur
- 2003-2006 **Moniteur** – École Centrale de Nantes (ECN) : (192 h équi. TD sur les 3 ans). Matières enseignées : électronique de puissance et électronique (TD, TP, Tutorat).

8.4 Recherche et valorisation

- 2023-2027 **ANR Electro-Karst**
Financement **ANR**, part laboratoire : 180K€
Résumé Ce projet est dédiée au développement de systèmes robotiques pour l'exploration du karst. L'application principale de ce nouvel outil robotique est l'évaluation des ressources en eau souterraine.

Partenaires LIRMM, LAB-STICC, IMT Atlantique/LS2N.
 Durée 4 ans
 Implication Responsable de work package, Encadrement doctorant, Recherche et développement.

2020-2024 **ANR COSSEROOTS**

Financement **ANR**, part laboratoire : 105K€

Résumé Son objectif est de développer, exploiter et diffuser une modélisation innovante dédiée aux robots souples et/ou continus comprenant des corps souples élancés. L'approche est basée sur la théorie des poutres Cosserat en grandes transformations sont réduits sur des bases de Ritz. Grâce à cette réduction, les modèles statiques et dynamiques de n'importe quel robot souple prennent la forme habituelle de la robotique rigide, ou flexible, avec actionneurs localisés. Les résultats du projet consistent en un ensemble de méthodes en modélisation, simulation et commande, traduits en algorithmes ouverts à la communauté.

Partenaires IMT Atlantique/LS2N, Iria Lille, TIMC,IUSTI

Durée 4 ans

Implication Encadrement doctorant, Recherche et développement.

2019-2020 **Projet Citeph** : Caractérisation d'un système de détection d'obstacles, d'aide à la navigation et de détection d'objets enfouis pour ROV basé sur la technologie du «sens électrique».

Financement **Citeph**, part laboratoire : 150K€

Résumé Le projet vise à caractériser les performances de capteur basé sur la technologie du « sens électrique » et implémenté sur ROV et AUV. Il s'inscrit dans le programme de développement de systèmes commerciaux «sens électrique» envisagé par la société ELWAVE en collaboration notamment avec IMT Atlantique.

Partenaires Elwave, IMT Atlantique/LS2N, YSEN.

Durée 2 ans.

Implication Responsable de work package, Encadrement Post-Doc, Recherche et développement.

2019 **Projet SenseNet** : Reconnaissance automatique à partir du sens électrique par apprentissage profond.

Financement **Carnot TNS Numérique 2019**, part laboratoire : 54K€

Résumé Le projet SenseNet a pour but de s'attaquer au problème difficile de la reconnaissance d'objet à partir de la mesure d'un champ électrique par apprentissage. Ce problème a été abordé en utilisant des techniques d'apprentissage profond couplées à une approche bio-inspirée.

En collaboration avec Frédéric Boyer, Ronan Fablet, François Rousseau.

Partenaires IMT Atlantique

Durée 1 an

Implication Encadrement Post-Doc, Recherche et développement.

2014-2019 **Projet européen subCULTron**

Financement **Europe**, part laboratoire : 146K€

Résumé Le projet subCULTron vise à atteindre une autonomie à long terme dans une société/culture sous-marine d'apprentissage, d'autorégulation et d'autosuffisance dans un domaine d'application à fort impact : le monde sous-marine de la lagune de Venise, Italie. Notre système hétérogène se compose de trois types d'agents différents : les premiers sur le fond marin qui constituent la mémoire collective à long terme du système, les seconds à la surface de l'eau qui s'interfacent avec la société humaine et délivrent l'énergie et enfin les troisièmes, entre ces deux couches, se déplacent, surveillent et explorent l'environnement et échangent des informations avec les robots du fond marin et de la surface.

Partenaires UNIGRAZ, UNIZG-FER, SSSA, ULB, IMT Atlantique/LS2N, CORILA, CYB.

Durée 4,5 ans

Implication Encadrement post doc, Recherche et développement.

2014-2017 **Projet région CEA-tech**

Financement **Région pays de loire**, 300K€

- Résumé L'objectif est de prolonger les développements de la technologie de capteurs biomimétiques offrant une perception sensorielle électrique et fournissant à des systèmes complexes des informations adaptées et conditionnées, pour diverses applications industrielles. L'objectif est d'appliquer aux problématiques de la téléopération, la technologie du sens électrique permettant ainsi un retour d'effort sans contact mécanique entre le bras téléopéré et son environnement.
- Partenaires IMT Atlantique/LS2N, CEA-tech, LISEN
- Durée 3 ans
- Implication Responsable de work package, Encadrement Doctorant et post-doc, Recherche et développement.
- 2014-2015 **projet AREVA** : Étude de faisabilité du sens électrique appliqué aux besoins du démantèlement nucléarisé.
- Financement **AREVA**, 120K€
- Résumé L'étude ci proposée, vise à appliquer le sens électrique à deux usages liés aux métiers du groupe AREVA dans l'industrie nucléaire : le développement d'une sonde électrique pour la caractérisation des milieux aqueux : détection, identification, localisation des inhomogénéités et cartographie
- Partenaires IMT Atlantique/LS2N, Areva
- Durée 18 mois.
- Implication Responsable de Projet, Recherche et développement.
- 2012-2013 **Projet Région Pays de loire et Carnot** Équipement de laboratoire
- Financement **Carnot**, part laboratoire : 116K€; **Région Pays de Loire**, part laboratoire : 58K€
- Résumé L'acquisition de la plate-forme moyenne échelle. Composé d'un bassin en verre de 4m³ (2x2x1m) et équipé d'un robot cartésien permettant d'évoluer en 3D. Cette plate-forme permet de développer nos approches autour du sens électrique dans un univers contrôlé (bruits, possibilité d'opacifier l'eau, changement de salinité, ...).
- Partenaires IMT Atlantique/LS2N
- Durée 1 an
- Implication Responsable de Projet, Recherche et développement.

2009-2012 **Projet Européen FET** (Futur Emerging Technologies) appel FP7 **ANGELS** (ANGuilliform swimming robot with Electric Sense)

Financement **Europe**, part laboratoire : 1200K€

Résumé L'objectif du projet ANGELS est de concevoir et de construire un prototype de robot nageur anguilliforme reconfigurable capable de se diviser en agents plus petits (et vice-versa), chacun étant équipé d'un "sens électrique" bio-inspiré utilisé à la fois pour la reconnaissance des objets et la communication entre agents.

Partenaires IMT Atlantique/LS2N, SUBATECH, EPFL, SSSA, UBO, USTUTT, UNIC,IIBCE,UDELAR

Durée 3.5 ans

Implication Recherche et développement.

2007-2011 **ANR PSIRob RAAMO** (Robot Anguille Autonome en Milieu Opaque)

Financement **ANR**, part laboratoire : 300K€

Résumé RAAMO a pour objectifs de munir notre prototype de robot anguille d'une peau artificielle performante et de le doter d'une autonomie sensorielle adaptée à son mode de locomotion bio-mimétique.

Partenaires IMT Atlantique/LS2N, LAG, SUBATECH, LMF, 3S, UNIC.

Durée 4 ans

Implication Recherche et développement.

8.5 Encadrements

8.5.1 Post-Doctorants

2019-2020 Johan Mauny. **Projet Citeph.**

Encadrement scientifique, assistance au développement.

En collaboration avec Frédéric Boyer et la Startup Elwave.

Durée 14 mois.

2017-2019 Mohamed Boukens. **Projet Européen subCULTron.**

Encadrement scientifique, assistance au développement

	En collaboration avec Frédéric Boyer
Durée	18 mois
2019	Mamadou-Lamarana Diallo. Projet SenseNet. Encadrement scientifique, assistance au développement. En collaboration avec Frédéric Boyer, Ronan Fablet, François Rousseau.
2015-2017	Stéphane Bazeille. Projet Européen subCULTron. Encadrement scientifique, assistance au développement. En collaboration avec Frédéric Boyer. Encadrement scientifique, assistance au développement.
Durée	18 mois.
2014-2015	Yannick Morel. Projet CEA tech. Encadrement scientifique, assistance au développement. En collaboration avec Frédéric Boyer, Franck Geffard.
Durée	18 mois.

8.5.2 Doctorants

2023-2026	Hugo Laplagne (50%). Sujet : Modélisation et reconstruction de l'environnement karstique par le sens électrique. Directeur de thèse : Frédéric Boyer
2023-2026	Max Roccuzzo (30%). Sujet : Conception et contrôle de robots serpenti-formes pour l'exploration des milieux non-structurés. Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
2021-2024	Andrea Gotelli (30%). Sujet : Modélisation et commande dynamiques de robots parallèles souples. Directeur de thèse : Sébastien Brio.
2021-2024	Zibo Zhang (30%). Sujet : Commande hybride mouvement-raideur des robots continus. Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
2020-2023	Xie Xiao (30%). Sujet : Stratégies de locomotion d'un robot serpentiforme à la surface de l'eau. Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
2017-2018	Johan Mauny (50%). Sujet : Modélisation dynamique des systèmes non-holonomes intermittents.

	Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
Poste	Ingénieur R&D Robotique / Mécatronique.
2015-2018	Steven Bruce Ferrer (50%) Sujet : Le retour électro-haptique dans l'eau et air pour la perception de l'environnement par un robot industriel.
Poste	Medical device Security advisor chez Freelance.
	Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
2014-2017	Sylvain Lanneau (50%). Sujet : le sens électrique dans l'eau pour la perception de l'environnement par un robot aquatique.
	Directeur de thèse : Frédéric Boyer.
Poste	Maitre assistant, Isen Nantes, L@bISEN, France.
2010-2013	Rédha Benachenhou (50%). Sujet : électrolocation dans un contexte multi-robot théorie et expérimentations.
	Directrice de thèse : Christine Chevallereau.
Poste	Assistant Professor, Automatic Department, USTO-MB, Algérie.

8.5.3 Masters

2022	Max Rocuzzo (50%). Sujet : Développement, instrumentation et contrôle d'un robot serpent nageur.
2022	Virgile Batto (50%). Sujet : Conception d'un robot serpent nageur à câbles à actionnement minimal.
2015	Manthan Panchoi (100%). Sujet : Navigation of underwater group of robots based on electric sense and observer.
2014	Dmytro Dudka (100%). Sujet : Télé-operation of a robot through electric haptic feedback.
2013	Denajda Aliaj (50%). Sujet : Control of underwater Robotic Swarm with electric sense.
2012	Araz Jaloo (100%). Sujet : Design of an electro-sensing-locomotion control loop for robot : a haptic feedback approach.
2011	Daniel Garido (50%). Sujet : Design of an electro-sensing-locomotion loop for an eel-like robot : a neural network approach.
2011	Phung Duc (50%). Sujet : Design and making of a fish-like robot in granular media.

- 2011 Gokul Chandrasekaran (50%). Sujet : Design and making of a bio-inspired snake-like robot.

8.5.4 Jurys de thèses

- 2018 Johan Mauny. Sujet : Modélisation dynamique des systèmes non-holonomes intermittents : application à la bicyclette.
- 2017 Sylvain Lanneau. Sujet : Localisation et estimation basées modèle d'un objet ellipsoïdal avec le sens électrique artificiel.
- 2015 Philippe Laurent. Sujet : Méthodes d'accélération pour la résolution numérique en électrolocation et en chimie quantique.
- 2014 Rédha Benachenhou. Sujet : Électrolocation dans un contexte multi-robots : théorie et expérimentations.

8.6 Publications

8.6.1 Journaux Internationaux avec comité de lecture

Soumis

- SJ1 Boyer, F. ; Gotelli, A. ; Tempel, P. ; **Lebastard**, V. ; Renda, F. ; Briot, S. ; Implicit time integration simulation of robots with rigid bodies and Cosserat rods based on a Newton-Euler recursive algorithm.

Acceptés

- J1 Tummers, M. ; **Lebastard**, V. ; Boyer, F. ; Troccaz, J. ; Rosa, B. ; Chikhaoui, M. T. ; Cosserat Rod Modeling of Continuum Robots from Newtonian and Lagrangian Perspectives, IEEE Transactions on Robotics.
- J2 Boyer, F. ; **Lebastard**, V. ; Candelier, F. ; Renda, F. ; Alamir, M. ; Statics and dynamics of continuum robots based on Cosserat rods and optimal control theories, IEEE Transactions on Robotics.

- J3 Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Candelier, F. ; Renda, F. ; Extended Hamilton’s principle applied to geometrically exact Kirchhoff sliding rods, *Journal of Sound and Vibration*, 516, 116511, 2022, Academic Press.
- J4 Renda, F. ; Armanini, C. ; **Lebastard, V.** ; Candelier, F. ; Boyer, F. ; A geometric variable-strain approach for static modeling of soft manipulators with tendon and fluidic actuation, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5, 3, 4006-4013, 2020.
- J5 Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Candelier, F. ; Renda, F. ; Dynamics of continuum and soft robots : A strain parameterization based approach, *IEEE Transactions on Robotics*, 37, 3, 847-863, 2020.
- J6 Bazeille, S. ; **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; A purely model-based approach to object pose and size estimation with electric sense, *IEEE Transactions on Robotics*, 36, 5, 1611-1618, 2020.
- J7 Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Ferrer, B. ; Geffard, F. ; Underwater pre-touch based on artificial electric sense, *The International Journal of Robotics Research*, 39, 6, 729-752, 2020, SAGE Publications Sage UK : London, England.
- J8 Lanneau, S. ; Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Bazeille, S. ; Model based estimation of ellipsoidal object using artificial electric sense, *The International Journal of Robotics Research*, 36, 9, 1022-1041, 2017, SAGE Publications Sage UK : London, England.
- J9 **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; Lanneau, S. ; Reactive underwater object inspection based on artificial electric sense, *Bioinspiration & Biomimetics*, 11, 4, 045003, 2016, IOP Publishing.
- J10 Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Chevallereau, C. ; Mintchev, S. ; Stefanini, C. ; Underwater navigation based on passive electric sense : New perspectives for underwater docking, *The International Journal of Robotics Research*, 34, 9, 1228-1250, 2015, SAGE Publications Sage UK : London, England.
- J11 Chevallereau, C. ; Benachenhou, M.-R. ; **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; Electric sensor-based control of underwater robot groups, *IEEE Transactions on Robotics*, 30, 3, 604-618, 2014.

- J12 Boyer, F.; **Lebastard, V.**; Chevallereau, C.; Servagent, N.; Underwater reflex navigation in confined environment based on electric sense, *IEEE transactions on robotics*,29,4,945-956,2013.
- J13 **Lebastard, V.**; Chevallereau, C.; Girin, A.; Servagent, N.; Gossiaux, P.-B.; Boyer, F.; Environment reconstruction and navigation with electric sense based on a Kalman filter, *The International Journal of Robotics Research*,32,2,172-188,2013,SAGE Publications Sage UK : London, England.
- J14 Servagent, N.; Jawad, B.; Bouvier, S.; Boyer, F.; Girin, A.; Gomez, F.; **Lebastard, V.**; Stefanini, C.; Gossiaux, P.-B.; Electrolocation sensors in conducting water bio-inspired by electric fish, *IEEE Sensors Journal*,13,5,1865-1882,2013.
- J15 Boyer, F.; Gossiaux, P.-B.; Jawad, B.; **Lebastard, V.**; Porez, M.; Model for a sensor inspired by electric fish,*IEEE transactions on robotics*,28,2,492-505,2011.
- J16 **Lebastard, V.**; Aoustin, Y.; Plestan, F.; ,Estimation of absolute orientation for a bipedal robot : Experimental results, *IEEE Transactions on Robotics*,27,1,170-174,2011.
- J17 **Lebastard, V.**; Aoustin, Y.; Plestan, F.; ,Observer-based control of a walking biped robot without orientation measurement,*Robotica*,24,3,385-400,2006,Cambridge University Press

8.6.2 Chapitres de livre

- Ch1 Bazeille, S.; **Lebastard, V.**; Boyer, F.; ,Underwater robots equipped with artificial electric sense for the exploration of unconventional aquatic niches, *Marine Robotics and Applications*,29-50,2018,Springer.
- Ch2 Boyer, F.; **Lebastard, V.**; ,Electric sensing for underwater navigation,*Living machines : a handbook of research in biomimetics and biohybrid systems*. Oxford University Press, Oxford,2018.
- Ch3 **Lebastard, V.**; Aoustin, Y.; Plestan, F.; Fridman, L.; An alternative to the measurement of five-links biped robot absolute orientation : estimation based on high order sliding mode ; *Modern sliding mode control theory. New perspectives and applications*, Springer Verlag, 2008.

- Ch4 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Absolute orientation estimation for observer-based control of a five-link walking biped robot ; Robot Motion and Control . Recent Developments, Springer Verlag, vol.335, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2006.

8.6.3 Brevets

- B1 Girin, A. ; **Lebastard, V.** ; Gossiaux, P.-B. ; Bouvier, S. ; Boyer, F. ; Servagent, N. ; Method and device to control the movement of a mobile system in an electrically conductive medium, 2013, WO Patent 2013/014392
- B2 Delplanque, Q. ; Ifrek L. ; Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; Method of detection in an electrically conductive medium ; 2021 ; WO patent 2021/229010.

8.6.4 Conférences Internationales avec comité de lecture

Acceptés

- C1 Xie, X. ; Herault, J. ; **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; Recursive inverse dynamic of a swimming snake-like robot with a tree-like mechanical structure, IEEE Conference on Advanced Robotics and its Social Impact (ARSO),2023.
- C2 Xie, X. ; Herault, J. ; Clement, É. ; **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; Quasi-static motion of a new serial snake-like robot on a water surface : a geometrical approach, IEEE/RSJ IROS,7372-7377, 2021.
- C3 Boukens, M. ; **Lebastard, V.** ; Van Vuuren, G. ; Boyer, F. ; Underwater communication with artificial electric sense, ALIFE 2021 : The 2021 Conference on Artificial Life,2021,MIT Press.
- C4 Herault, J. ; Clement, É. ; Brossillon, J. ; Lagrange, S. ; **Lebastard, V.** ; Boyer, F. ; Standing on the Water : Stability Mechanisms of Snakes on Free Surface, Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, 165-175, 2020, Springer.
- C5 Bazeille, S. ; **Lebastard, V.** ; Lanneau, S. ; Boyer, F. ; Model based object localization and shape estimation using electric sense on underwater robots, IFAC, 50,1, 5047-5054, 2017, Elsevier.

- C6 Thenius, R.; Moser, D.; Varughese, J. *et all*; subCULTron-cultural development as a tool in underwater robotics, Artificial life and intelligent agents symposium,27-41,2016,Springer.
- C7 Lanneau, S.; **Lebastard, V.**; Boyer, F.; Object shape recognition using electric sense and ellipsoid's polarization tensor IEEE ICRA,4692-4699,2016.
- C8 Morel, Y.; **Lebastard, V.**; Boyer, F.; Neural-based underwater surface localization through electrolocation, IEEE ICRA, 2596-2603,2016.
- C9 Morel, Y.; **Lebastard, V.**; Boyer, F.; Neural-based underwater spherical object localization through electrolocation, IEEE ICRA, 23-28,2015.
- C10 Benachenhou, M.-R.; Chevallereau, C.; **Lebastard, V.**; Boyer, F.; Synthesis of an electric sensor based control for underwater multi-agents navigation in a file, IEEE ICRA,4608-4613,2013.
- C11 Boyer, F.; **Lebastard, V.**; Exploration of objects by an underwater robot with electric sense, Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems,50-61,2012,Springer, Berlin, Heidelberg.
- C12 Mintchev, S.; Stefanini, C.; Girin, A.; Marrazza, S.; Orofino, S.; **Lebastard, V.**; et all; An underwater reconfigurable robot with bioinspired electric sense, IEEE ICRA,1149-1154,2012.
- C13 Chevallereau, C.; Boyer, F.; **Lebastard, V.**; Benachenou, M.; Electric sensor based control for underwater multi-agents navigation in formation,IEEE ICRA,1161-1167,2012.
- C14 **Lebastard, V.**; Chevallereau, C.; Girin, A.; Boyer, F.; Gossiaux, P.-B.; Localization of small objects with electric sense based on kalman filter,IEEE ICRA ,1137-1142,2012.
- C15 **Lebastard, V.**; Boyer, F.; Chevallereau, C.; Servagent, N.; Underwater electro-navigation in the dark, IEEE ICRA,1155-1160,2012.
- C16 Porez, M.; **Lebastard, V.**; Ijspeert, A.; Boyer, F.; ,Multi-physics model of an electric fish-like robot : Numerical aspects and application to obstacle avoidance, IEEE/RSJ IROS,1901-1906,2011.
- C17 **Lebastard, V.**; Chevallereau, C.; Amrouche, A.; Jawad, B.; et all, Underwater robot navigation around a sphere using electrolocation sense and kalman filter, IEEE/RSJ IROS,4225-4230,2010.

- C18 Jawad, B. ; Gossiaux, P.-B. ; Boyer, F. ; **Lebastard, V.** ; et all Sensor model for the navigation of underwater vehicles by the electric sense,IEEE ROBIO,879-884,2010.
- C19 Alamir, M. ; Omar, O. ; Servagent, N. ; Girin, A. ; Bellemain, P. ; **Lebastard, V.** ; et all. ,On solving inverse problems for electric fish like robots, IEEE ROBIO,1081-1086,2010.
- C20 Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; **Lebastard, V.** ; Experimental comparison of several posture estimation solutions for biped robot rabbit, IEEE ICRA,1270-1275,2008.
- C21 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Observer-based control of a walking biped robot : stability analysis, Advances In Climbing And Walking Robots,393-401,2007.
- C22 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Observer-based control of a walking planar biped robot : stability analysis, 46th IEEE Conference on Decision and Control,5144-5149,2007.
- C23 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Fridman, L. ; Absolute orientation estimation based on high order sliding mode observer for a five links walking biped robot, VSS'06,373-378,2006.
- C24 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Absolute orientation estimation for observer-based control of a five-link walking biped robot, Robot motion and control,181-199,2006,Springer, London.
- C25 **Lebastard, V.** ; A. Yannick ; P., Franck ; ,Observer-based control for absolute orientation estimation of a five-link walking biped robot,14th MED, 1-6, 2006.
- C26 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Sliding Mode Observer with off Orientation Measurement for a Walking Biped, Clawar, 93, 399, 2006, Springer.
- C27 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Finite time observer for absolute orientation estimation of a five-link walking biped robot,2006 American Control Conference,6 pp.,2006.
- C28 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; Step-by-step sliding mode observer for control of a walking biped robot by using only actuated variables measurement,IEEE/RSJ IROS,559-564,2005.

- C29 Lebastard, V ; Aoustin, Y ; Plestan, F ; Second order sliding mode observer for stable control of a walking biped,IFAC Proceedings Volumes,38,1,13-18,2005,Elsevier
- C30 **Lebastard, V.** ; Aoustin, Y. ; Plestan, F. ; ,Observer-based control of a biped robot, Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control (IEEE),67-72,2004.

8.7 Animations et rayonnement

- 2019-2024 Responsable scientifique de la collaboration avec la startup Elwave au travers le CoLab IMT Atlantique/Elwave.
- 2015-2022 Représentant de l'IMT Atlantique au comité de labélisation de Projets, pôle EMC2.
- 2016 Special issue on Artificial Electric Sense, Bioinspiration & Biomimetics, guest editor : Frédéric Boyer, Gerhard von der Emde, **Vincent Lebastard**.
- 2014 Lauréat du Prix « la recherche » en 2014 mention "technologie" avec Frédéric Boyer, Christine Chevallereau, Noël Servagent.

8.8 Arbitrage de communications scientifiques

- | | |
|-------------------|---|
| IEEE Journal | Transactions on Robotics(TR-O), Robotics and Automation Letters(RA-L), Sensors Journal. |
| IOP Sciences | Bioinspiration & Biomimetics. |
| Springer Journals | Nonlinear Dynamics, Scientific Reports. |
| MPDI | Sensor, Biomimetics, Micromachines,Applied Sciences. |
| IEEE Conférence | RoboSoft, ICRA, IROS, CDC, ACC, VSS. |

8.9 Activités d'enseignement

Dans cette section, je vais exposer les responsabilités pédagogiques que j'ai eues depuis mon intégration à IMT Atlantique (ex. Mines-Nantes). Dans une première partie, je présenterai la responsabilité de thématique d'approfondissement Robotique et interactions

(TAF ROBIN) d'option et la responsabilité d'unité d'enseignement. Dans un seconde partie, je résume mes activités d'enseignements. Je finirai par une partie sur les encadrements de projet et de stages en entreprise.

8.9.1 Responsabilités pédagogiques.

Responsable de thématique d'approfondissement Robotique et interactions (TAF ROBIN).

Depuis le passage de l'école des mines de Nantes à l'IMT Atlantique (2018), les étudiants peuvent choisir des thématiques d'approfondissement (TAF) d'un an. Ce choix intervient en fin de première année et les élèves intégrés dans la TAF peuvent être des élèves de 2^{ème} année ou des 3^{ème} année du cycle d'ingénieur. Les TAF étant aux nombres de 22, le nombre de combinaisons et de profils d'élèves sot très hétérogènes. Le rôle du responsable de TAF se décompose en trois grandes fonctions :

- L'accompagnement des étudiants,
- La gestion administrative de la TAF,
- Le niveau scientifique, la cohérence pédagogique de la TAF et son adéquation au monde industriel.

Le responsable d'option devient l'interlocuteur privilégié des élèves admis dans la TAF en lui apportant de l'aide dans ses éventuels souhaits de parcours à l'étranger (année de césure, transfert de crédits, double diplôme, etc.). Il valide également le sujet d'ingénierie proposé à l'étudiant pour son stage de fin d'étude (SFE). Concernant la gestion administrative de la TAF, elle se focalise sur la planification globale de la TAF et sur la participation aux jurys des études de dernière année. Le responsable d'option est également chargé de veiller à la cohérence du programme pédagogique de la TAF et à son adéquation avec les attentes du marché de l'emploi. La TAF est actualisée en moyenne tous les 4 ans et le rôle de responsable de TAF est de s'assurer du bon fonctionnement de ce processus en conduisant la réflexion sur les orientations de la TAF, en collaboration avec un panel d'experts industriels, puis de sa déclinaison opérationnelle. La responsabilité de TAF est une tâche lourde, car le responsable est un relais de Direction de la Formation et de la Vie Scolaire, de son département tout en étant au plus proche des élèves. J'ai participé au montage de la TAF Robin avec Mathieu Porez au moment du regroupement de l'école des mines de Nantes et de télécom bretagne dans l'IMT Atlantique. Je suis responsable de la TAF Robin depuis 2018.

Responsable d'Unité d'Enseignement (UE).

L'Unité d'Enseignement (UE) est un ensemble d'activités pédagogiques (cours, TP, TD) d'un volume de 40h et constituant un ensemble pédagogique cohérent. En phase de conception, le rôle du responsable d'UE est de définir le programme et les objectifs en cohérence avec les orientations pédagogiques du cursus auquel l'UE appartient, puis de synthétiser le tout dans une fiche descriptive. Une fois l'UE mise en production, le responsable de l'UE doit assurer la planification, le recrutement des intervenants ainsi que le suivi des résultats des étudiants. De plus, il doit établir chaque année un bilan de l'UE avec les élèves afin d'en assurer l'amélioration, conformément à la politique qualité de l'école. La liste suivante présente mes différentes responsabilités durant ma carrière :

2010-2018 Co-Responsable UE Projet d'Ingénierie Scientifique et Technique (P.I.S.T) en 2^{ème} année mines de Nantes.

2018-maintenant — Responsable UE Calcul scientifiques Appliqués (CSA) en 1^{ère} année de l'IMT Atlantique.

- Responsable UE Informatique pour la robotique en TAF Robin de l'IMT Atlantique.
- Responsable UE Informatique embarquée en TAF Robin de l'IMT Atlantique.
- Responsable UE Informatique temps réelle et distribuée en TAF Robin de l'IMT Atlantique.
- Responsable UE Cobotique et Haptique en TAF Robin de l'IMT Atlantique.
- Responsable UE prototypage en TAF Robin de l'IMT Atlantique.
- Co-Responsable UE Projet Complexes (PROCOM) en 3^{ème} année de l'IMT Atlantique.

8.9.2 Enseignements

UE Calcul scientifiques Appliqués (CSA) en 1^{ère} année de l'IMT Atlantique.

L'objectif de cette UE est de fournir un aperçu de plusieurs aspects de l'analyse numérique qui se posent souvent en informatique lors de la résolution de problèmes. L'enseignement est structuré comme suit : les systèmes linéaires, les systèmes non linéaires, l'optimisation principes et algorithmes, les équations différentielles ordinaires et partielles.

Mon implication dans cette UE Cours, TD, TP 24h.

Modélisation Expérimentation et Simulation : projet sens électrique en 1^{ère}

année de l'IMT Atlantique et 1^{ère} année des formations par alternance FIL et FIT. L'objectif de cette UE est de : permettre à l'élève de développer ses capacités d'exploitation des concepts vus dans les modules disciplinaires antérieurs (savoir appliquer, mettre en œuvre, ...); développer les facultés de confrontation de la réalité expérimentale à la théorie, et ce par l'intermédiaire d'un modèle physico-mathématique; Familiariser les élèves avec la simulation et les méthodes numériques permettant de résoudre les modèles posés. Le sujet que je développe dans cette UE est une version pédagogique de ma recherche en sens électrique.

Mon implication dans cette UE : Cours, TP 20h en 1^{ère} année de l'IMT Atlantique et 15h en FIL et FIT.

UE Informatique pour la robotique en TAF Robin de l'IMT Atlantique. L'objectif de cette UE est d'introduire les concepts liés à la mise en œuvre de l'architecture logicielle d'un robot dans l'objectif de le rendre autonome. Un focus est réalisé sur le middleware ROS (Robot Operating System) un logiciel dédié à la robotique.

Mon implication dans cette UE : Cours, TD 12h.

UE Informatique embarquée en TAF Robin de l'IMT Atlantique. L'objectif de cette UE est d'introduire les connaissances de base liées à un système embarqué : brique élémentaire d'un système robotisé. Après une introduction relative aux architectures matérielles liées aux microcontrôleurs, FPGA et autre DSP, une place importante sera faite à l'implémentation sur cible de programmes embarqués mettant en œuvre différents périphériques dans l'objectif de piloter un système.

Mon implication dans cette UE : Cours, TD, TP 40h.

UE Informatique temps réelle et distribuée en TAF Robin de l'IMT Atlantique
Cette UE introduit les concepts liés à l'informatique temps réel, aux bus de terrain et à la commande distribuée (au travers des systèmes d'information). Une partie importante de l'enseignement se fera à travers de travaux pratiques (sur PC ou cibles embarquées type Raspberry PI, carte Nucléo...), afin de mettre en œuvre les différents concepts de programmation temps réel, de découvrir le modèle OSI et implémenter certains bus de terrain.

Mon implication dans cette UE : Cours, TD, TP 20h.

UE prototypage en TAF Robin de l'IMT Atlantique. Les objectifs de cette UE est d'utiliser les techniques récentes de prototypage démocratisées (CAO, impression 3-D, Raspberry PI, ROS . . .) par les ateliers de fabrication numérique pour, à partir d'un cahier des charges fonctionnelles, concevoir, fabriquer et mettre en oeuvre un robot mobile de service.

Mon implication dans cette UE : Cours, mini projet 40h.

UE Robotique bio-inspirée. Cette UE introduit les bases de la biorobotique. En particulier, on étudie comment l'observation de la nature permet de reproduire artificiellement des solutions pour résoudre des problèmes sans solution pour la robotique classique. Après un tour d'horizon de la biorobotique et les leçons que la nature peut enseigner au roboticien, nous illustrons la démarche sur les deux versants de la robotique que sont la locomotion par (exemples du vol battant inspirés des insectes et de la nage des poissons) et la perception (par exemple le sens électrique).

Mon implication dans cette UE : TP sens électrique 8h.

8.9.3 Encadrement de projet et de stages en entreprise

La pratique d'un enseignement par projets fait partie des points forts de l'école des Mines Nantes et de l'IMT Atlantique. Ayant une forte appétence pour la recherche expérimentale, l'encadrement de projets d'élèves tient une place très importante dans mon activité d'enseignement. J'ai participé à tous les projets proposés sur chaque semestre de la formation ingénieur. La liste suivante présente (l'ordre chronologique du cycle d'ingénieur) les projets auxquels j'ai participé :

- **Faire pour apprendre (FPA, ex PII).** Les objectifs de ce projet sont de permettre à l'élève ingénieur de 1^{ère} année d'être confronté au monde de l'ingénierie et permet d'initier les élèves au travail de groupe. C'est un pré-projet très structuré avec un taux d'encadrement important. Cette initiation par d'un travail individuel puis d'une mise en commun des travaux pour finir par un premier travail de groupe de 3/4 élèves.

De 2009 à 2015, j'ai encadré chaque année un groupe de 24/28 d'élèves.

- **Conception et développement de système d'ingénierie (CODEVSI, Ex**

PRIME). Les objectifs de ce projet sont de permettre à l'élève ingénieur de 1^{ère} année de concevoir et réaliser une solution technique et de développer et d'appliquer des tests pour des éléments de la solution proposée. C'est un projet structuré avec un taux d'encadrement important qui permet d'aider les élèves à travailler en groupe.

De 2009 à 2015, j'ai encadré chaque année un groupe de 4/6 élèves en PRIME.

- **Mission Courte (M.C.)**. Les objectifs de ce projet sont de permettre à l'élève ingénieur de 2^{ème} année de « devenir un acteur du monde industriel en proposant une réponse adaptée à une problématique industrielle » dans le cadre d'une immersion d'un mois, en groupe, en entreprise. Ce projet est donc mené par un groupe d'environ 4 étudiants en fin de semestre 3 de la formation ingénieur.

J'ai encadré un groupe d'élèves en mission courtes en 2017,2018 et 2019.

- **Le Projet d'Ingénierie Scientifique et Technique (PIST)** est le projet d'ingénierie du semestre 4, et demande aux étudiants une forte autonomie dans l'acquisition des savoirs nécessaires à la résolution de la problématique posée. Basé sur des équipes de 4 à 8 personnes, il nécessite un renforcement du volet méthodologique et de la gestion de projet où les élèves sont acteurs de leur projet et deviennent autonomes.

De 2010-2018, J'ai encadré chaque année 1 à 2 groupes d'élèves en projet PIST.

- **Projet d'Option (Projet Procom)**. L'objectif du projet de semestre 5 est de développer les capacités des élèves à résoudre un problème d'ingénieur au sein d'une équipe. Chaque élève doit prouver son aptitude à mobiliser ses compétences et celles de ses partenaires en tenant compte du problème posé. Dans ce cadre, les élèves devront mettre en place une approche structurée de gestion de projet et mettre en oeuvre des compétences techniques fortes.

Depuis 2010, J'ai encadré chaque année un groupe d'élèves en projet d'option ou Procom.

- **Stage de Fin d'Étude (SFE)**. D'une durée de 6 mois, le Projet de Fin d'Étude est représentatif d'une mission d'ingénieur et doit présenter une réelle valeur ajoutée pour l'entreprise. Le projet évalue la capacité de l'élève à agir en situation

professionnelle réelle. Durant son stage, l'élève est amené à identifier, acquérir et mobiliser des compétences techniques et professionnels.

Depuis 2010, j'ai accompagné 2 à 3 élèves par année pour leur SFE.

Titre : Un parcours en biorobotique, du sens électrique à la robotique continue

Mot clés : de 3 à 6 mots clefs

Résumé : Les travaux présentés dans ce document s'articulent selon deux thématiques de recherche : la première porte sur une modalité de perception de l'environnement à savoir le sens électrique et la seconde, assez récente, qui porte sur une modalité plus mécanique à savoir la robotique continue. L'étude du sens électrique utilisé par des poissons tropicaux m'a conduit à m'inscrire dans la démarche de la bio-inspiration. La démarche détaillée dans ce manuscrit montre comment le sens électrique étudié par les roboticiens peut être un complément aux sens utilisés pour la perception en milieu sous-marin (vision, sonar). Cette compréhension se fait à travers une modélisation et des simulations, mais aussi à travers des collaborations multidisciplinaires à savoir, avec des biologistes et des physiciens. Ces collaborations, nous ont permis de passer d'une démarche ingénierie

à une démarche bio-inspirée et ainsi proposer des lois de contrôles de nos robots robustes aux changements de l'environnement. La thématique de la robotique continue, que j'ai investi depuis 2019, me permet de me familiariser avec la théorie des poutres Cosserat, la locomotion géométrique, la dynamique Lagrangienne des structures non-linéaires... Ma contribution est de participer à la conception et aux développements d'outils de modélisation et simulation efficaces pour la conception, l'analyse et la commande de nouveaux concepts de robots continus (médicaux, parallèles, à câbles ...). Ces modèles et simulateurs seront aussi utilisés en bio-robotique, pour modéliser la locomotion d'animaux allongés continus, comme les serpents et les poissons. L'idée est ici de comprendre les performances de ces animaux afin de les reproduire sur des artefacts robotiques.

Title: A trajectory in biorobotics from electric sense to continuous robotics

Keywords: de 3 à 6 mots clefs

Abstract: The work presented in this document is articulated according to two research themes: the first one concerns a modality of perception of the environment, i.e. the electric sense, and the second one, quite recent, which concerns a more mechanical modality, i.e. continuous robotics. The study of the electric sense used by tropical fishes, led me to join the bio-inspiration approach. The approach detailed in this manuscript shows how the electrical sense studied by roboticists can be a complement to the senses used for perception in underwater environment (vision, sonar). This understanding is done through modeling and simulations but also through multidisciplinary collaborations with biologists and physicists. These collaborations have allowed us to move from an engineering ap-

proach to a bio-inspired approach and thus propose control laws for our robots that are robust to environmental changes. The theme of continuous robotics, which I have invested since 2019, allows me to become familiar with the theory of Cosserat beams, geometric locomotion, Lagrangian dynamics of non-linear structures ... My contribution is to participate in the design and development of efficient modeling and simulation tools for the design, analysis and control of new concepts of continuous robots (medical, parallel, cabled ...). These models and simulators will also be used in bio-robotics, to model the locomotion of elongated continuous animals, such as snakes and fish. The idea here is to understand the performance of these animals in order to reproduce them on robotic avatar.