



HAL
open science

Suivi de chemin 3D de nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds

Ali Oulmas

► **To cite this version:**

Ali Oulmas. Suivi de chemin 3D de nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds. Automatique / Robotique. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS070 . tel-02355957

HAL Id: tel-02355957

<https://theses.hal.science/tel-02355957>

Submitted on 8 Nov 2019

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

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

Thèse

présentée à

Sorbonne Université

par

Ali OULMAS

pour obtenir le diplôme de

Doctorat de Sorbonne Université

Spécialité : Robotique

Suivi de chemin 3D de nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds

soutenance prévue le 11 juillet 2018

JURY

Pr.	M. SITTI	Directeur de l'institut Max Planck, Stuttgart	Président du jury
Pr.	Y. HADDAB	Professeur à l'université de Montpellier	Rapporteur
DR.	R. LENAIN	Directeur de Recherche à Irstea, Aubière	Rapporteur
Pr.	S. REGNIER	Directeur de thèse Professeur à Sorbonne Université	Examineur
Pr.	N. ANDREFF	Co-directeur de thèse Professeur à l'université de Franche-Comté	Examineur
Pr.	P. MORIN	Professeur à Sorbonne Université	Examineur
Dr.	T. XU	Maître de conférences à Chinese Academy of Sciences, Shenzhen	Invitée

Suivi de chemin 3D de nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds

Résumé

Les microrobots magnétiques, qui nagent en utilisant des modes de propulsion bio-inspirés, apparaissent très prometteurs pour la manipulation et la caractérisation d'objets à l'échelle microscopique dans des environnements confinés et très restreints, contrairement aux méthodes de micromanipulation classiques. La littérature propose une variété de microrobots avec des formes géométriques et des propriétés magnétiques différentes. Les commandes en mouvement proposées restent cependant simples, peu précises et insuffisamment robustes pour la réalisation de tâches réelles. De plus, il subsiste une incertitude sur le fait que tous ces micronageurs artificiels peuvent accomplir les mêmes tâches avec une performance égale. L'objectif de cette thèse consiste alors à proposer :

1. d'une part des commandes de mouvement génériques par asservissement visuel dans l'espace pour tous les types de micronageurs avec des contraintes non holonomes afin d'améliorer les performances de ces micronageurs.
2. d'autre part un ensemble de critères de comparaison entre des robots avec une topologie ou un mode de propulsion différents pour le choix du micronageur le plus performant pour réaliser une tâche particulière.

Des lois de commande de suivi de chemin dans l'espace sont synthétisées et validées expérimentalement sur des nageurs hélicoïdal et flexible sous différentes conditions. Ces robots évoluent dans un fluide à faible nombre de Reynolds, imitant respectivement le mécanisme de locomotion des bactéries et des spermatozoïdes et sont actionnés par un champ magnétique uniforme. Ces deux classes de nageurs possèdent une géométrie et un mode d'actionnement différents. Leur performance sont ainsi comparées en fonction de la tâche à réaliser, de l'environnement dans lequel ils évoluent et des contraintes de fabrications.

Mots clefs : Manipulation magnétique, micronageurs hélicoïdal et flexible, faible nombre de Reynolds, suivi de chemin 3D, asservissement visuel

3D path following of magnetic swimmers at low Reynolds number

Abstract

Magnetic microrobots, which swim using bio-inspired propulsion modes, appear very promising for manipulation and characterization of objects at microscopic scale inside confined and very restricted environments, unlike conventional micromanipulation methods. The literature proposes a variety of microrobots with different geometric shapes and magnetic properties. However, the motion controls proposed remain simple, imprecise and insufficiently robust for performing real tasks. In addition, there is still uncertainty that all these artificial microswimmers can accomplish the same tasks with equal performance. The objective of this thesis is thus to propose :

1. generic motion controls by visual servoing in space for all kinds of microswimmers with nonholonomic constraints in order to improve the microswimmer performances.
2. a set of comparison criteria between robots with a different topology or propulsion mode for choosing the most efficient microswimmer in order to perform a specific task.

Path following control laws in space are synthesized and experimentally validated on helical and flexible swimmers under different conditions. These robots operate in low Reynolds number fluid, imitating respectively bacteria and spermatozoa and are actuated with uniform magnetic field. These two classes of swimmers have different actuation mode and geometric shape. Their performances are thus compared according to the task to be performed, the environment in which the robots evolve and the manufacturing constraints.

Keywords : Magnetic manipulation, flexible and helical microswimmers, low Reynolds number, 3D path following, visual servoing

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste d'abréviations	xiii
Liste des symboles	xv
Introduction générale	1
1 Locomotion et manipulation sans contact dans le micromonde	5
1 Systèmes microrobotiques de manipulation à distance	6
1.1 Actionnement sans contact	7
1.2 Localisation à l'échelle microscopique	9
1.3 Microrobots	10
2 Locomotion à l'échelle microscopique	13
2.1 Équations Navier-Stokes	13
2.2 Locomotion à faible nombre de Reynolds	14
2.3 Microorganismes	15
2.4 Efforts hydrodynamiques	17
3 Manipulation magnétique	17
3.1 Aimantation	17
3.2 Efforts magnétiques	18
3.3 Systèmes à actionnement magnétique	19
4 Robots nageurs magnétiques	20
4.1 Nageurs flexibles	21
4.1.1 Modélisation	21
4.1.2 Conception & fabrication	22
4.2 Nageurs hélicoïdaux	24
4.2.1 Modèle de propulsion 1D	24
4.2.2 Modèle de propulsion 3D	25

	4.2.3	Conception & fabrication	26
	4.3	Applications potentielles	27
5		Commande de mouvement des microrobots magnétiques	29
	5.1	État de l'art	29
	5.2	Enjeux de commande	33
6		Synthèse générale & objectifs de la thèse	33
2		Nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds	37
1		Robots nageurs à faible nombre de Reynolds	38
2		Système de manipulation magnétique	39
	2.1	Bobines de Helmholtz	39
	2.2	Dispositif expérimental	39
	2.3	Notations cinématiques	40
	2.3.1	Repère global	41
	2.3.2	Repère du robot nageur	42
	2.4	Commande magnétique	42
	2.5	Équations dynamiques	44
3		Nageur hélicoïdal	45
	3.1	Description du robot hélicoïdal millimétrique	45
	3.2	Actionnement magnétique	46
	3.3	Caractérisation & optimisation	49
	3.4	Variation du nombre de flagelle	49
	3.5	Variation du nombre de flagelle en considérant le même volume	51
4		Nageur flexible	53
	4.1	Nombre de sperme	53
	4.2	Fabrication	54
	4.3	Propulsion et guidage par couple magnétique	54
	4.4	Caractérisation du robot flexible	57
	4.4.1	Réponse en fréquence	57
	4.4.2	Réponse en amplitude	58
5		Conclusion	61
3		Modélisation et commande 3D en boucle fermée	63
1		Introduction	64
2		Commande de mouvement des systèmes non-holonomes	64
	2.1	Système non-holonome	64
	2.2	Suivi de chemin versus suivi de trajectoire	65
	2.3	État de l'art des commandes de mouvement des systèmes non-holonomes	66
3		Modélisation cinématique et commande par une représentation scalaire	68
	3.1	Notations pour le suivi de chemin 3D	68
	3.2	Modèle cinématique 3D du robot nageur	71
	3.2.1	Translation	71
	3.2.2	Rotation	72
	3.2.3	Modèle cinématique complet dans le repère de Serret-Frénet	73
	3.3	Forme chaînée et loi de commande	74
	3.3.1	Forme chaînée et changements de variable	74
	3.3.2	Loi de commande	79
	3.4	Actionnement	80

4	Modélisation cinématique et commande par une approche géométrique	81
4.1	Notations et définitions	81
4.2	Modélisation	82
4.2.1	Vecteur d'état	82
4.2.2	Modèle cinématique	83
4.3	Loi de commande	84
4.4	Actionnement	88
5	Conclusion	89
4	Phase expérimentale	91
1	Suivi de chemin 3D	92
1.1	Droite spatiale	93
1.2	Hélice	94
1.3	Sinusoïde inclinée	96
1.4	Découplage suivi de chemin et profil de vitesse	98
1.5	Réglage des gains de commande	100
2	Nage en boucle fermée en présence de perturbations	100
2.1	Impact de la viscosité du fluide	101
2.2	Effets de bord	102
2.3	Compensation du poids du nageur	104
2.4	Comparaison boucle fermée vs. boucle ouverte	107
3	Critères de comparaison entre deux types différents de nageurs	108
3.1	Robot avec une queue flexible	108
3.2	Robot hélicoïdal vs. robot flexible	111
3.2.1	Comparaison de nageurs topologiquement différents	112
3.2.2	Rayon de courbure	112
3.2.3	Critère de viscosité du fluide	115
3.3	Conclusion	117
4	Commande vectorielle	118
4.1	Rapidité	118
4.2	Précision	119
5	Conclusion	121
	Conclusion et perspectives	123
A	Vitesses angulaires relatives	127
1	Notations	127
2	Calcul de la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B	127
3	Calcul des dérivées des erreurs d'orientation en fonction de la vitesse angulaire relative entre \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_F	128
4	Calcul de la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B pour la commande vectorielle	129
B	Compléments de démonstration de la commande vectorielle	131
1	Projection du modèle cinématique vectoriel dans le plan horizontal	131
2	Démonstration de (3.76)	133
	Bibliographie	135

Table des figures

1.1	Un système microrobotique de manipulation à distance est généralement composé d'un moyen d'actionnement et de détection externes, d'un ordinateur (i.e. contrôleur) pour le traitement des données et de microrobots. Leurs formes dépendent de l'environnement dans lequel ils évoluent, de l'actionnement, du moyen de localisation et des tâches à réaliser.	6
1.2	Comparaison entre les sources optique, acoustique et magnétique.	8
1.3	(a) Détection de bactéries dans le tractus gastro-intestinal d'une souris en utilisant l'imagerie par ultrasons Bourdeau et al. (2018) . (b) Système magnétique pour la manipulation d'une microparticule paramagnétique en boucle fermée en utilisant une sonde à ultrasons comme retour visuel (Khalil et al., 2014b).	10
1.4	Le nombre de Reynolds de quelques nageurs.	14
1.5	(a) Un mouvement réciproque d'une coquille de Saint-Jacques. Ce mouvement n'est pas adapté pour la locomotion dans un fluide à faible nombre de Reynolds. (b) Le robot nageur de Purcell (1977) qui exécute un mouvement non-réciproque et qui lui permet de se déplacer à $Re \ll 1$	15
1.6	Microorganismes utilisant un mouvement non-réciproque. (a) La fameuse bactérie <i>E. coli</i> utilise le mouvement du tire bouchon. (b) Un spermatozoïde utilise les oscillations de son flagelle.	16
1.7	(a) Un mouvement réciproque d'un micronageur. La force exercée par une partie du flagelle sur le fluide est représentée par une flèche verte dans le premier cycle et par une flèche rouge dans le deuxième cycle. Le micronageur ne se déplace pas car la force appliquée durant le premier cycle est compensée dans le deuxième cycle. (b) Un spermatozoïde utilise des oscillations qui se propagent de façon non-réversible de sa tête vers sa queue (i.e. dans une seule direction) pour produire une force de propulsion (Alvarez et al., 2014).	16
1.8	(a) Système à huit électroaimants capable de générer des forces et des couples magnétiques afin de contrôler un microrobot magnétique dans l'espace (Diller et al., 2014). Il est composé de A : la caméra de dessus, B : la caméra de côté, C : les bobines et D : l'espace de travail. (b) Robot manipulateur avec un aimant permanent comme organe terminal (Ciuti et al., 2010).	19

1.9	Génération d'un champ magnétique uniforme en utilisant trois paires de bobine avec la configuration d'Helmholtz (Mahoney <i>et al.</i> , 2011) (a) et la rotation synchronisée de deux dipôles magnétiques (Mahdy <i>et al.</i> , 2017) (b).	20
1.10	Les robots nageurs flexibles dans la littérature. (a) Schéma d'un nageur flexible constitué d'une chaîne de microparticules liées par des fibres d'ADN (Dreyfus <i>et al.</i> , 2005). Un globule rouge est ensuite attaché à une extrémité de cette chaîne et qui représente la tête. (b) Micronageur flexible à base de nano-fils (Jang <i>et al.</i> , 2015). (c) Robot nageur millimétrique avec un mouvement non-réciproque dans un fluide à faible nombre de Reynolds (Espinosa-Garcia <i>et al.</i> , 2013). (d) Micronageur fabriqué par électrofiltrage (Khalil <i>et al.</i> , 2016b).	23
1.11	Schéma d'un nageur avec une queue hélicoïdale rigide. F et T représentent respectivement la force et couple non-fluidiques tandis que v et ω sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire générées. Les paramètres géométriques sont : σ le rayon de la queue hélicoïdale et θ_H	24
1.12	Le repère des coordonnées de la queue hélicoïdale. L'origine de ce repère est le centre de l'hélice. L'axe \mathbf{x}_H est suivant l'axe principal de l'hélice. Le vecteur \mathbf{p} est la position du petit segment ds sur la queue.	26
1.13	Les microrobots nageurs hélicoïdaux dans la littérature. (a) Nageurs hélicoïdaux fabriqués par électrodéposition de palladium, puis revêtus de nickel et d'argent en utilisant l'évaporation par faisceau d'électrons (Hoop <i>et al.</i> , 2016). (b) Micronageurs hélicoïdaux avec des géométries de tête différentes conçus en utilisant la lithographie 3D par laser (Huang <i>et al.</i> , 2014a). (c) Fabrication de microtransporteurs en utilisant la lithographie 3D laser et le revêtement d'une couche magnétique avec l'évaporation par faisceau d'électrons (Huang <i>et al.</i> , 2015). La vue en coupe montre les composants du micronageur.	27
1.14	(a) Le soin de la fertilité chez l'homme en utilisant des microhélices magnétiques (Medina-Sánchez <i>et al.</i> , 2016). (b) La tâche consiste à attraper le spermatozoïde immobile (i), le transporter (ii), l'implanter dans l'ovule (iii) et se libérer (iv).	28
1.15	Proposition de Barbot (2016) pour l'utilisation d'un microrobot hélicoïdal comme un capteur de force dans une puce microfluidique. a et b sont les coefficients de propulsion et dépendent de la géométrie du robot et des caractéristiques du fluide.	29
1.16	Micromanipulation en contact direct avec les microobjets. Le microrobot assemble quatre microobjets dans un canal étroit (Pieters <i>et al.</i> , 2015).	29
1.17	Un robot hélicoïdal suit une trajectoire "U-turn" dans le plan vertical en utilisant une commande basée modèle avec une vitesse d'avance constante (Mahoney <i>et al.</i> , 2011).	30
1.18	Schéma fonctionnel d'une commande en boucle ouverte d'un microrobot magnétique. Dans ce schéma, Position* et Orientation* représentent les positions et les orientations désirées dans l'espace à atteindre par le nageur.	31
1.19	Schéma fonctionnel d'une commande de mouvement en boucle fermée d'un microrobot magnétique non-holonome.	31
1.20	Un robot flexible suit une commande de mouvement point à point actionné par un champ magnétique oscillant (Khalil <i>et al.</i> , 2014d).	32
2.1	(a) Un schéma représentant une paire de bobines en configuration de Helmholtz, et (b) le champ magnétique créé est uniforme dans l'espace entre les deux bobines (vue de dessus).	39

2.2	Système de manipulation magnétique composé de trois paires de bobine de Helmholtz, deux caméras et un endoscope.	40
2.3	L'architecture globale du système de manipulation magnétique. L'ordinateur envoie les tensions électriques nécessaires aux amplificateurs pour générer un champ magnétique \mathbf{B} en utilisant une carte E/S. Les amplificateurs sont alimentés par une source de courant, et convertissent les tensions en courants électriques à envoyer à chaque paire de bobines. Le prototype représente les bobines de Helmholtz qui génèrent le champ magnétique désirée \mathbf{B} . Enfin, en utilisant les deux caméras, la position et l'orientation du robot nageur sont récupérées en utilisant des algorithmes de suivi visuel (ViSP, Marchand et al., 2005).	41
2.4	Le repère global $\mathcal{F}_u = \{O, \mathbf{x} \mathbf{y} \mathbf{z}\}$ est défini suivant les axes principaux des trois paires de bobines avec la configuration de Helmholtz.	41
2.5	Le schéma illustre le repère du nageur mobile $\mathcal{F}_B = \{\mathbf{p}_G, \mathbf{x}_B \mathbf{y}_B \mathbf{z}_B\}$ ainsi que les angles de direction et d'inclinaison respectivement θ_d et θ_i permettant au nageur de se déplacer dans l'espace 3D. Dans cette figure, le robot nageur est illustré par un robot hélicoïdal mais il peut être remplacé par un nageur flexible.	43
2.6	Dans un champ magnétique uniforme, le couple magnétique \mathbf{T}_m aligne le moment magnétique du robot nageur avec le champ magnétique appliqué.	44
2.7	Schéma-bloc général de l'actionnement magnétique du robot nageur en boucle fermée. Les vecteurs \mathbf{v} et $\mathbf{\Omega}$ sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire de pilotage du robot nageur, les vecteurs \mathbf{p}_G et \mathbf{x}_B représentent respectivement la position et l'orientation du robot dans l'espace tandis que \mathbf{I} est le courant électrique à envoyer au système physique.	44
2.8	Le robot hélicoïdal réel. Ses dimensions sont : 1.5 mm de diamètre, 4 mm de pas avec 3.5 le nombre de tours.	46
2.9	Propulsion du robot nageur hélicoïdal avec un champ magnétique tournant. Le moment magnétique du nageur a tendance à s'aligner avec les lignes du champ magnétique tournant. L'interaction du nageur avec le fluide visqueux lui permet de convertir son mouvement rotatif en un mouvement linéaire (propulsion).	47
2.10	Le champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s du nageur dépend de la projection du produit vectoriel ($\mathbf{B}_d \times \mathbf{\Omega}$) sur l'axe principal du robot \mathbf{x}_B . Il doit être toujours de signe opposé pour contribuer au pilotage du nageur.	48
2.11	Actionnement sans contact du nageur hélicoïdal en utilisant le champ magnétique.	49
2.12	Des nageurs hélicoïdaux (réels et modèles CAO) avec plusieurs flagelles rigides. Un nageur hélicoïdal avec un flagelle (a), deux flagelles (b), trois flagelles (c) et quatre flagelles (d).	50
2.13	Les dimensions du nageur hélicoïdal pour le cas d'un double flagelle. Les valeurs sont en millimètres (mm).	50
2.14	Les vitesses d'avance des différents nageurs hélicoïdaux, émergés dans du glycerol pur avec un champ magnétique de 10 mT, en fonction de la fréquence de rotation du champ magnétique. L'angle d'inclinaison des nageurs est fixé à 30° pour compenser le poids des robots. Chaque mesure dans ce graphe représente la moyenne et l'écart type de trois tests avec le même nageur.	51
2.15	Des nageurs hélicoïdaux (réels et modèles CAO) avec plusieurs flagelles rigides ayant le même volume d'environ $11.8 \text{ mm}^3 \pm 0.1 \text{ mm}^3$. Un nageur hélicoïdal avec un flagelle (a), deux flagelles (b), trois flagelles (c) et quatre flagelles (d).	52

2.16	Les dimensions du nageur avec un seul flagelle hélicoïdal rigide (Les valeurs sont en millimètres). La largeur de la queue du robot avec un flagelle est deux fois plus grande que celle du robot avec un flagelle présenté sur la Figure 2.12.	52
2.17	Les vitesses d'avance des différents nageurs hélicoïdaux avec plusieurs flagelles rigides ayant le même volume, en fonction de la fréquence de rotation du champ magnétique. L'angle d'inclinaison des nageurs est fixé à 30° pour compenser le poids des robots. La moyenne et l'écart type sont calculés pour trois tests de mesure avec le même nageur.	53
2.18	Le nageur flexible est composé d'une queue flexible noire sur laquelle est attaché un aimant permanent. Ce dernier est placé de manière à avoir la magnétisation le long de l'axe principal du robot.	55
2.19	Actionnement du robot flexible avec un champ magnétique oscillant. Le moment magnétique oscille en synchronisation avec le champ magnétique appliqué. Grâce aux forces générées par l'interaction avec le fluide visqueux, la queue se tord et ainsi génère une force de propulsion.	55
2.20	Le schéma-bloc du contrôleur magnétique du nageur flexible.	56
2.21	Pour différentes fréquences d'oscillation, la forme de la queue du robot flexible (a) et la moyenne de la vitesse d'avance dans le plan horizontal (b). L'angle d'inclinaison est fixé à 50° afin de compenser le poids du nageur. Les barres d'erreur présentent l'écart type de la moyenne de la vitesse d'avance du nageur flexible pour quatre tests de mesure.	57
2.22	(a) L'amplitude des oscillations est proportionnel à l'angle θ et (b) La réponse en amplitude d'oscillation du nageur flexible. La caractérisation est réalisée avec un angle d'inclinaison de 50° et une fréquence d'oscillation de 1.2 Hz. Ces résultats représentent la moyenne et l'écart type de quatre mesures de vitesse pour chaque amplitude du champ magnétique.	59
2.23	La réponse du robot flexible à un échelon de 70° . L'angle de direction θ_d est calculé grâce à la moyenne d'angle des oscillations de l'axe principal du robot nageur flexible.	59
2.24	La réponse indicielle à un angle de direction de 70° avec différentes amplitudes d'oscillation. L'angle d'inclinaison et la fréquence d'oscillation sont restés fixes durant les expériences.	60
2.25	Le temps de réponse et l'erreur statique du robot flexible à un angle de direction de 70°	60
3.1	Comparaison entre suivi de chemin et suivi de trajectoire pendant les perturbations.	66
3.2	Simulation d'un suivi de chemin 3D d'une trajectoire rectiligne (a) et d'une trajectoire hélicoïdale (b) en utilisant un véhicule sous-marin autonome (Encarnacao et Pascoal, 2000).	67
3.3	Suivi de chemin 3D d'un robot nageur. Dans cette image, le robot nageur non-holonome est représenté par un robot nageur hélicoïdal mais il peut être remplacé par un robot nageur flexible ou autre.	68
3.4	Représentation des différents repères utilisés pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur dans le plan horizontal.	69
3.5	Représentation des différents repères utilisés pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur dans le plan vertical.	70
3.6	Principe du suivi de chemin 3D consiste à minimiser les erreurs de distance d_y et d_z ainsi que les erreurs d'orientation θ_{de} et θ_{ie}	71

3.7	Linéarisation du modèle cinématique (3.24) en utilisant la forme chaînée.	75
3.8	Schéma-bloc pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur. Le contrôleur magnétique dépend de la propulsion choisie (voir chapitre 2 pour l'hélice ou le flagelle).	80
3.9	Les erreurs de distance \mathbf{d} et d'orientation $\boldsymbol{\eta}_e$ utilisées dans l'approche géométrique pour le suivi de chemin 3D du robot nageur.	82
3.10	Les vecteurs de vitesses linéaires et angulaires du robot nageur et de la tangente du chemin de référence.	82
3.11	Schéma-bloc de la commande vectorielle. Le contrôleur magnétique dépend de la propulsion choisie (voir chapitre 2 pour l'hélice ou le flagelle).	89
4.1	Suivi d'une droite spatiale en utilisant le nageur hélicoïdal. Les gains de commande sont réglés comme suit : $k_{t1} = 0.01$, $k_{d1} = 0.2$, $k_{t2} = 0.2$ et $k_{d2} = 0.3$	93
4.2	Projection du chemin réalisé par le robot hélicoïdal dans les plans horizontal et vertical.	94
4.3	La reconstruction 3D de la trajectoire réalisée par le nageur hélicoïdal en suivant une courbe d'une forme d'une hélice avec des gains de commande de $k_{t1} = 0.004$, $k_{d1} = 0.05$, $k_{t2} = 0.3$ et $k_{d2} = 0.09$	95
4.4	Projection du chemin hélicoïdal réalisé par le nageur dans les plans horizontal (a) et vertical (b).	95
4.5	L'évolution des erreurs de distance (a) et d'orientation (b) durant le suivi du chemin hélicoïdal.	96
4.6	Suivi de chemin 3D d'une sinusoïde inclinée en utilisant le robot nageur hélicoïdal. Les gains de commande sont : $k_{t1} = 0.04$, $k_{d1} = 0.05$, $k_{t2} = 0.05$ et $k_{d2} = 0.08$	97
4.7	Projection du chemin réalisé par le robot hélicoïdal dans les plans horizontal et vertical.	97
4.8	Variation de la vitesse du robot nageur hélicoïdal en utilisant différents profils de fréquence comme un signal rectangulaire (a) et un signal arbitraire continu (b).	98
4.9	La fréquence de rotation du nageur hélicoïdal est variée en utilisant le décalage de fréquence (ou bien modulation par changement de phase) pour assurer la continuité du signal magnétique rotatif et éviter les changements brusques de phase. Ces derniers perturbent le mouvement rotatif du nageur.	99
4.10	Les chemins réalisés par le robot nageur pour différents gains de commande dans les plans horizontal (a) et vertical (b).	100
4.11	Les moyennes et les écarts types des erreurs de distance et d'orientation lors du suivi de la trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant trois différentes viscosités. Le nombre de suivi de chemin est de trois pour chaque viscosité.	101
4.12	Effet d'une surface solide sur la performance de l'algorithme du suivi de chemin avec le nageur hélicoïdal. (a) Schéma explicatif de l'expérience réalisée. (b) La moyenne et l'écart type de l'erreur latérale d_y lors du suivi de chemin avec le nageur hélicoïdal pour différentes distances δ par rapport à la surface solide.	103
4.13	L'interaction entre le robot nageur et la surface du fond du récipient. (a) Le suivi de chemin réalisé par le nageur. (b) Les erreurs de distance lors du suivi de chemin.	103
4.14	L'interaction entre le robot nageur et la paroi latérale du récipient. (a) La trajectoire réalisée par le nageur dans l'espace. (b) Les erreurs de distance lors du suivi de chemin.	104
4.15	Les vitesses horizontal (a) et vertical (b) du nageur hélicoïdal estimées en fonction de différents angles d'inclinaison en utilisant la matrice de propulsion du robot nageur hélicoïdal.	105

4.16	Suivi d'une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant le nageur hélicoïdal avec un angle de compensation d'inclinaison de 45° (a) et l'évolution de l'angle d'inclinaison du nageur hélicoïdal (b).	105
4.17	Les trajectoires du robot hélicoïdal en utilisant la commande en boucle fermée avec différents angles de compensation d'inclinaison.	106
4.18	La moyenne et l'écart type des erreurs de distance (a) et d'orientation (b) dans le plan vertical en fonction de l'angle de compensation d'inclinaison.	107
4.19	Comparaison entre les commandes en boucle fermée et en boucle ouverte avec le nageur hélicoïdal.	107
4.20	Schéma-bloc de l'algorithme utilisé pour contrôler les mouvements du robot nageur dans l'espace. Pour passer de la commande de mouvement du nageur hélicoïdal à celle du nageur flexible, il suffit d'adapter le mode d'actionnement propre au robot avec un champ magnétique oscillant plutôt que rotatif.	109
4.21	Suivi de chemin 3D d'une trajectoire arbitraire avec le nageur flexible. Les gains de commande sont réglés comme suit : $k_{d1} = 0.5$, $k_{d1} = 0.2$, $k_{d1} = 0.4$ et $k_{d1} = 0.1$.	109
4.22	Suivi de chemin 3D d'une trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant le nageur flexible.	110
4.23	Projection des chemins réalisés par le nageur flexible dans les plans horizontal et vertical avec les commandes en boucle ouverte et en boucle fermée. La trajectoire désirée est une courbe sinusoïdale inclinée.	110
4.24	Suivi de cercles de rayons variant de 1 mm à 5 mm en utilisant le robot flagelle. Les gains de commande et l'angle d'inclinaison sont maintenus constants. La fréquence d'oscillation est de 1.4 Hz. Les croix sur le graphe représentent les points de départ de chaque chemin.	113
4.25	Suivi de cercles de rayons variant de 2 mm à 10 mm en utilisant le robot hélicoïdal. Les gains de commande et l'angle d'inclinaison sont maintenus constants. La fréquence de rotation est de 2.8 Hz. Les croix sur le graphe représentent les points de départ de chaque chemin.	113
4.26	(a) Les erreurs quadratiques de distance d_y lors du suivi de chemin des différentes courbes circulaires pour les nageurs hélicoïdal et flexible. (b) Une comparaison entre les deux nageurs en normalisant les rayons de courbure des chemins de référence et les moyennes quadratiques par la longueur du robot utilisé.	114
4.27	Les chemins réalisés par les nageurs hélicoïdal et flexible en suivant une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant un fluide avec une viscosité élevée.	115
4.28	Les chemins réalisés par les nageurs hélicoïdal et flexible en suivant une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant un fluide avec une viscosité faible.	116
4.29	Les vitesses verticales des nageurs hélicoïdal et flexible pour différents angles d'inclinaison, en utilisant un fluide de viscosité faible. Ce graphe représente la moyenne et l'écart type de quatre mesures de vitesse pour chaque angle d'inclinaison des deux nageurs.	117
4.30	Comparaison entre les robots nageurs hélicoïdal et flexible avec différents critères.	118
4.31	Comparaison entre les commandes vectorielle et scalaire lors du suivi d'une droite spatiale avec une altitude constante en utilisant le nageur flexible. (a) Les chemins réalisés par le nageur dans le plan horizontal. (b) Les chemins réalisés par le nageur dans le plan vertical. Lors de ces expériences, les gains de commande des deux contrôleurs sont maintenus à 0.5.	119

4.32	Suivi d'une sinusoïde inclinée en utilisant le nageur flexible avec les deux commandes vectorielle et scalaire. Projection des chemins réalisés par le nageur dans les plans horizontal (a) et vertical (b).	120
4.33	Les angles de pilotage dans les plans horizontal (a) et vertical (b) lors du suivi de la trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant les lois de commande vectorielle et scalaire.	120
4.34	Les étapes de fabrication du microrobot nageur hélicoïdal : I/ Dépôt de la résine sur une plaque de verre, II/ Polymérisation focalisée , III/ Développement et IV/ Magnétisation en utilisant un fil de fer.	125
B.1	Le tracé des fonctions $f_1(\ \eta_e\) = \frac{1}{\sqrt{1-\ \eta_{el}\ ^2}}$, $f_2(\ \eta_e\) = 4\frac{\ \eta_{el}\ ^2}{\sqrt{1-\ \eta_{el}\ ^2}}$ et $8L$	134

Abréviations	Description
ABF	A rtificial B acterial F lagella
AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
bl	body length
DDL	D egrés D e L iberté
IRM	I magerie par R ésonance M agnétique
JHM	J anus H elical M icroswimmer
LTI	L inéaires à T emps I nvariant
LTV	L inéaires à T emps V ariant
PID	P roportionnel I ntégral D érivé
RMS	R oot M ean S quare
RTS	R oll T o S wim microrobot
SD	S tandard D eviation
ViSP	V isual S ervoing P latform

Symboles	Description
$\mathcal{C}(s)$	Le chemin de référence
s	L'abscisse curviligne du chemin de référence
c	La courbure du chemin de référence
τ	La torsion du chemin de référence
$\mathbf{c}(s) = (\tau, 0, c)^T$	Le vecteur comportant la courbure et la torsion du chemin
$\mathcal{F}_u = \{O, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}\}$	Le repère global (ou le repère monde)
\mathbf{p}_G	La position du centre de masse du nageur
\mathbf{p}_S	La position du point le plus proche de \mathbf{p}_G sur le chemin de référence
$\mathcal{F}_B = \{\mathbf{x}_B, \mathbf{y}_B, \mathbf{z}_B\}$	Le repère lié au corps du robot, centré en \mathbf{p}_G
\mathbf{x}_B	L'axe principal du nageur (i.e. orientation du robot)
\mathbf{x}_B^*	L'orientation désirée à atteindre
$\mathcal{F}_d = \{\mathbf{x}_d, \mathbf{y}_d, \mathbf{z}_d\}$	Le repère des perturbations, centré en \mathbf{p}_G
$\mathcal{F}_F = \{\mathbf{x}_F, \mathbf{y}_F, \mathbf{z}_F\}$	Le repère de Serret-Frénet le long du chemin de référence, centré en \mathbf{p}_S
$\mathbf{x}_F, \mathbf{y}_F$ et \mathbf{z}_F	La tangente, la normale et la binormale au chemin de référence, resp.
d_y	La distance horizontale entre le centre de mass du robot et le point le plus proche sur le chemin de référence
d_z	La distance verticale entre le centre de mass du robot et le point le plus proche sur le chemin de référence
\mathbf{d}	Le vecteur de distance entre le le centre de gravité du nageur et le point le plus proche sur le chemin de référence
δ_{θ_d}	L'angle compensateur de direction (compensation lacet)
δ_{θ_i}	L'angle compensateur d'inclinaison (compensation tangage)
θ_d	L'angle de direction du robot dans le plan horizontal
θ_i	L'angle d'inclinaison du robot dans le plan vertical
θ_{ds}	L'angle de la tangente du chemin de référence dans le plan horizontal
θ_{is}	L'angle de la tangente du chemin de référence dans le plan vertical
θ_{de}	L'erreur d'angle de direction entre le robot et le chemin de référence
θ_{ie}	L'erreur d'angle d'inclinaison entre le robot et le chemin de référence
$\boldsymbol{\eta}_e$	Le vecteur d'erreur d'orientation, défini comme le produit vectoriel entre \mathbf{x}_d et \mathbf{x}_F
${}^j\mathbf{p}_G$	La position du centre de masse du robot exprimée dans le repère \mathcal{F}_j
${}^j\mathbf{p}_S$	La position \mathbf{p}_S exprimée dans le repère \mathcal{F}_j
\mathbf{p}	Un point dans l'espace
v	L'amplitude de la vitesse linéaire totale du robot par rapport au repère global
v_p	L'amplitude de la vitesse de propulsion du robot le long de son axe principal
${}^j\mathbf{v}_i$	La vitesse linéaire du repère \mathcal{F}_i par rapport au repère global, exprimée dans le repère \mathcal{F}_j
${}^d\mathbf{v}_d = (v, 0, 0)^T$	La vitesse linéaire du repère \mathcal{F}_d par rapport au repère \mathcal{F}_u , exprimée dans \mathcal{F}_d

${}^B\mathbf{v}_B = (v_p, 0, 0)^T$	La vitesse linéaire de propulsion du nageur par rapport au repère \mathcal{F}_u , exprimée dans \mathcal{F}_B
${}^F\mathbf{v}_F = (\dot{s}, 0, 0)^T$	La vitesse linéaire du repère \mathcal{F}_F par rapport au repère global, exprimée dans \mathcal{F}_F
${}^F\dot{\mathbf{p}}_G = (0, \dot{d}_y, \dot{d}_z)^T$	La vitesse linéaire du robot (i.e. la dérivée temporelle de \mathbf{p}_G) dans le repère de Frénet \mathcal{F}_F
f	La fréquence de rotation ou d'oscillation du robot
${}^j\boldsymbol{\omega}_i$	La vitesse angulaire du repère \mathcal{F}_i par rapport au repère global, exprimée dans le repère \mathcal{F}_j
${}^j\boldsymbol{\omega}_{j,i}^r$	La vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_j et \mathcal{F}_i , exprimée dans le repère \mathcal{F}_j
$\boldsymbol{\Omega} = (0, \Omega_y, \Omega_z)^T$	La vitesse angulaire de pilotage du repère \mathcal{F}_B par rapport au repère global
$\boldsymbol{\Omega}_p = (\Omega_x, 0, 0)^T$	La vitesse angulaire de propulsion du nageur par rapport au repère global
$\boldsymbol{\omega}_d$	La vitesse angulaire du repère de perturbation par rapport au repère global
$\boldsymbol{\omega}_F$	La vitesse angulaire du repère du chemin de référence par rapport au repère global
$\boldsymbol{\omega}_e$	Le vecteur d'erreur de vitesse angulaire entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_F
${}^F\boldsymbol{\omega}_F = (\tau\dot{s}, 0, c\dot{s})^T$	La vitesse angulaire du repère \mathcal{F}_F par rapport au repère \mathcal{F}_u , exprimée dans \mathcal{F}_F
${}^j\mathbf{R}_i$	La matrice de rotation du repère \mathcal{F}_i au repère \mathcal{F}_j
$\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_y$ et \mathbf{R}_z	Les matrices de rotation autour des axes \mathbf{x} , \mathbf{y} et \mathbf{z} , resp.
$\mathbf{Sk}(\cdot)$	La matrice antisymétrique
\mathbf{q}	Le vecteur d'état
\mathbf{m}	Le vecteur de commande
z_1 à z_5	Les variables du vecteur d'état \mathbf{z}_c de la forme chaînée
u_1 à u_3	Les variables du nouveau vecteur de commande \mathbf{u}_c de la forme chaînée
L et \dot{L}	La fonction de Lyapunov et sa dérivée temporelle, resp.
k_{d1}, k_{t1}, k_{d2} et k_{t2}	Les gains de la commande scalaire
k_1 et k_2	Les gains de la commande vectorielle
λ	Le gain de la commande magnétique
R	Le rayon de courbure du chemin de référence
O_c	Le centre de courbure du chemin de référence
$\gamma..$	Les scalaires utilisés dans la commande de suivi de chemin
\mathbf{H}	Le champ d'excitation magnétique
\mathbf{B}_{ms}	Le champ d'induction magnétique créé par l'objet
\mathbf{B}	Le champ magnétique appliqué
\mathbf{B}_d	Le champ magnétique de propulsion
\mathbf{B}_s	Le champ magnétique de pilotage
B_0	La densité du flux magnétique
B_x	La norme du champ magnétique statique
B_y	L'amplitude des oscillations du champ magnétique
\mathbf{M}	Le moment magnétique
\mathbf{m}_{ag}	L'aimantation
F	La force non-fluidique de la matrice de propulsion 1D

T	Le couple non-fluidique de la matrice de propulsion 1D
\mathbf{T}_m	Le couple magnétique
\mathbf{T}_d	Le couple magnétique de propulsion
\mathbf{T}_s	Le couple magnétique de pilotage
\mathbf{F}_m	La force magnétique
\mathbf{F}_g	La forces de gravité
\mathbf{T} et \mathbf{F}	Le couple et la forces non-fluidiques, resp.
\mathbf{T}_{drag} et \mathbf{F}_{drag}	Le couple et la forces de traînée, resp.
$\mathbf{F}_{\text{elastic}}$	La force élastique
\mathbf{F}_{vis}	La force de traînée visqueuse du fluide
$\mathbf{A}_m, \mathbf{B}_m, \mathbf{C}_m$ et \mathbf{D}_m	Les sous-matrices constituant la matrice de mobilité
a, b et c	Les constantes de la matrice de propulsion 1D
c_{drag}	Le coefficient de traînée en translation
m_{drag}	Le coefficient de traînée en rotation
ζ_{\parallel} et ζ_{\perp}	Les coefficients de traînée visqueux tangent et normal
Re	Le nombre de Reynolds
p	La pression du fluide
ρ	La densité du fluide
η	La viscosité dynamique
ν	La viscosité cinématique
\mathbf{v}_n	Le vecteur vitesse du fluide
\mathbf{T}_n	Le tenseur des contraintes
\mathbf{I}	Le vecteur des courants électriques pour les trois paires de bobines
R_b	Le rayon d'une bobine
n	Le nombre de tours
μ_0	La perméabilité magnétique
μ_r	La perméabilité relative du matériau
E	le module de Young
I_m	Le moment quadratique
A	La raideur en flexion du flagelle
θ	L'amplitude des oscillations du nageur flexible
S_p	Le nombre de sperme
L_f	La longueur du flagelle
R_f	Le rayon du flagelle
$Z(S_p)$	Une fonction dépendante du nombre de sperme utilisée dans le calcul de la force de propulsion
y	Le déplacement transversal de la queue
τ_s	Le moment de flexion
θ_H	L'angle de tangage de l'hélice
σ	Le rayon de la queue hélicoïdale
\mathbf{t}	Le vecteur tangent
$\mathbf{x}_H, \mathbf{y}_H$ et z_H	Le repère de la queue de l'hélice
\mathbf{v}_s	La vitesse d'un petit segment de l'hélice
$\mathbf{v}_{\perp s}$ et $\mathbf{v}_{\parallel s}$	Les vitesses perpendiculaire et parallèle au segment
v_{ver}	L'amplitude de la vitesse verticale du nageur
v_{hor}	L'amplitude de la vitesse horizontale du nageur
$\boldsymbol{\omega}$	Le vecteur de vitesse angulaire
$d\mathbf{f}_s$	La force différentielle sur un petit segment de l'hélice

F_p	La force de propulsion
T_0	L'amplitude du couple appliqué
V	Un volume
D	Un diamètre
H	Une hauteur
d	Une distance
L_0	La longueur d'un objet
a_r	Le rapport de la hauteur d'un cylindre sur son diamètre
δ	La distance entre une surface solide et le chemin géométrique de référence
Q	Une variété différentielle
$\alpha(\cdot)$	Une forme différentielle
$A(\alpha)$	La matrice comportant les formes différentielles α
t	Le temps
$\mathbb{1}$	La matrice identité
C , S et T	$\cos(\cdot)$, $\sin(\cdot)$ et $\tan(\cdot)$, resp.

Introduction générale

La microrobotique interactive a pour objectif d'interagir avec le micromonde. Les systèmes microrobotiques conventionnels utilisent des micropinces avec des systèmes de positionnement précis. Ils ne peuvent pas être utilisés dans des environnements confinés comme le corps humain ou les puces microfluidiques. Une solution consiste à proposer des microrobots autonomes dont la taille caractéristique est micrométrique pour accéder à ces endroits restreints et réaliser des tâches complexes. Leur conception intégrée est une difficulté importante puisque les actionneurs et les capteurs ne peuvent pas être embarqués et assemblés dans ces microrobots. En effet, la microfabrication n'est pas complètement maîtrisée et demande beaucoup de précision et de compétences issues principalement des microtechnologies. Dans la littérature, les moyens de détection et d'actionnement externes sont utilisés. Les microstructures de forme géométrique simple, appelées micro-effecteurs ou microrobots, sont actionnés et détectés à distance.

La physique à l'échelle microscopique est différente de celle de l'échelle humaine. Les forces surfaciques sont prédominantes et les forces volumiques sont négligeables. Dans un milieu ambiant, les effets d'adhésion entre les microrobots et le substrat sont élevés. Par conséquent, les mouvements du microrobot deviennent difficiles à réaliser. Pour réduire l'adhésion, les microrobots évoluant dans un liquide sont efficaces car le fluide à l'échelle microscopique est caractérisé par un faible nombre de Reynolds. Cette propriété induit que les forces visqueuses dominent les forces d'inertie. De ce fait, les mouvements réciproques (dans un sens puis dans l'autre) ne sont pas adaptés pour se déplacer. Les microorganismes utilisent plutôt des mouvements non-réciproques pour se propulser. Les chercheurs s'inspirent alors de la nature pour comprendre le mécanisme de locomotion à l'échelle microscopique. **Purcell** a formalisé cette problématique dans son fameux théorème de la coquille de Saint-Jacques et propose deux types de mouvement non-réciproques, les propulsions hélicoïdale et flexible. La première est utilisée par les bactéries et la seconde par les spermatozoïdes.

La littérature propose d'imiter les mouvements de ces micro-espèces et une variété de micronageurs artificiels pour réaliser des applications dans plusieurs domaines. Ces microrobots peuvent s'appliquer en médecine mini-invasive avec par exemple la délivrance de médicaments ciblée et la

fécondation in vivo. Ils peuvent aussi être utilisés dans des applications industrielles, comme les tâches de manipulation ou de caractérisation de microobjets. Pour réaliser de telles applications, le mouvement de ces microrobots doit être répétable, précis et robuste afin de surmonter les erreurs de modélisation et les perturbations environnementales tels que les frottements, les effets de bord et les flux perturbateurs dans les vaisseaux sanguins. Or, actuellement, leurs commandes de mouvement sont assez simples et peu robustes. En général, elles sont en boucle ouverte et sont ainsi sensibles aux erreurs et aux dérives. Afin d'améliorer les performances de ces robots nageurs en termes de précision, de rapidité, de robustesse et de répétabilité nécessaires pour réaliser des tâches réelles dans l'espace, deux objectifs majeurs sont définis dans cette thèse :

Objectif de recherche 1 : *Commandes génériques par asservissement visuel dans l'espace pour tout les types de micronageurs avec des contraintes non holonomes.* Pour s'affranchir de la problématique de la conception, une solution est d'étudier des mininageurs dans une configuration à faible nombre de Reynolds. La commande de mouvement doit alors prendre en considération le poids du robot nageur, en plus des perturbations environnementales et des contraintes des non holonomie. Une modélisation cinématique 3D peut être utilisée pour décrire les mouvements du nageur dans le repère local du chemin de référence. Ensuite, une loi de commande pour un suivi de chemin dans l'espace doit être synthétisée afin de stabiliser le nageur et le faire converger vers la trajectoire désirée. Cette étude ne prend pas en compte la dynamique du nageur mais uniquement les erreurs spatiales entre le nageur et le chemin désiré. Ainsi, elle peut être utilisée pour n'importe quel micro/mininageur non-holonyme en adaptant son mode de propulsion spécifique.

Objectif de recherche 2 : *Proposition d'un ensemble de critères de comparaison entre des robots avec une topologie ou un mode de propulsion différents.* Tous les microrobots ne peuvent pas accomplir les mêmes tâches avec une performance égale. Cette thèse propose alors un ensemble de critères de comparaison entre des robots nageurs avec une topologie ou un mode de propulsion différents. Ces critères peuvent dépendre de la tâche à réaliser, de l'environnement dans lequel le nageur évolue et des contraintes de fabrication. Le choix du nageur le plus performant (i.e optimisé) pour réaliser une tâche particulière peut ainsi être effectué.

Pour répondre à ces objectifs, le chapitre 2 propose des robots nageurs hélicoïdal et flexible macroscopiques, qui imitent les mécanismes de propulsion des microorganismes. Ils sont actionnés par un champ magnétique uniforme rotatif ou oscillant, produit par un dispositif à base de bobines de Helmholtz. La propulsion et le pilotage des ces nageurs sont alors caractérisés en fonction de la fréquence et de l'intensité du champ magnétique. La géométrie des robots nageurs est optimisée, notamment en étudiant l'influence de plusieurs flagelles sur la force de propulsion produite. Ces nageurs artificiels sont non-holonomes car leur capacité de mouvement dans l'espace est limitée. Pour suivre un chemin quelconque dans l'espace, il faut résoudre la problématique de la commande en boucle fermée en prenant en compte cette contrainte et les perturbations extérieures.

Ainsi, le chapitre 3 décrit le mouvement de ces robots avec un modèle cinématique, exprimé dans le repère de Serret-Frenet avec des angles de compensation de direction (compensation en lacet) et d'inclinaison (compensation en tangage). Ces angles permettent de compenser les perturbations environnementales et le poids du robot nageur. Pour réaliser un suivi de chemin dans l'espace, une première loi de commande avec une représentation scalaire, est synthétisée en utilisant une nouvelle forme chaînée avec cinq états et trois entrées. Cette forme permet

de linéariser le système de manière exacte et de réaliser une commande globalement stable et découplée. La deuxième loi de commande est géométrique et plus intuitive. Elle est basée sur la fonction de Lyapunov pour stabiliser les mouvements de ces nageurs.

Le chapitre 4 présente la validation expérimentale de ces lois de commandes sur les nageurs magnétiques. Une variété de trajectoires spatiales est testée, sous différentes conditions. Leur impact sur les performances de la commande et du nageur est étudié. La deuxième partie montre que l'algorithme du suivi de chemin est général et propose des critères expérimentaux comparatifs entre les nageurs flexible et hélicoïdal.

Enfin, une conclusion rappelle les éléments saillants de cette thèse et ouvre quelques pistes de perspectives.

Cette thèse a donné lieu aux publications originales suivantes :

- **Ali Oulmas**, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier : *Closed-loop 3D path following of scaled-up helical microswimmers*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 1725-1730, 2016, Stockholm, Sweden.
- **Ali Oulmas**, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier : *Chained formulation of 3D path following for nonholonomic autonomous robots in a Serret-Frenet frame*. IEEE American Control Conference (ACC), pages 7275-7280, 2016, Boston, MA, USA.
- **Ali Oulmas**, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier : *3D closed-loop motion control of swimmer with flexible flagella at low Reynolds numbers*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 1877-1882, 2017, Vancouver, Canada.
- Bassem Dahroug, **Ali Oulmas**, Jean-Antoine Séon, Tiantian Xu, Brahim Tamadazte, Stéphane Régnier et Nicolas Andreff : *Some examples of path following in microrobotics*. IEEE International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), 2018, Nagoya, Japan.
- **Ali Oulmas**, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier : *3D closed-loop swimming at low Reynolds numbers*. International Journal of Robotics Research (IJRR).

Locomotion et manipulation sans contact dans le micromonde

Sommaire

1	Systèmes microrobotiques de manipulation à distance	6
1.1	Actionnement sans contact	7
1.2	Localisation à l'échelle microscopique	9
1.3	Microrobots	10
2	Locomotion à l'échelle microscopique	13
2.1	Équations Navier-Stokes	13
2.2	Locomotion à faible nombre de Reynolds	14
2.3	Microorganismes	15
2.4	Efforts hydrodynamiques	17
3	Manipulation magnétique	17
3.1	Aimantation	17
3.2	Efforts magnétiques	18
3.3	Systèmes à actionnement magnétique	19
4	Robots nageurs magnétiques	20
4.1	Nageurs flexibles	21
4.1.1	Modélisation	21
4.1.2	Conception & fabrication	22
4.2	Nageurs hélicoïdaux	24
4.2.1	Modèle de propulsion 1D	24
4.2.2	Modèle de propulsion 3D	25
4.2.3	Conception & fabrication	26
4.3	Applications potentielles	27
5	Commande de mouvement des microrobots magnétiques	29
5.1	État de l'art	29
5.2	Enjeux de commande	33
6	Synthèse générale & objectifs de la thèse	33

Ce premier chapitre décrit le système microrobotique et ses différentes composantes. Il se concentre ensuite sur une analyse des microrobots dans le milieu liquide. À l'échelle microscopique, le fluide est en effet caractérisé par un faible nombre de Reynolds, car les aspects inertiels sont négligeables devant les effets visqueux. La troisième partie aborde la locomotion dans ces conditions, en particulier les oscillations flexibles et le mouvement hélicoïdal. Les principes fondamentaux du magnétisme sont ensuite explicités, en particulier les systèmes de manipulation magnétique de ces microrobots. Ce chapitre propose ensuite une analyse détaillée du cœur de cette thèse, les différentes commandes des robots magnétiques à faible nombre de Reynolds. La position de notre travail par rapport aux enjeux et à la bibliographie clôt ce premier chapitre.

1 Systèmes microrobotiques de manipulation à distance

La microrobotique étudie les systèmes robotiques capables de manipuler des objets dont les dimensions sont inférieures à un millimètre. Les méthodes classiques utilisent généralement des micro-pinces contrôlées par des systèmes robotisés. Cependant, celles-ci ne peuvent pas interagir dans des environnements encombrés ou confinés comme le corps humain et les puces microfluidiques. Une solution consiste à utiliser des microrobots autonomes pour accéder à ces endroits restreints et réaliser des tâches complexes. Néanmoins, les actionneurs, contrôleurs et capteurs ne peuvent pas être embarqués par le robot à ces échelles. En effet, la microfabrication n'est pas suffisamment maîtrisée. La littérature propose pour remédier à cette problématique des systèmes de manipulation à distance avec des moyens de détection et des actionneurs externes.

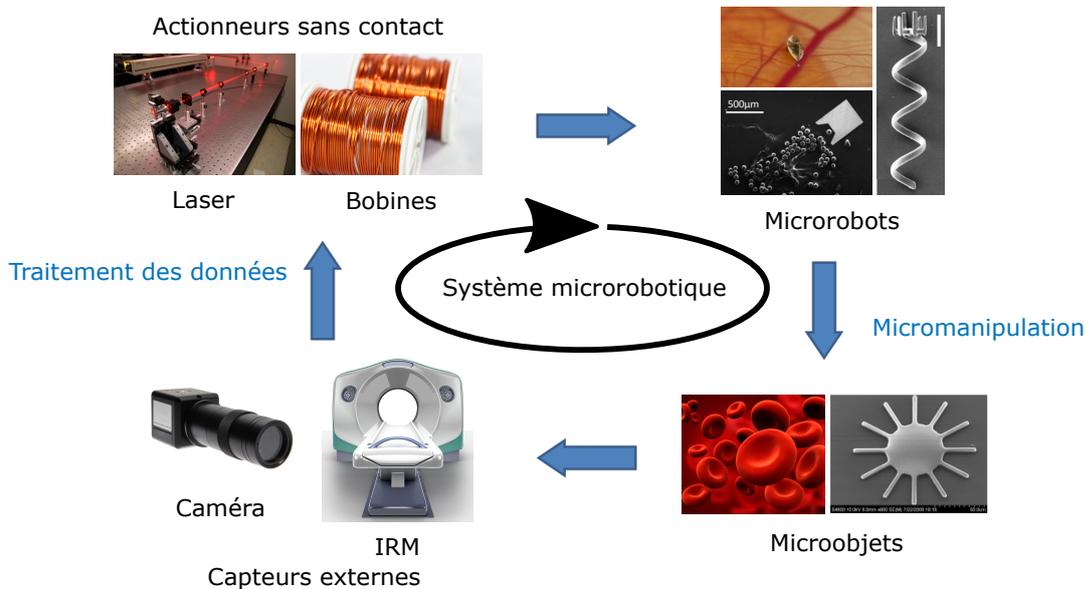


Figure 1.1. Un système microrobotique de manipulation à distance est généralement composé d'un moyen d'actionnement et de détection externes, d'un ordinateur (i.e. contrôleur) pour le traitement des données et de microrobots. Leurs formes dépendent de l'environnement dans lequel ils évoluent, de l'actionnement, du moyen de localisation et des tâches à réaliser.

Le schéma fonctionnel de tels systèmes est présenté sur la Figure 1.1. Il est composé d'une partie à l'échelle macroscopique à savoir l'actionnement, la détection et le traitement des informations et d'une partie microscopique représentée par le microrobot. Ce dernier possède une structure géométrique souvent simple et évolue dans un environnement liquide, dans le vide, à l'air ambiant ou entre deux fluides. Ces différents éléments doivent prendre en compte les contraintes liées aux échelles micro et macroscopique. Les temps de réponse des actionneurs et des capteurs, par exemple, doivent être faibles pour détecter, suivre et contrôler les microrobots rapides. La fabrication des microrobots doit être réalisée avec des couches compatibles pour assurer les différentes liaisons et la rigidité mécanique. Dans la suite, les différentes parties du système microrobotique autonome sont expliquées.

1.1 Actionnement sans contact

L'actionnement sans contact consiste à soumettre un objet à un champ physique auquel il est sensible afin de le déplacer à distance. Dans ce cadre, la littérature présente plusieurs sources d'énergie telles que la lumière, les ondes acoustiques et les effets magnétiques. D'un point de vue pratique, l'actionnement externe est un moyen de contrôle direct des mouvements du microrobot dans un environnement confiné.

Lumière

Les outils qui utilisent le plus la lumière sont les pinces optiques. Ces dernières utilisent un faisceau laser pour la caractérisation et la manipulation de particules ou de cellules de taille entre quelques dizaines de nanomètres et quelques micromètres, dans un milieu liquide. En effet, cette méthode exerce une force optique¹ pour piéger au milieu du faisceau un objet diélectrique et ainsi le déplacer dans la même direction que le laser (Ashkin, 1970; Munan *et al.*, 2017).

Ondes acoustiques

La manipulation acoustique consiste en général à utiliser un transducteur ultrasonore et un réflecteur afin de créer une onde acoustique stationnaire. Les particules solides se retrouvent alors piégées dans les nœuds de pression du champ acoustique. Ainsi, en variant la fréquence d'émission, les nœuds de pression se déplacent avec les particules piégées (Kozuka *et al.*, 2000).

Effets magnétiques

Le champ magnétique est l'actionnement le plus utilisé parmi ces deux derniers. Le principe consiste à appliquer une force et/ou un couple magnétiques sur l'objet à manipuler. Ce dernier doit être sensible à la variation du champ magnétique. Cette contrainte est résolue en utilisant des objets ferromagnétiques ou un aimant permanent. L'effort engendré par le champ magnétique

1. La force résultante de la réfraction d'un faisceau laser en milieu transparent.

se traduit alors par un effort répulsif ou attractif. Ainsi, l'objet magnétique peut être déplacé et orienté dans l'espace de travail.

Comparaison des moyens d'actionnement à distance

Cette partie compare les trois moyens d'actionnements présentés précédemment pour la micromanipulation d'objets dans l'espace, en considérant les forces produites, les degrés de liberté (2D ou 3D), la résolution, la sélectivité vis-à-vis des objets à manipuler, la biocompatibilité et les applications in vivo et in vitro, comme illustré sur la Figure 1.2.

Actionnement à distance

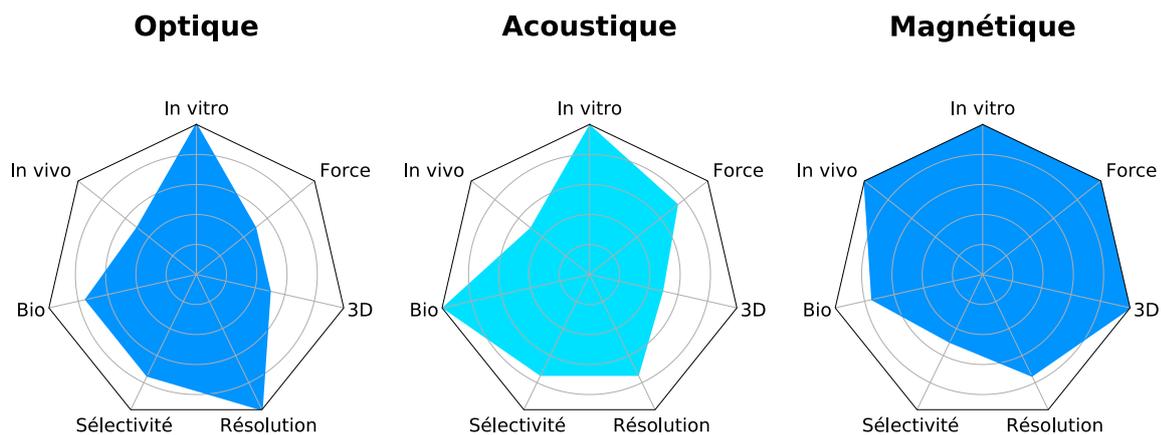


Figure 1.2. Comparaison entre les sources optique, acoustique et magnétique.

Ces graphes montrent que le champ magnétique couvre un plus grand nombre d'application par rapport aux deux autres sources. Il peut être utilisé dans des applications in vivo et in vitro. De plus, il est biocompatible car il n'affecte pas les tissus biologiques. En général, l'intensité du champ magnétique ne dépasse pas quelques milliteslas. Les sources optique et acoustique ne peuvent pas être appliquées dans des conditions in vivo, nécessitent le développement d'une instrumentation adéquate et sont limitées aux applications 2D. Le champ magnétique et la source optique ne sont pas sélectifs par rapport à l'objet à manipuler. Le premier peut agir uniquement sur les objets avec une partie magnétique et le deuxième nécessite des objets diélectriques dans un milieu purifié et homogène. Le champ acoustique peut manipuler n'importe quel objet ; cependant, il ne peut pas les traiter indépendamment. La lumière et les ondes acoustiques peuvent manipuler des objets de quelques micromètres et atteindre des résolutions importantes. Cependant, la force générée par ces deux sources est limitée à quelques piconewtons. Or, le champ magnétique peut produire une force beaucoup plus importante avec une résolution micrométrique. Ainsi, dans le reste de cette thèse, le champ magnétique est exploité comme source d'actionnement en fonction des différents avantages décrits.

1.2 Localisation à l'échelle microscopique

La localisation aux petites échelles est un enjeu important pour détecter et suivre les mouvements des microrobots dans l'espace de travail, particulièrement dans des environnements confinés. Elle est centrale pour réaliser ensuite une commande robuste et précise. Cette partie présente brièvement les trois méthodes classiques proposées dans la littérature.

Vision optique

La vision utilise des caméras couplées avec des objectifs optiques pour avoir une vue globale de l'espace de travail et ainsi obtenir la position et l'orientation 3D du microrobot. Actuellement, c'est la méthode la plus utilisée car le temps de calcul est rapide, le coût est relativement faible et la résolution peut atteindre quelques centaines de nanomètres. Les techniques de traitement d'images comme le seuillage et la détection des contours sont utilisées pour la localisation et le suivi du microrobot (Bouchebout *et al.*, 2014). Il existe des types de caméra appelés "capteurs événementiels", qui sont beaucoup plus rapides que les caméras classiques dans des scènes simples. Chaque pixel est électroniquement indépendant et produit des événements immédiatement après la détection d'une variation de contraste (Benosman *et al.*, 2014). Ce type de caméra imite la vision biologique. Cependant, le traitement d'information est plus complexe et ces capteurs nécessitent une caméra classique pour une calibration car ils ne fournissent aucune information sur la scène statique.

La vision présente des avantages dans les applications industrielles car elle ne consomme pas beaucoup d'énergie, peut détecter n'importe quel objet, atteint des résolutions nanométriques et n'a pas de conflit avec les moyens d'actionnement externes. Cependant, elle n'est pas adaptée pour des applications médicales, car elle ne traverse pas les tissus biologiques.

Imagerie par résonance magnétique

Dans le domaine médical, l'imagerie par résonance magnétique ou simplement IRM consiste à créer des images en utilisant le principe de la résonance magnétique nucléaire. Il exploite des atomes d'hydrogène qui émettent des signaux d'ondes radio, que le dispositif peut ensuite compiler pour construire une image. Comme les tissus contiennent différentes densités d'atomes d'hydrogène et d'eau, l'IRM peut alors cartographier les structures comme les vaisseaux sanguins ou la rétine de l'œil. Ces images peuvent être ensuite utilisées pour localiser les microrobots (Poupponeau *et al.*, 2014).

Cette méthode présente des avantages potentiels dans le domaine médical car elle peut assurer à la fois le suivi et l'actionnement des microrobots comme, par exemple, à l'intérieur du corps humain. Cependant, les IRMs sont très chers, lents et leur résolution spatiale est faible. Ces propriétés freinent énormément son utilisation aujourd'hui.

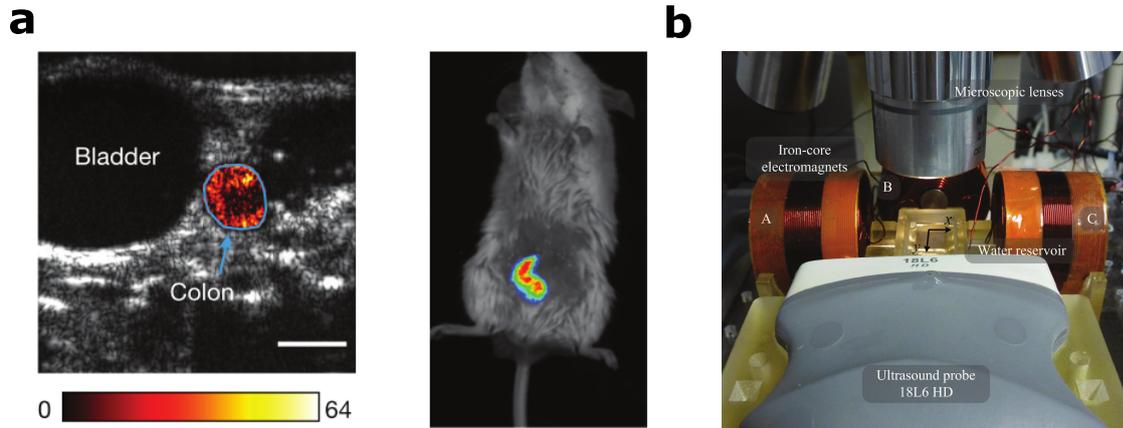


Figure 1.3. (a) Détection de bactéries dans le tractus gastro-intestinal d’une souris en utilisant l’imagerie par ultrasons [Bourdeau *et al.* \(2018\)](#). (b) Système magnétique pour la manipulation d’une microparticule paramagnétique en boucle fermée en utilisant une sonde à ultrasons comme retour visuel ([Khalil *et al.*, 2014b](#)).

Ultrasons

L’imagerie par ultrasons ou l’échographie consiste à envoyer des ondes sonores de plusieurs mégahertz qui traversent les tissus et sont renvoyées sous la forme d’un écho. Il est possible alors de reconstruire des images avec un niveau de gris selon l’intensité des échos en retour enregistrés. Cette méthode est très utilisée dans le domaine médical car elle ne présente pas d’effets négatifs sur la santé.

L’échographie présente actuellement la meilleure solution pour visualiser des objets *in vivo*. Elle peut fournir une cadence d’images de plus de 100 images par seconde et atteindre des résolutions spatiales importantes. Ces propriétés sont exploitées pour réaliser des commandes de microrobots en temps réel. La littérature montre la détection de bactéries dans le tractus gastro-intestinal d’une souris en utilisant l’imagerie par ultrasons comme illustré sur la Figure 1.3a. [Khalil *et al.* \(2014b\)](#) utilisent un système magnétique avec une sonde à ultrasons pour commander les mouvements d’une microparticule paramagnétique en boucle fermée (i.e. Figure 1.3b). Cependant, les auteurs constatent que le bruit de mesure est élevé à cause des artéfacts².

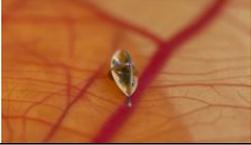
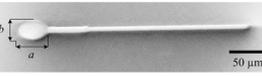
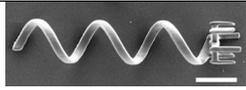
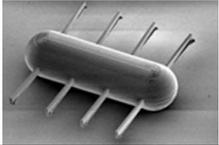
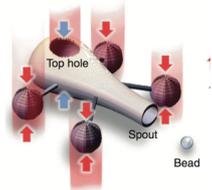
1.3 Microrobots

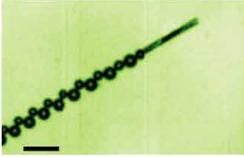
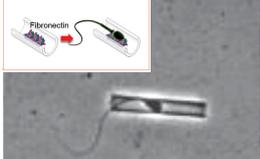
Les microrobots sont devenus un des sujets les plus étudiés et développés par les scientifiques ces dernières années. Ils peuvent accomplir de nombreuses tâches à l’échelle microscopique, inaccessible pour l’être humain. Le développement de nouvelles méthodes de microfabrication comme la lithographie 3D en utilisant un faisceau laser, permet de réaliser des formes variées et des structures complexes. La géométrie des microrobots dépend principalement de l’actionnement utilisé, de l’environnement dans lequel ils évoluent (air, vide, fluide ...), du moyen de localisation et de la tâche à accomplir. Cette section résume alors les microrobots disponibles

2. Des échos sur une image qui n’existent pas en réalité.

dans la littérature en fonction de leur mode de propulsion (i.e. actionnement).

Tableau 1.1. Les modes de propulsion et les caractéristiques des microrobots proposés dans la littérature.

Microrobots	Mode de propulsion	Caractéristiques	Taille & DDL	Réf.
	Gradient de champ magnétique	–	≈ 1 mm; 3D + 2 rotations	Kummer <i>et al.</i> (2010)
MagnetoSperm 	Champ magnétique oscillant (microrobot avec une couche ferromagnétique)	imite le système de locomotion d'un spermatozoïde dans le plan	322 μ m; 2D + 1 rotation	Khalil <i>et al.</i> (2014a)
	Champ magnétique rotatif	imite la bactérie E. coli	≈ 50 μ m; 3D + 2 rotations	Tottori <i>et al.</i> (2012)
	Battements des cils avec un champ magnétique pas à pas (on-off)	imite la paramecie	220 μ m; 2D + 1 rotation	Kim <i>et al.</i> (2016)
	Ouverture et fermeture des coquilles magnétiques du microrobot avec un champ magnétique	mouvement réciproque dans un fluide non Newtonien (lent)	≈ 800 μ m; 1D	Qiu <i>et al.</i> (2014)
	Propulsion acoustique (oscillation de la queue)	la tête du nageur est rigide et la queue est flexible	≈ 20 μ m; 2D + 1 rotation	Ahmed <i>et al.</i> (2016)
	Propulsion optique	plusieurs pièges optiques à double faisceau	40 μ m; 3D + 3 rotations	Villangca <i>et al.</i> (2016)
	Une source de lumière externe (phototaxis positif ou négatif)	imite le comportement des algues vertes	≈ 11 μ m; 2D + 1 rotation	Dai <i>et al.</i> (2016)

	Propulsion chimique par projection de microbulles (un microtube catalytique dans une solution H_2O_2)	imite la propulsion d'une fusée; guidage par champ magnétique	100 μm ; 2D + 1 rotation (3D possible)	Solovev <i>et al.</i> (2009)
	Propulsion biologique (des microtubes magnétiques propulsés par des spermatozoïdes)	guidage avec un champ magnétique externe	20-50 μm ; 2D + 1 rotation	Magdanz <i>et al.</i> (2015)

Il est possible d'utiliser une approche entièrement externe pour propulser et piloter des microrobots avec une source d'énergie magnétique, acoustique ou optique. Le mode de propulsion le plus répandu est basé sur le champ magnétique. Les microrobots doivent être alors équipés d'une partie magnétique avec une couche ferromagnétique ou un aimant permanent. Ainsi, il est possible d'appliquer directement une force magnétique pour les déplacer ou d'utiliser les mécanismes de locomotion des microorganismes avec un champ magnétique uniforme. Des exemples de ces microrobots sont illustrés sur le Tableau 1.1. Les microrobots à flagelles utilisent la rotation (ou les oscillations) de leur queue pour se propulser et sont actionnés par un champ magnétique rotatif (ou oscillant). Cet actionnement peut être produit en utilisant des ondes acoustiques progressives [Ahmed *et al.* \(2016\)](#). Ce mode de locomotion est présenté en détail dans la suite de cette thèse. Récemment, un microrobot avec des cils est fabriqué dans [Kim *et al.* \(2016\)](#). Il imite le mode de propulsion des paramécies pour se déplacer dans un fluide, et est actionné par un champ magnétique pas à pas. [Villangca *et al.* \(2016\)](#) utilisent plusieurs pièges optiques pour manipuler et propulser un microrobot dans l'espace. Il est possible d'utiliser la lumière autrement que par la force optique, comme illustré dans [Dai *et al.* \(2016\)](#). Ces microrobots sont attirés par la lumière exactement comme les algues vertes. Ainsi, ils peuvent être propulsés et pilotés dans l'espace en suivant la source de lumière.

Récemment, des approches utilisant l'énergie présente dans l'environnement sont développées pour propulser des microrobots à partir de réactions chimiques. La source d'énergie peut être du carburant, glucose ou du peroxyde d'hydrogène en fonction du catalyseur utilisé. Ces microrobots ont généralement une forme d'un tube, qui contient à l'intérieur le matériau catalytique. La conversion chimique libère l'énergie stockée dans les liaisons chimiques et projette le microrobot sous forme d'un mouvement linéaire. Ce mode de propulsion est similaire à celui d'une fusée à l'échelle macroscopique. Dans [Li *et al.* \(2016a\)](#), les microrobots chimiques forment des bulbes en continu dans leur cavité. Le jet de ces bulbes entraîne un mouvement linéaire du microrobot. Il est possible d'ajouter une source d'énergie externe pour moduler la vitesse de ces microsystemes comme la température ([Magdanz *et al.*, 2014](#)), la lumière ([Mou *et al.*, 2015](#)) ou les ultrasons ([Xu *et al.*, 2014a](#)). Pour l'instant, la direction de ces microrobots est contrôlée par un actionnement à distance avec un champ magnétique ou acoustique. De plus, leur mobilité dépend fortement du carburant présent dans l'environnement. Ainsi, la propulsion diminue progressivement avec la quantité du carburant consommée et cesse une fois cette quantité épuisée.

Dans la nature, les microorganismes comme les bactéries et les spermatozoïdes opèrent dans

des milieux complexes. Ils sont l'objet de plusieurs études pour comprendre leur mécanisme de locomotion afin de les imiter. Dans une approche biohybride, il est possible d'incorporer des cellules dans des matériaux synthétiques pour exploiter leurs capacités à opérer dans ces milieux complexes (Singh et Sitti, 2016). De cette manière, la propulsion peut être assurée par la cellule incorporée. Cependant, le guidage reste assuré par une source d'énergie externe comme le champ magnétique (Wright Carlsen *et al.*, 2014). Magdanz *et al.* (2013) ont réalisé un cylindre creux avec une couche magnétique pour capturer un spermatozoïde à l'intérieur. Ainsi, le microrobot biohybride est capable de se propulser à partir des oscillations de la queue du spermatozoïde et d'être piloté par un champ magnétique. Dans Khalil *et al.* (2014c), ce même microrobot est contrôlé en boucle fermée dans le plan par une commande point à point. Ce type d'actionnement par bactéries nécessite de maintenir une faible cytotoxicité³.

Enfin, l'approche chimique fournit une propulsion élevée. Cependant, la source d'énergie utilisée n'est pas toujours compatible avec les échantillons biologiques. Concernant l'approche biohybride, la performance des microrobots dépend fortement de la cellule incorporée. Or, l'actionnement externe, particulièrement le champ magnétique, entraîne une grande variété de mécanismes de locomotion et peut être exploité pour d'autres fonctionnalités supplémentaires. De plus, il est compatible avec les applications biomédicales car il n'affecte pas les tissus et cellules biologiques.

2 Locomotion à l'échelle microscopique

De nombreuses applications de microrobots impliquent des opérations dans des fluides comme la caractérisation de cellules. Cette thèse s'intéresse particulièrement aux microrobots qui évoluent dans un milieu liquide. Ainsi, il est important d'étudier les caractéristiques du fluide à l'échelle microscopique et les efforts hydrodynamiques auxquels le microrobot s'oppose lors de son mouvement. Cette partie présente donc les équations de Navier-Stokes modélisant un fluide lors d'un écoulement à faible nombre de Reynolds, le mode de locomotion adapté à cette échelle et les efforts fluidiques agissant sur un microrobot dans ces conditions.

2.1 Équations Navier-Stokes

Un fluide Newtonien peut être modélisé en utilisant les équations de Navier-Stokes qui s'écrivent de façon générale :

$$-\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}_n = \rho \frac{\partial \mathbf{v}_n}{\partial t} + \rho (\mathbf{v}_n \cdot \nabla) \mathbf{v}_n \quad (1.1)$$

avec \mathbf{v}_n et p respectivement le vecteur vitesse et la pression du fluide, \mathbf{T}_n le tenseur des contraintes, ρ la densité du fluide et t le temps. L'équation de conservation de la masse (équation de continuité) est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_n) = 0 \quad (1.2)$$

3. La cytotoxicité est une propriété d'un agent biologique à être toxique pour les cellules.

Dans le cas d'un écoulement incompressible d'un fluide Newtonien, la viscosité et la densité sont constantes. Les équations (1.1) et (1.2) peuvent être simplifiées comme :

$$-\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v}_n = \rho \frac{\partial \mathbf{v}_n}{\partial t} + \rho (\mathbf{v}_n \cdot \nabla) \mathbf{v}_n \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_n = 0 \quad (1.4)$$

avec η la viscosité dynamique du fluide et les termes $\eta \nabla^2 \mathbf{v}_n$ et $\rho (\mathbf{v}_n \cdot \nabla) \mathbf{v}_n$ désignent respectivement les termes visqueux et inertiel.

2.2 Locomotion à faible nombre de Reynolds

Selon la taille de l'objet et les caractéristiques du fluide, les modes de propulsion diffèrent. Dans un fluide, le rapport des forces visqueuses sur les forces d'inertie d'un objet de dimension linéaire L_0 se déplaçant à une vitesse v , peut être défini par le nombre de Reynolds Re comme :

$$Re \approx \frac{L_0 v \rho}{\eta} = \frac{L_0 v}{\nu} \quad (1.5)$$

où η et ρ sont respectivement la viscosité dynamique et la densité du fluide et ν la viscosité cinématique.

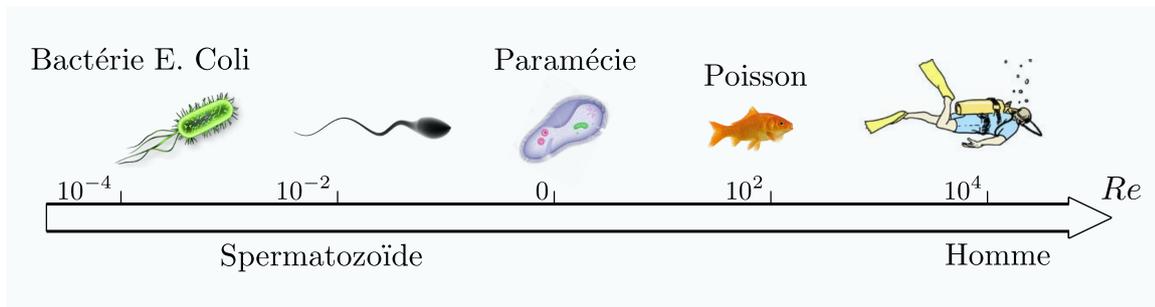


Figure 1.4. Le nombre de Reynolds de quelques nageurs.

À l'échelle macroscopique, un homme et un petit poisson nagent respectivement dans un fluide avec un nombre de Reynolds respectivement de 10^4 et 10^2 environ. Dans le micromonde, les microorganismes se déplacent plutôt dans un fluide caractérisé par le faible nombre de Reynolds ($Re \ll 1$) comme illustré sur la Figure 1.4. Cette propriété implique que les forces visqueuses sont prépondérantes par rapport aux forces inertielles des micronageurs. Le fluide est alors régi par l'équation de Stokes. Cette dernière est une version simplifiée de l'équation de Navier-Stokes dans laquelle les termes inertiels sont négligés et ainsi les équations (1.3) et (1.4) s'écrivent alors :

$$\eta \nabla^2 \mathbf{v}_n = \nabla p \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_n = 0 \quad (1.7)$$

Cette équation a la particularité d'être linéaire et indépendante du temps. Cette propriété implique qu'un objet, immergé dans ce type d'écoulement, ne sera pas capable de se déplacer avec un mouvement réciproque. Purcell (1977) a résumé ce phénomène avec le théorème de la coquille

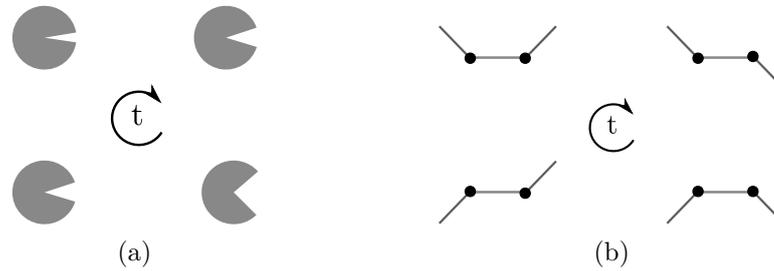


Figure 1.5. (a) Un mouvement réciproque d'une coquille de Saint-Jacques. Ce mouvement n'est pas adapté pour la locomotion dans un fluide à faible nombre de Reynolds. (b) Le robot nageur de Purcell (1977) qui exécute un mouvement non-réciproque et qui lui permet de se déplacer à $Re \ll 1$.

de Saint-Jacques ou en anglais "the scallop theorem". En effet, une coquille de Saint-Jacques se déplace par bonds dans un fluide avec un nombre de Reynolds élevé. Elle ouvre doucement ses coquilles et les ferme rapidement. Ainsi, elle chasse le liquide contenu dans sa coquille et se propulse grâce à la non-linéarité de l'écoulement (Figure 1.5a.). Cependant, à faible nombre de Reynolds, l'écoulement est linéaire et ce type de mouvement n'est pas adapté (i.e. le mouvement est indépendant de la vitesse d'ouverture et de fermeture des coquilles).

Dans la nature, les microorganismes comme les bactéries et les spermatozoïdes utilisent plutôt des mouvements non-réciproques comme illustré par le nageur à trois segments de Purcell (1977) sur la figure 1.5b. Le nageur exécute une série de configurations non réversibles dans le temps pour se propulser dans un fluide à faible nombre de Reynolds. Récemment, Qiu *et al.* (2014) ont montré la possibilité d'utiliser le mouvement réciproque d'une coquille de Saint-Jacques pour se propulser à faible nombre de Reynolds dans un fluide non-Newtonien dans lequel la viscosité n'est pas constante. La dynamique de l'objet immergé devient ainsi non-réversible. Cependant, ce mouvement reste pour l'instant très lent. Dans la partie suivante, les mécanismes de locomotion des microorganismes utilisant un mouvement non-réciproque pour se propulser dans un fluide à faible nombre de Reynolds sont introduits.

2.3 Microorganismes

Les bactéries et micronageurs unicellulaires utilisent des flagelles ou cils de façon non-réciproque pour se déplacer dans le sang (ou fluide en général) en s'appuyant sur la résistance du fluide. Un procaryote comme la bactérie *Escherichia coli* actionne un flagelle passif de façon hélicoïdale avec des moteurs moléculaires qui convertissent l'énergie chimique en énergie mécanique. Cette conversion engendre la propulsion (Figure 1.6a). De l'autre côté, un spermatozoïde (ou eucaryotes en général) utilise plutôt un flagelle actif qui possède une structure musculaire à l'intérieur et qui se déforme de façon ondulée à partir de moteurs moléculaires (Figure 1.6b). Les battements du flagelle remplissent le critère de non-réciprocité nécessaire pour se déplacer à faible nombre de Reynolds et ceux-ci produisent une force de propulsion (Figure 1.7).

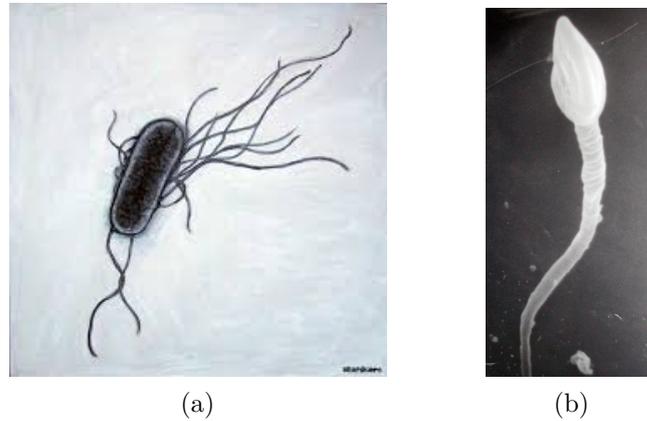


Figure 1.6. Microorganismes utilisant un mouvement non-réciproque. (a) La fameuse bactérie *E. coli* utilise le mouvement du tire bouchon. (b) Un spermatozoïde utilise les oscillations de son flagelle.

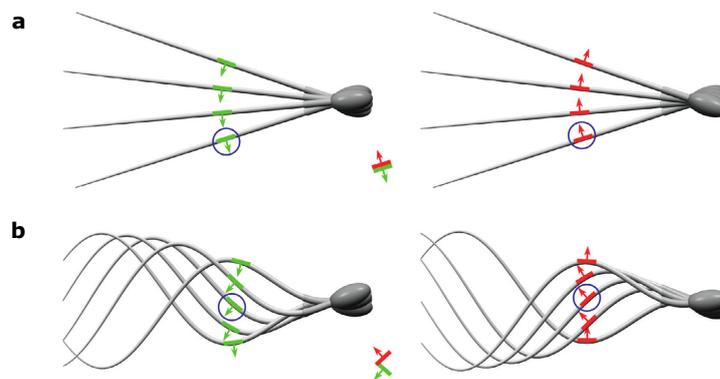


Figure 1.7. (a) Un mouvement réciproque d'un micronageur. La force exercée par une partie du flagelle sur le fluide est représentée par une flèche verte dans le premier cycle et par une flèche rouge dans le deuxième cycle. Le micronageur ne se déplace pas car la force appliquée durant le premier cycle est compensée dans le deuxième cycle. (b) Un spermatozoïde utilise des oscillations qui se propagent de façon non-réversible de sa tête vers sa queue (i.e. dans une seule direction) pour produire une force de propulsion (Alvarez *et al.*, 2014).

2.4 Efforts hydrodynamiques

Un corps émergé dans un fluide subit une force et un couple de traînée qui s'opposent à son mouvement. En considérant un nageur de forme cylindrique avec un diamètre D , une hauteur H et un rapport $a_r = H/D > 1$, la force de traînée \mathbf{F}_{drag} due au mouvement de translation du corps cylindrique dans un fluide, peut être approximée par [Ui et al. \(1984\)](#) :

$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = c_{\text{drag}} \mathbf{v} \quad (1.8)$$

$$= -8\pi\eta D(1.0276 + 0.3963a_r - 0.0259a_r^2 + 0.0014a_r^3)\mathbf{v} \quad (1.9)$$

avec η la viscosité du fluide, c_{drag} le coefficient de traînée en translation et \mathbf{v} la vitesse linéaire du robot. Le couple de traînée \mathbf{T}_{drag} exercé par le fluide du au mouvement de rotation du robot nageur est exprimé par :

$$\mathbf{T}_{\text{drag}} = m_{\text{drag}} \boldsymbol{\omega} \quad (1.10)$$

$$= \pi \eta H D^2 \boldsymbol{\omega} \quad (1.11)$$

avec m_{drag} le coefficient de traînée en rotation et $\boldsymbol{\omega}$ la vitesse angulaire du robot. Les coefficients de traînée c_{drag} et m_{drag} dépendent principalement de la forme du robot. Ces efforts hydrodynamiques permettent d'estimer l'énergie nécessaire pour surmonter la résistance fluidique.

3 Manipulation magnétique

La manipulation magnétique est un moyen efficace de contrôler les mouvements d'un micro-robot à distance. Elle est composée d'une source qui produit un champ magnétique et d'un objet (ou microrobot) qui subit les forces d'interaction magnétiques. Cette partie introduit les conceptions autour de l'aimantation qui sont une caractéristique importante d'un objet magnétique. Puis, les efforts qu'un microrobot magnéto-sensible subit en présence d'un champ magnétique sont décrits. Enfin, la dernière partie présente des différents systèmes de manipulation magnétique existants dans la littérature.

3.1 Aimantation

L'aimantation \mathbf{m}_{ag} est un phénomène non-linéaire. Il apparaît lorsqu'un champ magnétique externe \mathbf{H} est appliqué sur un matériau par exemple ferromagnétique. Elle est définie comme la densité volumique de moment magnétique \mathbf{M} :

$$\mathbf{m}_{\text{ag}} = \frac{d\mathbf{M}}{dV} \quad (1.12)$$

Ainsi,

$$\mathbf{M} = \int_V \mathbf{m}_{\text{ag}} dV \quad (1.13)$$

où V est le volume de l'objet magnétisé. Les moments magnétiques ont tendance à s'orienter dans la même direction que le champ magnétique appliqué ([Coey, 2010](#)).

Par ailleurs, la relation entre l'aimantation \mathbf{m}_{ag} de l'objet magnétique (de propriété magnétique linéaire) et le champ d'excitation magnétique \mathbf{H} est définie par :

$$\mathbf{m}_{\text{ag}} = \chi_m \mathbf{H} \quad (1.14)$$

avec χ_m la susceptibilité magnétique. Le champ d'induction magnétique \mathbf{B}_{ms} est relié à l'aimantation et au champ d'excitation magnétique par :

$$\mathbf{B}_{\text{ms}} = \mu_0 (\mathbf{m}_{\text{ag}} + \mathbf{H}) \quad (1.15)$$

$$= \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} \quad (1.16)$$

avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ et $\mu_r = (1 + \chi_m)$ qui représentent respectivement la perméabilité magnétique du vide et la perméabilité relative du matériau. En fonction de la susceptibilité magnétique χ_m , il existe trois matériaux dont le comportement est linéaire au champ magnétique externe, les matériaux diamagnétique, paramagnétique et ferromagnétique.

Un matériau diamagnétique est caractérisé par une magnétisation faible qui s'oriente dans le sens inverse au champ magnétique appliqué. Lorsque ce dernier est nul, le matériau perd son aimantation. Le coefficient χ_m est de l'ordre de -1×10^{-5} . Pour un matériau paramagnétique, la magnétisation s'oriente dans le même sens que le champ magnétique et la susceptibilité magnétique est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} environ. Enfin, un matériau ferromagnétique est caractérisé par des moments magnétiques qui sont orientés localement dans la même direction, et qui réagissent fortement au champ magnétique appliqué. La susceptibilité magnétique est de l'ordre de 10^2 , beaucoup plus importante que celles des matériaux présentés précédemment.

3.2 Efforts magnétiques

Un objet avec une magnétisation \mathbf{m}_{ag} subit une force et un couple magnétiques en présence d'un champ magnétique externe \mathbf{B} . Dans un champ magnétique uniforme, le moments magnétique de l'objet \mathbf{M} a tendance à s'aligner avec les lignes du champ magnétique externe, faisant apparaître un couple magnétique \mathbf{T}_m . Celui-ci est défini par la relation suivante (Coey, 2010) :

$$\mathbf{T}_m = \mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (1.17)$$

Dans un gradient de champ, l'objet magnétique subit une force magnétique \mathbf{F}_m dans la même direction du gradient de champ. Elle est définie par :

$$\mathbf{F}_m = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (1.18)$$

Le moment magnétique \mathbf{M} peut être exprimé en fonction de l'aimantation et du volume de l'objet magnétique comme présenté sur l'équation 1.13. Ainsi, en remplaçant l'expression de \mathbf{M} , le couple et la force magnétiques sont exprimés par les relations suivantes :

$$\mathbf{T}_m = \int_V \mathbf{m}_{\text{ag}} \times \mathbf{B} dV \quad (1.19)$$

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{m}_{\text{ag}} \cdot \nabla) \mathbf{B} dV \quad (1.20)$$

Ces efforts magnétiques dépendent à la fois de la source magnétique (aimant permanent ou électroaimant) pour générer le champ magnétique \mathbf{B} et de l'objet magnétique, à savoir, son moment magnétique \mathbf{M} . Plusieurs configurations de systèmes de manipulation magnétique sont proposées dans la littérature.

3.3 Systèmes à actionnement magnétique

La manipulation magnétique consiste à produire des forces et/ou des couples magnétiques pour contrôler les mouvements d'un microrobot magnétique. Il est possible alors d'utiliser des électroaimants ou des aimants permanents pour générer le champ magnétique dans l'espace de travail. Cette partie introduit les différentes configurations de système exploitant le champ magnétique pour manipulation d'objets magnétiques.

Le système magnétique illustré sur la Figure 1.8a se compose de huit électroaimants fixes dont le courant est régulé pour contrôler le champ magnétique créé dans l'espace. Il est utilisé pour commander un microrobot avec cinq degrés de liberté (trois DDL en position et deux DDL en orientation) (Diller *et al.*, 2014). L'utilisation d'électroaimants engendre une variété de configurations pour produire un gradient de champ et/ou un champ magnétique uniforme. Une architecture similaire, nommée OctoMag, au système précédent est présentée dans Kummer *et al.* (2010). Un IRM est étudié dans Poupponeau *et al.* (2014) dans le cadre de la manipulation d'objet. Une autre source pour induire un champ magnétique est l'utilisation d'un aimant permanent. Ainsi, des robots de manipulation sont utilisés dans plusieurs approches pour déplacer des objets sans contact à partir d'un aimant permanent placé sur l'organe terminal comme illustré sur la Figure 1.8b. Les mouvements de l'effecteur à proximité du microrobot magnétique permettent alors de le déplacer et de le piloter vers les positions désirées (Ciuti *et al.*, 2010). Tous les systèmes magnétiques cités utilisent à la fois le gradient de champ et le champ magnétique uniforme pour déplacer les microrobots.

Par ailleurs, les microrobots nageurs avec des flagelles ou cils sont en général actionnés avec un champ magnétique uniforme tournant ou oscillant. Par conséquent, les micronageurs tournent ou oscillent en synchronisation avec le champ magnétique appliqué et avancent grâce aux forces générées par l'interaction avec le fluide. Dans la littérature, Mahoney *et al.* (2011) utilisent

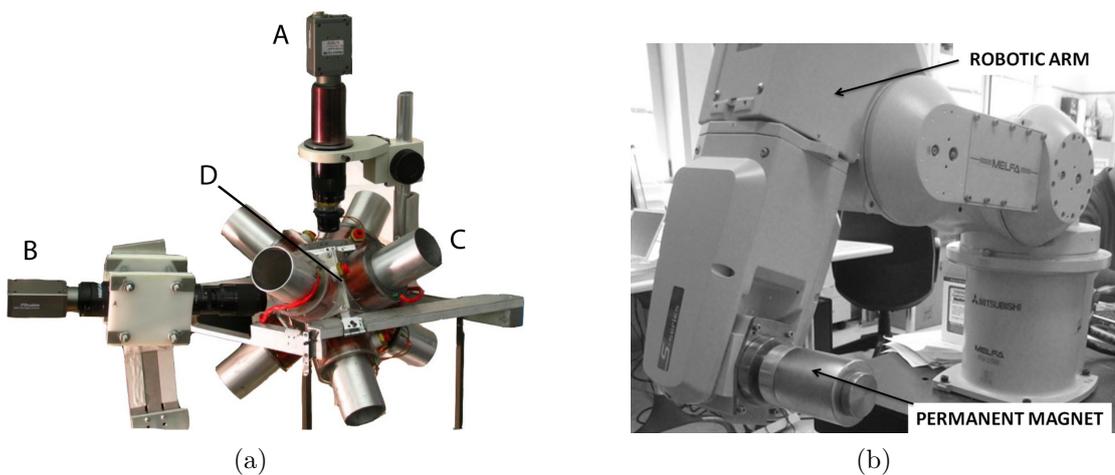


Figure 1.8. (a) Système à huit électroaimants capable de générer des forces et des couples magnétiques afin de contrôler un microrobot magnétique dans l'espace (Diller *et al.*, 2014). Il est composé de A : la caméra de dessus, B : la caméra de côté, C : les bobines et D : l'espace de travail. (b) Robot manipulateur avec un aimant permanent comme organe terminal (Ciuti *et al.*, 2010).

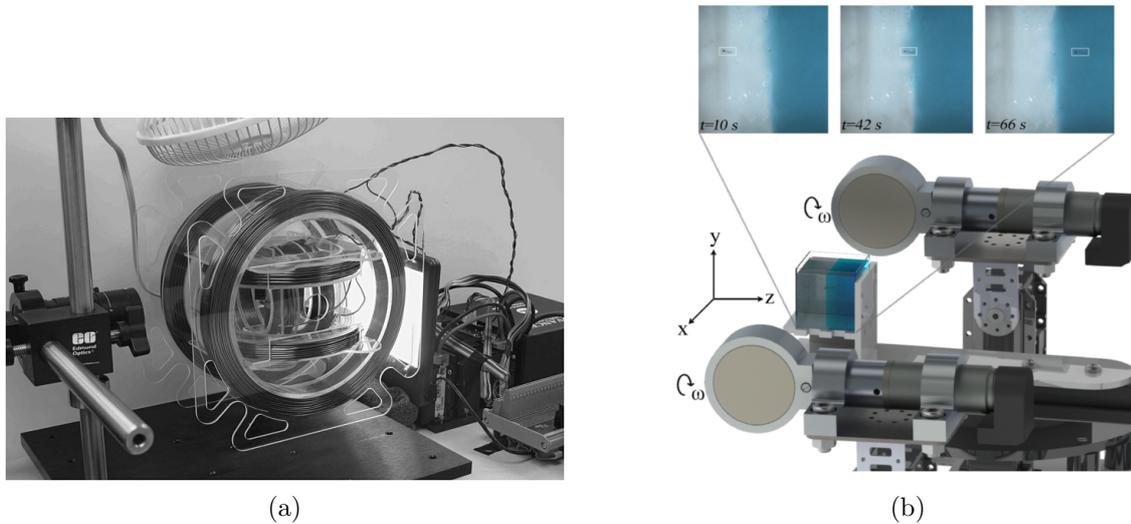


Figure 1.9. Génération d'un champ magnétique uniforme en utilisant trois paires de bobine avec la configuration d'Helmholtz (Mahoney *et al.*, 2011) (a) et la rotation synchronisée de deux dipôles magnétiques (Mahdy *et al.*, 2017) (b).

trois paires de bobine avec la configuration de Helmholtz pour produire un champ magnétique uniforme tournant dans l'espace de travail. Ce système est représenté sur la Figure 1.9a. En utilisant cette configuration, le gradient du champ magnétique est pratiquement nul. Il est aussi possible d'utiliser un bras de robot manipulateur avec un aimant permanent sur l'effecteur pour générer un champ magnétique tournant. Dans ce contexte, Mahoney et Abbott (2011) utilisent la rotation d'un dipôle magnétique pour actionner des robots hélicoïdaux dans des tubes fins. Cependant, le gradient de champ magnétique induit perturbe le mouvement de ces robots. Pour compenser, d'autres configurations utilisent la rotation synchronisée de deux dipôles magnétiques pour éliminer les effets perturbateurs du gradient de champ (Hosney *et al.*, 2015; 2016; Khalil *et al.*, 2017; Mahdy *et al.*, 2017). Un tel système est illustré sur la Figure 1.9b.

Kim *et al.* (2014) proposent une architecture originale d'un système électromagnétique avec deux paires de bobines de Helmholtz, capable de produire un champ magnétique uniforme aussi bien qu'un gradient de champ. Ils superposent les courants de Helmholtz et d'anti-Helmholtz. Le robot magnétique subit alors un couple magnétique induit par le courant de Helmholtz et une force magnétique par le courant d'anti-Helmholtz (courants électriques égaux dans des directions opposées). Les bobines de Helmholtz exploitées dans de nombreux systèmes sont présentées en détail dans le chapitre suivant.

4 Robots nageurs magnétiques

Dans le micromonde, les forces volumiques sont négligeables devant les forces surfaciques. Par conséquent, les mouvements et les tâches comme la manipulation d'objet deviennent difficiles à réaliser à cause des forces d'adhésion (Bouchebout *et al.*, 2014). Cependant, les microrobots qui évoluent dans un liquide semblent être une solution prometteuse pour surmonter ces forces perturbatrices. Cette thèse s'intéresse particulièrement aux microrobots qui interagissent dans un

milieu liquide et qui sont actionnés par un champ magnétique. En effet, l'actionnement magnétique présente l'avantage de ne pas embarquer une source d'énergie à l'intérieur du microrobot. La littérature propose une variété de robots nageurs magnétiques. Le mécanisme de locomotion de ces micronageurs doit être non-réciproque pour se propulser dans un fluide à l'échelle microscopique. Cette thèse s'est particulièrement focalisée sur les propulsions hélicoïdale et flexible. Cette partie présente le principe de locomotion, la modélisation et les développements récents de ces deux types de nage.

4.1 Nageurs flexibles

La référence aux nageurs flexibles est relative aux queues souples ou aux nageurs dont le corps dans son ensemble peut changer de courbure. Ils sont inspirés de la nature comme les spermatozoïdes et quelques bactéries qui utilisent les battements de leur flagelles pour se propulser dans un fluide à l'échelle microscopique. Un flagelle qui oscille dans un milieu liquide produit deux forces de propulsion à chacune de ses extrémités de même amplitude mais de sens opposé. Ainsi, la force de propulsion résultante est nulle. Dans la nature, un spermatozoïde possède un flagelle et une tête. Ainsi, les ondes se propagent dans un seul sens, de la tête vers la queue (oscillations non-symétriques), et entraînent une force de propulsion.

4.1.1 Modélisation

Le nageur flexible peut être modélisé par un filament fin passif de longueur L_f et de rayon R_f sur la quelle est attachée une tête rigide comme illustré dans [Evans et Lauga \(2010\)](#).

Les oscillations (ou rotations) de la tête induisent des battements du flagelle en formes chirales qui produisent une force de propulsion. En raison de leurs mouvements dans le fluide visqueux environnant, ces flagelles présentent alors des forces de traînée. L'interaction corps-fluide peut être décrite par la théorie des forces résistives (resistive force theory en anglais), développée par [Gray et Hancock \(1955\)](#) pour obtenir l'expression de la vitesse propulsive des spermatozoïdes d'un oursin de mer. Cette théorie explique que les forces hydrodynamiques sont proportionnelles à la vitesse du corps avec des coefficients de traînée constants. Elle calcule les forces causées par la vitesse du corps sur une longueur infinitésimalement petite du filament. Ainsi, la force de traînée visqueuse locale par unité de longueur \mathbf{F}_{visc} agissant sur le filament peut être exprimée comme suit :

$$\mathbf{F}_{\text{visc}} = -[\xi_{\parallel} \mathbf{t}\mathbf{t}^T + \xi_{\perp} (\mathbb{1} - \mathbf{t}\mathbf{t}^T)] \mathbf{v}_s \quad (1.21)$$

avec \mathbf{t} le vecteur tangent local, \mathbf{v}_s la vitesse locale du filament et $\mathbb{1}$ la matrice identité tandis que ξ_{\parallel} et ξ_{\perp} qui sont respectivement les coefficients de traînée tangentiel et normal, constants. Ces derniers peuvent être approximés comme suit ([Ye et al., 2014](#)) :

$$\xi_{\parallel} = \frac{2\pi\eta}{\log(L_f/R_f) - 1/2}, \quad \xi_{\perp} = \frac{4\pi\eta}{\log(L_f/R_f) + 1/2} \quad (1.22)$$

avec η la viscosité du fluide. Lors de la déformation du robot flexible, une force élastique apparaît. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$\mathbf{F}_{\text{elastic}} = -A \frac{\partial^4 \mathbf{p}}{\partial s^4} \quad (1.23)$$

avec A la raideur du matériau, s la longueur d'arc et \mathbf{p} le vecteur de position. Comme le robot flexible se déplace dans un fluide à faible nombre de Reynolds, les forces d'inertie sont négligeables et les forces de viscosité fluidiques sont équilibrées uniquement par les forces d'élasticité, i.e. $\mathbf{F}_{\text{vis}} + \mathbf{F}_{\text{elastic}} = 0$. L'équation élastohydrodynamique est alors la suivante :

$$[\xi_{\parallel} \mathbf{t}\mathbf{t}^T + \xi_{\perp} (\mathbb{1} - \mathbf{t}\mathbf{t}^T)] \mathbf{v}_s = -A \frac{\partial^4 \mathbf{p}}{\partial s^4} \quad (1.24)$$

La résolution de (1.24) donne la forme en état stable du flagelle oscillant. Cependant, la non-linéarité géométrique de cette équation rend sa résolution réalisable uniquement par une simulation numérique dans la plupart des cas [Lagomarsino et al. \(2003\)](#) [Ye et al. \(2014\)](#). En se restreignant aux mouvements de petites amplitudes, [Evans et Lauga \(2010\)](#) ont montré qu'il est possible de résoudre cette équation analytiquement. Les prédictions théoriques de ce modèle analytique sont validées par des mesures expérimentales en utilisant un nageur flexible magnétique dans [Shun Pak et al. \(2011\)](#). D'autres travaux sur la modélisation des spermatozoïdes naturels et artificiels sont respectivement présentés dans [Friedrich et al. \(2010\)](#) et [Elgeti et al. \(2015\)](#). En appliquant un mouvement oscillant à la tête du flagelle (avec un couple variable dans le temps), la force de propulsion moyenne F_p peut être estimée comme dans ([Evans et Lauga, 2010](#)) par :

$$F_p = \frac{1}{2} \frac{\pi f \xi_{\perp} T_0^2 L_f^4}{A^2} Z(S_p) \quad (1.25)$$

avec T_0 l'amplitude du couple appliqué, f la fréquence d'oscillation et $Z(S_p)$ une fonction dépendante du nombre de sperme S_p et des conditions limites imposées.

4.1.2 Conception & fabrication

Dans le cas d'un actionnement magnétique, le nageur flexible doit être sensible au champ magnétique appliqué. Celui-ci peut être actionné par un champ magnétique oscillant ([Jang et al., 2015](#)) ou rotatif ([Gao et al., 2010](#)). Par conséquent, il oscille ou tourne en synchronisation avec le champ magnétique appliqué à une fréquence donnée.

[Dreyfus et al. \(2005\)](#) présentent le premier nageur flexible, constitué d'une chaîne linéaire de microparticules magnétiques liées par des fibres d'ADN tel montré sur la Figure 1.10a. Pour briser la symétrie spatiale, un globule rouge est attaché à une extrémité de la chaîne. Le nageur montre un mouvement de battement en appliquant un champ magnétique oscillant. [Khalil et al. \(2014a\)](#) ont présenté un nageur flexible, appelé MagnetoSperm. Il est composé d'une structure qui ressemble à un spermatozoïde avec une tête ellipsoïdale magnétique (recouverte d'une couche de nickel-cobalt) et d'une queue trapézoïdale flexible (polymère SU-8). La queue est fabriquée par photolithographie et la couche magnétique déposée en utilisant l'évaporation par faisceau d'électrons (e-beam evaporation en anglais). [Jang et al. \(2015\)](#) ont fabriqué des nageurs basés sur des nano-fils. La structure consiste en une queue élastique (polypyrrole) et de bâtonnets magnétiques rigides (nickel) reliés par des liaisons souples en polymère. La fabrication est réalisée par déposition couche par couche et etching⁴ (Figure 1.10b). Dans [Li et al. \(2016b\)](#), les auteurs ont réalisé un nano-poisson qui utilise un mouvement non-réciproque pour se propulser dans un fluide à faible nombre de Reynolds. Il est composé d'une tête en or, de deux segments magnétiques en nickel au milieu, et d'un segment en or en tant que nageoire caudale d'un poisson

4. L'etching ou la gravure est un procédé qui consiste à retirer des couches de matériaux.

à la fin. Ces segments sont liés par des articulations flexibles en argent. Khalil *et al.* (2016b) ont fabriqué un nageur flexible par électrofilage (electrospinning)⁵ en utilisant une solution polystyrène dans du diméthylformamide. Des particules d'oxyde de fer qui ont des propriétés superparamagnétiques, sont incorporées dans la tête du nageur pour le rendre sensible au champ magnétique (Figure 1.10d). Tous ces nageurs cités sont actionnés par un champ magnétique oscillant.

Une version millimétrique d'un nageur flexible est montrée dans Espinosa-Garcia *et al.* (2013). Il est composé d'une tête avec un aimant permanent incorporé dans un tube en plastique dans lequel une bulle d'air est capturée pour le rendre de flottabilité neutre. Ensuite, une queue flexible en fibre optique est attachée à la tête. Ce nageur est de taille macroscopique mais il nage dans un fluide à faible nombre de Reynolds (Figure 1.10c).

5. Méthode utilisée pour la fabrication de fibres fines à partir d'une solution de polymère.

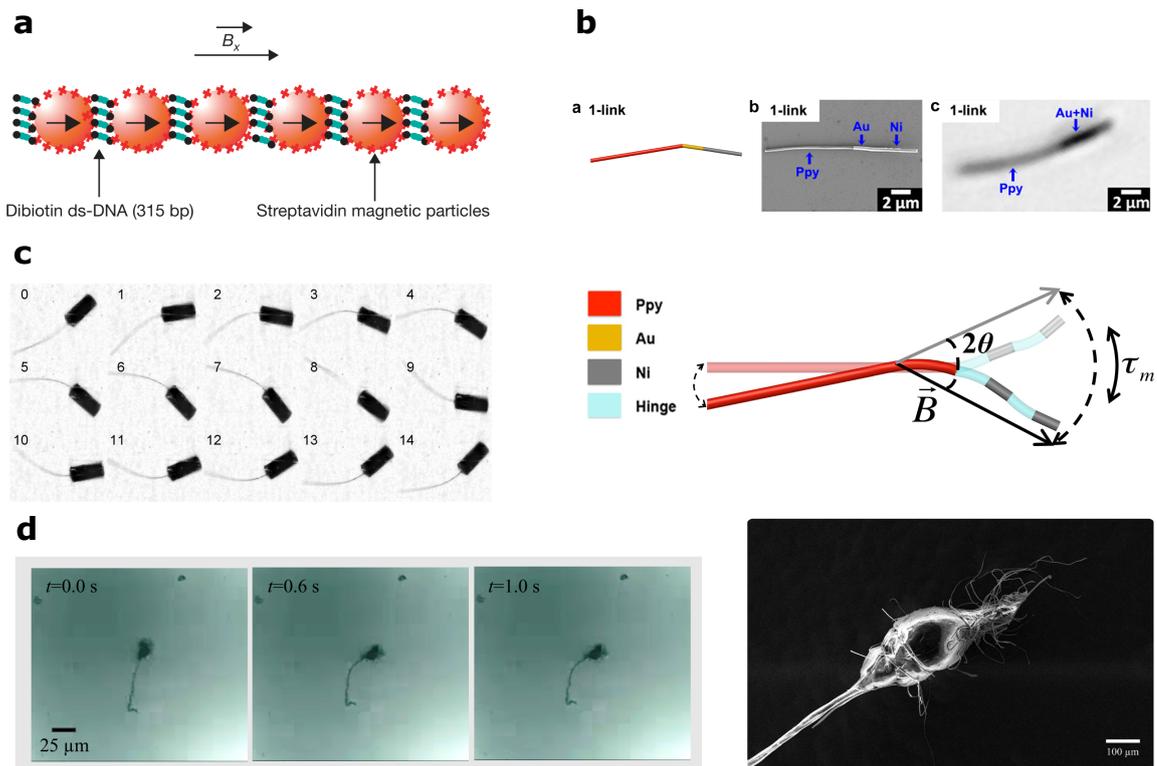


Figure 1.10. Les robots nageurs flexibles dans la littérature. (a) Schéma d'un nageur flexible constitué d'une chaîne de microparticules liées par des fibres d'ADN (Dreyfus *et al.*, 2005). Un globule rouge est ensuite attaché à une extrémité de cette chaîne et qui représente la tête. (b) Micronageur flexible à base de nano-fils (Jang *et al.*, 2015). (c) Robot nageur millimétrique avec un mouvement non-réciproque dans un fluide à faible nombre de Reynolds (Espinosa-Garcia *et al.*, 2013). (d) Micronageur fabriqué par électrofilage (Khalil *et al.*, 2016b).

4.2 Nageurs hélicoïdaux

Les nageurs hélicoïdaux sont inspirés aussi du milieu naturel comme la fameuse bactérie *E. coli*. Ces microorganismes utilisent la rotation de leur flagelle pour se propulser tout en s'appuyant sur le liquide visqueux. Ce type de mouvement est non-réciproque, appelé mouvement du tire-bouchon (ou the corkscrew motion en anglais). La modélisation de ces nageurs est largement étudiée dans la littérature. Pour se faire, la théorie des forces résistives présentée précédemment est utilisée (Lighthill, 1976). Les modèles de propulsion à une et trois dimensions sont présentés dans la suite.

4.2.1 Modèle de propulsion 1D

Le modèle de propulsion hélicoïdal 1D est proposé pour la première fois par Purcell (1977). En appliquant une force et un couple sur le nageur hélicoïdal, une rotation à une vitesse angulaire ω et une translation à une vitesse linéaire v le long de son axe principal sont créés. Comme le fluide à faible nombre de Reynolds est linéaire, la force et le couple respectivement F et T sont reliés par une matrice 2×2 à coefficients constants, à la vitesse linéaire et angulaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Cette matrice est appelée matrice de propulsion ou matrice de résistance du nageur hélicoïdal. Les constantes a , b et c sont proportionnelles à la viscosité du fluide, la forme et la taille du robot nageur. Ces paramètres sont donnés comme suit :

$$a = 2\pi n\sigma \left(\frac{\xi_{\parallel} \cos^2\theta_H + \xi_{\perp} \sin^2\theta_H}{\sin\theta_H} \right) \quad (1.27)$$

$$b = 2\pi n\sigma^2 (\xi_{\parallel} - \xi_{\perp}) \cos\theta_H \quad (1.28)$$

$$c = 2\pi n\sigma^3 \left(\frac{\xi_{\parallel} \cos^2\theta_H + \xi_{\perp} \sin^2\theta_H}{\sin\theta_H} \right) \quad (1.29)$$

avec n est le nombre de tour de l'hélice, θ_H l'angle de tangage par rapport à l'axe central, σ le rayon de l'hélice tandis que ξ_{\parallel} et ξ_{\perp} sont les coefficients de traînée tangent et normal à l'hélice comme illustré sur la Figure 1.11.

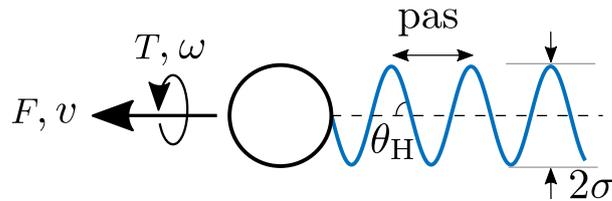


Figure 1.11. Schéma d'un nageur avec une queue hélicoïdale rigide. F et T représentent respectivement la force et couple non-fluidiques tandis que v et ω sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire générées. Les paramètres géométriques sont : σ le rayon de la queue hélicoïdale et θ_H .

Ce modèle est utilisé pour tester la faisabilité, caractériser et optimiser la propulsion de ces nageurs hélicoïdaux le long de leur axe central (Zhang *et al.*, 2009b; Xu *et al.*, 2012). Cependant, il ne fournit pas des informations suffisantes pour comprendre le comportement du microrobot dans l'espace.

4.2.2 Modèle de propulsion 3D

L'extension du modèle de propulsion hélicoïdal dans l'espace 3D est réalisée dans plusieurs travaux à savoir Lauga *et al.* (2006) pour l'étude de la mobilité des flagelles cellulaires et Mahoney *et al.* (2011) pour des nageurs hélicoïdaux artificiels. En utilisant la théorie des forces résistives, la force différentielle sur l'un des petits segments de l'hélice est donnée par :

$$d\mathbf{f}_s = -\xi_{\perp} \mathbf{v}_{\perp s} ds - \xi_{\parallel} \mathbf{v}_{\parallel s} ds \quad (1.30)$$

La vitesse \mathbf{v}_s de l'un de ces petits segments est décomposée en vitesse parallèle et perpendiculaire au segment, avec s la longueur d'arc. Les paramètres ξ_{\parallel} et ξ_{\perp} correspondent aux coefficients de traînée ($\xi_{\perp}/\xi_{\parallel} \approx 2$). À partir de cette équation, il est possible de calculer la force et couple hydrodynamiques respectivement \mathbf{F}_{drag} et \mathbf{T}_{drag} agissant sur le nageur hélicoïdal :

$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = \iiint d\mathbf{f}_s \quad (1.31)$$

$$\mathbf{T}_{\text{drag}} = \iiint \mathbf{p} \times d\mathbf{f}_s \quad (1.32)$$

avec \mathbf{p} la position du petit segment. L'intégrale de la force différentielle se fait suivant les trois directions (Figure 1.12). Le principe fondamental de la dynamique s'écrit alors comme suit :

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}_{\text{drag}} = 0 \quad (1.33)$$

$$\mathbf{T} + \mathbf{T}_{\text{drag}} = 0 \quad (1.34)$$

avec \mathbf{F} et \mathbf{T} sont respectivement la force et couple non-fluidiques appliqués. Le développement de (1.33) et (1.34) permet d'exprimer \mathbf{F} et \mathbf{T} en fonction de la vitesse de propulsion \mathbf{v} et de la vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

avec \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{C} sont des matrices 3×3 constituant la matrice de propulsion. Ces éléments dépendent de la forme et de la taille du robot nageur et ainsi que de la viscosité du fluide. Ces matrices ont les formes suivantes :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & b_{13} \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & c_{22} & 0 \\ c_{31} & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

L'inverse de la matrice de propulsion est appelée matrice de mobilité, qui représente les vitesses angulaire et linéaire du robot hélicoïdal en fonction de la force et du couple (Fu *et al.*, 2015).

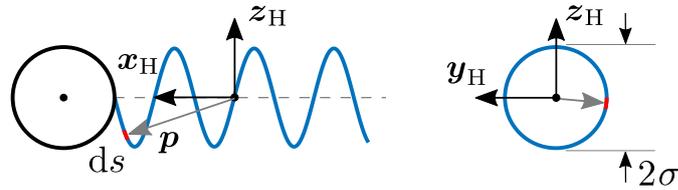


Figure 1.12. Le repère des coordonnées de la queue hélicoïdale. L'origine de ce repère est le centre de l'hélice. L'axe x_H est suivant l'axe principal de l'hélice. Le vecteur p est la position du petit segment ds sur la queue.

4.2.3 Conception & fabrication

Les nageurs magnétiques avec une queue hélicoïdale rigide sont actionnés par un champ magnétique rotatif. Ils tournent en synchronisation avec le champ magnétique appliqué. Ce mouvement rotatif est converti en un mouvement linéaire grâce à l'interaction avec le fluide.

Dans la littérature, plusieurs structures de nageur hélicoïdal sont fabriquées en utilisant la lithographie 3D par laser puis revêtues d'une couche ferromagnétique en utilisant l'évaporation par faisceau d'électrons. Cette technique est utilisée dans [Tottori *et al.* \(2012\)](#) et [Ding *et al.* \(2016\)](#) pour la fabrication des ABFs (Artificial Bacterial Flagella), dans [Medina-Sánchez *et al.* \(2016\)](#) pour le fameux spermobot, dans [Hwang *et al.* \(2016\)](#) pour le micronageur magnétique fluorescent JHM (Janus Helical Microswimmer) et dans [Barbot *et al.* \(2016\)](#) pour le micronageur RTS (Roll To Swim microrobot). Cette méthode est simple pour concevoir des architectures complexes, qui ne sont pas réalisables avec les techniques de microfabrication classiques. Dans [Huang *et al.* \(2014a\)](#), les auteurs ont réalisé des nageurs hélicoïdaux capables de piéger, transporter et relâcher des petits objets dans l'espace en utilisant les forces fluidiques (manipulation sans contact direct avec le microobjet). Le nageur consiste en une queue avec une forme de vis, connectée à une tête en forme d'un tube. Plusieurs têtes de géométries différentes sont étudiées pour analyser leurs impacts sur la locomotion du nageur et la manipulation d'objets (Figure 1.13b). Une forme encore plus complexe est montrée dans [Huang *et al.* \(2015\)](#), un micro-transporteur hélicoïdal avec un mécanisme de pompage basé sur la vis d'Archimède⁶. Ce nageur est composé d'une queue hélicoïdale magnétique avec des parties encapsulées dans un cylindre creux. Les différents composants mécaniques du micronageur sont illustrés sur la Figure 1.13c. Ces micronageurs sont utilisés pour transporter des microbilles et des microhélices dans des canaux microfluidiques. Dans [Peters *et al.* \(2016\)](#), les auteurs ont réussi à fabriquer des nageurs hélicoïdaux superparamagnétiques, dégradables dans un milieu aqueux. Ces nageurs visent des applications in vivo. Le matériau est composé de nanoparticules de magnétite, de diacrylate de poly (éthylène glycol) et de triacrylate de pentaérythritol.

D'autres techniques de microfabrication peuvent être utilisées. Dans [Hoop *et al.* \(2016\)](#), les auteurs ont utilisés l'électrodéposition assistée par modèle (template-assisted electrodeposition en anglais). Ils ont réalisé des nageurs hélicoïdaux par électrodéposition de palladium dans un moule en oxyde d'aluminium anodisé. Pour la magnétisation, les auteurs ont exploité l'évaporation par faisceau d'électrons pour déposer une couche de nickel (Ni) puis d'argent (Ag). Ces nageurs sont conçus dans le but d'éliminer des bactéries indésirables en contact direct avec elles

6. La vis d'Archimède est une hélice, utilisée comme un système de pompage de liquide.

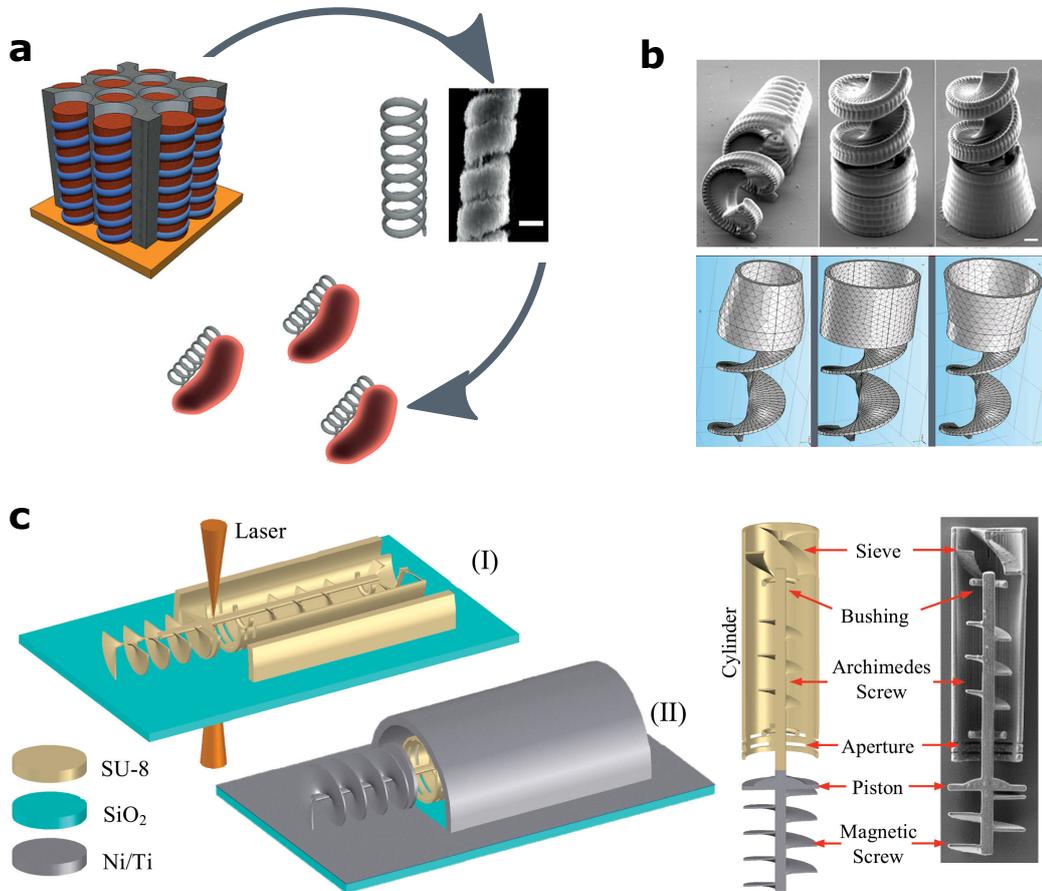


Figure 1.13. Les microrobots nageurs hélicoïdaux dans la littérature. (a) Nageurs hélicoïdaux fabriqués par électrodéposition de palladium, puis revêtus de nickel et d'argent en utilisant l'évaporation par faisceau d'électrons (Hoop *et al.*, 2016). (b) Micronageurs hélicoïdaux avec des géométries de tête différentes conçus en utilisant la lithographie 3D par laser (Huang *et al.*, 2014a). (c) Fabrication de micro-transporteurs en utilisant la lithographie 3D laser et le revêtement d'une couche magnétique avec l'évaporation par faisceau d'électrons (Huang *et al.*, 2015). La vue en coupe montre les composants du micronageur.

(Figure 1.13a). Une version millimétrique du nageur hélicoïdal est réalisée dans Xu *et al.* (2014b) en utilisant l'impression 3D. Cette méthode est simple et peu coûteuse par rapport à d'autres méthodes de microfabrication. Plusieurs autres méthodes de fabrication peuvent être utilisées tel que le self-scrolling (Bell *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2009a) et le glancing angle deposition (Walker *et al.*, 2015).

4.3 Applications potentielles

Afin de manipuler des objets dans le micromonde, les méthodes classiques sont en général basées sur des micro-pinces contrôlées par des systèmes robotisés. Cette partie présente les applications potentielles des microrobots et les avantages qu'ils offrent par rapport aux méthodes classiques telle que la manipulation sans contact dans des espaces enfermés.

Dans le domaine médical, les microrobots avec un actionnement sans contact intéressent la médecine mini-invasive (Nelson *et al.*, 2010; Diller et Sitti, 2013). Les microrobots peuvent être injectés à l'intérieur du corps humain, peuvent naviguer à travers les vaisseaux sanguins et transporter des médicaments pour des cellules défectueuses. Qiu *et al.* (2015) ont montré la possibilité de délivrer des gènes pour des cellules rénales humaines en utilisant des microrobots chargés avec de l'ADN plasmidique *in vitro*. Par ailleurs, une des causes de fertilité chez l'homme est l'immobilité des spermatozoïdes. Medina-Sánchez *et al.* (2016) utilisent des microhélices qui servent de moteurs, afin de transporter et d'aider des spermatozoïdes avec des déficiences de mouvement pour atteindre l'ovule (Figure 1.14a). La tâche consiste à attraper, transporter et implanter le spermatozoïde immobile dans l'ovocyte. Pour libérer le spermatozoïde, le microrobot est propulsé dans le sens inverse (Figure 1.14b). Malgré les enjeux à relever avant d'utiliser les microrobots dans la procréation assistée. Cette approche présente des avantages par rapport à la méthode classique puisque la fécondation a lieu de façon *in vivo*.

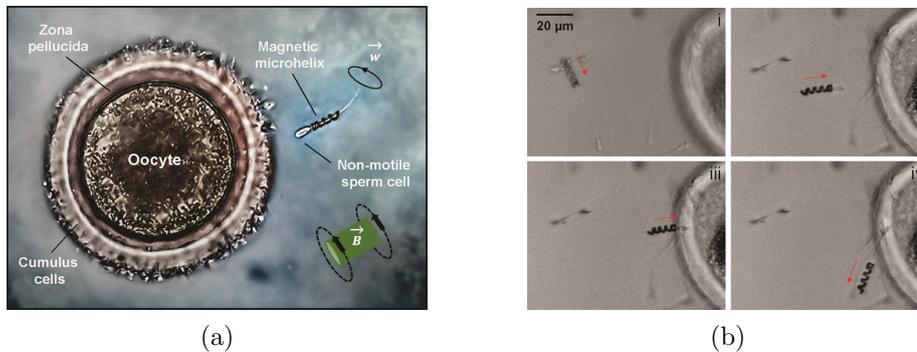


Figure 1.14. (a) Le soin de la fertilité chez l'homme en utilisant des microhélices magnétiques (Medina-Sánchez *et al.*, 2016). (b) La tâche consiste à attraper le spermatozoïde immobile (i), le transporter (ii), l'implanter dans l'ovule (iii) et se libérer (iv).

Dans le domaine biomédical, les microrobots peuvent être utilisés dans les laboratoires sur puce pour l'étude des cellules. Barbot (2016) propose d'utiliser un microrobot de forme hélicoïdale comme un capteur de force dans une puce microfluidique, afin de mesurer la raideur des cellules biologiques. Un tel microrobot développe une force proportionnelle à sa vitesse de rotation. Cette dernière peut être décrite par la relation suivante :

$$F = av + b\omega \quad (1.37)$$

avec F la force, a et b respectivement les coefficients de frottement visqueux et de propulsion tandis que v et ω sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire du microrobot hélicoïdal. Le mouvement rotatif du microrobot est converti en mouvement linéaire grâce à l'interaction avec le fluide. De plus, l'environnement de la plateforme microfluidique assure une stabilité de température et de flux perturbateurs. Par conséquent, les paramètres a et b sont constants. Ainsi, il est possible d'appliquer une force F avec précision en contrôlant ω et en mesurant v comme illustré sur la Figure 1.15.

Dans le domaine industriel, les microrobots peuvent être utilisés dans des tâches répétitives comme les tâches de pick-and-place (Tottori *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2014b). Ils peuvent appliquer des forces, positionner des microcomposants et réparer des défauts. Dans Pieters *et al.*

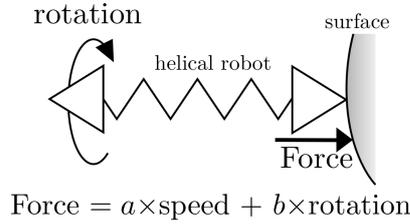


Figure 1.15. Proposition de Barbot (2016) pour l'utilisation d'un microrobot hélicoïdal comme un capteur de force dans une puce microfluidique. a et b sont les coefficients de propulsion et dépendent de la géométrie du robot et des caractéristiques du fluide.

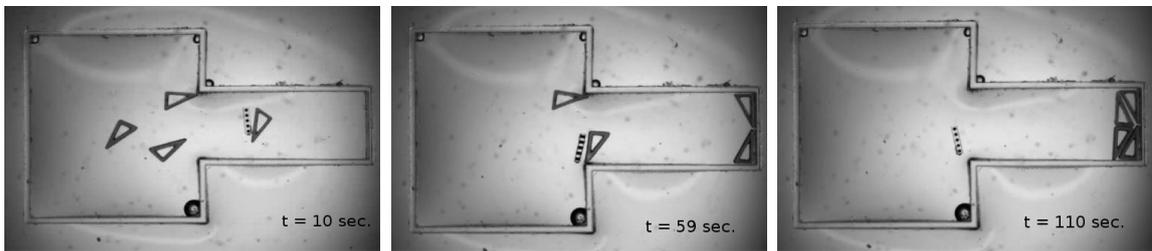


Figure 1.16. Micromanipulation en contact direct avec les microobjets. Le microrobot assemble quatre microobjets dans un canal étroit (Pieters *et al.*, 2015).

(2015), un microrobot magnétique assemble des microobjets de forme triangulaire dans un canal étroit (Figure 1.16).

5 Commande de mouvement des microrobots magnétiques

Afin de réaliser les tâches présentées précédemment, une commande du mouvement est nécessaire pour déplacer ces microrobots et atteindre des positions désirées. Cette commande doit être robuste et précise pour surmonter les perturbations environnementales comme la traînée visqueuse, les effets de bord et les flux perturbateurs dans les vaisseaux sanguins et aussi d'atteindre une certaine répétabilité afin de réaliser des tâches réelles. Cette partie présente l'état de l'art des commandes de mouvement des microrobots magnétiques qui évoluent dans un milieu liquide. La nécessité d'une commande en boucle fermée pour la réalisation de tâches réelles dans l'espace est expliquée.

5.1 État de l'art

Dans la littérature, les chercheurs ont développé différentes stratégies pour piloter les mouvements de ces robots magnétiques. Un aperçu des commandes de mouvement et les enjeux à relever dans ce domaine, est présenté dans Xu *et al.* (2015c). En général, il existe deux catégories de robots magnétiques : les robots holonomes et non-holonomes. Les premiers peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction de l'espace de travail, contrairement aux autres robots

qui possèdent des contraintes cinématiques lors de leur mouvement. Cette contrainte réduit l'ensemble des chemins atteignables à partir d'une configuration initiale, et la commande devient plus complexe.

Les robots magnétiques holonomes sont actionnés en général par un gradient de champ magnétique. Des commandes en boucle ouverte sont réalisées dans plusieurs travaux tel [Yesin et al. \(2006\)](#). Le principe est d'estimer la direction et l'intensité du gradient de champ pour atteindre une position désirée. De même pour les robots non-holonomes, [Alshafei et al. \(2014\)](#) réalisent une commande en boucle ouverte. Elle consiste à estimer la direction du champ magnétique tournant pour suivre une droite verticale avec un robot nageur hélicoïdal. [Ghosh et Fischer \(2009\)](#) utilisent des courbes plus complexes, en traçant les lettres "R", "@" ou "H" avec des commandes pré-programmées. Pour compenser le poids du robot hélicoïdal, [Mahoney et al. \(2011\)](#) développent une commande basée sur le modèle de propulsion du nageur. L'algorithme consiste à calculer l'orientation et la fréquence de rotation du robot nageur nécessaires pour atteindre une vitesse spatiale désirée. La commande est testée sur une trajectoire "U-turn" dans le plan vertical tout en maintenant une vitesse d'avance constante (Figure 1.17). Des erreurs de suivi ont été constatées lors de ces expériences. Elles sont dues aux changements de viscosité du fluide provoqués par la fluctuation de la température ambiante après la caractérisation du modèle de propulsion, ainsi que les effets de bord entre le nageur et le récipient. Cette commande basée modèle est plus intuitive pour contrôler la vitesse désirée du robot, plutôt que de contrôler directement l'orientation et la fréquence de rotation. Cependant, comme l'algorithme est en boucle ouverte, il est exposé aux erreurs de modélisation et aux dérives.

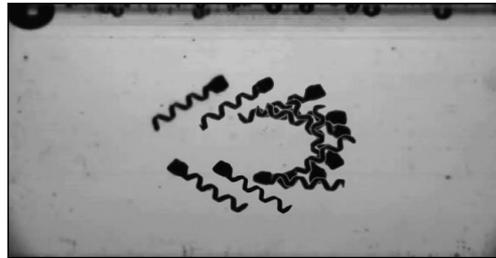


Figure 1.17. Un robot hélicoïdal suit une trajectoire "U-turn" dans le plan vertical en utilisant une commande basée modèle avec une vitesse d'avance constante ([Mahoney et al., 2011](#)).

Pour résumer, le schéma fonctionnel d'une commande en boucle ouverte d'un robot nageur magnétique est illustré sur la Figure 1.18. Le principe consiste à suivre la trajectoire de référence sans aucun retour d'information de la sortie. Ce type de commande n'est pas robuste aux perturbations externes et aux incertitudes du modèle. Pour remédier à cette incertitude, des commandes avec un opérateur humain peuvent être envisagées. Ainsi, avec un retour visuel, l'opérateur peut contrôler directement les mouvements du microrobot, corriger les dérives de la trajectoire de référence et éviter les obstacles présents dans l'environnement. Celle-ci se fait d'une manière non automatique. L'efficacité de cette commande dépend fortement de l'opérateur qui contrôle le microrobot. Elle est adaptée uniquement pour des applications qui ne nécessitent pas un nombre élevé de répétition. [Medina-Sánchez et al. \(2016\)](#) a utilisé la téléopération pour commander les mouvements d'un robot hélicoïdal chargé d'un spermatozoïde immobile, et le guider vers l'ovocyte comme illustré précédemment sur la Figure 1.14. Cette stratégie est utilisée aussi dans d'autres travaux à savoir [Tottori et al. \(2012\)](#), [Qiu et al. \(2015\)](#) et [Khalil et al. \(2016a\)](#).

En utilisant la téléopération, l'opérateur humain peut réguler la position du microrobot assez bien avec un retour visuel. Cependant, la précision reste moins importante que lors de l'utilisation d'une commande en boucle fermée.

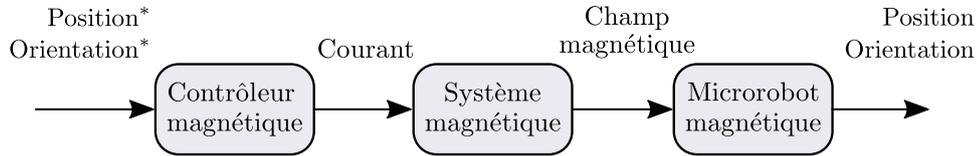


Figure 1.18. Schéma fonctionnel d'une commande en boucle ouverte d'un microrobot magnétique. Dans ce schéma, Position* et Orientation* représentent les positions et les orientations désirées dans l'espace à atteindre par le nageur.

Commander les microrobots magnétiques en boucle fermée les rend moins sensibles aux perturbations environnementales, comme les effets de bord et les incertitudes de modélisation, d'une manière automatique. En effet, un microobjet qui nage à proximité d'une surface solide à l'échelle microscopique, est attiré ou repoussé par ce bord. Ce phénomène est appelé effet de bord ou boundary effect en anglais. Il est étudié dans plusieurs travaux tel que (Lauga *et al.*, 2006; Peyer *et al.*, 2010; Diller *et al.*, 2013). Par ailleurs, les bruits thermiques influencent énormément la viscosité du fluide. Comme la dynamique de ces microrobots dépend fortement des propriétés du fluide, c'est une perturbation majeure à corriger (Ghosh *et al.*, 2014). Un schéma fonctionnel d'une commande en boucle fermée est illustré sur la Figure 1.19. Une telle commande corrige les erreurs et les dérives des microrobots à partir des informations des capteurs extéroceptifs. Ainsi, il est possible d'avoir des précisions élevées. De plus, la commande en boucle fermée engendre une certaine répétabilité de mouvement nécessaire pour réaliser des tâches réelles.

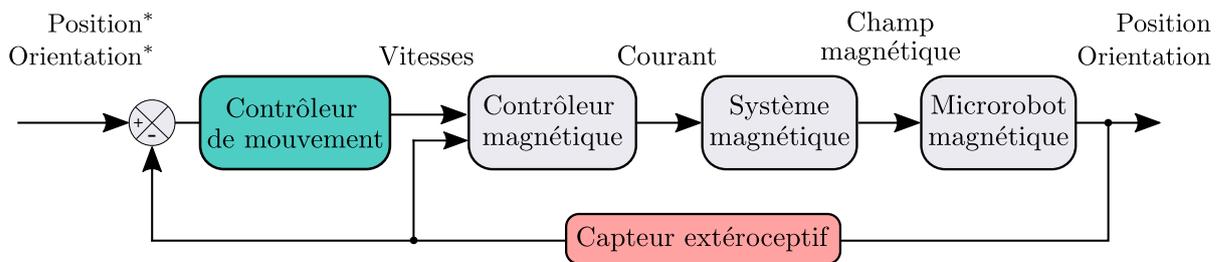


Figure 1.19. Schéma fonctionnel d'une commande de mouvement en boucle fermée d'un microrobot magnétique non-holonyme.

Dans la littérature, Kummer *et al.* (2010) utilisent le système OctoMag pour contrôler un robot magnétique holonome dans l'espace en cinq DDL avec un gradient de champ. La commande de mouvement est basée sur un correcteur proportionnel-dérivé pour asservir l'erreur de position du robot. Cependant, l'orientation est contrôlée en boucle ouverte. Ce contrôleur est validé sur différentes courbes à savoir : des trajectoires rectilignes le long des bords d'un cube, une courbe en forme de huit le long d'une surface sphérique et une trajectoire en spirale. Veron (2014) a développé une commande de suivi de trajectoire d'une capsule endoscopique magnétique dans le plan horizontal. La capsule est actionnée par un couple et une force magnétiques. Le correcteur implémenté comprend un terme proportionnel, un terme dérivé et une anticipation en accélération (feed-forward en anglais). Il corrige ainsi les erreurs de position et d'orientation.

Pour des robots magnétiques non-holonomes, [Khalil *et al.* \(2014d\)](#) proposent une commande de mouvement point à point dans le plan pour un robot flexible en contact avec une surface solide, actionné par un champ magnétique oscillant. La commande en boucle fermée consiste à générer, à partir de la position du robot nageur, un champ magnétique uniforme vers le point désiré (Figure 1.20). Cette même commande est appliquée dans [Youakim *et al.* \(2015\)](#) pour la commande de mouvement d'une grappe de microparticules paramagnétiques qui glissent sur une surface solide à partir d'un champ magnétique oscillant. Ce type de commande n'assure pas la continuité en vitesse à chaque point intermédiaire. En général, il est utilisé pour des systèmes holonomes qui peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction.

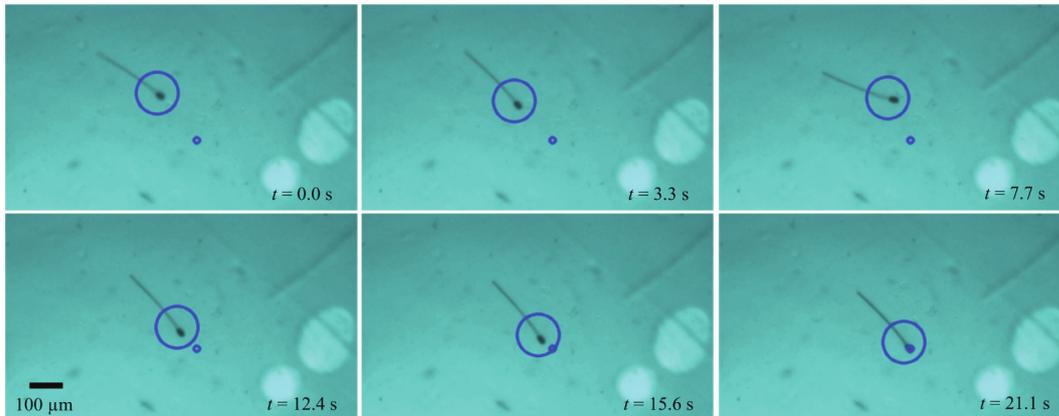


Figure 1.20. Un robot flexible suit une commande de mouvement point à point actionné par un champ magnétique oscillant ([Khalil *et al.*, 2014d](#)).

Il est possible aussi d'alterner entre différents types de mouvement comme dans [Barbot *et al.* \(2016\)](#) entre le roulement sur une surface solide, le mouvement de type toupie sur la pointe du robot hélicoïdal et la nage dans l'espace. Les mouvements de roulement et de la nage sont commandés en boucle ouverte. En revanche, le mouvement de type toupie (i.e. mouvement sur la pointe du nageur en contact avec la surface solide) est en boucle fermée. Ce dernier permet de positionner avec précision le nageur sur une surface solide pour appliquer une force désirée. Dans le cadre de ce projet de recherche, [Xu *et al.* \(2015a\)](#) a proposé précédemment une commande de suivi de chemin en boucle fermée dans le plan horizontal. La commande est validée sur une courbe rectiligne dans le plan horizontal avec un robot hélicoïdal. Cependant, l'altitude est commandée en boucle ouverte. Le modèle cinématique utilisé par [Xu *et al.*](#) est développé par [Samson \(1995\)](#) pour le suivi de chemin planaire d'un robot mobile. Il n'est pas adapté pour un suivi de chemin dans l'espace.

Une synthèse des différentes lois de commande de mouvement des robots magnétiques qui évoluent dans un milieu liquide est présentée dans le Tableau 1.2. Pour les robots magnétiques holonomes, il existe des commandes en boucle ouverte comme des commandes en boucle fermée. Ces dernières sont basées principalement sur le régulateur proportionnel intégral dérivé (PID), un correcteur classique et simple à implémenter. Celui-ci est généralement utilisé pour asservir en position les microrobots. Dans ce cas, l'orientation est contrôlée en boucle ouverte.

Pour les robots magnétiques non-holonomes, la plupart des commandes sont en boucle ouverte ou en téléopération avec l'intervention d'un opérateur humain. Pour ce type de nageur, une

commande en boucle fermée est plus difficile à synthétiser que pour les nageurs holonomes. Un simple contrôleur PID ne peut pas être appliqué directement sur la position du nageur, car celui-ci possède des contraintes cinématiques qui l'empêchent de se déplacer dans n'importe quelle direction de l'espace de travail. La commande développée par [Xu et al. \(2015a\)](#) prend en considération à la fois les erreurs de position et d'orientation. Cependant, le modèle cinématique utilisé n'est pas adapté pour une commande en boucle fermée dans l'espace.

5.2 Enjeux de commande

La commande en boucle fermée dans l'espace reste un enjeu important. Celle-ci doit prendre en considération les contraintes cinématiques verticale et horizontale du nageur. Le système doit comporter un moyen de localisation dans l'espace. L'un des objectifs de cette thèse est de réaliser une commande en boucle fermée généralisée qui prend en considération les perturbations extérieures et les contraintes cinématiques des robots nageurs dans l'espace.

Un autre enjeu de commande pour les microrobots nageurs qui n'est pas envisagé dans cette thèse mais qui devrait être étudié dans les futures travaux de recherche, est la commande simultanée d'une flotte de microrobots. Celle-ci permet d'améliorer les performances de ces nageurs, comme par exemple, dans le cas de la délivrance de médicament ciblée (targeted drug delivery en anglais). Pour l'instant, [Tottori et al. \(2011\)](#) et [Diller et al. \(2013\)](#) proposent d'utiliser des microrobots distincts (formes géométriques et/ou caractéristiques magnétiques différentes) qui réagissent différemment au champ magnétique appliqué. Cependant, la grande difficulté consiste à contrôler des microrobots similaires avec le même champ magnétique. Pour cela, il faut chercher des lois de commande de commutation avancées, comme les commandes basées sur les fonctions de Lyapunov multiple, afin de garantir la stabilité et la convergence des microrobots vers les trajectoires désirées.

6 Synthèse générale & objectifs de la thèse

Cette thèse s'intéresse particulièrement aux microrobots qui évoluent dans un milieu liquide. À l'échelle microscopique, le fluide est caractérisé par un faible nombre de Reynolds car les forces visqueuses dominent les forces d'inertie. Dans ces conditions, le mouvement réciproque n'est pas adapté à la nage et une solution consiste à imiter le mouvement non-réciproque des microorganismes pour se mouvoir. Un microrobot hélicoïdal copie les bactéries qui utilisent la rotation de leur flagelle à la façon d'un tire-bouchon pour générer une force de propulsion. Un micronageur flexible s'inspire du mouvement des spermatozoïdes, qui oscillent leur flagelle flexible pour se déplacer. Ces deux microrobots nageurs peuvent présenter des solutions dans plusieurs applications in vitro et in vivo. Ils peuvent accéder à des endroits très restreints et réaliser des tâches complexes dans des environnements confinés et très restreints. Cependant, il est difficile d'embarquer des actionneurs et des capteurs dans ces micronageurs. Ce travail s'intéresse alors au champ magnétique pour un d'actionnement à distance. Les sources d'énergie sont à l'extérieur, et basées sur des électroaimants dont le courant électrique est contrôlé.

Dans la littérature, il existe de nombreux travaux de recherche sur la conception, l'optimisation et la fabrication de micronageurs et des études sur leur faisabilité. Les chercheurs proposent

Tableau 1.2. Résumé des commandes de mouvement des robots magnétiques.

Systèmes	Actionnement magnétique	Commande & holonomie	DDL	Références
Holonomes				
OctoMag	Gradient de champ magnétique	Commande en boucle ouverte pré-programmée ; Commande de position point à point en boucle fermée (Correcteur PD) et commande d'orientation en boucle ouverte.	3D + 2 rotations	Yesin <i>et al.</i> ; Kummer <i>et al.</i>
Capsule endoscopique	Force et couple magnétiques	Suivi de trajectoire en boucle fermée (Correcteur PD + feed-forward sur la position et l'orientation de la capsule) dans le plan horizontal.	2D + 1 rotation	Veron
Sphère paramagnétique	Gradient de champ magnétique	Commande de position point à point en boucle fermée avec une loi de commande PI.	2D	Keuning <i>et al.</i>
Mag- μ Bots	Force et couple magnétiques	Un correcteur PI pour réguler la position du robot.	2D + 1 rotation	Diller <i>et al.</i>
Non-holonomes				
Nanorobot hélicoïdal	Champ uniforme tournant	Commande en boucle ouverte pré-programmée.	2D + 1 rotation	Ghosh et Fischer
Robot hélicoïdal	Champ magnétique rotatif	Commande basée sur le modèle de propulsion du nageur dans le plan vertical. L'algorithme est en boucle ouverte.	2D + 1 rotation (3D possible)	Mahoney <i>et al.</i>
Spermbot ; ABF	Champ magnétique rotatif	Téléopération en boucle ouverte.	2D + 1 rotation (3D possible)	Medina-Sánchez <i>et al.</i> ; Kim <i>et al.</i>
Roll to Swim robot (RTS)	Champ magnétique rotatif	Commande 2D en boucle fermée pour le mouvement de type toupie (holonome) ; Téléopération pour le roulement sur la surface et la nage (non-holonome).	2D en BF	Barbot <i>et al.</i>
MagnetoSperm	Champ magnétique oscillant	Commande en boucle fermée pour un mouvement point à point sur une surface solide.	2D	Khalil <i>et al.</i>
Scaled-up Helical Microswimmer	Champ magnétique rotatif	Commande de suivi de chemin en boucle fermée dans le plan horizontal.	2D + 1 rotation	Xu <i>et al.</i>

une variété de microrobots avec des tailles et des formes différentes en fonction des tâches à accomplir. Cependant, leurs commandes restent assez simples, peu précises et insuffisamment robustes. En général, ces systèmes sont commandés en boucle ouverte. Or, pour la plupart des tâches, ces micronageurs doivent suivre un chemin géométrique spatial avec précision pour atteindre les positions désirées tout en évitant les obstacles présents dans l'environnement. Ainsi, une commande en boucle fermée dans l'espace peut améliorer la répétabilité, la précision et la robustesse de ces microsystemes face aux perturbations environnementales et aux erreurs de modélisation. Elle permet aussi aux personnes qui ne sont pas familiarisées avec la robotique et ses outils, de contrôler aisément les mouvements de ces micronageurs dans l'espace de travail, comme par exemple, les médecins dans les tâches d'exploration ou de délivrance de médicament pour des cellules défectueuses. De plus, la commande en boucle fermée peut aussi être utilisée dans les tâches manufacturières qui nécessitent une haute précision et une répétabilité élevée.

La partie conception, fabrication et optimisation des nageurs hélicoïdal et flexible est largement étudiée dans la littérature, contrairement à la partie commande. D'ailleurs, aucun de ces deux nageurs n'est commandé en boucle fermée dans l'espace. Ainsi, le premier objectif majeur de cette thèse consiste à réaliser une commande par asservissement visuel dans l'espace, généralisée pour tous les types de micronageurs avec des contraintes non-holonomes. L'idée est de s'affranchir des considérations de conception et proposer des mininageurs dans des conditions de bas Reynolds. Ce choix induit de prendre en considération le poids du microrobot et les perturbations environnementales dans la boucle de commande.

Les robots, flexible et hélicoïdal, utilisent un mouvement non-réciproque pour se propulser dans un fluide à faible nombre de Reynolds. Cependant, ces deux classes de nageurs ont une forme géométrique et un mode de propulsion complètement différents. Le deuxième objectif de cette thèse consiste ainsi à optimiser les robots nageurs hélicoïdal et flexible, notamment en intégrant plusieurs flagelles, et de proposer un ensemble de critères pour comparer deux microrobots qui sont topologiquement différents. À partir de cette analyse, le choix du micronageur le plus performant pour réaliser une tâche spécifique peut être effectuée.

Pour répondre aux objectifs, le chapitre 2 propose des nageurs magnétiques macroscopiques, définis comme des nageurs de taille supérieure à un millimètre. Ces robots évoluent dans un fluide avec une viscosité élevée pour imiter le sang en termes de nombre de Reynolds. Ces robots de taille volontairement augmentée facilitent la fabrication et la localisation avec les dispositifs optiques standards tels que les caméras optiques. Ils peuvent être utilisés dans des applications macroscopiques, et servir de banc d'essai avant la validation à l'échelle microscopique. L'actionnement magnétique est assuré par un dispositif expérimental composé de bobines de Helmholtz. La propulsion et le guidage de ces nageurs sont ainsi caractérisés en fonction du champ magnétique appliqué.

Les robots nageurs utilisés dans cette étude sont considérés comme des systèmes non-holonomes car, ils avancent uniquement dans la direction de leur axe principal. Ils n'ont pas de propulseurs latéraux ou verticaux. Le chapitre 3 décrit leur mouvements par un modèle cinématique 3D, exprimé dans le repère de Serret-Frénet avec des angles de compensation de direction (compensation en lacet) et d'inclinaison (compensation en tangage). Ces angles compensent les perturbations environnementales et le poids du robot nageur (les nageurs artificiels n'ont pas une flottabilité neutre comme les bactéries). Une première loi de commande est synthétisée en utilisant une nouvelle formulation chaînée avec cinq états et trois entrées pour un suivi de chemin

dans l'espace. Cette forme linéarise le système et engendre une commande stable et découplée. Cette approche est scalaire. Une deuxième approche vectorielle plus intuitive est développée, basée sur la fonction de Lyapunov.

Le chapitre 4 présente la validation expérimentale de ces commandes de suivi de chemin 3D sur les nageurs magnétiques. Des trajectoires 3D avec des courbures de complexité différente sont testées sur les robots. Différentes conditions sont expérimentées, comme différents profils de vitesse, angles de compensation d'inclinaison, viscosités de liquide, gains de commande et effets de bord. Leur impacts sur les performances du suivi de chemin est étudié. La deuxième partie montre que l'algorithme développé est général, et peut être utilisé pour n'importe quel nageur non-holonome en adaptant le mode de propulsion propre au robot. La troisième partie propose une comparaison multicritère entre les nageurs flexible et hélicoïdal en fonction de la tâche à réaliser, de l'environnement dans lequel ils évoluent et du processus de fabrication.

Nageurs magnétiques à faible nombre de Reynolds

Sommaire

1	Robots nageurs à faible nombre de Reynolds	38
2	Système de manipulation magnétique	39
2.1	Bobines de Helmholtz	39
2.2	Dispositif expérimental	39
2.3	Notations cinématiques	40
2.3.1	Repère global	41
2.3.2	Repère du robot nageur	42
2.4	Commande magnétique	42
2.5	Équations dynamiques	44
3	Nageur hélicoïdal	45
3.1	Description du robot hélicoïdal millimétrique	45
3.2	Actionnement magnétique	46
3.3	Caractérisation & optimisation	49
3.4	Variation du nombre de flagelle	49
3.5	Variation du nombre de flagelle en considérant le même volume	51
4	Nageur flexible	53
4.1	Nombre de sperme	53
4.2	Fabrication	54
4.3	Propulsion et guidage par couple magnétique	54
4.4	Caractérisation du robot flexible	57
4.4.1	Réponse en fréquence	57
4.4.2	Réponse en amplitude	58
5	Conclusion	61

Ce deuxième chapitre explique les difficultés technologiques liées à l'échelle microscopique et propose une étude macroscopique du problème en reproduisant des conditions similaires à celles de l'échelle microscopique. Il décrit ensuite le système de manipulation magnétique utilisé dans l'étude de cette thèse. Ce dispositif utilise la configuration de Helmholtz pour générer un champ magnétique uniforme afin de commander les orientations de deux types de robots nageurs magnétiques. Ainsi, les deux dernières parties de ce chapitre traitent en détails les nageurs magnétiques hélicoïdal et flexible. La méthode de fabrication, l'actionnement magnétique (i.e. propulsion et pilotage) et la caractérisation sont présentés pour les deux robots. Les nageurs hélicoïdal et flexible imitent respectivement les mouvements d'une bactérie *E. coli* et d'un spermatozoïde. De ce fait, le premier est propulsé par un champ magnétique tournant et le deuxième par un champ magnétique oscillant. La caractérisation des propriétés de propulsion est réalisée en fonction de la fréquence de rotation ou d'oscillation et de l'intensité du champ magnétique. Une optimisation géométrique en variant le nombre de flagelles est décrite pour le cas du robot hélicoïdal.

1 Robots nageurs à faible nombre de Reynolds

La commande des micronageurs en boucle fermée n'est pas suffisamment étudiée dans la littérature principalement à cause des outils d'observation qui sont limités ou s'ils existent, coûtent très chers (voir section 1.2, chapitre 1). De plus, la fabrication à l'échelle micrométrique demande beaucoup de temps et de compétence et coûte cher.

Dans ce travail, nous proposons d'étudier le système à l'échelle macroscopique en reproduisant les mêmes conditions que celles à l'échelle microscopique tel que :

- i) Le fluide à faible nombre de Reynolds : Le fluide à l'échelle microscopique (tel que le sang) est caractérisé par le faible nombre de Reynolds car les forces visqueuses dominent les forces d'inertie. Il est possible d'utiliser un fluide de viscosité élevée tel que la glycérine pour imiter le sang en terme de nombre de Reynolds à l'échelle macroscopique. Ainsi, comme le mouvement du fluide autour du robot est caractérisé uniquement par le nombre de Reynolds, la propulsion du nageur devrait être la même que celle à l'échelle microscopique.
- ii) Les forces volumiques nulles : Les microorganismes comme les bactéries ont une flottabilité neutre. Cependant, les nageurs artificiels qui imitent le mouvement de ces bactéries ont un poids non-nul. Ainsi, cette hypothèse considère que la force de gravité comme une perturbation et devrait être compensée en utilisant par exemple la commande en boucle fermée.

À l'échelle macroscopique, les dispositifs optiques réguliers tel que les caméras peuvent être utilisés pour la détection et le suivi des robots nageurs afin de réaliser une commande en boucle fermée. La fabrication est beaucoup plus simple. Le système macroscopique servira aussi de banc de test avant la validation sur des microrobots. Dans cette étude, les travaux sont réalisés sur des robots nageurs de dimension millimétrique.

2 Système de manipulation magnétique

Afin de propulser et piloter les robots nageurs magnétiques, il existe plusieurs configurations pour générer un champ magnétique, comme montré dans la section 3.3 du chapitre 1. Les bobines électromagnétiques, comme le système de Helmholtz, permet de piloter le robot nageur dans l'espace 3D plus aisément que les aimants permanents. Dans cette section, le principe des bobines de Helmholtz, le dispositif expérimental ainsi que l'architecture du système complet sont présentés.

2.1 Bobines de Helmholtz

Une paire de bobines de Helmholtz consiste en deux bobines identiques de rayon R_b , placées à une distance $d = R_b$ l'une de l'autre comme illustré sur la Figure 2.1a. Elles sont alimentées par le même courant électrique I qui circule dans la même direction.

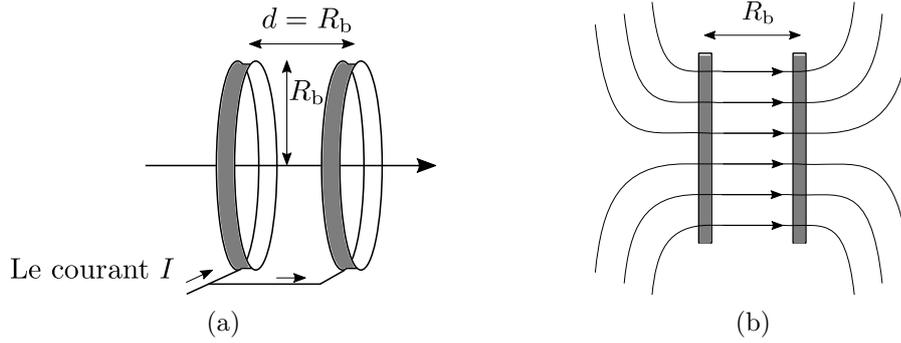


Figure 2.1. (a) Un schéma représentant une paire de bobines en configuration de Helmholtz, et (b) le champ magnétique créé est uniforme dans l'espace entre les deux bobines (vue de dessus).

Cette configuration permet d'avoir un champ magnétique quasiment uniforme dans l'espace entre les deux bobines (Figure 2.1b). L'expression du champ magnétique généré peut être donnée comme suit :

$$\forall \mathbf{p} \in \mathbb{R}^3 \quad \|\mathbf{B}(\mathbf{p})\| = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R_b} \quad (2.1)$$

où n est le nombre de spires de chaque bobine, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ la perméabilité magnétique du vide et \mathbf{p} un point dans l'espace entre les deux bobines. L'intensité et la direction du champ magnétique \mathbf{B} sont contrôlées respectivement par l'intensité et la direction du courant électrique I qui parcourt les deux bobines. En utilisant cette configuration, le gradient de champ magnétique entre les deux bobines est pratiquement nul.

2.2 Dispositif expérimental

Le système de manipulation magnétique du robot nageur dans l'espace 3D, est composé de trois paires de bobines avec la configuration de Helmholtz pour générer un champ magnétique

uniforme \mathbf{B} dans l'espace 3D. La densité du flux magnétique maximale dans le centre de l'espace de travail est de 10 mT. Les détails de fabrication et d'étalonnage des bobines de Helmholtz peuvent être trouvés dans la thèse de Xu (2014). Chaque paire de bobines est alimentée par un servoamplificateur (Maxon motor). Ce dernier contrôle le courant électrique envoyé aux bobines. Une communication analogique entre les amplificateurs et l'ordinateur est assurée par une carte entrées/sorties (modèle Sensoray 626).

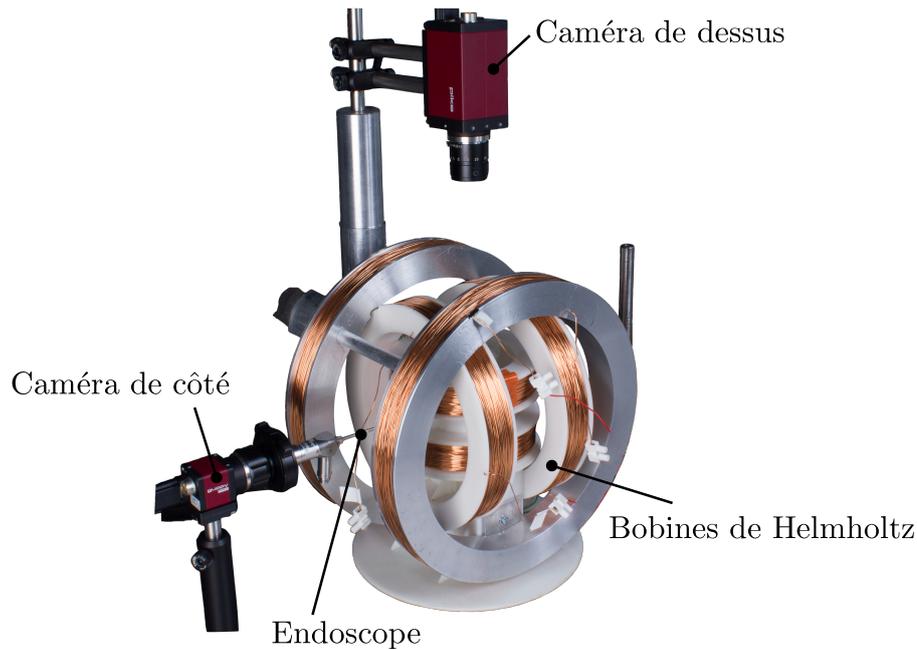


Figure 2.2. Système de manipulation magnétique composé de trois paires de bobine de Helmholtz, deux caméras et un endoscope.

Le système de détection du robot nageur est composé de deux caméras. Une caméra (Pike F032B) optique placée au dessus du système pour avoir une vue du plan horizontal et une deuxième caméra (Guppy Pro F032) couplée avec un endoscope rigide (Bipol, 27 mm de diamètre) pour la vue latérale. À partir de ces deux caméras, il est possible de reconstruire la position et l'orientation du robot nageur dans l'espace 3D (Xu, 2014). La Figure 2.2 présente le système de Helmholtz et les caméras de détection. L'architecture globale du système est résumée sur la Figure 2.3.

Les robots nageurs se déplacent dans une cuve remplie de glycérine, un liquide avec une viscosité élevée qui permet d'avoir un faible nombre de Reynolds. La densité de la glycérine pure est de 1.26 g/cm^3 et la viscosité est de 1.524 Pa.s à une température de 23°C .

2.3 Notations cinématiques

Dans cette section, les notations cinématiques pour le contrôle du robot nageur sont présentées. Il comprend le repère global du système et celui du robot nageur.

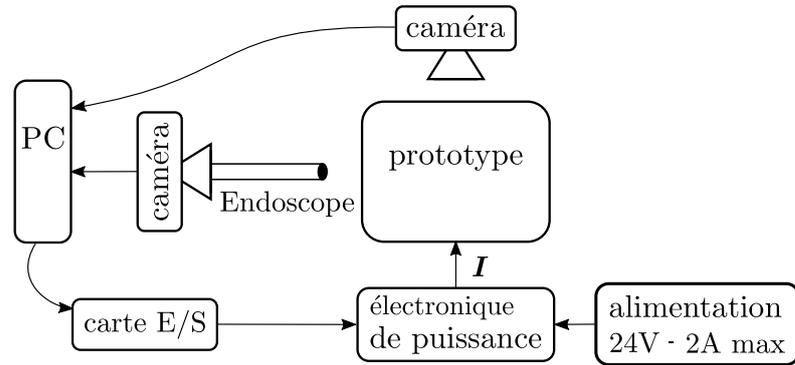


Figure 2.3. L'architecture globale du système de manipulation magnétique. L'ordinateur envoie les tensions électriques nécessaires aux amplificateurs pour générer un champ magnétique \mathbf{B} en utilisant une carte E/S. Les amplificateurs sont alimentés par une source de courant, et convertissent les tensions en courants électriques à envoyer à chaque paire de bobines. Le prototype représente les bobines de Helmholtz qui génèrent le champ magnétique désirée \mathbf{B} . Enfin, en utilisant les deux caméras, la position et l'orientation du robot nageur sont récupérées en utilisant des algorithmes de suivi visuel (ViSP, [Marchand et al., 2005](#)).

2.3.1 Repère global

Le système de coordonnées global (ou monde) $\mathcal{F}_u = \{O, \mathbf{x} \mathbf{y} \mathbf{z}\}$ est défini par les directions des champs magnétiques générés par les trois paires de bobines de Helmholtz. Chaque paire de bobines génère un champ magnétique suivant un axe dans le repère global \mathcal{F}_u . L'axe \mathbf{x} est défini suivant la direction du champ magnétique généré par la paire de bobines avec le plus grand diamètre et qui est le long de l'axe principal des deux bobines. De même, les axes \mathbf{y} et \mathbf{z} sont définis respectivement suivant les axes principaux des deux paires de bobines avec des diamètres moyen et petit. L'origine O est situé au milieu des trois paires de bobines. Ce repère est illustré sur la Figure 2.4.

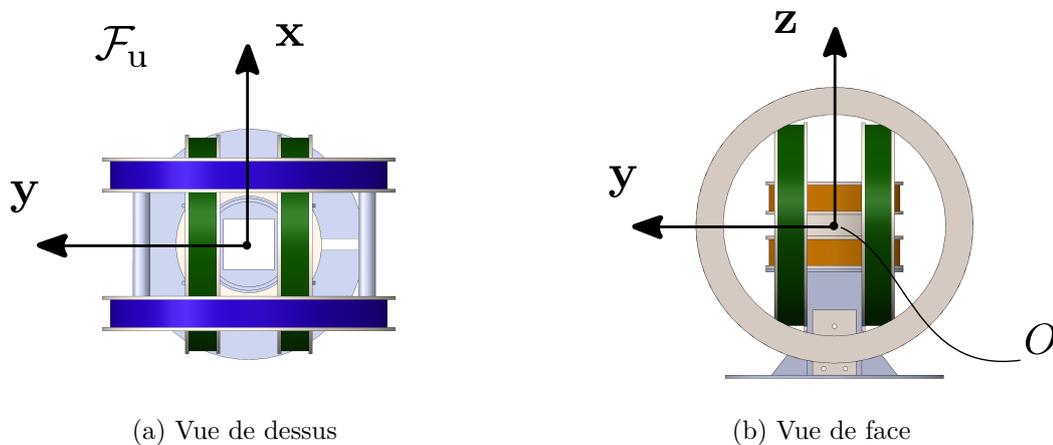


Figure 2.4. Le repère global $\mathcal{F}_u = \{O, \mathbf{x} \mathbf{y} \mathbf{z}\}$ est défini suivant les axes principaux des trois paires de bobines avec la configuration de Helmholtz.

2.3.2 Repère du robot nageur

Le repère du nageur mobile $\mathcal{F}_B = \{\mathbf{x}_B \ \mathbf{y}_B \ \mathbf{z}_B\}$ est attaché au corps du nageur magnétique, situé au centre de masse du nageur \mathbf{p}_G . Le vecteur \mathbf{x}_B est suivant l'axe principal du robot tandis que \mathbf{y}_B et \mathbf{z}_B sont les vecteurs de base du plan perpendiculaire à l'axe principal du robot. L'orientation du nageur (i.e. le vecteur \mathbf{x}_B) par rapport au repère global est caractérisée par deux angles d'Euler à savoir l'angle de direction θ_d et l'angle d'inclinaison θ_i . Le premier est l'angle entre la projection de l'axe principal du robot nageur dans le plan horizontal et l'axe \mathbf{x} du repère global \mathcal{F}_u (l'angle de lacet). Le deuxième angle est l'angle entre l'axe principal du robot nageur et le plan horizontal \mathbf{xOy} (l'angle de tangage). La Figure 2.5 illustre ces deux angles ainsi que le repère \mathcal{F}_B .

L'orientation du robot nageur magnétique ${}^u\mathbf{x}_B$ (ou simplement \mathbf{x}_B) dans le repère global \mathcal{F}_u est exprimée par la relation suivante :

$$\mathbf{x}_B = {}^u\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{x}_B \quad (2.2)$$

avec ${}^B\mathbf{x}_B = [1 \ 0 \ 0]^T$ l'orientation du nageur dans le repère \mathcal{F}_B , et ${}^u\mathbf{R}_B$ la matrice de rotation du repère \mathcal{F}_B au repère \mathcal{F}_u qui est donnée comme suit :

$${}^u\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_z(\theta_d)\mathbf{R}_y(-\theta_i) = \begin{bmatrix} C\theta_d C\theta_i & -S\theta_d & -C\theta_d S\theta_i \\ S\theta_d C\theta_i & C\theta_d & -S\theta_d S\theta_i \\ S\theta_i & 0 & C\theta_i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

À partir de ces deux dernières équations, il est possible d'exprimer l'orientation du robot nageur \mathbf{x}_B en fonction des angles de direction θ_d et d'inclinaison θ_i :

$$\mathbf{x}_B = \begin{bmatrix} C\theta_d C\theta_i \\ S\theta_d C\theta_i \\ S\theta_i \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En contrôlant les angles θ_d et θ_i , les mouvements du robot nageur peuvent être contrôlés dans l'espace 3D. La base du plan perpendiculaire à l'axe principal du robot est constituée par les vecteurs \mathbf{y}_B et \mathbf{z}_B définis par :

$$\mathbf{y}_B = {}^u\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{y}_B \quad (2.5)$$

avec ${}^B\mathbf{y}_B = [0 \ 1 \ 0]^T$ et

$$\mathbf{z}_B = \mathbf{x}_B \times \mathbf{y}_B \quad (2.6)$$

Les angles de direction et d'inclinaison sont définis respectivement dans $[0, 2\pi]$ et $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$.

2.4 Commande magnétique

Dans l'espace de travail entre les trois paires de bobines du système présenté sur la Figure 2.2, le champ magnétique \mathbf{B} est uniforme. Ainsi, un robot nageur avec un moment magnétique \mathbf{M} subit uniquement un couple magnétique \mathbf{T}_m comme suit :

$$\mathbf{T}_m = \mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (2.7)$$

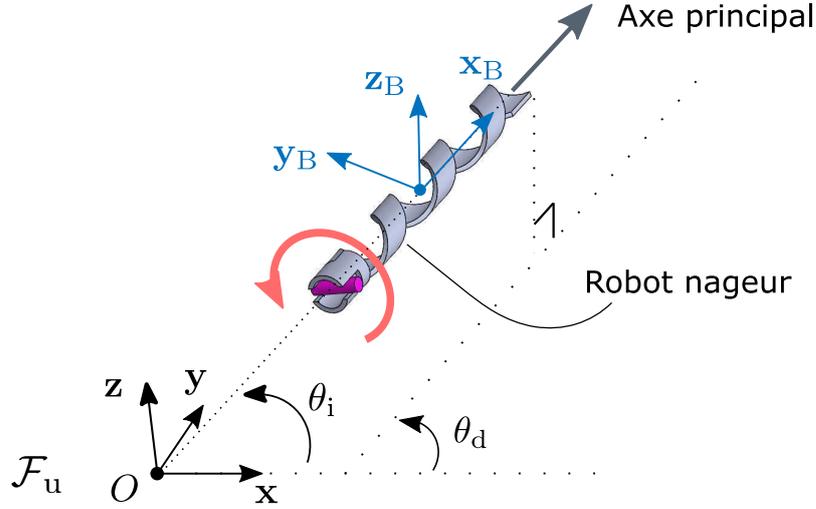


Figure 2.5. Le schéma illustre le repère du nageur mobile $\mathcal{F}_B = \{p_G, x_B, y_B, z_B\}$ ainsi que les angles de direction et d'inclinaison respectivement θ_d et θ_i permettant au nageur de se déplacer dans l'espace 3D. Dans cette figure, le robot nageur est illustré par un robot hélicoïdal mais il peut être remplacé par un nageur flexible.

Le couple magnétique a tendance à aligner le moment magnétique du robot avec le champ magnétique appliqué. Ainsi, avec un champ magnétique tournant ou oscillant, le robot nageur tourne ou oscille en synchronisation avec le champ magnétique appliqué à une fréquence f . Le champ magnétique \mathbf{B} peut être décomposé comme suit :

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_d + \mathbf{B}_s \quad (2.8)$$

avec \mathbf{B}_s le champ magnétique perpendiculaire au vecteur du moment magnétique \mathbf{M} et \mathbf{B}_d parallèle au vecteur \mathbf{M} comme illustré sur la Figure 2.6. Ainsi, le couple magnétique appliqué se réécrit comme suit :

$$\mathbf{T}_m = \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_s \quad (2.9)$$

$$= \mathbf{M} \times \mathbf{B}_d + \mathbf{M} \times \mathbf{B}_s \quad (2.10)$$

Le couple magnétique \mathbf{T}_d est utilisé pour la propulsion du robot nageur et \mathbf{T}_s pour le pilotage. Le premier couple est parallèle au champ magnétique \mathbf{B}_s et le second est perpendiculaire au plan constitué par les vecteurs du moment \mathbf{M} et du champ \mathbf{B}_s . Les champs magnétiques \mathbf{B}_d et \mathbf{B}_s peuvent être exprimés de manière générale en fonction de la position et de l'orientation du robot nageur (respectivement p_G et x_B) et des vitesses linéaire et angulaire désirées à atteindre (respectivement \mathbf{v} et $\mathbf{\Omega}$). Le schéma-bloc de la commande magnétique du robot nageur en boucle fermée peut être alors représentée comme sur la Figure 2.7.

Dans le cas où le champ magnétique n'est pas complètement uniforme, une force magnétique \mathbf{F}_m est générée et qui est donnée comme suit :

$$\mathbf{F}_m = \nabla (\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}) \quad (2.11)$$

avec ∇ l'opérateur gradient. La présence de \mathbf{F}_m se traduit par une translation du robot nageur dans la même direction que la force magnétique. Les imperfections de \mathbf{B} sont difficiles à modéliser,

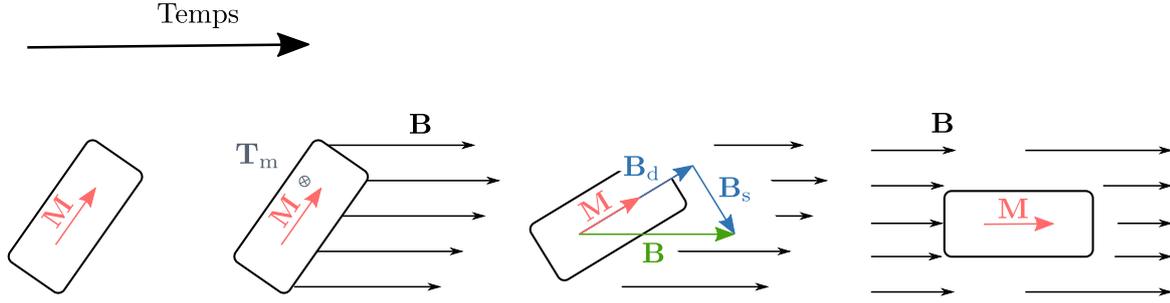


Figure 2.6. Dans un champ magnétique uniforme, le couple magnétique \mathbf{T}_m aligne le moment magnétique du robot nageur avec le champ magnétique appliqué.

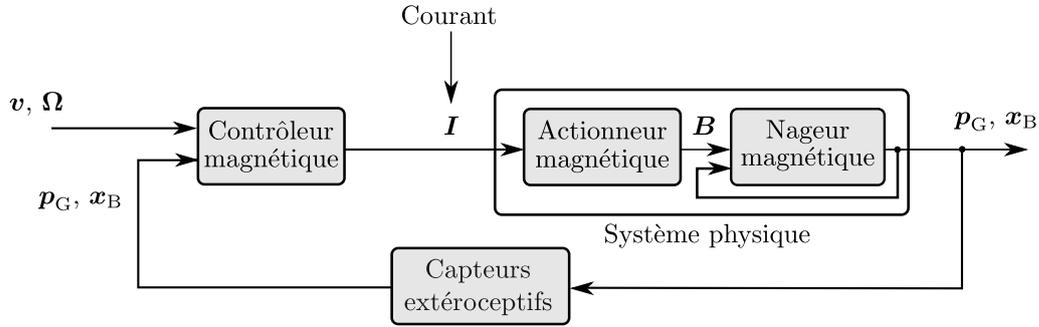


Figure 2.7. Schéma-bloc général de l'actionnement magnétique du robot nageur en boucle fermée. Les vecteurs \mathbf{v} et $\boldsymbol{\Omega}$ sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire de pilotage du robot nageur, les vecteurs \mathbf{p}_G et \mathbf{x}_B représentent respectivement la position et l'orientation du robot dans l'espace tandis que \mathbf{I} est le courant électrique à envoyer au système physique.

généralement petites et dures à exploiter. Ainsi, nous considérons pour la suite de cette étude que la force \mathbf{F}_m et la translation résultante comme une perturbation qui peut être compensée par la commande en boucle fermée.

2.5 Équations dynamiques

Lors de la nage du robot dans un fluide à faible nombre de Reynolds, la force et le couple de traînée respectivement \mathbf{F}_{drag} et \mathbf{T}_{drag} dus aux mouvements de rotation et de translation du corps, sont balancés par les forces et couples non-fluidiques respectivement \mathbf{F} et \mathbf{T} , comme suit :

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}_{\text{drag}} = 0 \quad (2.12)$$

$$\mathbf{T} + \mathbf{T}_{\text{drag}} = 0 \quad (2.13)$$

En remplaçant (2.12) et (2.13) respectivement par les équations (1.31) et (1.32), il est possible d'exprimer les vitesses linéaire et angulaire de propulsion du robot nageur en fonction de \mathbf{F} et \mathbf{T} comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \boldsymbol{\Omega}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_m & \mathbf{B}_m \\ \mathbf{C}_m & \mathbf{D}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

où \mathbf{v}_p et $\boldsymbol{\Omega}_p$ représentent respectivement les vitesses linéaire et angulaire de propulsion du robot tandis que \mathbf{A}_m , \mathbf{B}_m , \mathbf{C}_m et \mathbf{D}_m sont des matrices de dimension 3×3 formant la matrice de mobilité (Fu *et al.*, 2015). Cette dernière dépend de la géométrie du robot nageur et des propriétés du fluide. L'inverse de cette matrice donne la matrice de résistance qui exprime la force et le couple en fonction des vitesses linéaire et angulaire du nageur. Cette dernière est étudiée dans Mahoney *et al.* (2011) pour le robot hélicoïdal et dans Khalil *et al.* (2016b) pour le nageur flexible.

La force non-fluidique \mathbf{F} est la somme des forces magnétique et de gravité (i.e. $\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m$, avec \mathbf{F}_g la force de gravité.). Le poids du robot nageur artificiel n'est pas nul. Cependant, en prenant en compte l'hypothèse des forces volumiques nulles (i.e. $\mathbf{F}_g = 0$) développée dans la section 1, la force de gravité est ainsi considérée comme une perturbation qui peut être compensée en utilisant la commande en boucle fermée. De plus, comme le champ magnétique est uniforme, la force magnétique est nulle (i.e. $\mathbf{F}_m = 0$). Ainsi, La force non-fluidique appliquée sur le robot nageur est négligée. Pour le couple non-fluidique, le robot nageur subit uniquement un couple magnétique \mathbf{T}_m .

Pour conclure, le robot subit uniquement un couple magnétique \mathbf{T}_m comme effort non-fluidique. L'expression des vitesses linéaire et angulaire de propulsion du nageur peut ainsi être simplifiée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \boldsymbol{\Omega}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{D}_m \end{bmatrix} \mathbf{T}_m \quad (2.15)$$

Comme les matrices \mathbf{B}_m et \mathbf{D}_m sont inversibles, nous avons donc :

$$\mathbf{T}_m = \mathbf{B}_m^{-1} \mathbf{v}_p \quad (2.16)$$

$$= \mathbf{D}_m^{-1} \boldsymbol{\Omega}_p \quad (2.17)$$

Les matrices \mathbf{B}_m et \mathbf{D}_m peuvent être identifiées comme dans Mahoney *et al.* (2011) et Xu (2014).

3 Nageur hélicoïdal

Cette section décrit le nageur hélicoïdal. Les équations dynamiques du robot sont étudiées à faible nombre de Reynolds (i.e. la matrice de propulsion) afin de bien choisir l'axe de rotation, et ainsi bien définir les champs magnétiques de propulsion et de pilotage. La deuxième partie aborde l'optimisation géométrique du robot en étudiant la propulsion du nageur pour plusieurs flagelles rigides. Cette dernière partie vient en complément des travaux réalisés précédemment par Xu *et al.* (2014b) sur l'optimisation expérimentale du nageur hélicoïdal.

3.1 Description du robot hélicoïdal millimétrique

Les robots nageurs hélicoïdaux millimétriques sont fabriqués en utilisant une imprimante 3D avec un matériau "VisiJet M3 Black". Ensuite, un aimant de forme d'un disque (1.5 mm de diamètre et 0.5 mm de hauteur) est attaché sur la tête du robot d'une manière à avoir la magnétisation perpendiculaire à l'axe principal du robot. Les paramètres géométriques du robot

hélicoïdal ont été choisis en se basant sur les travaux de [Xu \(2014\)](#), qui a réalisé une étude expérimentale quantitative qui consiste à optimiser la forme géométrique d'un robot hélicoïdal à l'échelle macroscopique. Les paramètres géométriques considérés sont : le pas, la largeur et le nombre de tour de la queue hélicoïdale. D'après les résultats obtenus, le paramètre qui influence le plus la propulsion du nageur est le pas. La Figure 2.8 présente le robot hélicoïdal utilisé dans cette étude.

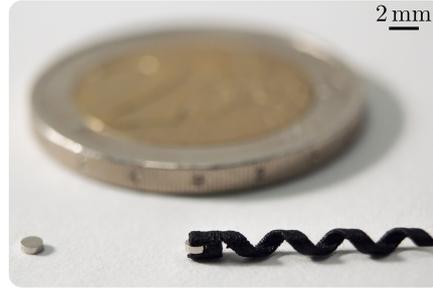


Figure 2.8. Le robot hélicoïdal réel. Ses dimensions sont : 1.5 mm de diamètre, 4 mm de pas avec 3.5 le nombre de tours.

3.2 Actionnement magnétique

Le robot nageur hélicoïdal est actionné par un champ magnétique rotatif généré grâce au système électromagnétique présenté sur la Figure 2.2. Le champ magnétique \mathbf{B} est décomposé en champ magnétique de propulsion \mathbf{B}_d et champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s comme montré dans l'équation (2.8). Cette section présente les expressions de ces deux composantes du champ magnétique.

D'après l'équation (2.15), la vitesse angulaire de propulsion du nageur est donnée par :

$$\boldsymbol{\Omega}_p = \mathbf{D}_m \mathbf{T}_m \quad (2.18)$$

La matrice \mathbf{D}_m est non-diagonale à cause de la forme hélicoïdale du robot nageur et a la forme suivante ([Mahoney et al., 2011](#)) :

$$\mathbf{D}_m = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{13} \\ 0 & d_{22} & 0 \\ d_{31} & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Lors de la propulsion du nageur, le couple magnétique appliqué est le couple \mathbf{T}_d . D'après (2.18), celui-ci peut être exprimé comme suit :

$$\mathbf{T}_d = \mathbf{D}_m^{-1} \boldsymbol{\Omega}_p \quad (2.20)$$

Pour générer une rotation autour de l'axe principal du nageur hélicoïdal, le couple magnétique doit satisfaire l'équation (2.20). Ainsi, d'après l'équation (2.10), le moment magnétique \mathbf{M} et le champ magnétique de propulsion \mathbf{B}_d doivent appartenir au plan perpendiculaire à l'axe de nage défini par $\mathbf{D}_m^{-1} \boldsymbol{\Omega}_p$. L'identification de \mathbf{D}_m est difficile et peu précise à cause des erreurs de fabrication et des perturbations environnementales. En effet, [Mahoney et al. \(2011\)](#) ont constaté

que celle-ci est très affectée par la température de l'environnement qui change les propriétés du fluide telles que la viscosité et ainsi le modèle est peu précis. En outre, dans [Fu et al. \(2015\)](#) section VI, les auteurs ont conclu que l'axe de nage $\mathbf{D}_m^{-1} \boldsymbol{\Omega}_p$ est très proche de l'axe principal du robot nageur. Pour cela, dans cette étude, la matrice \mathbf{D}_m est choisie comme une matrice identité et les erreurs résultantes de ce choix peuvent être compensées par le retour visuel du système expérimental. L'axe de la nage du robot est ainsi choisi comme $\boldsymbol{\Omega}_p = \Omega_x \mathbf{x}_B$. Cette approximation a prouvé son efficacité dans plusieurs travaux tels que [Morozov et Leshansky \(2014\)](#) et [Xu et al. \(2015a\)](#).

Par ailleurs, le couple magnétique a tendance à aligner le moment magnétique du robot nageur avec le champ magnétique appliqué. Ainsi, avec un champ magnétique tournant \mathbf{B}_d et une queue hélicoïdale, le nageur peut se propulser en convertissant sa rotation propre en mouvement linéaire grâce aux forces générées par l'interaction avec le fluide visqueux. Le principe de la propulsion hélicoïdale est illustré sur la Figure 2.9.

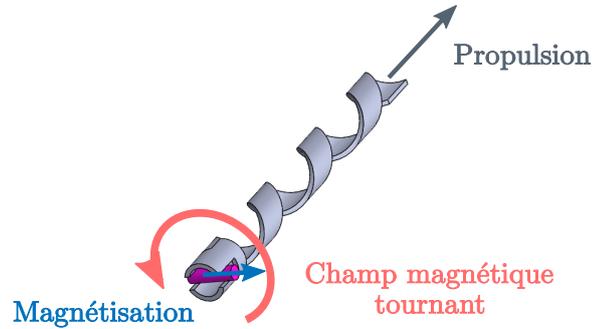


Figure 2.9. Propulsion du robot nageur hélicoïdal avec un champ magnétique tournant. Le moment magnétique du nageur a tendance à s'aligner avec les lignes du champ magnétique tournant. L'interaction du nageur avec le fluide visqueux lui permet de convertir son mouvement rotatif en un mouvement linéaire (propulsion).

L'expression du champ magnétique \mathbf{B}_d qui permet la rotation propre du robot hélicoïdal, est exprimée par la relation suivante :

$$\mathbf{B}_d = B_0 \cos(2\pi ft) \mathbf{y}_B + B_0 \sin(2\pi ft) \mathbf{z}_B \quad (2.21)$$

avec f représente la fréquence de rotation, B_0 la densité du flux magnétique dans le centre de l'espace de travail tandis que \mathbf{y}_B et \mathbf{z}_B sont les vecteurs de base du plan perpendiculaire à l'axe du robot hélicoïdal \mathbf{x}_B . Les expressions de ces trois derniers vecteurs sont présentées dans la sous-section 2.3.2.

La rotation du nageur à une fréquence f est convertie en vitesse linéaire de propulsion grâce à l'interaction fluïdique. Ainsi, en utilisant les équations (2.16) et (2.17), la vitesse linéaire de propulsion peut être calculée en fonction des matrices de propulsion du nageur comme suit :

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{B}_m \mathbf{D}_m^{-1} \boldsymbol{\Omega}_p \quad (2.22)$$

avec $\boldsymbol{\Omega}_p = 2\pi f \mathbf{x}_B$ la vitesse angulaire de propulsion du nageur. Cette relation (2.22) est valide dans le cas où le nageur tourne en synchronisation avec le champ magnétique appliqué \mathbf{B}_d . Par

ailleurs, en absence de perturbations, la vitesse linéaire totale du nageur \mathbf{v} est égale à la vitesse de propulsion \mathbf{v}_p . Ainsi, l'expression de la fréquence f qui permet d'atteindre une vitesse linéaire désirée est donnée par :

$$f = \frac{\|\mathbf{v}\|}{2\pi \|\mathbf{B}_m \mathbf{D}_m^{-1} \mathbf{x}_B\|} \quad (2.23)$$

Dans notre cas, nous caractérisons cette relation par le biais des expériences. C'est à dire nous mesurons la vitesse linéaire du robot en fonction de différentes fréquences de rotation.

Le guidage du robot nageur hélicoïdal est assuré par le champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s . En effet, un champ magnétique parallèle à l'axe principal du robot hélicoïdal crée un couple magnétique perpendiculaire à son axe principal qui lui permet de changer de direction. Dans [Xu et al. \(2015a\)](#), le champ \mathbf{B}_s est défini comme une commande proportionnelle à l'erreur géodésique $\|\mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^*\|$ entre l'axe réel du robot et l'axe désiré à atteindre (respectivement \mathbf{x}_B et \mathbf{x}_B^*), et est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{B}_s = -\text{sign}(\mathbf{B}_d \cdot \mathbf{x}_B^*) \lambda \|\mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^*\| \mathbf{x}_B \quad (2.24)$$

où $\text{sign}(\cdot)$ représente la fonction signe, λ le gain de commande et \mathbf{x}_B^* l'orientation désirée du robot hélicoïdal à atteindre. Dans ce travail, une approche un peu différente est utilisée. Elle consiste à exprimer le champ magnétique \mathbf{B}_s en fonction de la vitesse angulaire de pilotage Ω du robot hélicoïdal. Pour cela, le produit vectoriel $\mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^*$ peut être réécrit comme suit :

$$\mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^* = \mathbf{x}_B \times (\mathbf{x}_B + (\Omega \times \mathbf{x}_B) dt) \quad (2.25)$$

$$= \mathbf{x}_B \times (\Omega \times \mathbf{x}_B) dt \quad (2.26)$$

$$= (\mathbb{1} - \mathbf{x}_B \mathbf{x}_B^T) \Omega dt \quad (2.27)$$

où $\mathbb{1}$ est une matrice d'identité 3×3 et dt le temps d'échantillonnage. En remplaçant (2.27) dans (2.24), le champ magnétique \mathbf{B}_s qui est l'actionneur associé à la vitesse angulaire de pilotage Ω , est alors exprimé par :

$$\mathbf{B}_s = -\text{sign}((\mathbf{B}_d \times \Omega) \cdot \mathbf{x}_B) \lambda \|(\mathbb{1} - \mathbf{x}_B \mathbf{x}_B^T) \Omega\| \mathbf{x}_B \quad (2.28)$$

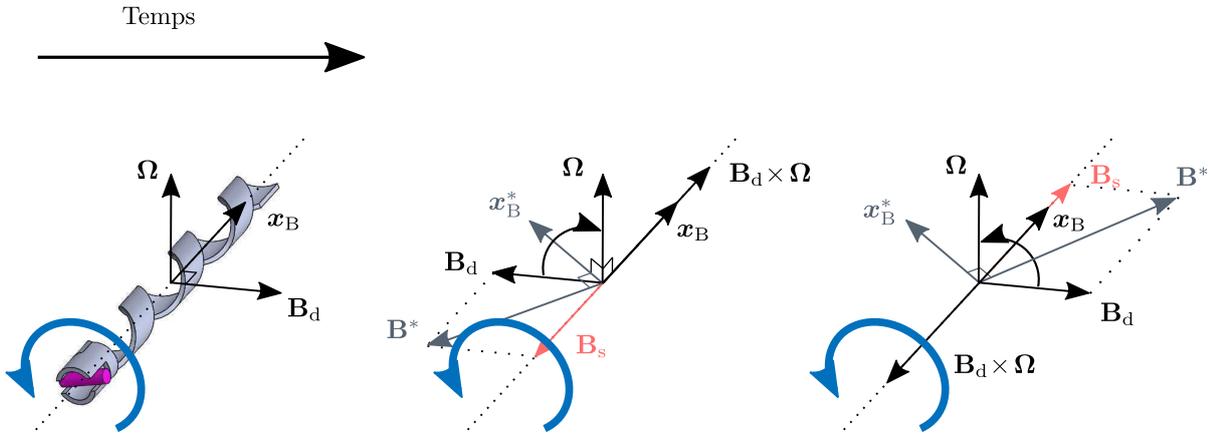


Figure 2.10. Le champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s du nageur dépend de la projection du produit vectoriel $(\mathbf{B}_d \times \Omega)$ sur l'axe principal du robot \mathbf{x}_B . Il doit être toujours de signe opposé pour contribuer au pilotage du nageur.

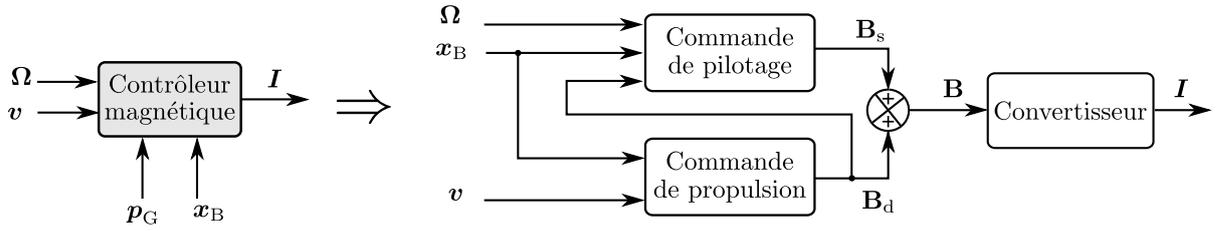


Figure 2.11. Actionnement sans contact du nageur hélicoïdal en utilisant le champ magnétique.

Comme illustré sur la Figure 2.10, le champ magnétique \mathbf{B}_s dépend du signe de la projection de $(\mathbf{B}_d \times \boldsymbol{\Omega})$ sur l'axe principal du robot \mathbf{x}_B . Le champ magnétique \mathbf{B}_s doit toujours être de signe opposé au produit scalaire de $(\mathbf{B}_d \times \boldsymbol{\Omega})$ et \mathbf{x}_B pour contribuer au pilotage.

En conclusion, le schéma fonctionnel du contrôleur magnétique pour le nageur hélicoïdal est présenté sur la Figure 2.11. Celui-ci utilise la commande de propulsion pour transformer la vitesse linéaire \mathbf{v} du nageur en champ magnétique rotatif \mathbf{B}_d . Ensuite, la vitesse angulaire $\boldsymbol{\Omega}$ et l'orientation réelle \mathbf{x}_B du robot sont utilisées par la commande de pilotage pour calculer le champ magnétique \mathbf{B}_s nécessaire pour amener le nageur vers une orientation désirée dans l'espace. Ce contrôleur ne dépend pas de la position du nageur \mathbf{p}_G car le champ magnétique est uniforme dans tout l'espace de travail. Enfin, le champ magnétique global \mathbf{B} est transformé en courant électrique pour chaque paire de bobines par l'équation (2.1). Dans cette section, la commande électromagnétique du nageur hélicoïdal (i.e. définition du champ magnétique \mathbf{B}) est ramenée à un problème cinématique (choix d'une vitesse linéaire de propulsion et d'une vitesse angulaire de pilotage). Ce problème sera traité dans le chapitre 3.

3.3 Caractérisation & optimisation

Pendant sa thèse, Xu (2014) a étudié expérimentalement l'influence des paramètres géométriques sur la force de propulsion des nageurs hélicoïdaux. Les paramètres étudiés sont : le pas, la largeur et le nombre de tour de l'hélice constituant le nageur. Elle conclut que le pas et le nombre de tour sont les deux paramètres qui influencent le plus la force de propulsion de ces nageurs hélicoïdaux. Dans la nature, la bactérie E. Coli par exemple, possède plusieurs flagelles qu'elle fait tourner pour se propulser. Ainsi, la force de propulsion des nageurs hélicoïdaux artificiels peut être optimisée avec plusieurs flagelles. Dans la littérature, Ye *et al.* (2014) ont étudié expérimentalement la propulsion de robots nageurs avec plusieurs flagelles flexibles. Lors de la rotation de ces nageurs, les queues flexibles se tordent passivement en forme hélicoïdale dans un fluide visqueux et génèrent une force de propulsion. Dans cette section, nous étudions des nageurs avec plusieurs flagelles hélicoïdaux rigides contrairement à celles étudiées dans Ye *et al.* (2014) qui sont flexibles, et leurs influences sur la propulsion des nageurs hélicoïdaux.

3.4 Variation du nombre de flagelle

Nous avons réalisé des nageurs hélicoïdaux rigides avec un nombre de flagelle qui varie entre un et quatre, régulièrement espacés, comme montré sur la Figure 2.12. Les quatre différents

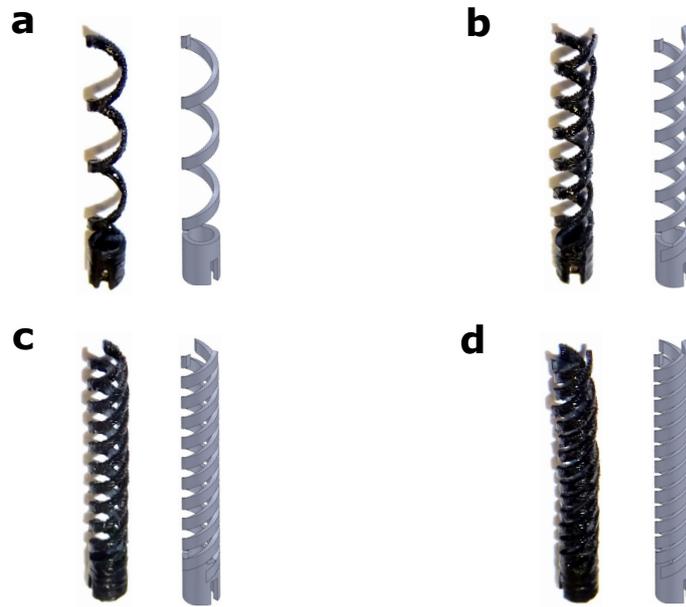


Figure 2.12. Des nageurs hélicoïdaux (réels et modèles CAO) avec plusieurs flagelles rigides. Un nageur hélicoïdal avec un flagelle (a), deux flagelles (b), trois flagelles (c) et quatre flagelles (d).

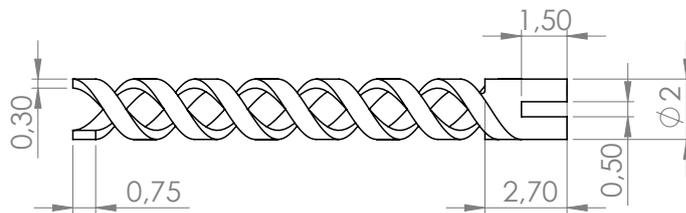


Figure 2.13. Les dimensions du nageur hélicoïdal pour le cas d'un double flagelle. Les valeurs sont en millimètres (mm).

nageurs ont la même forme de tête, la même magnétisation (i.e. le même aimant permanent) et les mêmes caractéristiques du flagelle. Les dimensions ont été résumées sur la Figure 2.13 pour le cas d'un nageur avec deux hélices rigides.

Les différents nageurs ont été émergés dans du glycerol pur et ont été actionnés par un champ magnétique tournant d'intensité de 10 mT. La fréquence de rotation varie de 0 Hz jusqu'à 4.5 Hz. La vitesse d'avance pour chaque fréquence a été mesurée en utilisant les caméras. Le résultat a été rapporté sur la Figure 2.14 pour les quatre types de nageurs.

Les résultats montrent que la vitesse d'avance du nageur avec une seule hélice augmente proportionnellement avec la fréquence de rotation du champ magnétique jusqu'à atteindre une vitesse maximale de 2.5 mm/s à une fréquence de 4 Hz environ. Cette dernière est appelée fréquence de coupure (step-out ou cut-off frequency en anglais). Au-delà de cette fréquence, la vitesse décroît dramatiquement. Le champ magnétique applique un couple magnétique sur le nageur hélicoïdal pour surmonter le couple de traînée fluïdique. Au-delà de cette fréquence de coupure, le couple magnétique n'est pas suffisant pour maintenir le nageur hélicoïdal en rotation

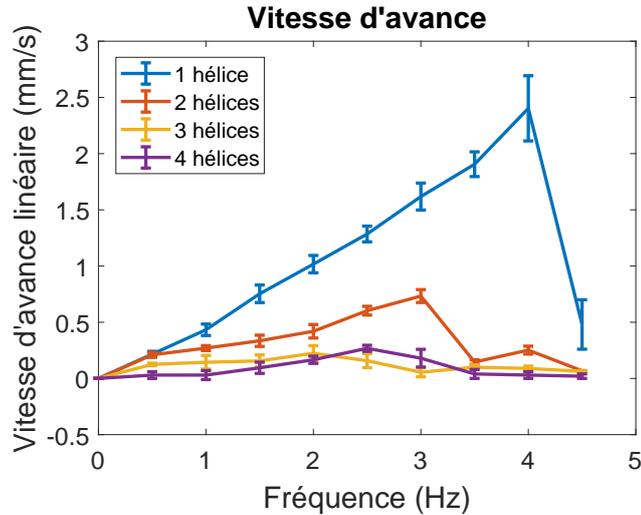


Figure 2.14. Les vitesses d’avance des différents nageurs hélicoïdaux, émergés dans du glycerol pur avec un champ magnétique de 10 mT, en fonction de la fréquence de rotation du champ magnétique. L’angle d’inclinaison des nageurs est fixé à 30° pour compenser le poids des robots. Chaque mesure dans ce graphe représente la moyenne et l’écart type de trois tests avec le même nageur.

synchrone avec le champ magnétique tournant appliqué. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans [Xu *et al.* \(2013\)](#) et [Xu *et al.* \(2014c\)](#). En utilisant le nageur avec deux hélices, nous remarquons que la vitesse d’avance augmente avec la fréquence de rotation du champ magnétique mais avec une pente moins importante que celle du nageur avec une seule hélice. La vitesse maximale est atteinte à une fréquence de coupure de 3 Hz environ. La vitesse maximale du premier nageur est trois fois plus grande que celle du deuxième. Pour les deux derniers nageurs avec trois et quatre hélices, la vitesse d’avance est très faible dans les deux cas.

D’après ces expériences, nous concluons que la vitesse d’avance diminue avec le nombre de flagelle rigide. Cela est dû peut être à l’interaction hydrodynamique entre les différents flagelles quand l’espace entre eux devient petit. Chaque flagelle est affecté par le flux fluide généré par le flagelle à côté. Ainsi, une hélice peut générer une force de propulsion beaucoup plus importante que celle générée par plusieurs hélices.

3.5 Variation du nombre de flagelle en considérant le même volume

Lors de l’optimisation réalisée précédemment, le volume du robot augmente avec le nombre de flagelle. Ainsi, nous avons constaté que la vitesse de propulsion maximale diminue considérablement avec le nombre de flagelle. Dans cette section, une optimisation du nageur hélicoïdal est étudiée en considérant le volume global inchangé.

Les nageurs expérimentés dans cette étude sont présentés sur la Figure 2.15. Le nombre de flagelle varie de un à quatre. Cependant, le volume reste constant, égal à $11.8 \text{ mm}^3 \pm 0.1 \text{ mm}^3$. Les dimensions du robot hélicoïdal avec un seul flagelle sont présentées sur la Figure 2.16. Les caractéristiques magnétiques sont les mêmes pour tous les robots. La vitesse d’avance est mesurée

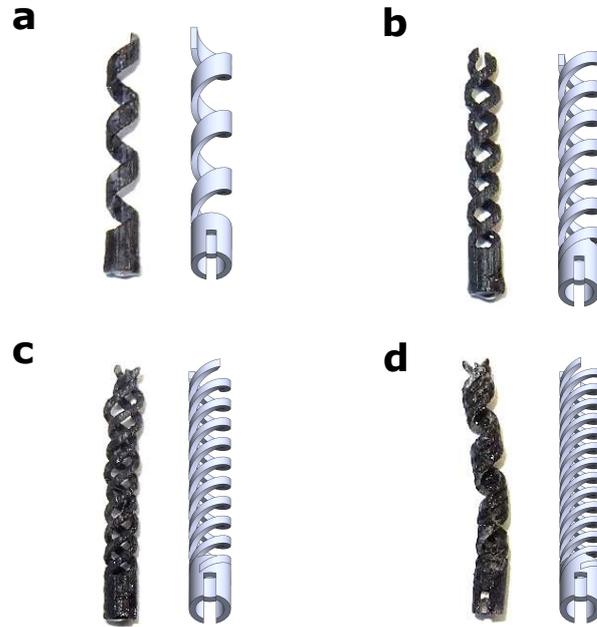


Figure 2.15. Des nageurs hélicoïdaux (réels et modèles CAO) avec plusieurs flagelles rigides ayant le même volume d'environ $11.8 \text{ mm}^3 \pm 0.1 \text{ mm}^3$. Un nageur hélicoïdal avec un flagelle (a), deux flagelles (b), trois flagelles (c) et quatre flagelles (d).

en fonction de la fréquence de rotation du champ magnétique. Les résultats sont illustrés sur la Figure 2.17.

Les résultats montrent que la vitesse du robot avec un seul flagelle croît proportionnellement avec la fréquence de rotation jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.5 mm/s à une fréquence de 2 Hz environ. La vitesse est moins importante que celle du nageur avec un seul flagelle présenté dans la sous-section 3.4 car la largeur de sa queue est deux fois plus grande. En fait, la vitesse de propulsion diminue en augmentant la largeur de la queue du nageur (Xu, 2014). Pour les robots avec un nombre de flagelle supérieur à deux, la fréquence de coupure est de 2.5 Hz et la vitesse d'avance diminue en augmentant le nombre de flagelle. Ceci peut être expliqué par l'interaction hydrodynamique entre les différents flagelles qui ralentit la propulsion. Nous constatons aussi que le nageur avec deux flagelles atteint une vitesse maximale égale à celle du robot avec un

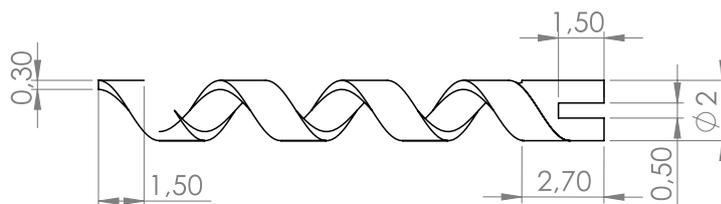


Figure 2.16. Les dimensions du nageur avec un seul flagelle hélicoïdal rigide (Les valeurs sont en millimètres). La largeur de la queue du robot avec un flagelle est deux fois plus grande que celle du robot avec un flagelle présenté sur la Figure 2.12.

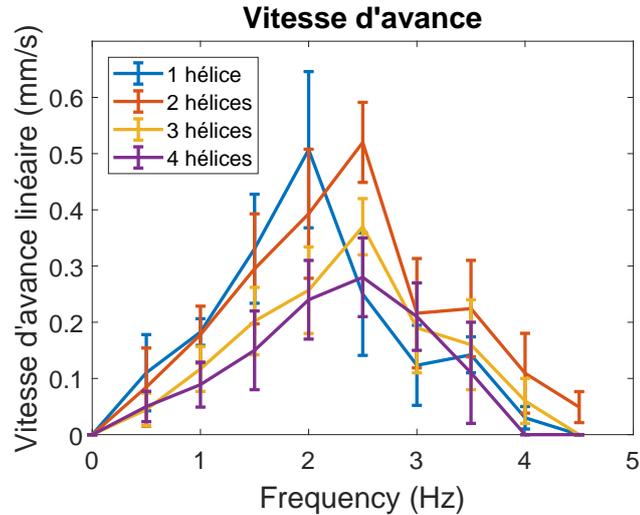


Figure 2.17. Les vitesses d’avance des différents nageurs hélicoïdaux avec plusieurs flagelles rigides ayant le même volume, en fonction de la fréquence de rotation du champ magnétique. L’angle d’inclinaison des nageurs est fixé à 30° pour compenser le poids des robots. La moyenne et l’écart type sont calculés pour trois tests de mesure avec le même nageur.

seul flagelle mais à une fréquence de 2.5 Hz au lieu de 2 Hz. Ce résultat pourrait être intéressant car un multiflagelle pourrait être capable de travailler dans un fluide de viscosité plus large que le mono-flagelle.

4 Nageur flexible

La première partie de cette section présente la fabrication du robot nageur flexible. Pour cela, il faut prendre en compte l’élasticité de la queue du robot par rapport au fluide, ainsi que le sens de la magnétisation. Ce nageur présente une géométrie et un mode de propulsion différents de ceux du nageur hélicoïdal présenté dans la section précédente. Ainsi, un contrôleur magnétique de pilotage est développé pour atteindre les orientations désirées dans l’espace. Enfin, la vitesse de propulsion et l’agilité de ce robot sont caractérisées en fonction de la fréquence et de l’amplitude du champ magnétique appliqué.

4.1 Nombre de sperme

Le nageur flexible utilise les battements de sa queue pour générer une force de propulsion afin de se déplacer dans un fluide à faible nombre de Reynolds. Il imite le mécanisme de locomotion d’un spermatozoïde. Pour cela, il faut respecter un certain rapport entre l’élasticité de sa queue et la viscosité du fluide. Celui-ci est défini par le nombre de sperme.

Le nombre de sperme S_p est un nombre sans dimension qui quantifie l’importance des forces visqueuses sur les forces élastiques du robot nageur. Il est exprimé comme dans [Evans et Lauga](#)

(2010) par :

$$S_p = \left(\frac{L_f^4 \zeta_{\perp} 2\pi f}{A} \right)^{1/4} \quad (2.29)$$

avec L_f la longueur totale du flagelle élastique, f la fréquence de propulsion du champ magnétique oscillant, ζ_{\perp} le coefficient de traînée visqueux normal au flagelle et A le coefficient de raideur du flagelle.

Pour $S_p \ll 1$, la vitesse du nageur tend vers zéro parce que la queue n'est pas assez flexible pour se tordre et le théorème de la coquille de Saint-Jacques est appliqué. De l'autre côté, pour $S_p \gg 1$, les oscillations décroissent rapidement car la viscosité du fluide est trop élevée. Dans la nature, les spermatozoïdes nagent avec $S_p \sim 7$, cependant, [Lowe \(2003\)](#) a montré que la propulsion d'un filament flexible est optimisée pour $S_p \sim 1$.

Par ailleurs, la raideur en flexion du flagelle peut être exprimée comme $A = EI_m$ avec E le module de Young et I_m le moment quadratique de la section transversale. En raison de la traînée du fluide, le robot flexible se tord en essayant de s'aligner avec le couple magnétique appliqué. La rigidité en flexion varie le long de la queue élastique du nageur en fonction de l'abscisse curviligne s comme suit :

$$EI_m \frac{dy}{ds} = \int_0^s \tau_s ds \quad (2.30)$$

où y est le déplacement transversal de la queue à une distance s tandis que τ_s est le moment de flexion ([Xu et al., 2015b](#)).

4.2 Fabrication

Les robots nageurs flexibles sont constitués d'une tête représentée par un aimant permanent sur laquelle est collée une queue flexible. Cette dernière est fabriquée à partir d'un élastomère (silicone), obtenu en mélangeant une base et un catalyseur liquide, qui durcit à température ambiante. Avant la solidification, la queue est placée dans un moule pour prendre la forme souhaitée. Comme l'élastomère est translucide, quelques gouttes de pâte pigmentaire de couleur noire sont ajoutées dans le mélange pour détecter facilement la queue avec les deux caméras. L'aimant permanent a la forme d'un disque et est placé de manière à avoir la magnétisation le long de l'axe principal du robot nageur flexible. La Figure 2.18 présente le robot flexible obtenu.

4.3 Propulsion et guidage par couple magnétique

Le robot flexible est actionné par un champ magnétique oscillant. Lorsqu'un couple magnétique est appliqué sur le nageur, la queue flexible se tord et ainsi génère une force de propulsion grâce à l'interaction avec le fluide visqueux. Le principe de propulsion est illustré sur la Figure 2.19.

La magnétisation du nageur est suivant son axe principal. Ainsi, le champ magnétique de propulsion \mathbf{B}_d est exprimé par la relation suivante ([Dreyfus et al., 2005](#)) :

$$\mathbf{B}_d = B_x \mathbf{x}_B + B_y \cos(2\pi ft) \mathbf{y}_B \quad (2.31)$$

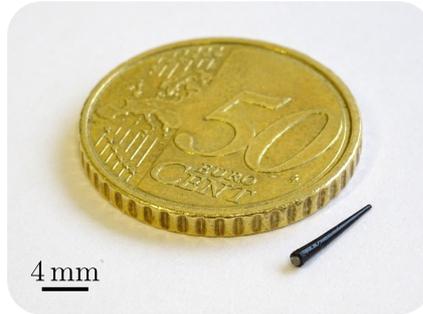


Figure 2.18. Le nageur flexible est composé d'une queue flexible noire sur laquelle est attaché un aimant permanent. Ce dernier est placé de manière à avoir la magnétisation le long de l'axe principal du robot.

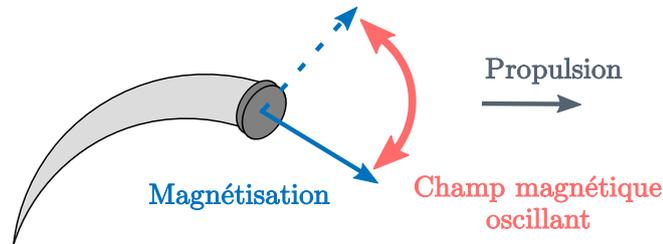


Figure 2.19. Actionnement du robot flexible avec un champ magnétique oscillant. Le moment magnétique oscille en synchronisation avec le champ magnétique appliqué. Grâce aux forces générées par l'interaction avec le fluide visqueux, la queue se tord et ainsi génère une force de propulsion.

Le plan de la nage est défini par les vecteurs \mathbf{x}_B et \mathbf{y}_B . Comme la direction du mouvement linéaire ne change pas avec le champ magnétique oscillant, un champ magnétique statique et homogène $\mathbf{B}_x = B_x \mathbf{x}_B$ est introduit pour contrôler la direction du robot nageur. Ensuite, un champ magnétique sinusoïdal $\mathbf{B}_y = B_y \cos(2\pi ft) \mathbf{y}_B$ est appliqué dans la direction perpendiculaire à l'axe principal du robot flexible, avec f la fréquence d'oscillation. Le champ magnétique résultant \mathbf{B}_d oscille autour de l'axe principal du nageur. Comme la magnétisation \mathbf{M} est dans le plan de la nage, le couple magnétique de propulsion \mathbf{T}_d est perpendiculaire à la fois à \mathbf{M} et \mathbf{B}_d et ainsi à l'axe du nageur flexible. Les oscillations du nageur flexible à une fréquence f sont ensuite converties en vitesse linéaire grâce aux forces générées par l'interaction du robot avec le fluide. La relation entre la fréquence des oscillations du nageur et la vitesse linéaire générée est caractérisée par le biais des expériences dans la section suivante.

La commande de pilotage présentée dans (2.28) pour le robot hélicoïdal ne peut pas être appliquée pour le guidage du nageur flexible car la magnétisation de ce dernier n'est pas perpendiculaire à son axe principal. Ainsi, une nouvelle commande est développée pour piloter l'orientation de celui-ci en boucle fermée dans l'espace.

Le couple magnétique de pilotage \mathbf{T}_s est perpendiculaire à la fois à l'orientation réelle du robot \mathbf{x}_B et à l'orientation désirée à atteindre \mathbf{x}_B^* . Ainsi, il peut être défini comme une commande

proportionnelle à l'erreur vectorielle $\mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^*$ comme suit :

$$\mathbf{T}_s = \lambda \mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^* \quad (2.32)$$

où λ est le gain de commande. Pour calculer l'expression du champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s , l'équation (2.32) est développée comme suit :

$$\mathbf{T}_s = \lambda \mathbf{x}_B \times \mathbf{x}_B^* \quad (2.33)$$

$$= \|\mathbf{M}\| \mathbf{x}_B \times \frac{\lambda}{\|\mathbf{M}\|} \mathbf{x}_B^* \quad (2.34)$$

$$= \mathbf{M} \times \frac{\lambda}{\|\mathbf{M}\|} \mathbf{x}_B^* \quad (2.35)$$

Or, le couple \mathbf{T}_s est généré par un champ magnétique \mathbf{B}_s . D'après (2.10), nous avons donc

$$\mathbf{T}_s = \mathbf{M} \times \mathbf{B}_s \quad (2.36)$$

Enfin, en identifiant (2.35) et (2.36) l'expression du champ magnétique de pilotage \mathbf{B}_s est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{B}_s = \frac{\lambda}{\|\mathbf{M}\|} \mathbf{x}_B^* \quad (2.37)$$

Pour ramener cette commande magnétique à une simple commande cinématique, nous exprimons l'orientation désirée \mathbf{x}_B^* en fonction de l'orientation réelle \mathbf{x}_B et de la vitesse angulaire de pilotage $\boldsymbol{\Omega}$ du nageur comme suit :

$$\mathbf{x}_B^* = \mathbf{x}_B + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}_B dt \quad (2.38)$$

où dt est le temps d'échantillonnage.

Enfin, le contrôleur magnétique pour le nageur flexible est résumé sur la Figure 2.20. Les entrées du système sont la vitesse angulaire de pilotage et l'orientation réelle du robot (respectivement $\boldsymbol{\Omega}$ et \mathbf{x}_B). La loi de commande en boucle fermée du champ magnétique est ainsi développée comme suit :

$$\mathbf{B} = B_x \mathbf{x}_B + B_y \cos(2\pi ft) \mathbf{y}_B + \frac{\lambda}{\|\mathbf{M}\|} \mathbf{x}_B^* \quad (2.39)$$

En remplaçant \mathbf{x}_B^* par (2.38), la commande magnétique globale est donnée par :

$$\mathbf{B} = B_x \mathbf{x}_B + B_y \cos(2\pi ft) \mathbf{y}_B + \frac{\lambda}{\|\mathbf{M}\|} (\mathbf{x}_B + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{x}_B dt) \quad (2.40)$$

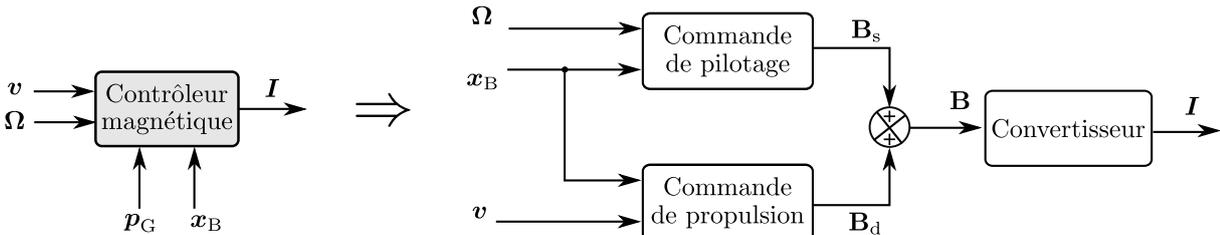


Figure 2.20. Le schéma-bloc du contrôleur magnétique du nageur flexible.

Cette équation est transformée en courant électrique pour chaque paire de bobines du système physique par l'équation 2.1. Comme pour le robot hélicoïdal, la commande électromagnétique du nageur flexible est ramenée à une commande cinématique (choix de vitesses linéaire et angulaire) avant de l'exploiter dans le chapitre 3 dans une commande de mouvement en boucle fermée. D'après nos connaissances, cette commande magnétique de pilotage en boucle fermée du nageur flexible est développée pour la première fois dans l'espace. Dans la section suivante, cette transduction est caractérisée (i.e. passage de vitesses linéaire et angulaire au champ magnétique et inversement).

4.4 Caractérisation du robot flexible

Pour commander les mouvements du robot flexible dans l'espace, il est important de le caractériser par rapport au champ magnétique appliqué. D'après l'équation (2.31), l'amplitude et la fréquence d'oscillation du champ magnétique interviennent tous les deux dans la commande du robot nageur. De ce fait, cette section présente les réponses en fréquence et en amplitude du robot aux sollicitations magnétiques. Celles-ci peuvent être utilisées pour commander la vitesse et l'agilité du nageur pendant son mouvement.

4.4.1 Réponse en fréquence

Dans cette sous-section, la vitesse du nageur est étudiée pour différentes fréquences d'oscillation du champ magnétique. Le flagelle du robot se tord grâce à la traînée fluide et ainsi génère une force de propulsion dans l'espace. La Figure 2.21 décrit la forme et la vitesse du robot flexible dans de la glycérine pure pour différentes fréquences d'oscillation du champ magnétique. Pour compenser le poids du robot, l'angle d'inclinaison est fixé à 50° pendant les expériences.

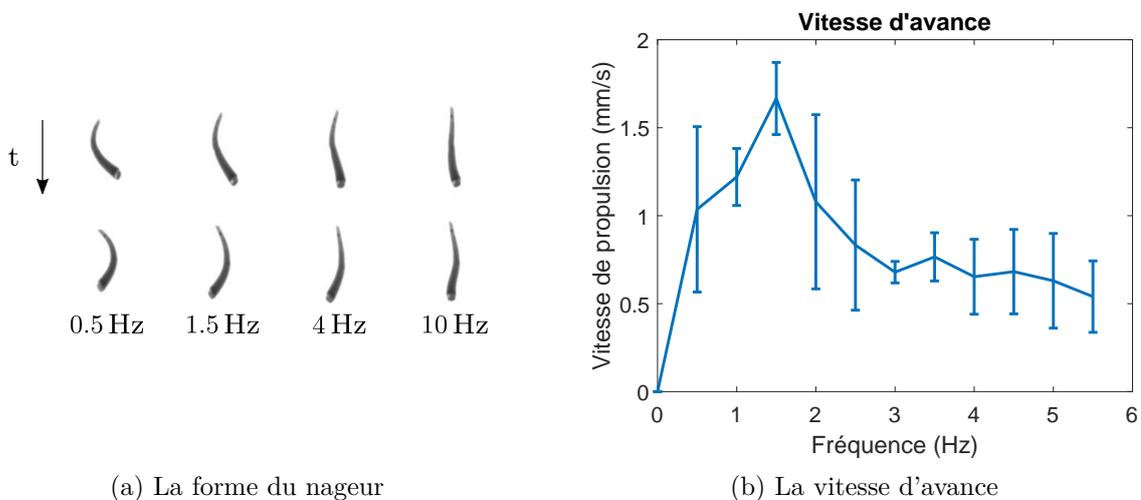


Figure 2.21. Pour différentes fréquences d'oscillation, la forme de la queue du robot flexible (a) et la moyenne de la vitesse d'avance dans le plan horizontal (b). L'angle d'inclinaison est fixé à 50° afin de compenser le poids du nageur. Les barres d'erreur présentent l'écart type de la moyenne de la vitesse d'avance du nageur flexible pour quatre tests de mesure.

Les résultats montrent que la vitesse du robot nageur augmente proportionnellement avec la fréquence d'oscillation du champ magnétique jusqu'à atteindre sa valeur maximale à une fréquence de 1.5 Hz environ. Cette dernière ne représente pas une fréquence de coupure comme c'est le cas pour le nageur hélicoïdal. Au-delà de celle-ci, la vitesse du nageur diminue lentement comme illustré sur la Figure 2.21b. Ces résultats sont similaires à ceux de [Espinosa-Garcia et al. \(2013\)](#). La Figure 2.21a montre la forme de la queue du nageur flexible pour différentes fréquences d'oscillation. Nous constatons que la tête du robot a moins de temps pour se déplacer latéralement entre deux inversions du champ magnétique en augmentant la fréquence d'oscillation. Ainsi, la queue se tord de moins en moins (i.e. l'amplitude des oscillations du nageur diminue). Ce qui explique la décroissance de la vitesse du nageur à haute fréquence car la force de propulsion générée est faible de moins en moins.

Ces résultats montrent que le nageur flexible présente une fréquence optimale pour laquelle la vitesse linéaire est maximale. De ce fait, il est possible de diminuer la vitesse d'avance du robot soit en augmentant ou en diminuant la fréquence d'oscillation. Cependant, le nageur est plus stable pour des hautes fréquences car les amplitudes d'oscillations sont moins importantes. Dans les applications de délivrance d'objet, il serait donc très intéressant d'augmenter la fréquence du nageur pour le stabiliser lors des phases de pose et de dépose.

4.4.2 Réponse en amplitude

Cette sous-section traite la réponse en amplitude du robot nageur. La première partie aborde la vitesse du robot pour différents amplitudes du champ magnétique oscillant. Ensuite, l'agilité du nageur (i.e. réponse à un angle de direction) est étudiée en mesurant le temps de réponse et l'erreur statique.

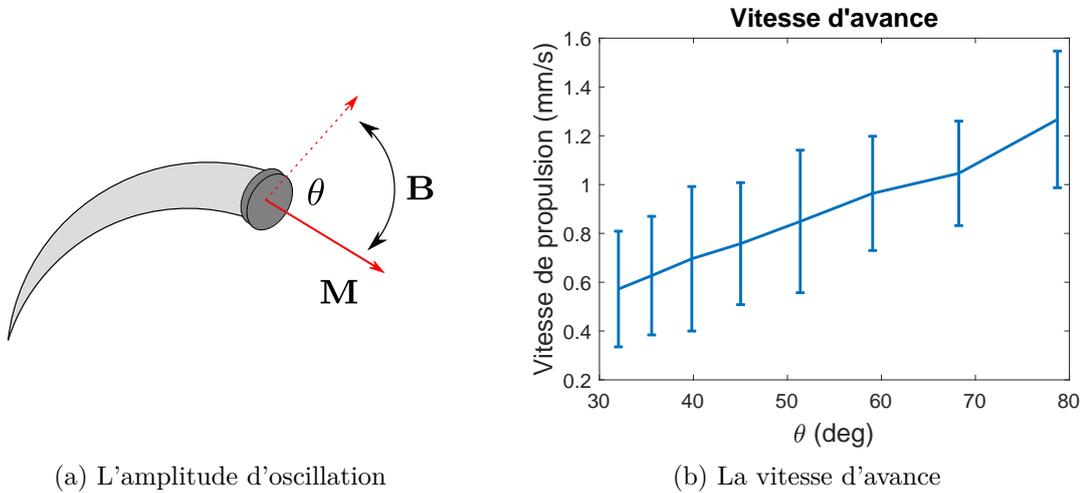
Lorsque le nageur oscille en synchronisation avec le champ magnétique, l'amplitude des oscillations est proportionnel à l'angle θ . Ce dernier est défini comme l'angle entre les deux extrémités de l'axe principal du nageur lors des oscillations tel présenté sur la Figure 2.22a.

La Figure 2.22b montre l'évolution de la vitesse linéaire du robot nageur en fonction des amplitudes d'oscillations du champ magnétique appliqué. Nous constatons que la vitesse moyenne du robot croît proportionnellement avec l'amplitude des oscillations. Ainsi, la vitesse linéaire du nageur peut être régulée en utilisant soit la fréquence soit l'amplitude d'oscillation du champ magnétique.

L'amplitude du champ magnétique joue aussi un rôle dans l'agilité du flagelle. Pour cela, des expériences sont réalisées en étudiant la réponse indicielle du robot à un angle de direction de 70° avec différents amplitudes d'oscillation. L'angle de direction du nageur est mesuré en utilisant la moyenne d'angle des oscillations de l'axe principal du robot comme présenté sur la Figure 2.23. Le graphe montre les oscillations du robot en bleu avec un angle θ de 70° . La moyenne des oscillations en rouge représente l'angle de direction du robot. La précision de ce dernier dépend du nombre de points utilisés pour calculer la moyenne.

La Figure 2.24 montre la réponse du nageur à l'entrée échelon de 70° pour différentes amplitudes d'oscillations. Nous constatons que l'erreur en régime permanent et le temps de réponse ¹

1. Le temps de réponse est défini comme le temps nécessaire pour atteindre 95% du régime permanent.



(a) L'amplitude d'oscillation

(b) La vitesse d'avance

Figure 2.22. (a) L'amplitude des oscillations est proportionnel à l'angle θ et (b) La réponse en amplitude d'oscillation du nageur flexible. La caractérisation est réalisée avec un angle d'inclinaison de 50° et une fréquence d'oscillation de 1.2 Hz. Ces résultats représentent la moyenne et l'écart type de quatre mesures de vitesse pour chaque amplitude du champ magnétique.

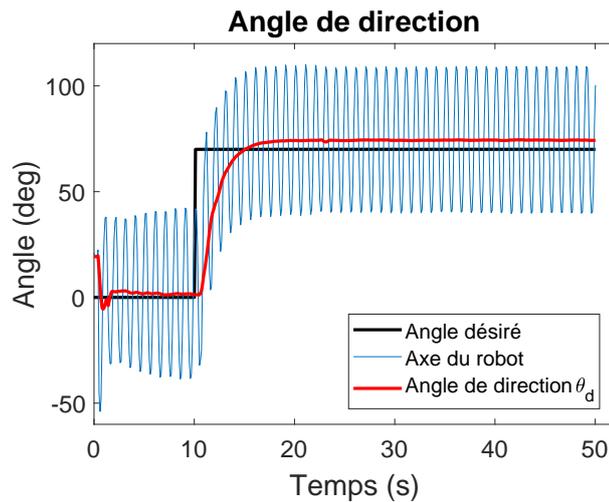


Figure 2.23. La réponse du robot flexible à un échelon de 70° . L'angle de direction θ_d est calculé grâce à la moyenne d'angle des oscillations de l'axe principal du robot nageur flexible.

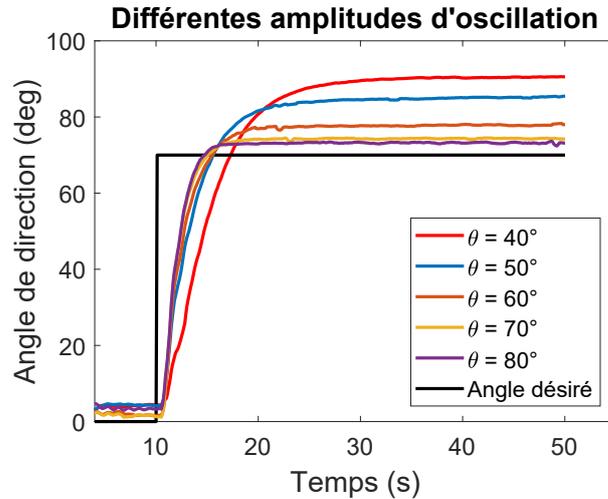


Figure 2.24. La réponse indicielle à un angle de direction de 70° avec différentes amplitudes d'oscillation. L'angle d'inclinaison et la fréquence d'oscillation sont restés fixes durant les expériences.

changent en fonction de l'angle θ . La figure 2.25 résume ces deux performances pour différents angles θ . L'erreur statique est de 20° environ pour $\theta = 40^\circ$, celle-ci diminue en augmentant l'amplitude des oscillations pour atteindre 3° environ à $\theta = 80^\circ$. Nous constatons aussi que le temps de réponse diminue considérablement en augmentant l'amplitude des oscillations. Pour conclure, la réponse du nageur flexible est plus rapide et plus précise pour des amplitudes d'oscillations élevés.

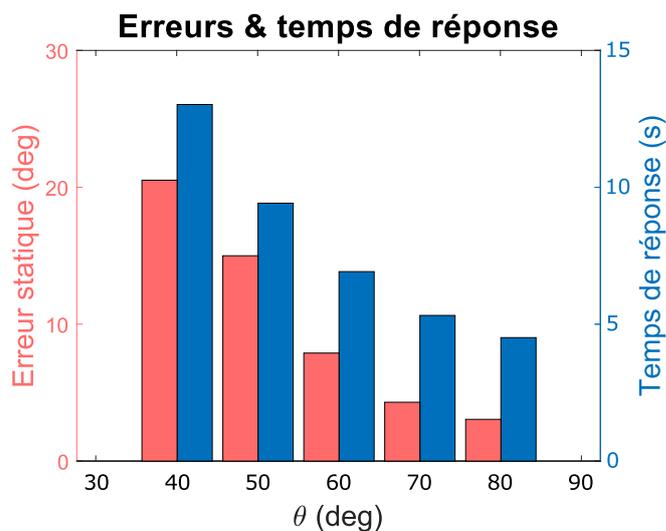


Figure 2.25. Le temps de réponse et l'erreur statique du robot flexible à un angle de direction de 70° .

5 Conclusion

Le dispositif expérimental utilise la configuration de Helmholtz pour générer un champ magnétique uniforme. Dans ce cas, le robot nageur subit uniquement un couple magnétique.

La matrice de propulsion du robot nageur hélicoïdal a été étudiée pour bien définir l'axe de rotation et ainsi le couple de propulsion. La commande magnétique de pilotage est développée en fonction de la vitesse angulaire de pilotage du robot afin de réaliser par la suite une commande en boucle fermée. L'optimisation géométrique du robot a été réalisée avec plusieurs flagelles rigides. En augmentant le nombre de flagelles à taille de flagelle constante, la vitesse maximale du robot nageur diminue car l'espace entre les différents flagelles devient petit et l'interaction hydrodynamique entre celles-ci affecte la propulsion du robot. Cependant, en augmentant le nombre de flagelles mais en gardant le même volume global du robot, les résultats sont différents. En effet, un nageur multi-hélices rigides atteint la même vitesse d'avance qu'un nageur avec un seul flagelle mais à une fréquence de coupure plus élevée. Ce résultat pourrait être intéressant car le nageur multiflagelle serait capable de travailler dans un fluide avec une viscosité plus élevée que le nageur mono-flagelle.

Le nageur flexible est fabriqué en respectant un certain rapport entre l'élasticité de sa queue et la viscosité du liquide. Il est propulsé par un champ magnétique oscillant. La commande magnétique de pilotage est développée pour contrôler la direction du robot nageur dans l'espace. Celle-ci est en fonction de la vitesse angulaire de pilotage. La caractérisation est réalisée en fonction de la fréquence et de l'amplitude du champ magnétique oscillant appliqué. Contrairement au nageur hélicoïdal, le robot flexible ne présente pas de fréquence de coupure mais plutôt une fréquence optimale pour laquelle la vitesse est maximale. L'amplitude des oscillations, quant à elle, joue un rôle dans l'agilité et la régulation de la vitesse linéaire du robot.

Dans le chapitre suivant, un suivi de chemin 3D est développé pour commander les mouvements de ces robots nageurs en boucle fermée.

Modélisation et commande 3D en boucle fermée

Sommaire

1	Introduction	64
2	Commande de mouvement des systèmes non-holonomes	64
2.1	Système non-holonome	64
2.2	Suivi de chemin versus suivi de trajectoire	65
2.3	État de l’art des commandes de mouvement des systèmes non-holonomes	66
3	Modélisation cinématique et commande par une représentation scalaire	68
3.1	Notations pour le suivi de chemin 3D	68
3.2	Modèle cinématique 3D du robot nageur	71
3.2.1	Translation	71
3.2.2	Rotation	72
3.2.3	Modèle cinématique complet dans le repère de Serret-Frénet	73
3.3	Forme chaînée et loi de commande	74
3.3.1	Forme chaînée et changements de variable	74
3.3.2	Loi de commande	79
3.4	Actionnement	80
4	Modélisation cinématique et commande par une approche géométrique	81
4.1	Notations et définitions	81
4.2	Modélisation	82
4.2.1	Vecteur d’état	82
4.2.2	Modèle cinématique	83
4.3	Loi de commande	84
4.4	Actionnement	88
5	Conclusion	89

1 Introduction

Ce chapitre présente une première approche scalaire pour la modélisation et commande du robot nageur. Pour cela, un modèle cinématique avec le repère de Serret-Frénet associé au chemin de référence est utilisé pour exprimer le mouvement désiré en fonction des paramètres du chemin de référence tels que la courbure, la torsion et leurs dérivées spatiales. Les contraintes non-holonomes, le poids du robot nageur et les perturbations extérieures sont pris en compte. Ensuite, une nouvelle formulation chaînée est développée pour linéariser le modèle cinématique et synthétiser une loi de commande afin de stabiliser le système le long d'un chemin 3D. La deuxième partie de ce chapitre développe une approche géométrique plus intuitive du mouvement du robot nageur. Une loi de commande basée sur la fonction de Lyapunov est synthétisée pour commander les mouvements du nageur.

2 Commande de mouvement des systèmes non-holonomes

2.1 Système non-holonyme

Dans un cas idéal, les robots peuvent se déplacer dans n'importe, quelle direction dans l'espace quelque soit leur orientation. Or, certains systèmes mécaniques réels sont soumis à des contraintes cinématiques de position et de vitesse lors de leur mouvement. Ces contraintes réduisent l'ensemble des chemins permettant d'atteindre une configuration désirée à partir de la configuration réelle du robot. L'exemple le plus simple d'un système soumis à des contraintes cinématiques est un robot mobile de type voiture. Les contraintes sur les roues de ce dernier l'empêchent de se déplacer dans un mouvement perpendiculaire à ses roues. Dans l'espace 3D, les déplacements verticaux et latéraux d'un véhicule sous-marin ou d'un avion ne peuvent se faire que s'ils sont associés à des déplacements horizontaux. De tels systèmes sont dits non-holonomes. À l'inverse, les systèmes qui n'ont pas de restriction sur la direction de leurs déplacements comme par exemple les drones ou les robots manipulateurs, sont appelés des systèmes holonomes.

Définition 3.1. *Un système mécanique dont l'espace de configuration est une variété différentielle Q de dimension m , est un système non-holonyme s'il est soumis à un ensemble de contraintes cinématiques*

$$\langle a_i(\mathbf{q}), \dot{\mathbf{q}} \rangle_{i=1, \dots, k} = \mathbf{A}^T(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (3.1)$$

indépendantes¹ et non intégrables², avec \mathbf{q} la configuration du système et $a(\cdot)$ une forme différentielle de Q dans \mathbb{R}^m .

Plus de détails sur les contraintes non-holonomes peuvent être trouvés dans [Campion et al. \(1991\)](#) et [Thuilot \(1995\)](#). Un exemple sur la contrainte de roulement sans glissement d'une roue est présenté dans la thèse de [Maya \(2007\)](#).

De ce fait, un système non-holonyme peut être défini comme un système mécanique avec des contraintes sur les vitesses qui ne sont pas dérivables à partir des contraintes de position

1. La matrice $\mathbf{A}(\mathbf{q}) = (a_1(\mathbf{q}) \dots a_k(\mathbf{q}))$ est de rang $k \leq n$ pour toutes les configurations \mathbf{q} .

2. Pour étudier l'intégrabilité, il faut appliquer le théorème de Frobenius en utilisant les crochets de Lie ([Nijmeijer et Van der Schaft, 1990](#)).

(Bloch *et al.*, 2005). Une caractéristique importante des systèmes non-holonomes est que le nombre de ses entrées est inférieur au nombre de ses degrés de liberté. Cette caractéristique rend la commande de ce système difficile à réaliser. Un résumé des commandes de mouvement des systèmes non-holonomes est présenté par la suite.

Les robots nageurs magnétiques utilisés dans cette étude génèrent des mouvements linéaires dans la même direction que leur axe principal grâce à leur mouvement de rotation ou d'oscillation et ainsi, ils ne peuvent pas se déplacer directement de façon latérale ou verticale. Cependant, les mouvements latéraux générés par les effets des bords (Ghosh *et al.*, 2014), les bruits thermiques (Peyer *et al.*, 2010) ou le poids du nageur sont considérés comme des perturbations, et devraient être corrigées. L'un des objectifs majeurs de cette thèse consiste en la réalisation d'une commande en boucle fermée dans l'espace 3D pour la compensation de ces erreurs. Enfin, les commandes des systèmes non-holonomes classiques comme les sous-marins et les systèmes "avion" peuvent être employées pour la commande de mouvement des robots magnétiques utilisés dans cette étude. Dans la section suivante, deux classes de commande de mouvement sont présentées.

2.2 Suivi de chemin versus suivi de trajectoire

La vitesse d'avance des micronageurs magnétiques ne peut pas être atteinte dans plusieurs cas. En premier lieu, la fréquence de coupure (cut-off frequency en anglais) impose une saturation sur l'amplitude de la vitesse du microrobot (Xu *et al.*, 2014c). Celle-ci dépend de la qualité de la microfabrication et de la viscosité du fluide. En deuxième lieu, l'adhérence du micronageur au substrat peut générer une distorsion de la vitesse d'avance.

L'environnement aux échelles réduites n'est pas toujours homogène car le fluide contient de nombreux micro-résidus et micro-cellules. Ainsi, dans ces conditions, la précision des micronageurs doit être élevée pour éviter les obstacles et les collisions. Dans la commande de mouvement des robots autonomes non-holonomes, le suivi de chemin et le suivi de trajectoire sont parmi les méthodes les plus utilisées. En fonction des tâches à réaliser, celles-ci peuvent être choisies. Cependant, en présence de perturbations, ces deux approches réagissent différemment. Pour cela, une comparaison est illustrée sur la Figure 3.1 pour le cas d'un nageur magnétique.

Dans le cas du suivi de trajectoire, le nageur doit suivre une courbe géométrique donnée avec des contraintes temporelles. De ce fait, le contrôleur de suivi de trajectoire commande à la fois la vitesse d'avance et l'orientation du robot. Il est possible de considérer que la trajectoire désirée est générée par un robot virtuel, et ainsi, suivre la trajectoire désirée revient à suivre le robot virtuel. À cause de perturbations, telles que des zones de frottement élevé dans le cas des micronageurs en milieu inhomogène (p. ex. le sang), un retard se crée entre le robot réel et le robot virtuel. Pour compenser ce retard, le contrôleur de suivi de trajectoire tend à augmenter la vitesse du robot, qui est limitée par les actionneurs qui imposent une saturation sur l'amplitude de la vitesse. Le robot réel prend alors du retard sur le robot virtuel, ce qui l'amène à couper les virages de la trajectoire désirée, et ainsi il ne respecte plus la contrainte géométrique imposée par la trajectoire. À l'inverse, la méthode du suivi de chemin permet une meilleure précision géométrique en présence de telles perturbations. Le robot suit le chemin de référence sans aucune notion du temps. Ainsi, le robot peut se déplacer avec une vitesse d'avance quelconque (i.e une vitesse non régulée en boucle fermée), atteindre une convergence lisse vers la trajectoire de référence et respecter mieux la contrainte géométrique. Dans le contrôleur du suivi de chemin,

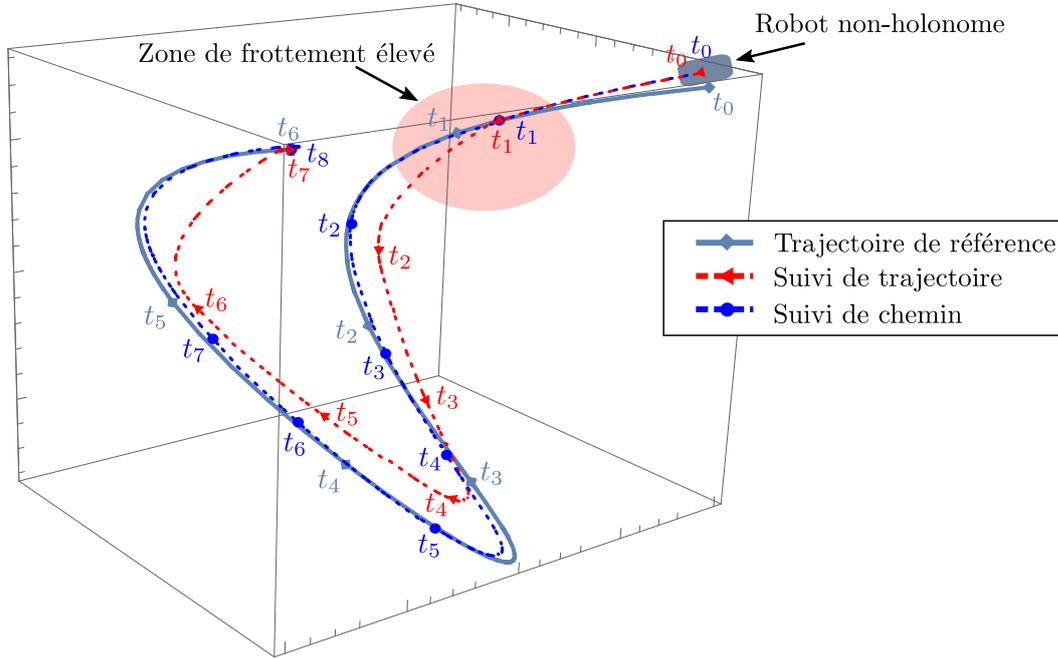


Figure 3.1. Comparaison entre suivi de chemin et suivi de trajectoire pendant les perturbations.

seule l'orientation du robot est commandée en boucle fermée, et cela indépendamment de la vitesse d'avance/propulsion du robot. En revanche, ce type de commande ne garantit aucune performance temporelle.

Pour ces raisons, le suivi de chemin est moins contraignant que le suivi de trajectoire en présence de perturbations pour les microneurs non-holonomes. De plus, pour la plupart des tâches à réaliser par les microrobots, l'utilisateur n'est pas familiarisé avec les outils de la robotique, comme par exemple, un médecin ou un biologiste dans la tâche de délivrance ciblée de médicaments. Il donne un chemin géométrique vers la position désirée mais il ne sait pas comment définir la vitesse le long de ce chemin. Dans la section suivante, un état de l'art sur les commandes de suivi de chemin pour les systèmes non-holonomes est présenté.

2.3 État de l'art des commandes de mouvement des systèmes non-holonomes

Dans la littérature, [Encarnacao et Pascoal \(2000\)](#) ont développé une commande non-linéaire pour un suivi de chemin 3D d'un véhicule sous-marin autonome (AUV, Autonomous Underwater Vehicle). La commande utilise les techniques du backstepping en se basant sur une fonction de Lyapunov et prend en considération la dynamique du véhicule. La méthode a été validée en simulation en suivant une trajectoire rectiligne et une trajectoire hélicoïdale (Figure. 3.2). Cependant, d'après les auteurs, d'éventuels travaux sont nécessaires pour rendre la loi de commande robuste en présence d'incertitudes paramétriques et compenser les perturbations externes comme les courants océaniques. De même, [Lapierre et Jouvencel \(2008\)](#) ont présenté une commande non-linéaire basée sur les techniques de backstepping et de la fonction de Lyapunov, qui conduit asymptotiquement le modèle dynamique d'un véhicule sous-marin autonome sur un

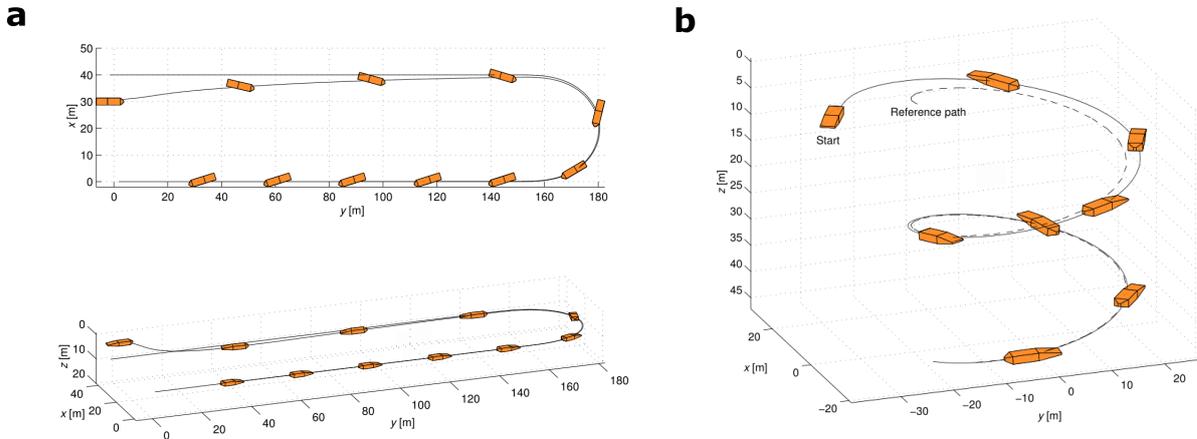


Figure 3.2. Simulation d'un suivi de chemin 3D d'une trajectoire rectiligne (a) et d'une trajectoire hélicoïdale (b) en utilisant un véhicule sous-marin autonome (Encarnacao et Pascoal, 2000).

chemin prédéfini avec une vitesse d'avance constante. Les résultats de simulation montrent que le contrôleur est robuste aux incertitudes paramétriques.

Pour faire face aux incertitudes de modélisation et aux perturbations externes, une commande par mode glissant est introduites dans plusieurs travaux (Salgado-Jimenez *et al.*, 2004; Song et Smith, 2000). Cette commande est simple et robuste d'un point de vue théorique. Cependant, lors de l'implémentation expérimentale, elle présente des inconvénients comme le phénomène de réticence³ qui peut endommager les actionneurs. Cette méthode ne peut s'appliquer qu'à un nombre limité de classes de véhicule autonome non-holonyme.

Une autre approche dans le cas d'un mouvement dans le plan (2D) consiste à linéariser le modèle cinématique du robot planaire en utilisant une forme canonique appelée "la forme chaînée", et ensuite, appliquer une commande linéaire pour stabiliser le système (Samson, 1995). Cette méthode est exploitée par Xu *et al.* (2015a) pour piloter un nageur hélicoïdal dans un plan horizontal. Morin et Samson (2008) ont utilisé cette solution avec une commande linéaire par retour d'état testée sur différents robots mobiles (robot unicycle, voiture et avec des remorques). Cette dernière approche a été étendue par Wadoo *et al.* (2012) pour le suivi de trajectoire d'un véhicule sous-marin. Cependant, le système résultant est linéaire à temps variant (LTV) et il n'est pas complètement découplé, du fait d'un choix non optimal de repère pour exprimer la cinématique.

La première approche établie dans ce travail est l'extension de la commande de Morin et Samson (2008) pour le suivi de chemin dans l'espace 3D. Le modèle cinématique est linéarisé en utilisant une nouvelle formulation chaînée avec trois entrées et cinq états. Le système résultant est linéaire et invariant dans le temps (LTI). Une simple loi de commande par retour d'état est alors suffisante pour stabiliser le système.

3. La discontinuité dans la commande produit un comportement dynamique particulier autour de la surface de glissement, appelé phénomène de réticence (chattering en anglais).

3 Modélisation cinématique et commande par une représentation scalaire

3.1 Notations pour le suivi de chemin 3D

La cinématique du robot nageur avec les contraintes non-holonomes est développée en utilisant un repère global absolu \mathcal{F}_u avec comme origine le point \mathcal{O} , et un repère lié au corps du robot nageur \mathcal{F}_B situé au centre de masse \mathbf{p}_G du robot nageur.

L'orientation du robot nageur par rapport au repère global est caractérisé par deux angles d'Euler à savoir l'angle de direction θ_d et l'angle d'inclinaison θ_i . Le premier est l'angle entre la projection de l'axe principal du robot nageur dans le plan horizontal et l'axe \mathbf{x} du repère global \mathcal{F}_u (l'angle de lacet). Le deuxième angle θ_i est l'angle entre l'axe principal du robot nageur et le plan horizontal \mathbf{xOy} (l'angle de tangage). La Figure 3.3 illustre ces deux angles.

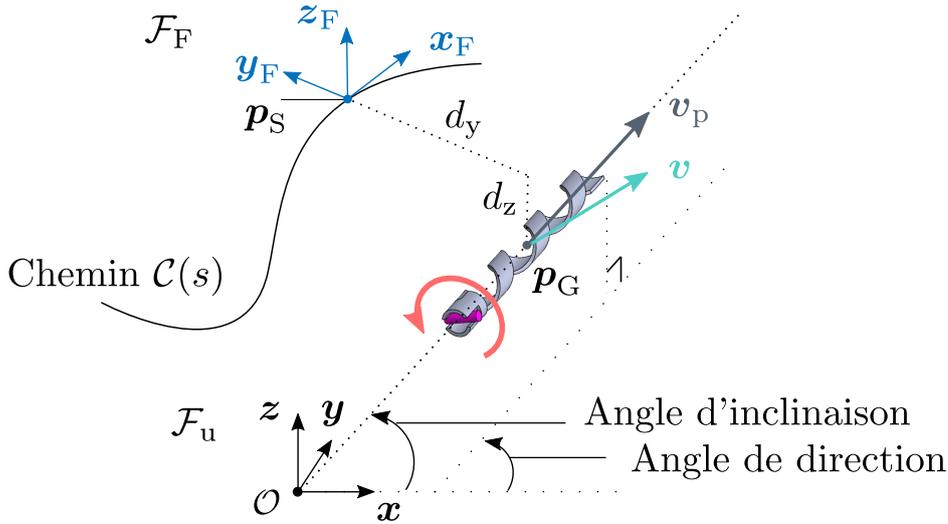


Figure 3.3. Suivi de chemin 3D d'un robot nageur. Dans cette image, le robot nageur non-holonyme est représenté par un robot nageur hélicoïdal mais il peut être remplacé par un robot nageur flexible ou autre.

Pendant les perturbations, la vitesse linéaire totale \mathbf{v} n'est pas alignée avec l'axe principal du robot nageur \mathbf{x}_B . Ainsi, le repère des perturbations \mathcal{F}_d (the disturbances frame en anglais) est défini comme le repère où l'axe \mathbf{x}_d est alignée avec la vitesse linéaire totale du robot nageur. Dans le cas d'un avion, ce repère est appelé "le repère vent" faisant référence aux perturbations causées par le vent (Oliveira *et al.*, 2013; Kaminer *et al.*, 2006). L'angle compensateur de direction δ_{θ_d} est utilisé pour compenser les perturbations latérales. Il est défini comme l'angle entre les axes \mathbf{x}_B et \mathbf{x}_d dans le plan horizontal comme illustré sur la Figure 3.4. L'angle compensateur d'inclinaison δ_{θ_i} est utilisé pour compenser les perturbations dans le plan vertical (comme le poids du robot nageur dans notre cas). Il est défini comme l'angle entre les axes \mathbf{x}_B et \mathbf{x}_d dans le plan vertical comme illustré sur la Figure 3.5. La matrice de rotation de \mathcal{F}_d à \mathcal{F}_B correspond à la séquence

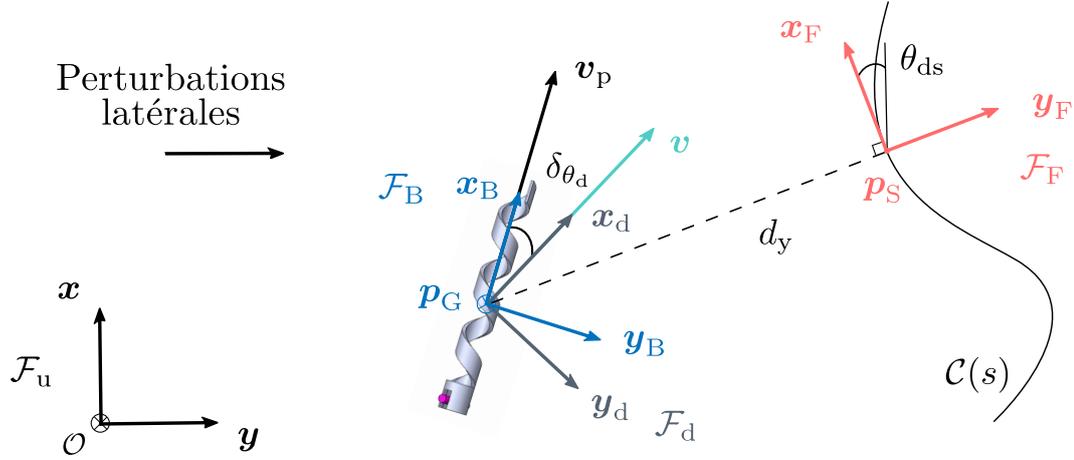


Figure 3.4. Représentation des différents repères utilisés pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur dans le plan horizontal.

de rotation $\mathbf{R}_y(-\delta\theta_i)\mathbf{R}_z(\delta\theta_d)$ et elle est donnée comme dans [Etkin \(2012\)](#) :

$${}^B\mathbf{R}_d = \begin{bmatrix} C\delta\theta_i C\delta\theta_d & -C\delta\theta_i S\delta\theta_d & -S\delta\theta_i \\ S\delta\theta_d & C\delta\theta_d & 0 \\ S\delta\theta_i C\delta\theta_d & -S\delta\theta_i S\delta\theta_d & C\delta\theta_i \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Le chemin de référence à suivre est noté par $\mathcal{C}(s)$ et est décrit par l'abscisse curviligne s , la courbure c et la torsion τ du chemin. \mathcal{F}_F est le repère de Serret-Frenet qui parcourt le chemin de référence $\mathcal{C}(s)$ selon s . Il est centré en \mathbf{p}_S . Sous l'hypothèse d'un chemin continuement dérivable ($\mathcal{C}(s)$ est C^1), \mathbf{p}_S est alors le point de $\mathcal{C}(s)$ le plus proche du centre de masse du robot nageur \mathbf{p}_G . Les vecteurs \mathbf{x}_F et \mathbf{y}_F sont respectivement les vecteurs directeurs de la tangente et de la normale au chemin et \mathbf{z}_F représente le vecteur directeur de la binormale à la courbe de référence et est donnée par le produit vectoriel entre \mathbf{x}_F et \mathbf{y}_F . Les formules de Frénet donnant les dérivées des vecteurs de la base de Frénet s'écrivent à l'aide de la courbure et de la torsion :

$$\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_F \\ \mathbf{y}_F \\ \mathbf{z}_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & c & 0 \\ -c & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_F \\ \mathbf{y}_F \\ \mathbf{z}_F \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

La preuve de ces équations est montrée dans [Oprea \(2007\)](#). Nous avons aussi par définition la vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}_F$ du repère de Frénet qui s'écrit par la relation suivante ([Stoker, 1989](#)) :

$$\boldsymbol{\omega}_F = \frac{1}{2} \left(\mathbf{x}_F \times \frac{d\mathbf{x}_F}{dt} + \mathbf{y}_F \times \frac{d\mathbf{y}_F}{dt} + \mathbf{z}_F \times \frac{d\mathbf{z}_F}{dt} \right) \quad (3.4)$$

Ainsi, en remplaçant (3.3) dans (3.4), la vitesse angulaire ${}^F\boldsymbol{\omega}_F$ s'écrit :

$${}^F\boldsymbol{\omega}_F = \mathbf{c}(s) \dot{s} \quad (3.5)$$

$$= \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \\ c \end{pmatrix} \dot{s} \quad (3.6)$$

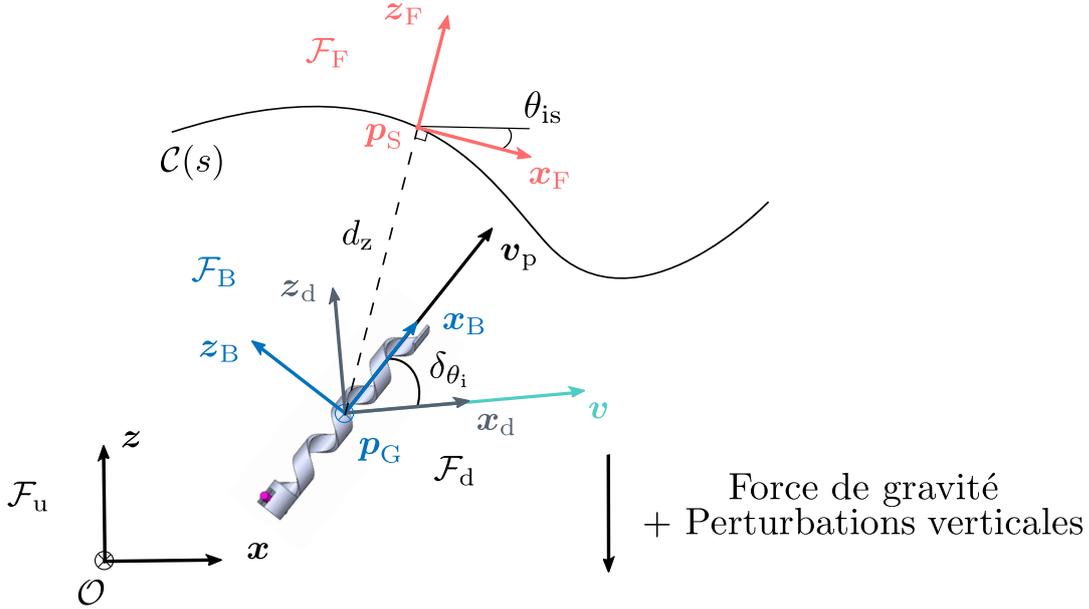


Figure 3.5. Représentation des différents repères utilisés pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur dans le plan vertical.

L'orientation du repère \mathcal{F}_F par rapport au repère \mathcal{F}_u est caractérisée par l'angle de direction de référence θ_{ds} et l'angle d'inclinaison de référence θ_{is} . En résumé, les différents repères utilisés pour le suivi de chemin du robot nageur sont illustrés sur les Figures 3.4 et 3.5.

Le problème du suivi de chemin 3D consiste à ramener le centre de masse du robot nageur p_G sur $\mathcal{C}(s)$ et à aligner la vitesse linéaire totale \mathbf{v} du robot nageur avec la tangente \mathbf{x}_F du chemin de référence. Cela revient à minimiser les erreurs de distance (d_y, d_z) et d'orientation (θ_{de}, θ_{ie}) entre le nageur et le chemin de référence comme illustré sur la Figure 3.6. Le vecteur d'état \mathbf{q} peut alors être défini comme suit :

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} s \\ d_y \\ \theta_{de} \\ d_z \\ \theta_{ie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ d_y \\ \theta_d - \delta\theta_d - \theta_{ds} \\ d_z \\ \theta_i - \delta\theta_i - \theta_{is} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

où d_y et d_z représentent les distances horizontale et verticale entre le centre de masse du nageur p_G et le point le plus proche sur le chemin de référence p_S tandis que θ_{de} et θ_{ie} sont respectivement les erreurs d'angle de direction et d'inclinaison.

Le vecteur de commande \mathbf{m} est composé de la norme de la vitesse linéaire totale $v = \|\mathbf{v}\|$ du nageur pour la propulsion et des composantes Ω_y et Ω_z du vecteur de vitesse angulaire $\mathbf{\Omega}$ du nageur par rapport au repère global \mathcal{F}_u , exprimé dans \mathcal{F}_B , pour le guidage :

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} v \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

La composante Ω_x du vecteur de rotation instantanée $\boldsymbol{\Omega}$ n'est pas prise en compte car l'erreur en roulis ne perturbe pas la tâche de suivi de chemin (Encarnacao et Pascoal, 2000). De plus, dans le cas du nageur hélicoïdal ou flexible, la composante Ω_x du vecteur de vitesse angulaire alignée avec l'axe du nageur, est utilisée pour la propulsion. Le nombre d'entrées est inférieur au nombre de degrés de liberté, qui est une des caractéristiques des systèmes non-holonomes.

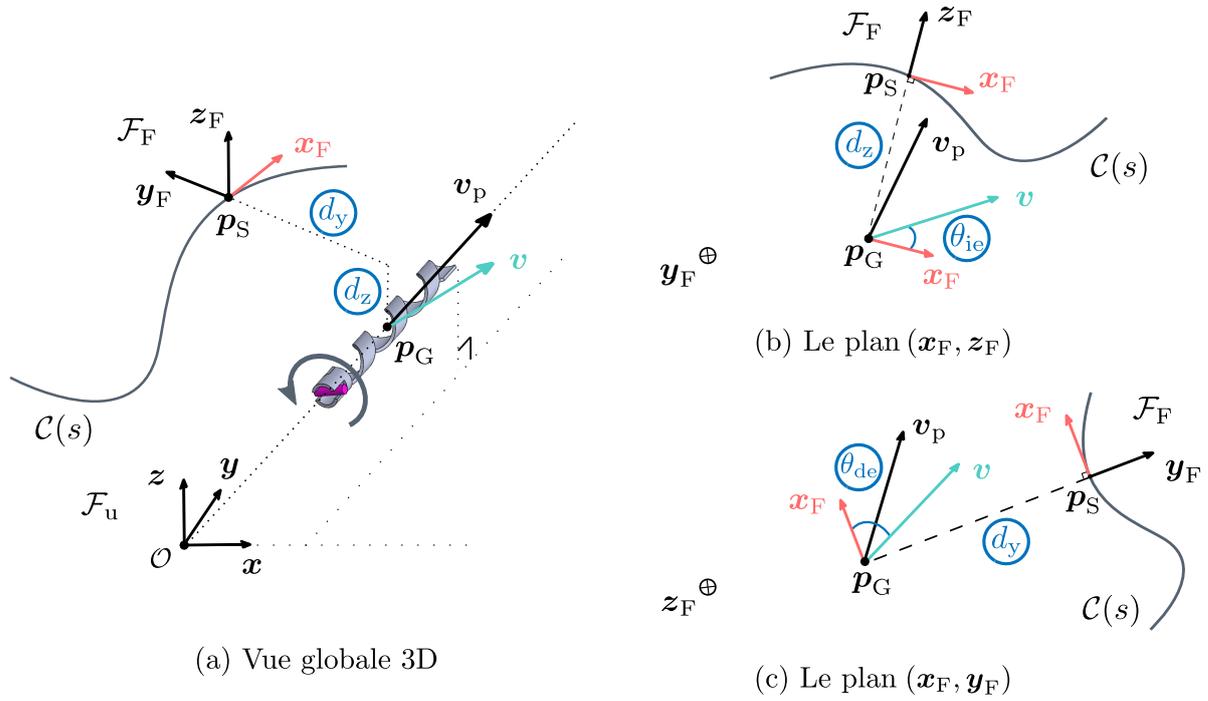


Figure 3.6. Principe du suivi de chemin 3D consiste à minimiser les erreurs de distance d_y et d_z ainsi que les erreurs d'orientation θ_{de} et θ_{ie} .

3.2 Modèle cinématique 3D du robot nageur

La modélisation cinématique du robot nageur dans l'espace 3D est basée sur les travaux de Encarnacao (2002), qui a travaillé sur la modélisation cinématique d'un véhicule sous-marin dans l'espace 3D en utilisant le repère de Serret-Frénet. Nous proposons ici quelques modifications pour adapter le modèle aux robots nageurs.

3.2.1 Translation

Pour calculer la partie translation du modèle cinématique, la position ${}^u p_G$ du robot nageur dans le repère global \mathcal{F}_u est utilisée comme suit :

$${}^u p_G = {}^u p_S + {}^u \mathbf{R}_F^F p_G \quad (3.9)$$

La dérivée temporelle de cette équation par rapport au temps donne :

$${}^u v_d = {}^u v_F + {}^u \mathbf{R}_F^F \dot{p}_G + {}^u \dot{\mathbf{R}}_F^F p_G \quad (3.10)$$

En exprimant cette équation dans le repère de Serret-Frénet, nous obtenons :

$${}^F\mathbf{R}_u {}^u\mathbf{v}_d = {}^F\mathbf{v}_F + \dot{{}^F}\mathbf{p}_G + {}^F\dot{\mathbf{R}}_F {}^F\mathbf{p}_G \quad (3.11)$$

Or,

$$\begin{aligned} {}^F\mathbf{R}_u {}^u\mathbf{v}_d &= {}^F\mathbf{R}_d {}^d\mathbf{v}_d \\ {}^F\dot{\mathbf{R}}_F {}^F\mathbf{p}_G &= {}^F\boldsymbol{\omega}_F \times {}^F\mathbf{p}_G \end{aligned}$$

En remplaçant ces deux expressions, l'équation (3.11) peut être réécrite comme suit :

$${}^F\mathbf{R}_d {}^d\mathbf{v}_d = {}^F\mathbf{v}_F + \dot{{}^F}\mathbf{p}_G + {}^F\boldsymbol{\omega}_F \times {}^F\mathbf{p}_G \quad (3.12)$$

où ${}^F\mathbf{R}_d$ est la matrice de rotation de \mathcal{F}_d à \mathcal{F}_F :

$${}^F\mathbf{R}_d = \mathbf{R}_z(\theta_{de})\mathbf{R}_y(\theta_{ie}) = \begin{bmatrix} C\theta_{de} C\theta_{ie} & -S\theta_{de} & C\theta_{de} S\theta_{ie} \\ S\theta_{de} C\theta_{ie} & C\theta_{de} & S\theta_{de} S\theta_{ie} \\ -S\theta_{ie} & 0 & C\theta_{ie} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

En introduisant dans (3.12) les variables d'état et d'entrée, cette équation peut être développée comme suit :

$${}^F\mathbf{R}_d \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{d}_y \\ \dot{d}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau \dot{s} \\ 0 \\ c \dot{s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{d}_y \\ \dot{d}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c d_y \dot{s} \\ -\tau d_z \dot{s} \\ \tau d_y \dot{s} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La résolution de ces équations par rapport à \dot{s} , \dot{d}_y et \dot{d}_z donne la partie translation du modèle cinématique à savoir :

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v C\theta_{de} C\theta_{ie}}{1 - c d_y} \\ \dot{d}_y = v S\theta_{de} C\theta_{ie} + \tau d_z \dot{s} \\ \dot{d}_z = -v S\theta_{ie} - \tau d_y \dot{s} \end{cases} \quad (3.16)$$

Notons que ces équations ne sont pas définies pour $d_y = \frac{1}{c}$. C'est à dire quand le mobile se situe en le centre de courbure du chemin.

3.2.2 Rotation

Pour la deuxième partie concernant la partie rotation du modèle cinématique, la dérivée temporelle de la matrice de rotation ${}^F\mathbf{R}_d$ peut être utilisée pour calculer les dérivées $\dot{\theta}_{de}$ et $\dot{\theta}_{ie}$. Nous avons par définition la relation suivante (Spong *et al.*, 2006) :

$${}^F\dot{\mathbf{R}}_d = {}^F\mathbf{R}_d \mathbf{Sk} \left({}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r \right) \quad (3.17)$$

où $\mathbf{Sk}(\cdot)$ représente la matrice antisymétrique. La vitesse angulaire relative entre \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_F est exprimée comme suit :

$${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r = {}^d\boldsymbol{\omega}_d - {}^d\boldsymbol{\omega}_F \quad (3.18)$$

La vitesse angulaire ${}^d\boldsymbol{\omega}_d$ peut être exprimée en fonction de la vitesse relative entre \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B comme suit :

$${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r = {}^d\boldsymbol{\omega}_d - {}^d\boldsymbol{\omega}_B \quad (3.19)$$

ou encore,

$${}^d\boldsymbol{\omega}_d = {}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r + {}^d\boldsymbol{\omega}_B \quad (3.20)$$

En remplaçant ${}^d\boldsymbol{\omega}_d$ par (3.20), l'équation (3.18) peut être réécrite comme suit :

$${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r = {}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r + {}^d\boldsymbol{\omega}_B - {}^d\boldsymbol{\omega}_F \quad (3.21)$$

avec

$$\begin{aligned} {}^d\boldsymbol{\omega}_B &= {}^d\mathbf{R}_B {}^B\boldsymbol{\omega}_B \quad \text{sachant que : } {}^B\boldsymbol{\omega}_B = \boldsymbol{\Omega} \\ {}^d\boldsymbol{\omega}_F &= {}^d\mathbf{R}_F {}^F\boldsymbol{\omega}_F \\ {}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\delta}_{\theta_d} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_z(-\delta_{\theta_d}) \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\delta}_{\theta_i} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Les détails du calcul de ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r$ sont présentés dans la section 2 de l'annexe A.

En remarquant que ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r$ est de la forme ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r = [0 \ p \ q]^T$, l'équation (3.17) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ie} \\ \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (C\theta_{ie})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Le calcul des dérivées temporelles des erreurs d'orientation θ_{de} et θ_{ie} en fonction de p et q est détaillé dans la section 3 de l'annexe A.

En remplaçant les expressions de p et q , la partie rotation du modèle cinématique est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{ie} &= \Omega_y C\delta_{\theta_d} - \Omega_z S\delta_{\theta_d} S\delta_{\theta_i} - \dot{\delta}_{\theta_i} C\delta_{\theta_d} + \tau \dot{s} S\theta_{de} \\ \dot{\theta}_{de} &= \Omega_z \frac{C\delta_{\theta_i}}{C\theta_{ie}} + \frac{\dot{\delta}_{\theta_d}}{C\theta_{ie}} - \tau \dot{s} T\theta_{ie} C\theta_{de} - c \dot{s} \end{cases} \quad (3.23)$$

Notons que ces équations ne sont pas définies pour $d_y = \frac{1}{c}$ ou $\theta_{ie} = \frac{\pi}{2}[\pi]$.

3.2.3 Modèle cinématique complet dans le repère de Serret-Frénet

Enfin, le modèle cinématique complet du robot nageur dans le repère de Serret-Frénet est donné par les équations (3.16) et (3.23), ce qui se résume aux équations suivantes :

$$\dot{s} = \frac{v C\theta_{de} C\theta_{ie}}{1 - c d_y} \quad (3.24a)$$

$$\dot{d}_y = v S\theta_{de} C\theta_{ie} + \tau d_z \dot{s} \quad (3.24b)$$

$$\dot{d}_z = -v S\theta_{ie} - \tau d_y \dot{s} \quad (3.24c)$$

$$\dot{\theta}_{ie} = \Omega_y C\delta_{\theta_d} - \Omega_z S\delta_{\theta_d} S\delta_{\theta_i} - \dot{\delta}_{\theta_i} C\delta_{\theta_d} + \tau \dot{s} S\theta_{de} \quad (3.24d)$$

$$\dot{\theta}_{de} = \Omega_z \frac{C\delta_{\theta_i}}{C\theta_{ie}} + \frac{\dot{\delta}_{\theta_d}}{C\theta_{ie}} - \tau \dot{s} T\theta_{ie} C\theta_{de} - c \dot{s} \quad (3.24e)$$

Ces équations ne sont pas définies pour $d_y = \frac{1}{c}$ (i.e. le mobile se situe en le centre de courbure du chemin) ou $\theta_{ie} = \frac{\pi}{2}[\pi]$ (i.e. le mobile est perpendiculaire à la courbe).

Remarque : La projection de ce modèle dans le plan horizontal sans l'angle de compensation, c'est à dire en mettant $d_z, \tau, \delta_{\theta_i}, \theta_{ie}, \delta_{\theta_d}$ et Ω_y à zéro, nous donne bien le modèle cinématique utilisé par [Samson \(1995\)](#) et [Morin et Samson \(2008\)](#) pour un suivi de chemin planaire d'un robot mobile :

$$\begin{cases} \dot{s} &= \frac{v C \theta_{de}}{1 - c d_y} \\ \dot{d}_y &= v S \theta_{de} \\ \dot{\theta}_{de} &= \Omega_z - c \dot{s} \end{cases} \quad (3.25)$$

3.3 Forme chaînée et loi de commande

Le poids du nageur et les perturbations latérales sont modélisés en utilisant le repère de perturbation \mathcal{F}_d . Ainsi, pendant les perturbations, le suivi de chemin 3D consiste à aligner la vitesse totale linéaire \mathbf{v} avec la tangente du chemin de référence \mathbf{x}_F , i.e., les distances et les erreurs d'orientation doivent être asservies à zéro. Pour cette raison, une loi de commande stable doit être synthétisée :

$$(v, \Omega_y, \Omega_z) = f(d_y, d_z, \theta_{ie}, \theta_{de}) \quad (3.26)$$

Le modèle cinématique du robot nageur (3.24) est non-linéaire. Pour contrôler ce type de système, une solution consiste à le linéariser autour de l'équilibre $d_y = d_z = \theta_{de} = \theta_{ie}$. [Samson \(1995\)](#) a proposé une approche en linéarisant le modèle cinématique d'un robot mobile (unicycle, voiture, avec des remorques) en utilisant la forme chaînée avec deux entrées et trois états afin de concevoir un contrôleur simple et efficace. La linéarisation des systèmes autonomes non-holonomes avec plusieurs entrées en utilisant la forme chaînée est introduite dans ([Bushnell et al., 1995](#)) et ([Walsh et Bushnell, 1993](#)) illustré par l'exemple d'un camion des pompiers.

Dans cette thèse, une nouvelle formulation chaînée avec trois entrées et cinq états est utilisée pour linéariser le modèle cinématique (3.24) dans le repère de Serret-Frénet. Ensuite, une loi de commande par retour d'état est appliquée pour stabiliser le système.

3.3.1 Forme chaînée et changements de variable

Compte tenu de la dépendance de l'ensemble des équations (3.24) à \dot{s} et du découplage partiel entre les plans horizontal et vertical, ces équations peuvent être transformées par des changements de coordonnées appropriés en utilisant la forme chaînée. La Figure 3.7 présente les différentes étapes pour linéariser le modèle cinématique du robot nageur en utilisant la forme chaînée.

Lemme 3.1 (Mise sous forme chaînée). *Le changement de l'espace d'état*

$$\begin{aligned} z_1 &= s \\ z_2 &= d_y \\ z_3 &= \tau d_z + (1 - c d_y) T \theta_{de} \\ z_4 &= d_z \\ z_5 &= -\tau d_y + (c d_y - 1) T \theta_{ie} (C \theta_{de})^{-1} \end{aligned}$$

et de l'espace de commande

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{v C \theta_{de} C \theta_{ie}}{1 - c d_y} \\ u_2 &= \gamma_{21} \Omega_z + \gamma_{22} \\ u_3 &= \gamma_{31} \Omega_y + \gamma_{32} \Omega_z + \gamma_{33} \end{aligned}$$

convertit le modèle cinématique (3.24) du robot nageur en système chaîné avec trois entrées et cinq états comme suit :

$$\dot{z}_1 = u_1 \tag{3.27a}$$

$$\dot{z}_2 = z_3 u_1 \tag{3.27b}$$

$$\dot{z}_3 = u_2 \tag{3.27c}$$

$$\dot{z}_4 = z_5 u_1 \tag{3.27d}$$

$$\dot{z}_5 = u_3 \tag{3.27e}$$

où $\mathbf{z}_c = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)^T$ représente le nouveau vecteur d'état et $\mathbf{u}_c = (u_1, u_2, u_3)^T$ le nouveau vecteur de commande. Ces transformations ne sont pas définies pour des erreurs d'orientation θ_{ie} et θ_{de} égales à $\frac{\pi}{2}[\pi]$ et pour une distance horizontale d_y égale à $\frac{1}{c}$.

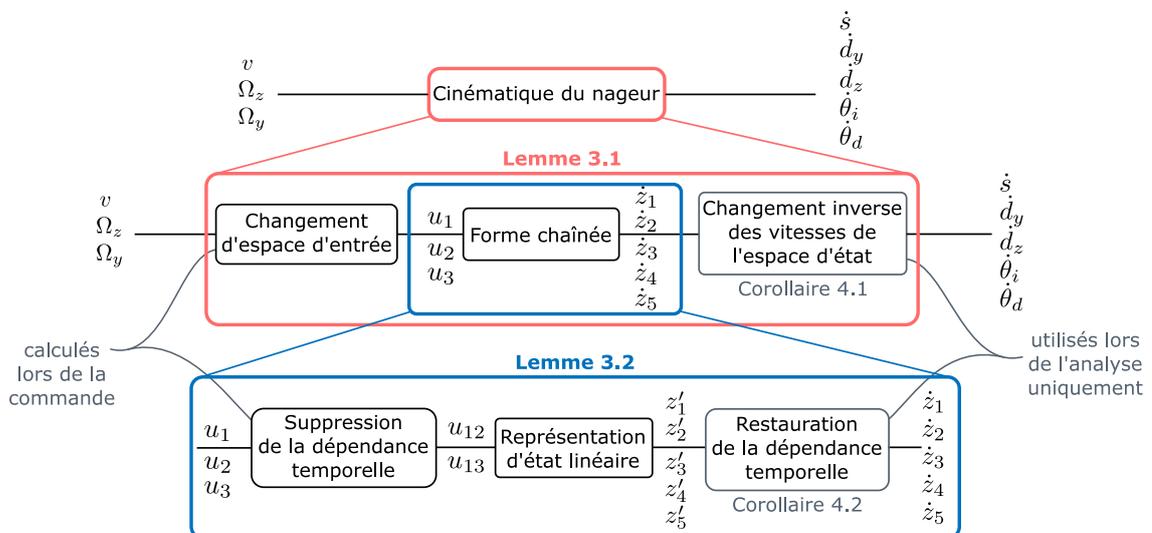


Figure 3.7. Linéarisation du modèle cinématique (3.24) en utilisant la forme chaînée.

L'intérêt de la forme chaînée est que si la variable d'état z_2 converge vers zéro, alors la dérivée \dot{z}_2 aussi, et donc d'après (3.27b), la variable z_3 aussi converge vers zéro (idem pour z_4 et z_5). Cependant, la dérivée \dot{z}_1 doit être différente de zéro, car alors u_1 est égale à zéro et l'évolution du système est arrêtée (i.e. \dot{z}_2 est égale à zéro sans que z_2 soit égale à zéro).

Pour cela, u_1 est choisie comme la vitesse d'avance le long du chemin de référence qui est arbitraire et non nulle (i.e. $u_1 = \text{arbitraire} \neq 0$). Les variables d'état z_2 et z_4 sont choisies comme les erreurs de distance tandis que z_3 et z_5 représentent les erreurs d'orientation avec anticipation de la variation du chemin (courbure, torsion).

Preuve : Les transformations du modèle cinématique (3.24) en forme canonique (3.27) commence en choisissant la première variable d'état comme :

$$z_1 = s$$

Ainsi, à partir de (3.24a) :

$$u_1 = \dot{z}_1 = \dot{s} = \frac{v C\theta_{de} C\theta_{ie}}{1 - c d_y} \quad (3.28)$$

L'entrée u_1 est donc fonction de la norme de la vitesse linéaire totale du robot nageur v .

Puis, la deuxième variable d'état est choisie comme la distance horizontale :

$$z_2 = d_y \quad (3.29)$$

Ainsi, à partir de (3.24b) :

$$\dot{z}_2 = \dot{d}_y = v S\theta_{de} C\theta_{ie} + \tau d_z \dot{s} \quad (3.30)$$

Puis, à partir de (3.27b), (3.28) et (3.30), la troisième variable d'état z_3 est obtenue comme suit :

$$z_3 = (1 - c d_y) T\theta_{de} + \tau d_z \quad (3.31)$$

à condition que $\theta_{de} \neq \frac{\pi}{2}[\pi]$.

Par conséquent, (3.27c) permet d'avoir u_2 comme suit :

$$\begin{aligned} u_2 &= \dot{z}_3 \\ &= \tau \dot{d}_z + d_z \dot{s} \frac{\partial \tau}{\partial s} + (1 - c d_y) \dot{\theta}_{de} (C\theta_{de})^{-2} - (c \dot{d}_y + d_y \dot{s} \frac{\partial c}{\partial s}) T\theta_{de} \end{aligned} \quad (3.32)$$

dans laquelle θ_{de} et θ_{ie} doivent être différents de $\frac{\pi}{2}[\pi]$ et d_y de $\frac{1}{c}$.

En remplaçant \dot{s} , \dot{d}_y , \dot{d}_z et $\dot{\theta}_{de}$ par leurs valeurs dans (3.24), l'entrée u_2 peut être réécrite en fonction de la vitesse angulaire de pilotage Ω_z comme suit :

$$u_2 = \gamma_{21} \Omega_z + \gamma_{22} \quad (3.33)$$

où γ_{21} et γ_{22} sont des scalaires définis comme suit :

$$\begin{aligned} \gamma_{21} &= v \dot{s}^{-1} (C\theta_{de})^{-1} C\delta_{\theta_i} \\ \gamma_{22} &= -\dot{s} (2v \dot{s}^{-1} \tau S\theta_{ie} + \tau^2 d_y - d_z \frac{\partial \tau}{\partial s} + c(c d_y - 1)(1 - 2(C\theta_{de})^{-2}) \\ &\quad + (c\tau d_z + d_y \frac{\partial c}{\partial s}) T\theta_{de}) + v \dot{s}^{-1} (C\theta_{de})^{-1} \dot{\delta}_{\theta_d} \end{aligned}$$

sachant que γ_{22} dépend de la vitesse linéaire totale v du robot nageur et de la dérivée temporelle de l'angle compensateur de direction $\dot{\delta}_{\theta_d}$. Nous reviendrons sur cette dernière dans quelques lignes.

De même, la quatrième variable d'état est choisie comme la distance verticale :

$$z_4 = d_z \quad (3.34)$$

Ainsi, à partir de (3.24d) :

$$\dot{z}_4 = \dot{d}_z = -v S\theta_{ie} - \tau d_y \dot{s} \quad (3.35)$$

Depuis (3.27d), (3.28) et (3.35), z_5 est obtenue comme suit :

$$z_5 = (c d_y - 1) T\theta_{ie} C(\theta_{de})^{-1} - \tau d_y \quad (3.36)$$

Finalement, à partir de (3.27e) et (3.36) :

$$\begin{aligned} u_3 &= \dot{z}_5 \\ &= -\tau \dot{d}_y - d_y \dot{s} \frac{\partial \tau}{\partial s} + \left(c \dot{d}_y + d_y \dot{s} \frac{\partial c}{\partial s} \right) \frac{T\theta_{ie}}{C\theta_{de}} - \left((C\theta_{ie})^{-1} \dot{\theta}_{ie} + T\theta_{de} S\theta_{ie} \dot{\theta}_{de} \right) v \dot{s}^{-1} \end{aligned} \quad (3.37)$$

où θ_{de} et θ_{ie} doivent être différents de $\frac{\pi}{2}[\pi]$ et d_y de $\frac{1}{c}$.

En remplaçant \dot{s} , \dot{d}_y , $\dot{\theta}_{ie}$ et $\dot{\theta}_{de}$ par leurs valeurs dans (3.24), l'entrée u_3 est alors obtenue en fonction des vitesses angulaires de pilotage Ω_z et Ω_y :

$$u_3 = \gamma_{31} \Omega_y + \gamma_{32} \Omega_z + \gamma_{33} \quad (3.38)$$

avec γ_{31} , γ_{32} et γ_{33} sont des scalaires définis comme suit :

$$\begin{aligned} \gamma_{31} &= -v \dot{s}^{-1} (C\theta_{ie})^{-1} C\delta_{\theta_d} \\ \gamma_{32} &= v \dot{s}^{-1} C(\theta_{ie})^{-1} (S\delta_{\theta_i} S\delta_{\theta_d} - C\delta_{\theta_i} S\theta_{ie} T\theta_{de}) \\ \gamma_{33} &= \left(-d_y \frac{\partial \tau}{\partial s} - (d_z \tau + 2(1 - c d_y) T\theta_{de}) \left(\tau + c \frac{T\theta_{ie}}{C\theta_{de}} \right) + d_y \frac{\partial c}{\partial s} \frac{T\theta_{ie}}{C\theta_{de}} \right) \dot{s} \\ &\quad + (1 - c d_y) (\dot{\delta}_{\theta_i} C\delta_{\theta_d} - \dot{\delta}_{\theta_d} S\theta_{ie} T\theta_{de}) \end{aligned}$$

Cela conclut la preuve du lemme 3.1. ■

Corollaire 3.1 (Changement inverse des vitesses de l'espace d'état). *Si la forme chaînée (3.27) est stable, alors le modèle cinématique (3.24) est stable aussi.*

Preuve : D'après les équations (3.29) et (3.34), si les variables z_2 et z_4 convergent vers zéro, alors les erreurs de distance d_y et d_z convergent aussi vers zéro. Ensuite, d'après l'équation (3.34), si d_y , d_z et z_3 convergent vers zéro, et si $\theta_{de} \in] -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$, alors l'erreur d'angle de direction θ_{de} converge aussi vers zéro, sinon, si initialement $\theta_{de} \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[$, alors θ_{de} converge vers π . Enfin, d'après l'équation (3.36), si d_y et z_5 convergent vers zéro, et θ_{de} converge vers 0 ou π , alors l'erreur d'angle d'inclinaison θ_{ie} converge aussi vers zéro sachant qu'initialement $\theta_{ie} \in] -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$. ■

Comme les scalaires γ_{33} et γ_{22} dépendent des dérivées des angles compensateurs de directions et d'inclinaison respectivement $\dot{\delta}_{\theta_d}$ et $\dot{\delta}_{\theta_i}$, qui reflètent les variations de l'interaction avec

l'environnement, le contrôleur aussi dépend d'eux. Pour calculer ces deux paramètres, plusieurs stratégies de contrôle peuvent être implémentées incluant : i) fournir une estimation anticipée ; ii) s'appuyer sur la détection extéroceptive ; iii) réaliser un observateur similaire à celui de [Lenain et al. \(2006\)](#), qui permet de compenser le glissement latéral dans la commande de robots tout-terrain 2D dans le cadre de travail proposé par [Samson \(1995\)](#) ; iv) introduire la dynamique associée dans la commande tel que [Lenain et al. \(2010\)](#).

Dans notre cas, l'environnement expérimental est plutôt stable. Les paramètres δ_{θ_i} et δ_{θ_d} sont considérés comme constants et les perturbations mineures qui peuvent apparaître à cause de ce choix peuvent être compensées par le retour visuel.

Lemme 3.2 (Suppression de la dépendance temporelle). *En introduisant un changement d'échelle de temps défini par*

$$\forall i = 1, \dots, 5, \quad \frac{\dot{z}_i}{|\dot{z}_1|} = \dot{z}'_i \quad (3.39)$$

et en définissant les entrées de commande indépendantes du temps suivantes :

$$u_{12} = \frac{u_2}{u_1} \quad (3.40a)$$

$$u_{13} = \frac{u_3}{u_1} \quad (3.40b)$$

le système de forme chaînée (3.27) peut être convertit en modèle linéaire et invariant dans le temps (LTI) comme suit :

$$\dot{z}'_1 = \text{sign}(u_1) \quad (3.41a)$$

$$\dot{z}'_2 = \text{sign}(u_1) z_3 \quad (3.41b)$$

$$\dot{z}'_3 = \text{sign}(u_1) u_{12} \quad (3.41c)$$

$$\dot{z}'_4 = \text{sign}(u_1) z_5 \quad (3.41d)$$

$$\dot{z}'_5 = \text{sign}(u_1) u_{13} \quad (3.41e)$$

Ces changements sont définis pour u_1 constante et non nulle.

Preuve : En appliquant (3.39) et (3.40) à (3.27) permet d'avoir trivialement (3.41), qui peut être réécrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{z}'_2 \\ \dot{z}'_3 \\ \dot{z}'_4 \\ \dot{z}'_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{sign}(u_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{sign}(u_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \text{sign}(u_1) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \text{sign}(u_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{13} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Ce dernier est donc trivialement linéaire et invariant dans le temps. ■

Corollaire 3.2 (Restauration de la dépendance temporelle). *Si le système (3.42) est stable, alors (3.27) est trivialement stable.*

Ces transformations permettent de séparer le comportement longitudinal (i.e. le profil de vitesse) du robot nageur et ses mouvements latéral et vertical par rapport au chemin de référence. Ainsi, ces deux tâches, i.e. profil de vitesse et suivi de chemin, peuvent être commandées indépendamment.

3.3.2 Loi de commande

Proposition 3.1. *Soit la commande*

$$\begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{13} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_2 \\ z_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{sign}(u_1) k_{t1} & 0 \\ 0 & \text{sign}(u_1) k_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_5 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

où k_{t1} , k_{d1} , k_{t2} et k_{d2} sont les gains de commande strictement positifs. Sous les conditions établies dans les lemmes 3.1 et 3.2, la commande (3.43) fournit une dynamique en boucle fermée de second ordre indépendante du temps pour stabiliser le système (3.41).

Preuve : En remplaçant la loi de commande (3.43) dans le système linéaire (3.41c) permet d'avoir l'équation suivante :

$$z_3' = -\text{sign}(u_1)k_{d1}z_2 - k_{t1}z_3$$

À partir de (3.41b), $z_3 = \text{sign}(u_1)z_2'$ et tant que u_1 est constante et non nulle, $z_3' = \text{sign}(u_1)z_2''$.

L'insertion de ce résultat dans l'équation précédente fournit :

$$\text{sign}(u_1)[z_2'' + k_{t1}z_2' + k_{d1}z_2] = 0$$

Le même calcul s'applique à z_5 et z_4 et ainsi, le système linéaire (3.41) est équivalent à ces deux systèmes de second ordre unidimensionnels et découplés :

$$\begin{cases} z_2'' + k_{t1} z_2' + k_{d1} z_2 = 0 \\ z_4'' + k_{t2} z_4' + k_{d2} z_4 = 0 \end{cases}$$

Cela conclut la preuve de la proposition 3.1. ■

Corollaire 3.3. *La commande (3.43) stabilise le suivi de chemin.*

Preuve : La stabilité asymptotique du système (3.41) sous la commande (3.43) est assurée en réglant simplement les coefficients des deux équations de second ordre SISO et découplées (Proposition 3.1). À partir du lemme 3.2, cela assure la stabilité du système chaîné (3.27) sous u_2 et u_3 , trivialement obtenues de (3.40) et (3.43). Stabilisant (3.27) stabilise (3.24) grâce à leur équivalence (Corollaire 3.1) et ainsi le suivi de chemin spatial peut être achevé. ■

En rétablissant les changements de variable dans Lemme 3.1, nous pouvons alors calculer les entrées réelles à partir des sorties réelles :

$$\begin{aligned} v(t) &= \text{arbitraire} \neq 0 \\ (\Omega_y, \Omega_z) &= f(d_y, d_z, \theta_{ie}, \theta_{de}) \end{aligned}$$

avec $f(d_y, d_z, \theta_{ie}, \theta_{de})$ exprimée dans la section suivante.

3.4 Actionnement

Les entrées de commande indépendantes du temps u_{12} et u_{13} données par (3.43) permettent de calculer

$$\begin{aligned} u_2 &= u_{12} u_1 \\ &= -k_{d1} u_1 z_2 - k_{t1} |u_1| z_3 \\ &= -k_{d1} u_1 d_y - k_{t1} |u_1| (\tau d_z + (1 - c d_y) T \theta_{de}) \end{aligned} \quad (3.44)$$

et

$$\begin{aligned} u_3 &= u_{13} u_1 \\ &= -k_{d2} u_1 z_4 - k_{t2} |u_1| z_5 \\ &= -k_{d2} u_1 d_z - k_{t1} |u_1| (-\tau d_y + (c d_y - 1) C(\theta_{de})^{-1} T \theta_{ie}) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Notons qu'à partir de (3.33) et (3.38), ces derniers ont les expressions suivantes :

$$\begin{cases} u_2 &= \gamma_{21} \Omega_z + \gamma_{22} \\ u_3 &= \gamma_{31} \Omega_y + \gamma_{32} \Omega_z + \gamma_{33} \end{cases} \quad (3.46)$$

Connaissant la position ${}^u p_G$ du robot nageur et les paramètres du chemin de référence (s , τ et c), nous pouvons déduire γ_{21} , γ_{22} , γ_{31} , γ_{32} et γ_{33} . Alors, les vitesses angulaires de pilotage Ω_y et Ω_z peuvent être calculées en inversant (3.46)

$$\begin{cases} \Omega_z &= \gamma_{21}^{-1} (u_2 - \gamma_{22}) \\ \Omega_y &= \gamma_{31}^{-1} (u_3 - \gamma_{33} - \gamma_{32} \Omega_z) \end{cases} \quad (3.47)$$

Le schéma fonctionnel de la commande en boucle fermée pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur magnétique est présenté sur la Figure 3.8. La position et l'orientation du robot

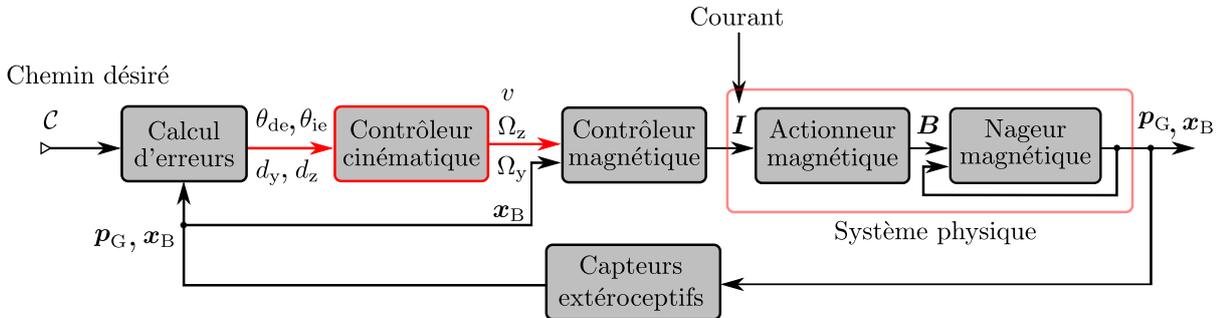


Figure 3.8. Schéma-bloc pour le suivi de chemin 3D d'un robot nageur. Le contrôleur magnétique dépend de la propulsion choisie (voir chapitre 2 pour l'hélice ou le flagelle).

nageur dans l'espace (respectivement \mathbf{p}_G et \mathbf{x}_B) sont mesurées avec les deux caméras du système magnétique. Celles-ci sont comparées à un chemin géométrique \mathcal{C} de consigne \mathbf{p}_S et \mathbf{x}_F , ce qui permet d'avoir les erreurs de distance (d_y et d_z) et d'orientation (θ_{de} et θ_{ie}). Le contrôleur cinématique utilise ces erreurs pour calculer les vitesses angulaires de pilotage Ω_y et Ω_z nécessaires au suivi de chemin. Le couple magnétique à appliquer sur le robot nageur est envoyé sous forme de courant électrique \mathbf{I} pour chacune des bobines du système de Helmholtz, afin de générer le champ magnétique \mathbf{B} nécessaire pour actionner le robot nageur et le ramener vers la trajectoire de référence.

4 Modélisation cinématique et commande par une approche géométrique

La première approche du suivi de chemin 3D présentée précédemment est algébrique. Les erreurs de distance et d'orientation dans les plans horizontal et vertical sont utilisées. Dans cette section, une approche géométrique est développée avec l'aide de Pascal Morin.

4.1 Notations et définitions

Les produits scalaire et vectoriel dans l'espace Euclidien sont représentés respectivement par (\cdot) et (\times) . Dans cette section, les deux relations vectorielles suivantes vont être utilisées à savoir :

$$\mathbf{x} \times (\mathbf{y} \times \mathbf{z}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{z})\mathbf{y} - (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y})\mathbf{z} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{x} \cdot (\mathbf{y} \times \mathbf{z}) = \mathbf{y} \cdot (\mathbf{z} \times \mathbf{x}) = \mathbf{z} \cdot (\mathbf{x} \times \mathbf{y}) \quad (3.49)$$

où \mathbf{x} , \mathbf{y} et \mathbf{z} sont des vecteurs dans l'espace Euclidien.

Définition 3.2 (Vecteur "des courbures"). $\mathbf{c}(s)$ est le vecteur représentant localement la forme du chemin à parcourir, appelé vecteurs "des courbures", est constitué de la torsion τ autour de l'axe \mathbf{x}_F du repère de Serret-Frénet et de la courbure c autour de l'axe \mathbf{z}_F :

$$\mathbf{c}(s) = [\tau \ 0 \ c]^T \quad (3.50)$$

Nous ferons par la suite l'hypothèse forte suivante :

Hypothèse 1 (Régularité du chemin). *Le chemin est continument dérivable par rapport à l'abscisse curviligne et pour bien définir la commande, l'hypothèse suivante est élaborée :*

$$c_{\max} := \sup_s \|\mathbf{c}(s)\| < +\infty \quad (3.51)$$

4.2 Modélisation

4.2.1 Vecteur d'état

Dans cette approche, nous utilisons une représentation vectorielle plutôt que scalaire. Le vecteur d'état \mathbf{q} est alors défini comme :

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \boldsymbol{\eta}_e \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

où $\mathbf{d} = \mathbf{p}_G - \mathbf{p}_S$ représente le vecteur de distance entre le centre de gravité du nageur et le point le plus proche sur le chemin de référence tandis que, $\boldsymbol{\eta}_e = \mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F$ représente le vecteur d'erreur angulaire entre le nageur et le chemin de référence, comme illustré sur la Figure 3.9. Afin de réaliser le suivi de chemin 3D, ces deux erreurs (i.e. \mathbf{d} et $\boldsymbol{\eta}_e$) doivent être maintenues à zéro.

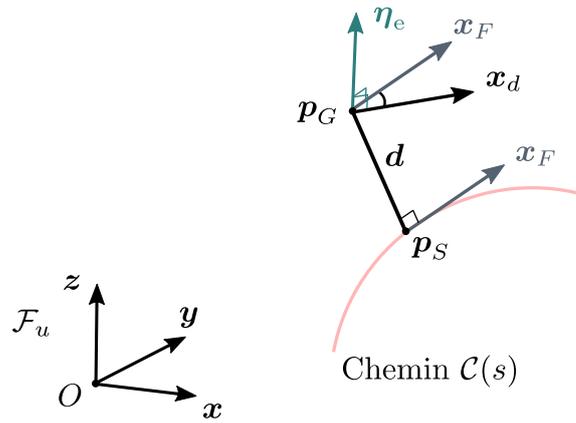


Figure 3.9. Les erreurs de distance \mathbf{d} et d'orientation $\boldsymbol{\eta}_e$ utilisées dans l'approche géométrique pour le suivi de chemin 3D du robot nageur.

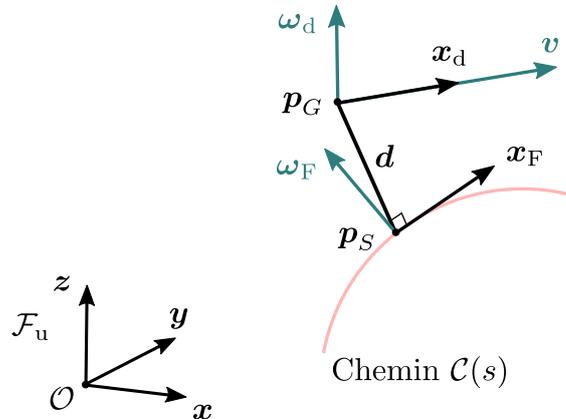


Figure 3.10. Les vecteurs de vitesses linéaires et angulaires du robot nageur et de la tangente du chemin de référence.

4.2.2 Modèle cinématique

Le modèle cinématique pour cette approche consiste à trouver les dérivées temporelles des erreurs de distance et d'orientation respectivement $\dot{\mathbf{d}}$ et $\dot{\boldsymbol{\eta}}_e$, en fonction de \mathbf{d} , $\boldsymbol{\eta}_e$, \mathbf{x}_d , \mathbf{x}_F , v , $\boldsymbol{\omega}_d$ (i.e. la vitesse angulaire du repère des perturbations) et $\boldsymbol{\omega}_F$ (i.e. la vitesse angulaire du repère de Serret-Frénet). En commençant par la partie translation (i.e. $\dot{\mathbf{d}}$), nous avons :

$$\mathbf{d} = \mathbf{p}_G - \mathbf{p}_S \quad (3.53)$$

$$\implies \dot{\mathbf{d}} = v\mathbf{x}_d - \dot{s}\mathbf{x}_F \quad (3.54)$$

L'interprétation géométrique de la relation (3.54) est la suivante : la variation de l'écart latéral est la différence entre la vitesse du robot et la vitesse du repère de Frénet. Maintenant, nous cherchons à exprimer la relation (3.54) en fonction des erreurs de distance \mathbf{d} et d'orientation $\boldsymbol{\eta}_e$.

En utilisant la relation (3.48), il est possible d'écrire $\mathbf{x}_F \times (\mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F) = \mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\mathbf{x}_F$, d'où $\mathbf{x}_d = \mathbf{x}_F \times (\mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F) + (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\mathbf{x}_F$. En remplaçant cette expression dans (3.54), nous avons :

$$\dot{\mathbf{d}} = v(\mathbf{x}_F \times (\mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F) + (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\mathbf{x}_F) - \dot{s}\mathbf{x}_F \quad (3.55)$$

$$= (v(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) - \dot{s})\mathbf{x}_F + v\mathbf{x}_F \times (\mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F) \quad (3.56)$$

$$= (v(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) - \dot{s})\mathbf{x}_F + v\mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\eta}_e \quad (3.57)$$

avec $\boldsymbol{\eta}_e = \mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F$ le vecteur d'erreur angulaire. Cela conclut le calcul de la première partie du modèle cinématique.

Concernant la deuxième partie du modèle cinématique, l'erreur angulaire $\boldsymbol{\eta}_e$ est définie comme suit :

$$\boldsymbol{\eta}_e = \mathbf{x}_d \times \mathbf{x}_F \quad (3.58)$$

La dérivée temporelle de l'erreur angulaire se calcule comme :

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_e = \dot{\mathbf{x}}_d \times \mathbf{x}_F + \mathbf{x}_d \times \dot{\mathbf{x}}_F \quad (3.59)$$

$$= -\mathbf{x}_F \times (\boldsymbol{\omega}_d \times \mathbf{x}_d) - \mathbf{x}_d \times (\mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\omega}_F) \quad (3.60)$$

$$= -(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\boldsymbol{\omega}_d + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d)\mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F)\mathbf{x}_F + (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\boldsymbol{\omega}_F \quad (3.61)$$

$$= -(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\boldsymbol{\omega}_e + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d)\mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F)\mathbf{x}_F \quad (3.62)$$

avec $\boldsymbol{\omega}_e = \boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_F$ le vecteur d'erreur de vitesse angulaire.

Les équations (3.57) et (3.62) représentent le modèle cinématique :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{d}} &= (v(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) - \dot{s})\mathbf{x}_F + v\mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\eta}_e \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_e &= -(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\boldsymbol{\omega}_e + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d)\mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F)\mathbf{x}_F \end{cases} \quad (3.63)$$

Remarque : La projection de ce modèle dans le plan horizontal nous donne le système cinématique pour le cas 2D présenté dans (3.25). La preuve est détaillée dans l'annexe 1.

Corollaire 3.4 (Modèle cinématique dans le repère de Frénet). *Le modèle cinématique dans le repère local du chemin de référence est donné par :*

$$\begin{cases} {}^F\dot{\mathbf{d}} &= \left(v({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\mathbf{x}_F) - \dot{s} \right) {}^F\mathbf{x}_F + v {}^F\mathbf{x}_F \times {}^F\boldsymbol{\eta}_e - {}^F\boldsymbol{\omega}_F \times {}^F\mathbf{d} \\ {}^F\dot{\boldsymbol{\eta}}_e &= -({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\mathbf{x}_F) {}^F\boldsymbol{\omega}_e + ({}^F\mathbf{x}_F \cdot {}^F\boldsymbol{\omega}_d) {}^F\mathbf{x}_d - ({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\boldsymbol{\omega}_F) {}^F\mathbf{x}_F - {}^F\boldsymbol{\omega}_F \times {}^F\boldsymbol{\eta}_e \end{cases} \quad (3.64)$$

Preuve : En effet, la projection du (3.63) dans le repère de Serret-Frénet associé au chemin de référence s'exprime par la relation suivante :

$$\left({}^F \dot{\mathbf{d}} + {}^F \boldsymbol{\omega}_F \times {}^F \mathbf{d} \right) = \left(v({}^F \mathbf{x}_d \cdot {}^F \mathbf{x}_F) - \dot{s} \right) {}^F \mathbf{x}_F + v {}^F \mathbf{x}_F \times {}^F \boldsymbol{\eta}_e \quad (3.65)$$

$$\left({}^F \dot{\boldsymbol{\eta}}_e + {}^F \boldsymbol{\omega}_F \times {}^F \boldsymbol{\eta}_e \right) = -({}^F \mathbf{x}_d \cdot {}^F \mathbf{x}_F) {}^F \boldsymbol{\omega}_e + ({}^F \mathbf{x}_F \cdot {}^F \boldsymbol{\omega}_d) {}^F \mathbf{x}_d - ({}^F \mathbf{x}_d \cdot {}^F \boldsymbol{\omega}_F) {}^F \mathbf{x}_F \quad (3.66)$$

Ainsi, ces équations peuvent être réécrites en (3.64). ■

4.3 Loi de commande

Proposition 3.2. Soient $k_1 \in \mathbb{R}^+$ et k_2 une fonction continue telle que $k_2(\mathbf{d}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_F) \geq \delta > 0$ pour un scalaire constant δ . En supposant que la vitesse v est une fonction continument dérivable bornée, la dérivée \dot{v} est bornée, et que $v(t)$ ne tend pas vers 0 quand t tend vers $+\infty$, alors, la loi de commande

$$\boldsymbol{\omega}_d = \boldsymbol{\omega}_F - k_1 v \left(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2 \right)^2 \frac{\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F}{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F} - k_2(\mathbf{d}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_F) |v| (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) \boldsymbol{\eta}_e \quad (3.67)$$

rend l'origine $(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}_e) = (\mathbf{0}, \mathbf{0})$ du système (3.63) asymptotiquement stable avec un domaine de convergence contenant

$$\mathcal{A} := \left\{ (\mathbf{d}(0), \boldsymbol{\eta}_e(0)) : \|\mathbf{d}(0)\|^2 + \frac{1}{k_1} \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e(0)\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e(0)\|^2} < \frac{1}{c_{\max}^2} \right\}$$

Preuve : Considérons la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$L = \frac{1}{2} \left(k_1 \|\mathbf{d}\|^2 + \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2} \right) \quad (3.68)$$

La fonction L est strictement positive en dehors de l'objectif de commande $(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}_e) = (\mathbf{0}, \mathbf{0})$, et ne s'annule que lorsque l'objectif est atteint. Pour assurer la stabilité asymptotique, la fonction de Lyapunov L doit être strictement décroissante. La dérivée de L est calculée comme suit :

$$\dot{L} = k_1 \mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{d}} + \frac{\boldsymbol{\eta}_e \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}_e}{(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2} \quad (3.69)$$

En utilisant le fait que $\mathbf{d} \cdot \mathbf{x}_F = \boldsymbol{\eta}_e \cdot \mathbf{x}_d = \boldsymbol{\eta}_e \cdot \mathbf{x}_F = 0$, et les expressions de $\dot{\mathbf{d}}$ et $\dot{\boldsymbol{\eta}}_e$ dans (3.63), la dérivée \dot{L} peut être réécrite comme :

$$\dot{L} = k_1 v \mathbf{d} \cdot (\mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\eta}_e) + \frac{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F}{(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2} \boldsymbol{\eta}_e \cdot \boldsymbol{\omega}_e \quad (3.70)$$

En utilisant la relation dans (3.49), cette équation peut être réécrite comme :

$$\dot{L} = k_1 v \boldsymbol{\eta}_e \cdot (\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F) + \frac{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F}{(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2} \boldsymbol{\eta}_e \cdot \boldsymbol{\omega}_e \quad (3.71)$$

$$= \boldsymbol{\eta}_e \cdot \left(k_1 v (\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F) + \frac{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F}{(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2} \boldsymbol{\omega}_e \right) \quad (3.72)$$

En appliquant la loi de commande $\boldsymbol{\omega}_d$ définie par (3.67), nous obtenons

$$\dot{L} = -k_2 (\mathbf{d}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_F) |v| \frac{(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)^2}{(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2} \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2 \quad (3.73)$$

Or, $(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)^2 = 1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2$, donc

$$\dot{L} = -k_2 (\mathbf{d}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_F) |v| \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2} \leq 0 \quad (3.74)$$

Ainsi, L n'est jamais croissante le long des solutions du système contrôlé. Cela montre que $(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}_e) = (\mathbf{0}, \mathbf{0})$ est un point d'équilibre stable. Pour compléter la démonstration, il faut montrer que pour toute condition initiale dans \mathcal{A} ,

Propriété 1. La loi de commande $\boldsymbol{\omega}_d$ est bien définie le long de la solution tout le temps, i.e., il faut montrer que $\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F$ ne tend pas vers 0 et $\boldsymbol{\omega}_F$ est bornée ;

Propriété 2. La solution converge vers 0, i.e., $(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}_e) = (\mathbf{0}, \mathbf{0})$ est le seul point d'équilibre asymptotiquement stable.

Preuve de la propriété 1 :

Comme nous savons que :

$$|\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F|^2 + \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2 = 1 \quad (3.75)$$

$\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F$ tend donc vers 0 (i.e. mobile orthogonal à la trajectoire) si seulement si $1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2$ tend vers 0. Ce qui revient à dire que la fonction de Lyapunov L tend vers $+\infty$. Cela est impossible car la fonction L n'est jamais croissante le long des solutions du système. Par conséquent, $\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F$ ne s'annule pas. Reste à s'assurer que $\boldsymbol{\omega}_F$ est bornée. Avant de le faire, remarquons que

$$\frac{1}{|\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F|} = \frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq \max\left\{\frac{2}{\sqrt{3}}, 4 \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}}\right\} \leq \max\left\{\frac{2}{\sqrt{3}}, 8L\right\} \quad (3.76)$$

avec $\frac{2}{\sqrt{3}}$ la valeur de $\frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}}$ pour $\|\boldsymbol{\eta}_e\| = \frac{1}{2}$. Dans la commande (3.67), le terme

$$\left(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2\right)^2 \frac{\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F}{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F} \quad (3.77)$$

peut donc être défini par continuité quand $\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F = 0$ en raison de (3.75). La singularité $\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F = 0$ est donc purement virtuelle car $\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F = \sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}$ peut être simplifiée avec $(1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2)^2$.

Maintenant, nous montrons que $\boldsymbol{\omega}_F$ est bornée. Pour cela, nous savons que \mathbf{d} est orthogonal à la tangente $\dot{\mathbf{x}}_F$ (Figure 3.9) du fait de la continuité C^1 du chemin. Le produit scalaire entre ces deux vecteurs est donc nul (i.e. $\mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F = 0$), par conséquent, $\dot{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{x}_F + \mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F = 0$. Ainsi,

$$\dot{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{x}_F = -\mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F \quad (3.78)$$

Or, d'après (3.54)

$$\dot{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{x}_F = (v\mathbf{x}_d - \dot{s}\mathbf{x}_F) \cdot \mathbf{x}_F \quad (3.79)$$

$$= v(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) - \dot{s} \quad (3.80)$$

En utilisant les relations (3.49), (3.78) et (3.80), il est possible d'écrire :

$$v(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) - \dot{s} = -\mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F \quad (3.81)$$

$$= -\mathbf{d} \cdot (\boldsymbol{\omega}_F \times \mathbf{x}_F) \quad (3.82)$$

$$= -\boldsymbol{\omega}_F \cdot (\mathbf{x}_F \times \mathbf{d}) \quad (3.83)$$

$$= -\dot{s}\mathbf{c}(s) \cdot (\mathbf{x}_F \times \mathbf{d}) \quad (3.84)$$

car d'après (3.5), $\boldsymbol{\omega}_F = \dot{s}\mathbf{c}(s)$. Par conséquent,

$$\dot{s} = v \frac{\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F}{1 - \mathbf{c}(s) \cdot (\mathbf{x}_F \times \mathbf{d})} \quad (3.85)$$

Comme la fonction L est décroissante le long des solutions du système, $L(t) \leq L(0) \forall t$. Ainsi,

$$\forall t, \quad k_1 \|\mathbf{d}(t)\|^2 \leq k_1 \|\mathbf{d}(0)\|^2 + \frac{\|\boldsymbol{\eta}(0)\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}(0)\|^2} \quad (3.86)$$

Or, d'après (3.51), on a :

$$\forall t, \quad \|\mathbf{d}(t)\| < \frac{1}{\|\mathbf{c}(s(t))\|} < \frac{1}{c_{\max}} \quad (3.87)$$

En particulier, cette majoration est valable sous (3.86) quand

$$\|\mathbf{d}(0)\|^2 + \frac{1}{k_1} \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e(0)\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e(0)\|^2} < \frac{1}{c_{\max}^2} \quad (3.88)$$

Alors,

$$\forall t, \quad \|\mathbf{d}(t)\|^2 \leq \|\mathbf{d}(0)\|^2 + \frac{1}{k_1} \frac{\|\boldsymbol{\eta}(0)\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}(0)\|^2} < \frac{1}{c_{\max}^2} \quad (3.89)$$

Donc, il existe une constante positive $s_m < 1$ tel que $c_{\max} \|\mathbf{d}(t)\| \leq s_m$. Puisque $\|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\| \leq \|\mathbf{a}\| \cdot \|\mathbf{b}\|$ et, similairement, $\|\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}\| \leq \|\mathbf{a}\| \cdot \|\mathbf{b}\|$, alors $\|\mathbf{c}(s) \cdot (\mathbf{x}_F \times \mathbf{d})\| \leq \|\mathbf{c}(s)\| \cdot \|\mathbf{d}\| \leq c_{\max} \|\mathbf{d}\| \leq s_m$. Par conséquent, le dénominateur de \dot{s} dans (3.85) est majoré par $1 - s_m$ et son numérateur par v_{\max} . Ainsi,

$$|\dot{s}| \leq \frac{v_{\max}}{1 - s_m} \quad (3.90)$$

avec v_{\max} la limite de $|v|$. Par conséquent,

$$\|\boldsymbol{\omega}_F\| = \|\dot{s}\mathbf{c}(s)\| \leq \frac{c_{\max} v_{\max}}{1 - s_m} \quad (3.91)$$

Ainsi donc, la vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}_F$ est bornée. Au passage, notons qu'en établissant la relation (3.88) à partir de l'Hypothèse 1, nous avons, lors de cette preuve, défini le domaine de convergence \mathcal{A} .

Nous devons donc maintenant démontrer la Propriété 2. Pour ce faire, nous aurons besoin du Lemme de Barbalat et de son extension, rappelés ci-dessous.

Définition 3.3 (Lemme de Barbalat). *Si une fonction $f(t)$ tend vers une valeur limite quand t tend vers l'infini et si la dérivée $\dot{f}(t)$ est uniformément continue (i.e. $\ddot{f}(t)$ est bornée), alors la dérivée $\dot{f}(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini (Farkas et Wegner, 2016).*

Définition 3.4 (Version étendue du lemme de Barbalat). *Si une fonction dérivable $f(t)$ converge vers une valeur limite v_{\lim} quand t tend vers l'infini, et si la dérivée $(df/dt)(t)$ de cette fonction est la somme de deux termes, le premier est uniformément continu et le deuxième tend vers zéro quand t tend vers l'infini, ainsi la dérivée $(df/dt)(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini (Samson, 1995; Micaelli et Samson, 1993).*

Preuve de la propriété 2 :

Montrer que $(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}_e) = (\mathbf{0}, \mathbf{0})$ est le seul point d'équilibre asymptotiquement stable revient à montrer que la fonction de Lyapunov L converge vers zéro quand t tend vers l'infini. Pour cela, nous utilisons le lemme de Barbalat comme expliqué dans Micaelli et Samson (1994) pour le cas d'un robot mobile planaire. Les étapes principales de la preuve de convergence sont :

1. $\dot{L} \leq 0$ implique que $L \rightarrow L_{\lim}$, donc que $\dot{L} \rightarrow 0$, et ainsi que $v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t) \rightarrow 0$ d'après le lemme de Barbalat.
2. La dérivée temporelle de $v(t)^2\boldsymbol{\eta}_e(t)$ consiste en deux termes. Le premier est en fonction de $v(t)^n(\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F)(t)$ ($n \geq 1$) qui est uniformément continu. Le deuxième converge vers zéro. D'après le lemme de Barbalat étendu, $v(t)(\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F)(t) \rightarrow 0$. Ainsi, $v(t) \|\mathbf{d}(t)\|^2 \rightarrow 0$.
3. Par conséquent, $v(t)L \rightarrow 0$, et $L_{\lim} = 0$ si $v(t)$ ne tend pas vers zéro.

Nous commençons par montrer que $v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini. Cela revient à montrer que la dérivée \dot{L} tend vers zéro quand t tend vers l'infini. D'après le lemme de Barbalat (i.e. Définition 3.3), si la fonction L converge vers une valeur constante L_{\lim} quand t tend vers l'infini et si \dot{L} est uniformément continue (i.e. sa dérivée est bornée), alors \dot{L} tend vers zéro quand t tend vers l'infini.

À partir de (3.74), nous déduisons que la fonction L tend vers zéro quand t tend vers l'infini. De plus, \dot{L} est uniformément continue car tous les paramètres qui composent sa dérivée \ddot{L} sont bornés. C'est à dire tous les termes $\frac{1}{|\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_F|}$, $|\dot{s}|$, $\|\boldsymbol{\omega}_F\|$, \mathbf{d} , $\boldsymbol{\eta}_e$, $\mathbf{c}(s)$ et $|v|$ sont bornés. Ainsi, en appliquant le lemme de Barbalat, nous déduisons que la dérivée \dot{L} tend vers zéro quand t tend vers l'infini comme suit :

$$k_2 v(t) \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e(t)\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e(t)\|^2} \rightarrow 0 \quad \text{quand } t \rightarrow +\infty \quad (3.92)$$

Enfin, puisque k_2 est minoré par $\delta > 0$, nous concluons que

$$v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t) \rightarrow 0 \quad \text{quand } t \rightarrow +\infty \quad (3.93)$$

Maintenant, nous montrons la convergence de $v(t) \|\mathbf{d}(t)\|^2$ vers zéro quand t tend vers l'infini. Pour cela, nous utilisons la dérivée de $v(t)^2\boldsymbol{\eta}_e(t)$ qui peut être écrite en fonction de la distance $\mathbf{d}(t)$. Ainsi,

$$\frac{d}{dt} (v(t)^2\boldsymbol{\eta}_e(t)) = 2\dot{v}(t)v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t) + v(t)^2\dot{\boldsymbol{\eta}}_e(t) \quad (3.94)$$

En remplaçant la dérivée temporelle $\dot{\boldsymbol{\eta}}_e(t)$ par son expression dans (3.63), l'équation (3.94) peut alors être développée comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(v(t)^2 \boldsymbol{\eta}_e(t) \right) = 2\dot{v}(t)v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t) + v(t)^2 \left(-(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) \boldsymbol{\omega}_e + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d) \mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F) \mathbf{x}_F \right) \quad (3.95)$$

En étudiant la convergence de cette équation quand t tend vers l'infini, nous avons à partir des équations (3.93), (3.75) et (3.67)

$$\dot{v}(t)v(t)\boldsymbol{\eta}_e(t) \longrightarrow 0 \quad \text{quand } t \longrightarrow +\infty \quad (3.96)$$

$$v(t)^2 \left((\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d) \mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F) \mathbf{x}_F \right) \longrightarrow 0 \quad \text{quand } t \longrightarrow +\infty \quad (3.97)$$

$$-v(t)^2 (\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) \boldsymbol{\omega}_e \longrightarrow k_1 v(t)^3 (\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F)(t) \quad \text{quand } t \longrightarrow +\infty \quad (3.98)$$

Ainsi,

$$\frac{d}{dt} \left(v(t)^2 \boldsymbol{\eta}_e(t) \right) \longrightarrow k_1 v(t)^3 (\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F)(t) \quad \text{quand } t \longrightarrow +\infty \quad (3.99)$$

Cette équation (i.e. la dérivée de $v(t)^2 \boldsymbol{\eta}_e(t)$) est uniformément continue car sa dérivée est bornée. De plus, $v(t)^2 \boldsymbol{\eta}_e(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini. En appliquant la version étendue du lemme de Barbalat (i.e. Définition 3.4), la dérivée de $v(t)^2 \boldsymbol{\eta}_e(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini. Par conséquent, $v(t)^3 (\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F)(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini. Nous avons aussi $\|\mathbf{d}\| = \|\mathbf{d} \times \mathbf{x}_F\|$ puisque \mathbf{d} et \mathbf{x}_F sont orthogonaux. Ainsi,

$$v(t)^6 \|\mathbf{d}(t)\|^2 \longrightarrow 0 \quad \text{quand } t \longrightarrow +\infty \quad (3.100)$$

Enfin, en utilisant (3.92), (3.100) et la limite de $v(t)$, cela implique que

$$v(t)^6 L(t) \longrightarrow 0 \quad (3.101)$$

Puisque la fonction de Lyapunov L converge vers une valeur limite L_{\lim} quand t tend vers l'infini et $v(t)$ ne tend pas vers zéro quand t tend vers l'infini, nous déduisons que $L_{\lim} = 0$. Cela conclut la preuve de la deuxième propriété. ■

4.4 Actionnement

La loi de commande (3.67) nous donne l'expression de la vitesse angulaire de pilotage $\boldsymbol{\omega}_d$ du repère de perturbation \mathcal{F}_d . Celle-ci optimise les erreurs spatiales entre la vitesse linéaire totale du nageur et la tangente du chemin de référence. Pour calculer la vitesse angulaire de pilotage du nageur $\boldsymbol{\omega}_B$, la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B est utilisée comme suit :

$$\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r = \boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_B \quad (3.102)$$

Ainsi,

$$\boldsymbol{\omega}_B = \boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_{d,B}^r \quad (3.103)$$

$$= \boldsymbol{\Omega} \quad (3.104)$$

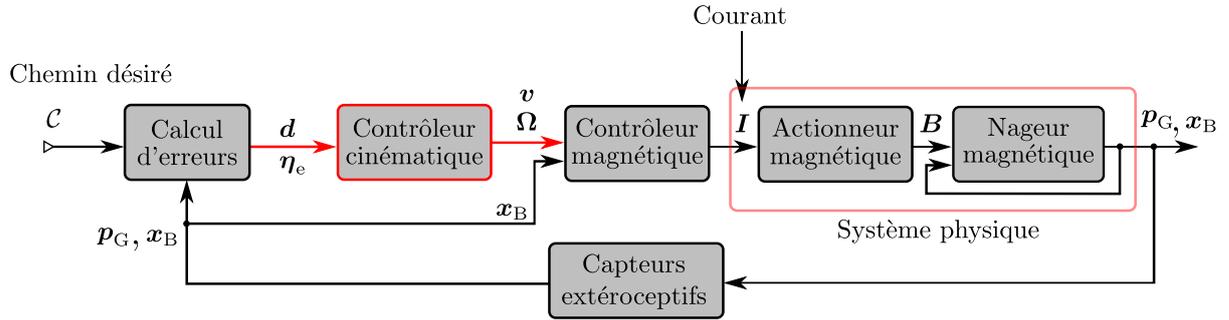


Figure 3.11. Schéma-bloc de la commande vectorielle. Le contrôleur magnétique dépend de la propulsion choisie (voir chapitre 2 pour l’hélice ou le flagelle).

La notation ω_B est la même que Ω . L’expression de la vitesse angulaire relative $\omega_{d,B}^r$ est donnée dans la section 4 de l’Annexe A.

En résumé, le schéma fonctionnel de la commande vectorielle pour le suivi de chemin 3D du robot nageur magnétique est présenté sur la Figure 3.11. Cette approche utilise les erreurs vectorielles entre le nageur et le chemin de référence (i.e. d et η_e) afin de calculer la vitesse angulaire de pilotage Ω nécessaire au suivi de chemin. Le contrôleur magnétique utilise cette vitesse angulaire et l’orientation réelle x_B pour calculer le couple magnétique de pilotage à appliquer sur le robot. Celui-ci est envoyé sous forme de courant électrique I aux bobines de Helmholtz afin de générer le champ magnétique B nécessaire au guidage du nageur. Enfin, la position et l’orientation du nageur (i.e. p_G et x_B) sont estimées en utilisant les deux caméras du système magnétique. Par rapport à l’approche scalaire présentée précédemment, cette loi de commande ne nécessite pas la connaissance de quelques paramètres du chemin de référence comme les dérivées des courbure et torsion.

5 Conclusion

Cette thèse est particulièrement motivée par les applications des microrobots dans l’espace tel que la manipulation à cinq DDL⁴ des cellules biologiques à l’intérieur du corps humain, où la commande de mouvement en boucle fermée est nécessaire pour amener le nageur vers la position désirée avec une précision élevée afin d’éviter les obstacles présents dans l’environnement et de compenser les flux sanguins perturbateurs.

Pour cela, ce chapitre a développé deux lois de commande pour le suivi de chemin 3D des robots nageurs en boucle fermée de manière générique. Le poids du robot, les perturbations environnementales et les contraintes de non holonomie sont pris en compte. Dans la première approche, le modèle cinématique est présenté dans le repère de Frénet du chemin de référence. Ainsi, le mouvement désiré est exprimé en termes des paramètres du chemin géométrique tel que la courbure, la torsion et leurs dérivées. Ensuite, une nouvelle formulation chaînée avec cinq états et trois entrées est développée pour linéariser le système du nageur et synthétiser une loi de commande par retour d’état. Cette première approche est géométrique. Elle utilise

4. Degrés De Liberté

les projections des erreurs spatiales (i.e. les erreurs de distance et d'orientation) dans les plans horizontal et vertical. Une deuxième approche géométrique plus intuitive du mouvement du robot nageur est développée. La loi de commande est synthétisée en se basant sur la fonction de Lyapunov. Une preuve de stabilité est présentée aussi pour celle-ci.

Ces deux approches de commande utilisent uniquement les erreurs spatiales entre le nageur et le chemin de référence, sans prendre en compte la dynamique du robot. Ainsi, elles peuvent être utilisées pour n'importe quels systèmes autonomes non-holonomes tel que les véhicules sous marins et les avions.

Dans le chapitre suivant, ces deux commandes sont validées sur les nageurs hélicoïdal et flexible présentés précédemment dans le chapitre 2. Des chemins géométriques 3D avec des courbures et des torsions de complexité variée et sous différentes conditions sont expérimentés.

Phase expérimentale

Sommaire

1	Suivi de chemin 3D	92
1.1	Droite spatiale	93
1.2	Hélice	94
1.3	Sinusoïde inclinée	96
1.4	Découplage suivi de chemin et profil de vitesse	98
1.5	Réglage des gains de commande	100
2	Nage en boucle fermée en présence de perturbations	100
2.1	Impact de la viscosité du fluide	101
2.2	Effets de bord	102
2.3	Compensation du poids du nageur	104
2.4	Comparaison boucle fermée vs. boucle ouverte	107
3	Critères de comparaison entre deux types différents de nageurs	108
3.1	Robot avec une queue flexible	108
3.2	Robot hélicoïdal vs. robot flexible	111
3.2.1	Comparaison de nageurs topologiquement différents	112
3.2.2	Rayon de courbure	112
3.2.3	Critère de viscosité du fluide	115
3.3	Conclusion	117
4	Commande vectorielle	118
4.1	Rapidité	118
4.2	Précision	119
5	Conclusion	121

Les commandes en boucle ouverte sont très sensibles aux perturbations environnementales et aux erreurs de modélisation. Dans le chapitre précédent, des lois de commande en boucle fermée sont développées pour améliorer la précision et la robustesse des micronageurs. Ainsi, ce

chapitre présente une validation expérimentale de ces lois de commande en utilisant les robots magnétiques hélicoïdal et flexible à faible nombre de Reynolds. La première partie traite l'approche scalaire sur le nageur hélicoïdal avec des chemins géométriques de complexité différente. Une droite spatiale, une hélice et une sinusoïde inclinée sont testées. Les performances de l'algorithme du suivi de chemin sont expérimentées face aux changements de viscosité, aux effets de bords et aux erreurs de modélisation. Pour montrer que cet algorithme est général et peut être utilisé pour n'importe quel robot nageur non-holonome, celui-ci est validé sur le robot flexible en adaptant le mode de propulsion magnétique propre au nageur. Enfin, un ensemble de critères de comparaison entre les nageurs flexible et hélicoïdal sont proposées. Cela permet de choisir le plus performant entre deux nageurs de topologie différente. Ces critères sont en fonction de la tâche à réaliser, de l'environnement dans lequel les robots évoluent et du processus de fabrication.

1 Suivi de chemin 3D

Cette section présente la validation de la commande du suivi de chemin 3D sur le prototype expérimental. La première approche est utilisée sur le nageur hélicoïdal en suivant des chemins géométriques distincts y compris : une droite spatiale avec une altitude constante, une hélice et une sinusoïde inclinée. Les mouvements du robot nageur dans l'espace sont contrôlés par asservissement visuel en suivant l'Algorithme 1. Ce dernier est développé en C++ avec la bibliothèque ViSP (Marchand *et al.*, 2005). La fréquence d'échantillonnage est fixé à 10 Hz pour toutes les

Algorithme 1 Suivi de chemin 3D d'un robot nageur

Requiert : $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$

- 1: $v \leftarrow \text{total_linear_speed}$
 - 2: $\mathcal{C}(s) \leftarrow \text{3D_geometric_path}$
 - 3: **Tant que** pas la fin du chemin **faire**
 - 4: $I, I_1 \leftarrow \text{grab_images}()$
 - 5: $\theta_i, \theta_d \leftarrow \text{swimmer_orientation_tracking}(I, I_1)$
 - 6: $\mathbf{x}_B \leftarrow \text{swimmer_axis_calculation}(\theta_i, \theta_d) \quad \triangleright (2.4)$
 - 7: $\mathbf{y}_B, \mathbf{z}_B \leftarrow \text{swimmer_axis_perpendicular_plane}(\theta_i, \theta_d)$
 - 8: $\mathbf{p}_G \leftarrow \text{swimmer_position_tracking}(I, I_1)$
 - 9: $\mathbf{p}_S \leftarrow \text{projection_path}(\mathbf{p}_G)$
 - 10: $(\mathbf{x}_F, \mathbf{y}_F, \mathbf{z}_F) \leftarrow \text{Serret_Frenet_frame}$
 - 11: $(s, c, \tau, \frac{dc}{ds}, \frac{d\tau}{ds}) \leftarrow \text{path_parameters}(\mathbf{p}_S)$
 - 12: $(d_z, d_y) \leftarrow \text{distance_errors}(\mathbf{p}_G, \mathbf{p}_S)$
 - 13: $(\theta_{de}, \theta_{ie}) \leftarrow \text{orientation_errors}(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_F)$
 - 14: $(\dot{s}, \dot{d}_y, \dot{d}_z, \dot{\theta}_{de}, \dot{\theta}_{ie}) \leftarrow \text{kinematic_equations} \quad \triangleright (3.24)$
 - 15: $(\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{31}, \gamma_{32}, \gamma_{33}) \leftarrow \text{scalars}$
 - 16: $(u_1, u_2, u_3) \leftarrow \text{control_law} \quad \triangleright (3.28), (3.44), (3.45)$
 - 17: $\boldsymbol{\Omega} = (0, \Omega_y, \Omega_z) \leftarrow \text{steering_angular_velocities} \quad \triangleright (3.47)$
 - 18: $\mathbf{B}_d \leftarrow \text{driving_magnetic_field}(\mathbf{y}_B, \mathbf{z}_B) \quad \triangleright (2.21)$
 - 19: $\mathbf{B}_s \leftarrow \text{steering_magnetic_field}(\mathbf{x}_B, \boldsymbol{\Omega}) \quad \triangleright (2.28)$
 - 20: $\mathbf{I} \leftarrow \text{current_conversions}(\mathbf{B}_d, \mathbf{B}_s)$
 - 21: **Fin Tant que**
-

expériences.

Dans la sous-section suivante, cet algorithme est testé sur une droite spatiale avec une altitude constante. Celle-ci est simple car la courbure et la torsion sont constantes. Elle peut être utilisée dans la plupart des applications in vitro, où le nageur doit suivre un chemin géométrique prédéfini, par exemple traverser des micro-canaux avec une altitude constante.

1.1 Droite spatiale

Le nageur hélicoïdal tourne en synchronisation avec le champ magnétique appliqué à une fréquence de 3.2 Hz. L'angle de compensation de direction δ_{θ_d} est nul car l'environnement expérimental est assez stable. Cependant, pour compenser le poids du nageur, l'angle de compensation d'inclinaison δ_{θ_i} est fixé à 45° . La courbure et la torsion du chemin de référence respectivement c et τ sont nulles dans le cas d'une droite spatiale. Ainsi, la commande de pilotage des vitesses angulaires donnée par (3.47) peut être simplifiée comme suit :

$$\begin{cases} \Omega_z = C\theta_{ie} (C\theta_{de})^2 (C\delta_{\theta_i})^{-1} (-k_{d1} u_1 d_y - k_{t1} |u_1| T\theta_{de}) \\ \Omega_y = -C\theta_{de} (C\theta_{ie})^2 (-k_{d2} u_1 d_z + k_{t2} |u_1| (C\theta_{de})^{-1} T\theta_{ie}) \\ \quad - (-k_{d1} u_1 d_y - k_{t1} |u_1| T\theta_{de}) S(2\theta_{ie}) S(2\theta_{de})/4 \end{cases} \quad (4.1)$$

La reconstruction 3D du chemin réalisé par le nageur est présentée sur la Figure 4.1. Le robot nageur est initialement placé à une distance $d_y = 4.4$ mm et $d_z = 3$ mm du chemin de référence et une erreur d'orientation différente de zéro. Nous observons que le robot hélicoïdal converge d'abord vers le chemin de référence, puis suit le long du chemin en maintenant les erreurs de distance d_y et d_z nulles. La projection du chemin 3D réalisé par le nageur dans les plans horizontal et vertical est présenté sur la Figure 4.2.

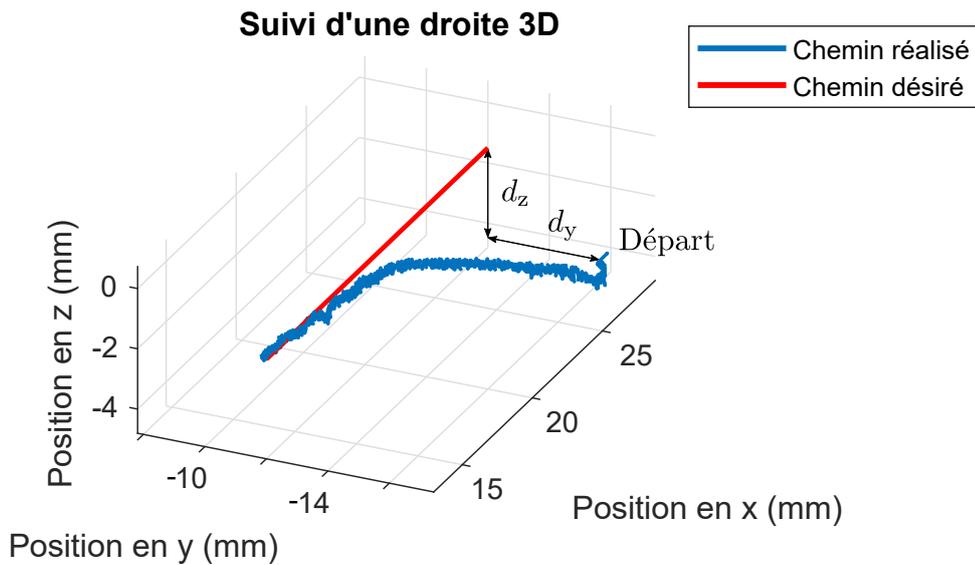


Figure 4.1. Suivi d'une droite spatiale en utilisant le nageur hélicoïdal. Les gains de commande sont réglés comme suit : $k_{t1} = 0.01$, $k_{d1} = 0.2$, $k_{t2} = 0.2$ et $k_{d2} = 0.3$.

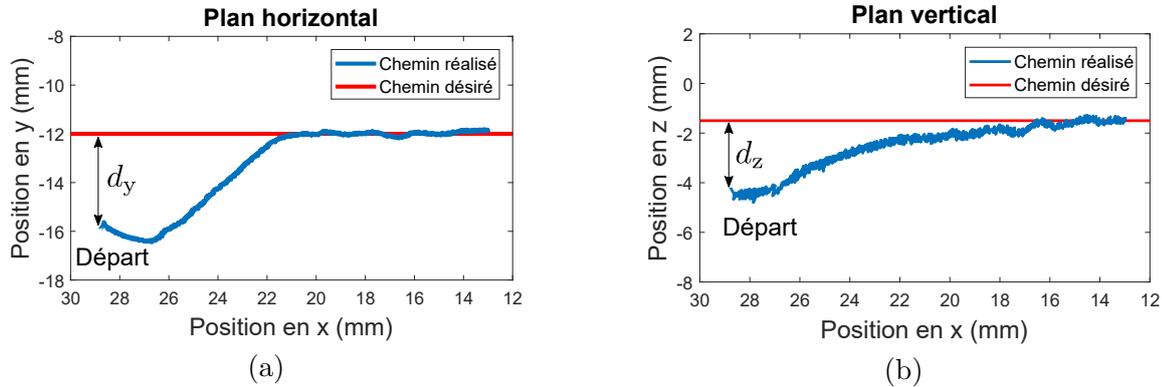


Figure 4.2. Projection du chemin réalisé par le robot hélicoïdal dans les plans horizontal et vertical.

Xu *et al.* (2015a) proposent une commande de suivi de chemin planaire pour améliorer la précision et la robustesse des nageurs hélicoïdaux. L’algorithme est validé sur une droite dans le plan horizontal. Cependant, l’altitude est maintenue (presque) constante par une commande en boucle ouverte, ainsi limitant le mouvement aux courbes planaires. En comparaison avec celle-ci, le contrôleur 3D proposé dans cette thèse régule à la fois les erreurs latérale et verticale à zéro comme illustré sur les graphes de la Figure 4.2, ainsi généralisant le mouvement aux courbes spatiales. Dans la sous-section suivante, l’algorithme du suivi de chemin 3D est testé sur une trajectoire plus complexe avec une courbure et une torsion constantes.

1.2 Hélice

Un chemin ayant la forme d’une hélice est généré afin d’évaluer le contrôleur et le comportement du nageur à ce type de courbe. Le nageur est initialement placé près du chemin de référence. La Figure 4.3 montre le résultat de la reconstruction 3D par vision de la position du nageur hélicoïdal en suivant le chemin hélicoïdal de référence.

Nous observons que le nageur hélicoïdal suit la trajectoire malgré la complexité du chemin. La projection de la trajectoire réalisée par le nageur dans les plans horizontal et vertical est présentée sur la Figure 4.4. De plus, l’évolution des erreurs de distance et d’orientation entre le nageur et le chemin de référence est donnée sur la Figure 4.5.

Dans le plan vertical, ces graphes montrent que l’erreur de distance d_z est maintenue nulle, ainsi que l’erreur d’orientation d’inclinaison θ_{ie} . Dans le plan horizontal, l’erreur de distance d_y est également maintenue nulle. Cependant, l’erreur d’orientation de direction θ_{de} n’est pas nulle. Cela est dû au réglage des gains de commande ou par le fait que l’environnement présente des perturbations latérales. Dans ce dernier cas, la commande en boucle fermée tend à compenser ces perturbations en augmentant ou diminuant l’angle de direction.

Pour estimer la précision du suivi de chemin, l’erreur quadratique (RMS¹) et l’écart type

1. Root Mean Square

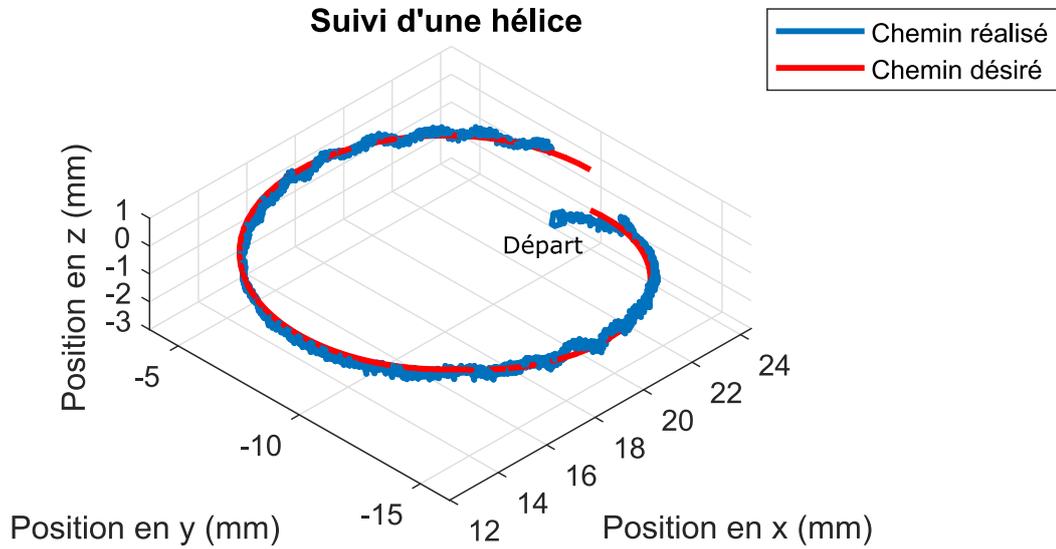


Figure 4.3. La reconstruction 3D de la trajectoire réalisée par le nageur hélicoïdal en suivant une courbe d'une forme d'une hélice avec des gains de commande de $k_{t1} = 0.004$, $k_{d1} = 0.05$, $k_{t2} = 0.3$ et $k_{d2} = 0.09$.

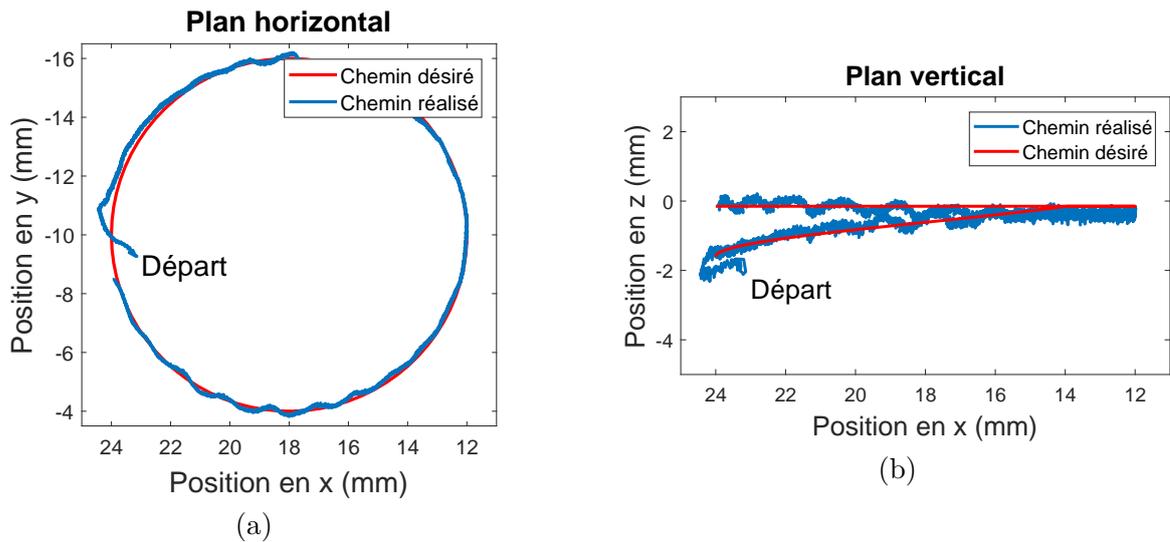


Figure 4.4. Projection du chemin hélicoïdal réalisé par le nageur dans les plans horizontal (a) et vertical (b).

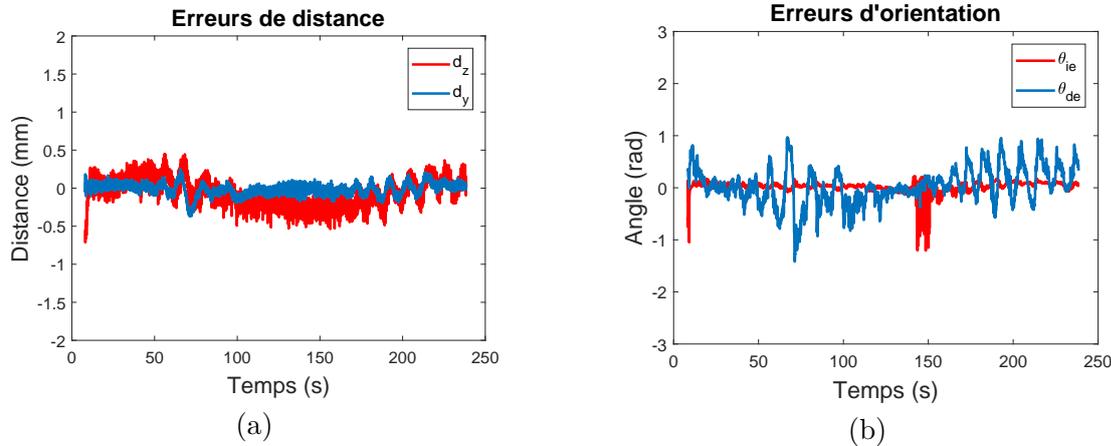


Figure 4.5. L'évolution des erreurs de distance (a) et d'orientation (b) durant le suivi du chemin hélicoïdal.

Tableau 4.1. Les erreurs du suivi de chemin hélicoïdal.

Erreurs	d_y (%bl)	d_z (%bl)	θ_{de} (rad)	θ_{ie} (rad)
RMS	0.52	1.24	0.349	0.151
SD	0.51	1.18	0.348	0.117

(SD²) sont calculés comme illustré sur le Tableau 4.1. Nous constatons que les erreurs sont inférieures à $200 \mu\text{m}$. La précision du suivi de chemin est submillimétrique. Elle représente environ 1.25% de la longueur du nageur hélicoïdal ($1\text{bl}^3=16 \text{ mm}$).

Pour ce type de trajectoires, le contrôleur est plutôt satisfaisant. Cependant, il est nécessaire de tester les performances de l'algorithme de suivi de chemin sur des courbes plus complexes car dans les applications in vivo, l'environnement est très complexe et plein d'obstacles. Dans ces conditions, le nageur doit suivre des trajectoire complexes, être robuste aux perturbations environnementales tel que les flux sanguins et précis pour éviter les obstacles. Pour cela, une trajectoire avec une courbure et une altitude qui varie, est étudiée dans la sous-section suivante.

1.3 Sinusoïde inclinée

Le contrôleur et le robot hélicoïdal sont évalués sur une trajectoire plus complexe avec une courbure et une inclinaison variantes en suivant un chemin sinusoïdal incliné. La reconstruction par vision de la position 3D du nageur est présentée sur la Figure 4.6. La projection du chemin réalisé par le nageur dans les plans horizontal et vertical est donnée par la Figure 4.7.

2. Standard Deviation

3. **bl** : la longueur du nageur (**body length** en anglais)

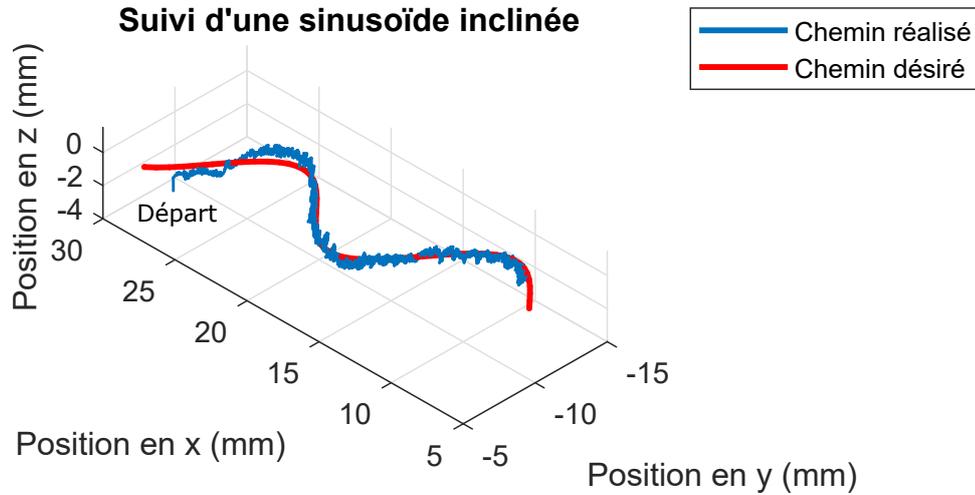


Figure 4.6. Suivi de chemin 3D d'une sinusoïde inclinée en utilisant le robot nageur hélicoïdal. Les gains de commande sont : $k_{t1} = 0.04$, $k_{d1} = 0.05$, $k_{t2} = 0.05$ et $k_{d2} = 0.08$.

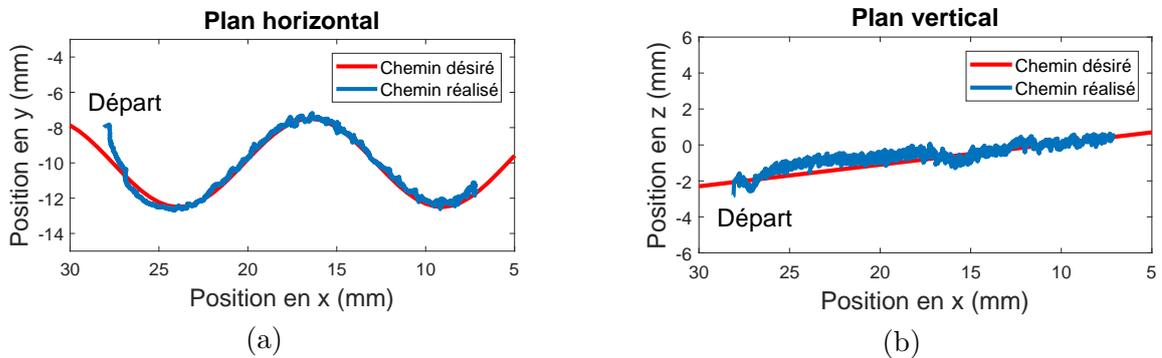


Figure 4.7. Projection du chemin réalisé par le robot hélicoïdal dans les plans horizontal et vertical.

Le robot nageur hélicoïdal suit le chemin de référence malgré la succession et la complexité des courbures. L'erreur quadratique pendant le suivi de chemin est de $178 \mu\text{m}$ pour d_y et de $396 \mu\text{m}$ pour d_z . Le contrôleur est satisfaisant puisqu'il ne dépasse pas 2.5% d'erreur.

La commande de suivi de chemin 3D (i.e. l'approche scalaire) développée dans le chapitre 3 est validée et analysée dans cette section par des résultats expérimentaux avec le nageur hélicoïdal en suivant des courbes distincts (une droite spatiale, une hélice et une sinusoïde inclinée). L'algorithme consiste à minimiser les erreurs de distance et d'orientation entre le robot nageur et le chemin de référence. Ainsi, lorsque le nageur est loin du chemin de référence, il converge d'abord vers le chemin, puis suit le long du chemin en suivant le vecteur tangent du chemin. Les résultats montrent l'efficacité et la précision du contrôleur.

1.4 Découplage suivi de chemin et profil de vitesse

Dans la plupart des applications des robots nageurs, la tâche est définie comme un chemin géométrique à suivre sans spécification du profil de vitesse comme expliqué dans la sous-section 2.2. Les deux tâches (i.e. suivi de chemin et profil de vitesse) ensemble définissent un suivi de trajectoire. Cependant, pendant les perturbations, ce dernier entraîne un retard entre le nageur réel et le robot virtuel désiré à suivre. Par conséquent, si la commande était un suivi de trajectoire (donc couplant suivi géométrique et profil de vitesse) le nageur aurait tendance à couper la trajectoire désirée pour compenser ce retard. Ainsi, il ne respecterait plus la contrainte géométrique (i.e. précision réduite) et risquerait d'entrer en collision avec les obstacles présents dans l'environnement.

Le découplage du suivi de chemin et du profil de vitesse permet de meilleures performances en terme de précision durant les perturbations. De plus, la vitesse du nageur (commande longitudinale) peut être modifiée ou commandée indépendamment et sans perturbation de la tâche du suivi de chemin (commande latérale), en fonction de l'application et des conditions environnementales tel que la viscosité du fluide. Dans l'algorithme du suivi de chemin (i.e. l'approche scalaire), le découplage est réalisé par le Lemme 3.2 (Suppression de la dépendance temporelle).

Dans cette partie, des expériences sont réalisées en utilisant la trajectoire sinusoïdale inclinée présentée sur la Figure 4.6 avec différents profils de vitesse afin d'illustrer l'impact de ces derniers sur les performances de l'algorithme du suivi de chemin du robot nageur.

La vitesse linéaire totale v du nageur hélicoïdal dépend de la fréquence de rotation f et de l'angle d'inclinaison θ_i du nageur. Cependant, l'angle θ_i est déjà utilisé dans la commande du suivi de chemin. Par conséquent, seule la fréquence de rotation f peut être utilisée pour changer la vitesse du nageur v . Pour ce faire, deux profils de fréquence différents sont générés. Le premier est un signal rectangulaire et le deuxième est un signal arbitraire continu comme illustré respectivement sur les Figures 4.8(a) et 4.8(b).

Les résultats obtenus sont comparés avec le même chemin de référence en utilisant un profil

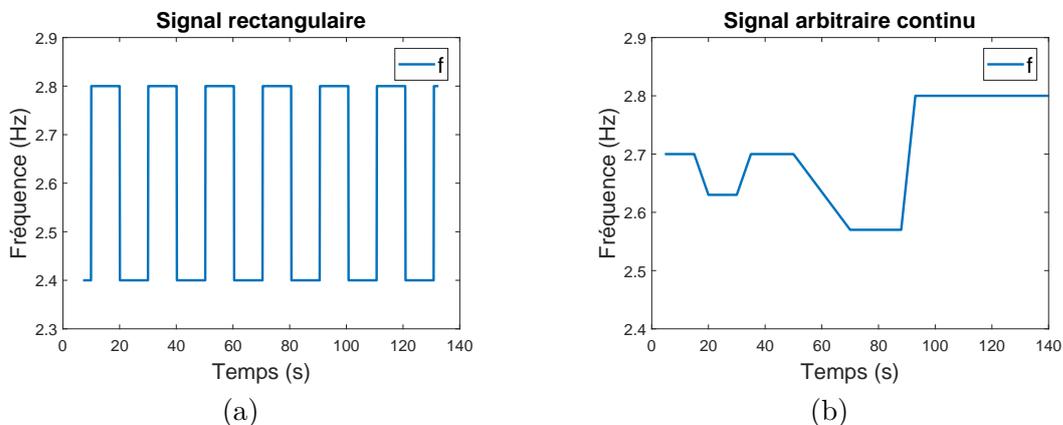


Figure 4.8. Variation de la vitesse du robot nageur hélicoïdal en utilisant différents profils de fréquence comme un signal rectangulaire (a) et un signal arbitraire continu (b).

Tableau 4.2. Les erreurs de distance et d'orientation durant le suivi de la trajectoire sinusoïdale pour différents profils de vitesse. Chaque ligne représente la moyenne de trois tests de suivi de chemin.

Profils de vitesse	Erreurs	d_y (%bl)	d_z (%bl)	θ_{de} (rad)	θ_{ie} (rad)
constant	RMS	1.11	2.47	0.597	0.079
	SD	1.08	2.10	0.594	0.068
signal rectangulaire	RMS	1.82	1.88	0.255	0.108
	SD	1.75	1.51	0.254	0.099
signal arbitraire	RMS	1.31	2.06	0.308	0.153
	SD	1.13	1.73	0.305	0.106

de fréquence constant, et sont présentés dans le Tableau 4.2. Nous observons que les performances du suivi de chemin sont plutôt satisfaisantes dans les trois cas car l'erreur de distance maximale ne dépasse pas 2.5%bl (soit 400 μm). Ainsi, nous concluons que le profil de vitesse n'affecte pas particulièrement les performances de la tâche du suivi de chemin et peut être commandé séparément en fonction de l'application à réaliser.

Remarque : La rotation du nageur hélicoïdal est variée en utilisant le décalage de fréquence pour assurer la continuité du signal et éviter les sauts de phase (i.e. changements brusques de phase) lors du changement de fréquence de rotation du robot, comme illustré sur la Figure 4.9. Cela assure aussi que la vitesse est C^1 (i.e., v continue et \dot{v} bornée).

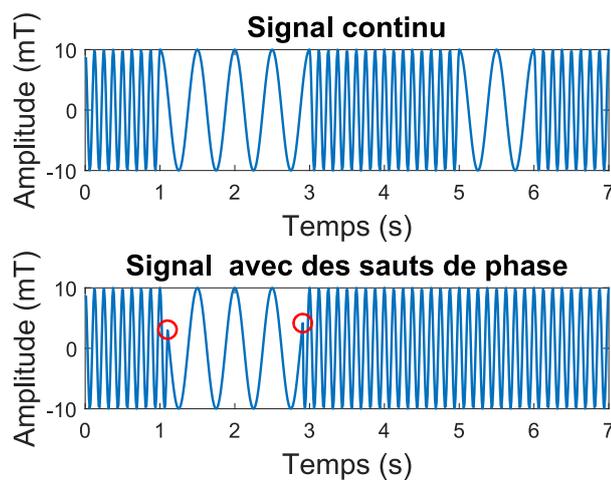


Figure 4.9. La fréquence de rotation du nageur hélicoïdal est variée en utilisant le décalage de fréquence (ou bien modulation par changement de phase) pour assurer la continuité du signal magnétique rotatif et éviter les changements brusques de phase. Ces derniers perturbent le mouvement rotatif du nageur.

1.5 Réglage des gains de commande

Les performances du contrôleur en boucle fermée (i.e. stabilité, précision et rapidité) peuvent être ajustées en utilisant les gains de commande $k_{d1,2}$ et $k_{t1,2}$. La stabilité concerne les oscillations du nageur autour du chemin de référence. La précision est l'erreur entre le nageur et le chemin désiré. La rapidité est liée au temps de réponse du nageur avant d'atteindre la trajectoire désirée.

Des expériences en utilisant une droite spatiale avec une altitude constante avec différents gains de commande, sont réalisées afin d'illustrer l'effet de ces paramètres sur les performances du suivi de chemin 3D. Les chemins réalisés par le nageur hélicoïdal pour différents gains de commande sont présentés sur la Figure 4.10.

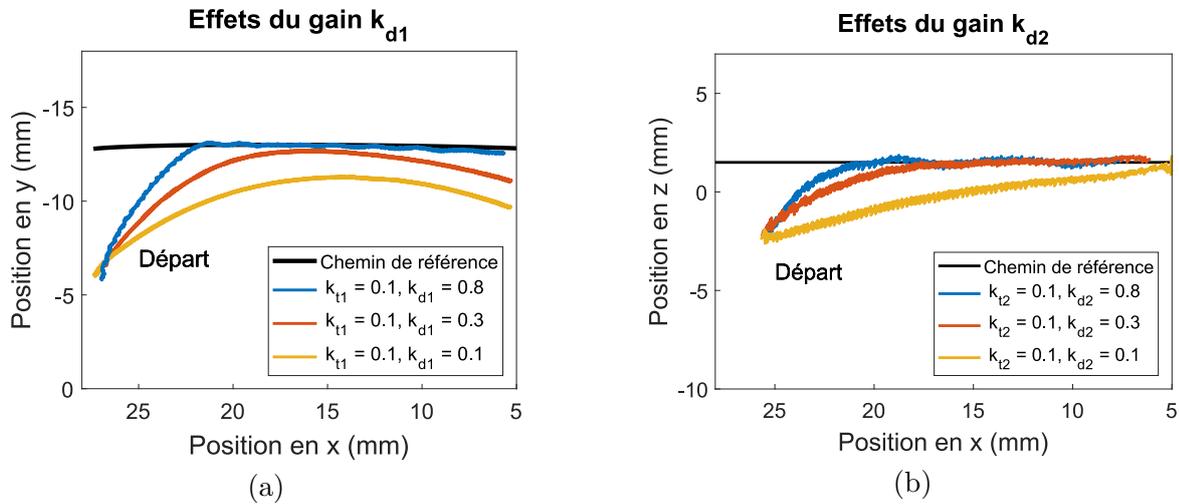


Figure 4.10. Les chemins réalisés par le robot nageur pour différents gains de commande dans les plans horizontal (a) et vertical (b).

Le nageur hélicoïdal est initialement placé loin du chemin de référence. Il peut être observé qu'en augmentant les paramètres k_{d1} et k_{d2} , le nageur converge plus rapidement vers le chemin de référence. De plus, l'erreur latérale à la fin de la trajectoire dans le plan horizontal, due aux effets de bord, diminue en augmentant ces deux gains (Figure 4.10(a)). De l'autre côté, les deux gains k_{t1} et k_{t2} jouent plutôt un rôle stabilisateurs. En effet, les paramètres $k_{d1,2}$ et $k_{t1,2}$ peuvent être considérés comme les gains proportionnel et dérivé d'un contrôleur PD.

2 Nage en boucle fermée en présence de perturbations

Dans cette section, l'impact de différentes perturbations sur le mouvement du nageur hélicoïdal en utilisant la commande en boucle fermée est étudié. Les effets de bords et de changements de viscosité sont abordés comme des perturbations environnementales, et le poids du nageur comme une erreur de modélisation. En présence de perturbations, le robot nageur possède une vitesse d'avance et une vitesse de dérive. La première est suivant l'axe principal du nageur tandis que la deuxième est perpendiculaire à celui-ci comme illustré précédemment sur les Figures 3.4 et 3.5. Le but de la commande en boucle fermée est de compenser la vitesse de dérive

qui dévie le nageur de sa trajectoire de référence.

2.1 Impact de la viscosité du fluide

La dynamique des robots nageurs à faible nombre de Reynolds dépend fortement de leur géométrie et des propriétés du fluide comme la viscosité. Cette dernière est affectée par la température. Dans Mahoney et Abbott (2011), les auteurs ont réalisé un algorithme basé sur le modèle de propulsion du nageur hélicoïdal (le modèle de propulsion est calculé à partir des caractéristiques géométriques du nageur et des propriétés du fluide) pour commander la vitesse linéaire spatiale du robot. Comme le contrôleur est en boucle ouverte, il est perturbé par les changements de viscosité. Dans ces cas, la trajectoire de référence n'est pas achevée avec des erreurs sur la vitesse désirée à atteindre. Pour compenser les perturbations causées par ces effets (changements de viscosité ou de température), la commande en boucle fermée est une solution efficace.

Ce travail utilise la glycérine comme liquide pour imiter le fluide à l'échelle microscopique en termes de nombre de Reynolds. La densité de la glycérine pure est de 1.26 g/cm^3 et la viscosité est de $1.524 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ à une température de 23°C . Cette section étudie la trajectoire sinusoïdale inclinée, précédemment présentée, avec plusieurs viscosités afin de montrer l'efficacité de la commande en boucle fermée aux changements de viscosité du fluide. La glycérine pure est diluée avec de l'eau pour avoir les différentes viscosités.

Durant ces expériences, l'angle de compensation d'inclinaison δ_{θ_i} et les gains de commande sont maintenus fixes. Les résultats du suivi de la trajectoire sinusoïdale inclinée avec trois viscosités différentes par le nageur hélicoïdal sont comparés en utilisant la moyenne et l'écart type des erreurs de distance et d'orientation comme présenté sur la Figure 4.11.

Dans le plan horizontal, le graphe montre que la moyenne de l'erreur de distance d_y est

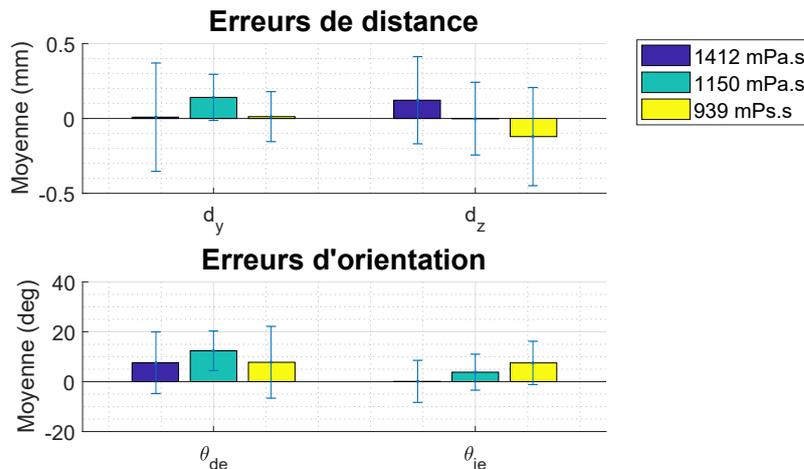


Figure 4.11. Les moyennes et les écarts types des erreurs de distance et d'orientation lors du suivi de la trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant trois différentes viscosités. Le nombre de suivi de chemin est de trois pour chaque viscosité.

comprise entre $\pm 400 \mu\text{m}$ (soit 2.5 %bl) dans les trois cas, ce qui est satisfaisant. Dans le plan vertical, nous observons que la moyenne de l'erreur de distance d_z diminue en diminuant la viscosité du fluide. Pour compenser le changement de viscosité, la commande augmente l'angle d'inclinaison comme illustré sur le graphe de l'erreur d'orientation θ_{ie} afin de garder une erreur de distance inférieure à $500 \mu\text{m}$. En effet, lorsque la viscosité diminue, le robot nageur devient plus lourd que son milieu fluide et coule vers le fond. De ce fait, en augmentant l'angle d'inclinaison, la vitesse verticale du robot nageur est augmentée et ainsi compense cette dérive vers le bas.

Dans cette section, la commande en boucle fermée utilise l'angle d'inclinaison du nageur pour augmenter la vitesse verticale du robot et compenser la dérive verticale causée par les changements de viscosité du fluide. Par ailleurs, comme les deux tâches du "suivi de chemin" et du "profil de vitesse" sont découplées, la vitesse verticale du nageur peut être augmentée en utilisant la fréquence de rotation du robot afin d'éviter que la nageur coule vers le fond dans le cas d'un changement de viscosité brusque et élevé.

En conclusion, la commande en boucle fermée est utilisée pour compenser les perturbations causées par les changements de viscosité du fluide lors du suivi de chemin dans l'espace. Celle-ci utilise l'angle d'inclinaison du robot nageur pour corriger les erreurs de dérive. De plus, il est possible d'agir sur le profil de vitesse du robot nageur dans le cas où le changement de viscosité du fluide est brusque et élevé.

2.2 Effets de bord

Aux échelles réduites, les micronageurs sont affectés par plusieurs perturbations, essentiellement les effets de bord. En effet, la présence d'une surface solide augmente la traînée visqueuse sur le corps du nageur. Cette dernière diminue en s'éloignant du bord comme expliqué par [Peyer et al. \(2010\)](#). L'influence d'une surface solide sur une bactérie *E. coli* est observée et analysée dans [Lauga et al. \(2006\)](#) et [Lauga et Powers \(2009\)](#). Celle-ci nage en ligne droite dans un environnement sans bord. Cependant, en présence d'une surface solide, la rotation des flagelles induit une force perpendiculaire à l'axe des flagelles. Une force égale mais de sens opposé est appliquée sur la tête à cause de sa contre-rotation par rapport aux flagelles. Ainsi, la bactérie nage d'une façon circulaire. Les nageurs artificiels quant à eux ont la même direction de rotation entre leur tête et flagelle. Ainsi, proche d'une paroi solide, le robot nageur roule dans un mouvement perpendiculaire à son axe principal (même quand il n'y a pas de contact direct avec la surface). Ce type de mouvement est utilisé par plusieurs microrobots pour se déplacer sur une surface solide ([Barbot et al., 2016](#)).

Cette section teste l'efficacité de la commande en boucle fermée à ce type de perturbation en analysant l'effet d'une surface solide sur le mouvement du robot nageur. Pour cela, une trajectoire rectiligne est générée avec une distance δ variante par rapport à la surface solide, de manière similaire à celle réalisée par [Diller et al. \(2013\)](#). Dans ce cas, le robot nageur se déplace parallèlement à la surface comme illustré sur le schéma de la Figure 4.12(a).

La moyenne et l'écart type lors du suivi de chemin avec le nageur hélicoïdal sont rapportés sur la Figure 4.12(b) pour différentes distances δ . Nous observons que le contrôleur est efficace pour une distance δ supérieure à 2.5 mm. Cependant, en dessous de cette distance, la précision

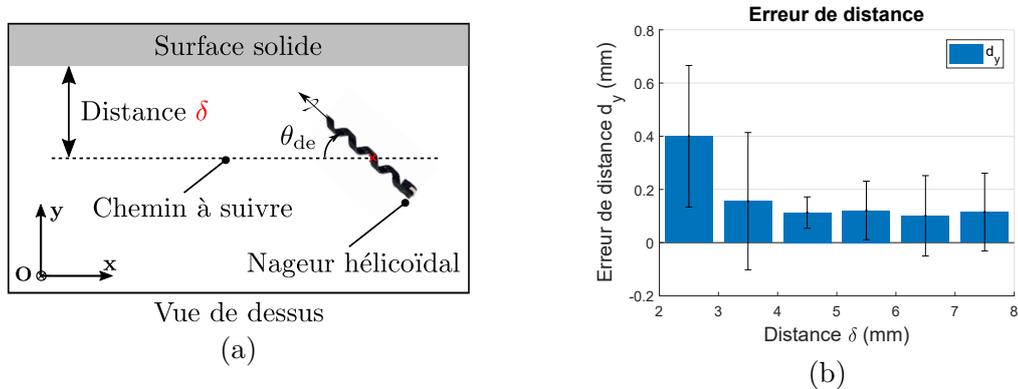


Figure 4.12. Effet d'une surface solide sur la performance de l'algorithme du suivi de chemin avec le nageur hélicoïdal. (a) Schéma explicatif de l'expérience réalisée. (b) La moyenne et l'écart type de l'erreur latérale d_y lors du suivi de chemin avec le nageur hélicoïdal pour différentes distances δ par rapport à la surface solide.

diminue dramatiquement à cause de l'augmentation du couple de traînée fluïdique et du contact intermittent du nageur avec la surface. D'autres expériences en mettant le robot nageur en contact direct avec la surface solide sont réalisées afin de montrer l'effet du contact du nageur avec la surface solide sur la performance du suivi de chemin.

Dans la première expérience, le robot nageur est initialement placé entièrement en contact avec la surface du fond du récipient comme montré sur la Figure 4.13(a). Pendant le suivi de chemin, le robot nageur roule un peu latéralement sur la surface comme nous le constatons sur le graphe de l'erreur latérale d_y sur la Figure 4.13(b). Une fois détaché, le robot nageur converge vers le chemin de référence. Dans la deuxième expérience, le nageur est cette fois-ci entièrement en contact avec la paroi latérale du récipient comme illustré sur la Figure 4.14(a). Nous observons sur le graphe des erreurs de distance 4.14(b) que le nageur roule sur la paroi verticalement pendant quelques secondes avant de se détacher. Lors de cette phase, l'erreur de

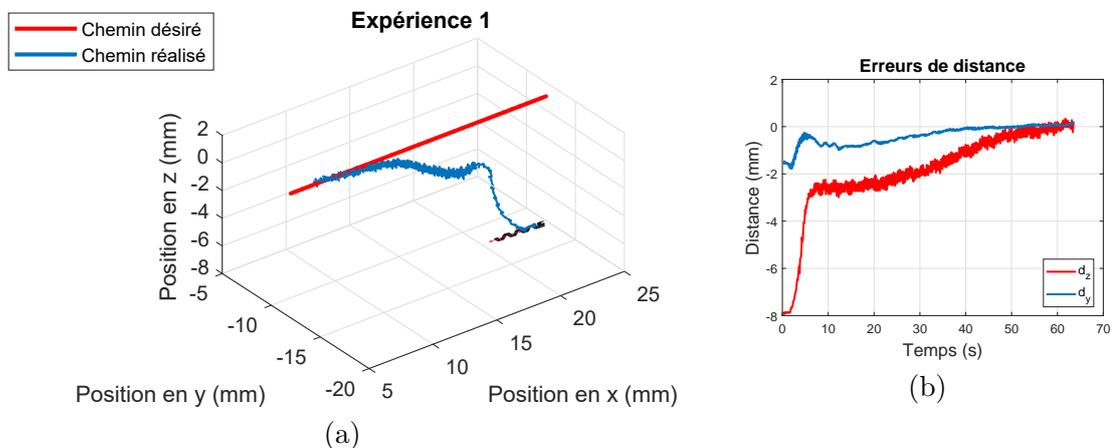


Figure 4.13. L'interaction entre le robot nageur et la surface du fond du récipient. (a) Le suivi de chemin réalisé par le nageur. (b) Les erreurs de distance lors du suivi de chemin.

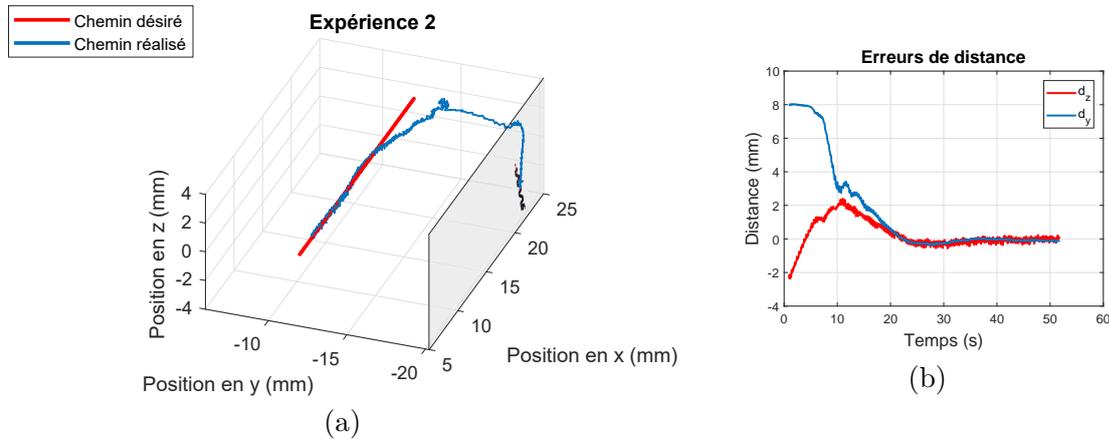


Figure 4.14. L'interaction entre le robot nageur et la paroi latérale du récipient. (a) La trajectoire réalisée par le nageur dans l'espace. (b) Les erreurs de distance lors du suivi de chemin.

distance d_y reste constante et l'erreur d_z augmente. Une fois le nageur détaché, les deux erreurs de distance d_y et d_z convergent vers zéro et ainsi le suivi de chemin est achevé.

En conclusion, cette section montre que le nageur hélicoïdal est affecté par les effets de bord (quand il est très proche ou en contact direct avec la surface solide). Cela résulte en un mouvement de dérive latérale qui est perpendiculaire à son axe principal de rotation. La commande de suivi de chemin utilise les orientations du nageur pour converger vers la trajectoire désirée. De ce fait, il faut garder une distance minimale entre le chemin de référence et la surface solide afin d'éviter que le robot nageur entre en contact avec cette dernière. Pour des chemins de référence très proches de la paroi, le nageur finit par suivre le chemin de référence. En revanche, il serait plus judicieux de contrôler le mouvement de roulement sur la surface en boucle fermée que la nage.

2.3 Compensation du poids du nageur

Les robots nageurs artificiels ont généralement un poids qui n'est pas négligeable, contrairement aux bactéries qui ont plutôt une flottabilité neutre. Par conséquent, ils ont tendance à couler vers le fond lors de leur mouvement. Dans ces cas, la vitesse linéaire totale \mathbf{v} du robot nageur n'est pas alignée avec la vitesse de propulsion \mathbf{v}_p le long de son axe principal. Ainsi, pour compenser le poids, il faut incliner le robot nageur d'un angle de compensation d'inclinaison δ_{θ_i} par rapport à la direction désirée. Cet angle peut être défini comme l'angle entre la vitesse linéaire totale \mathbf{v} et l'axe principal du robot nageur comme illustré précédemment sur la Figure 3.5. Au-dessous de cet angle, le robot nageur perd de l'altitude et gagne en vitesse en descendant à cause de la gravité. Au-dessus, le nageur gagne de l'altitude et perd un peu en vitesse tel présenté sur la Figure 4.15, où les vitesses horizontal et vertical du nageur hélicoïdal sont estimées en fonction de différents angles d'inclinaison en utilisant la matrice de propulsion. Nous observons que la vitesse horizontale diminue en augmentant l'angle d'inclinaison, par contre, la vitesse verticale augmente.

Dans ce travail, l'angle de compensation d'inclinaison δ_{θ_i} est contrôlé en boucle ouverte et

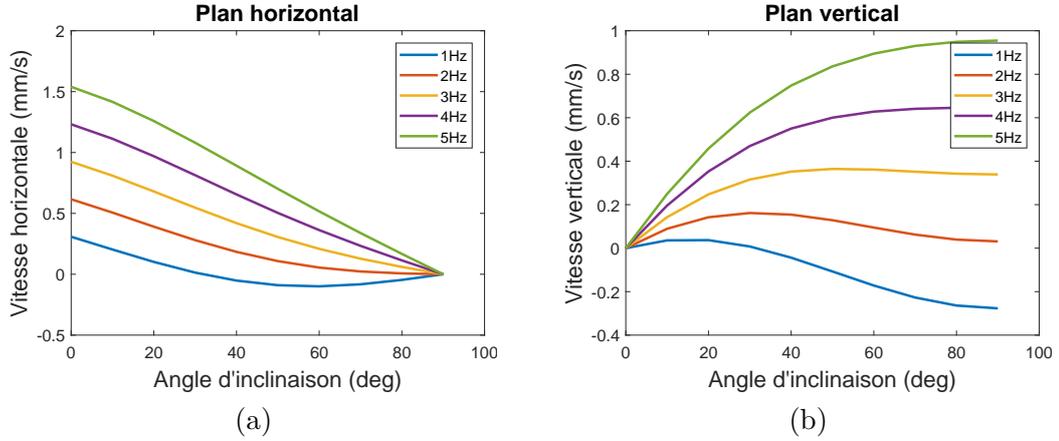


Figure 4.15. Les vitesses horizontale (a) et verticale (b) du nageur hélicoïdal estimées en fonction de différents angles d'inclinaison en utilisant la matrice de propulsion du robot nageur hélicoïdal.

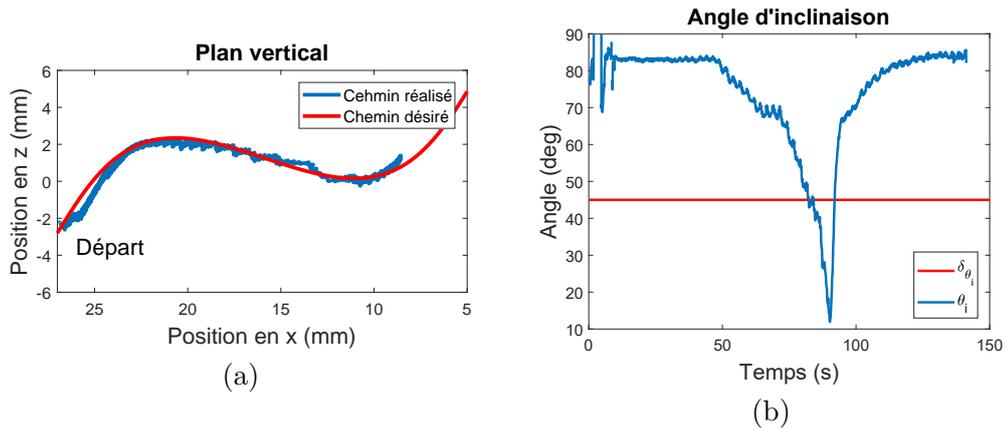


Figure 4.16. Suivi d'une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant le nageur hélicoïdal avec un angle de compensation d'inclinaison de 45° (a) et l'évolution de l'angle d'inclinaison du nageur hélicoïdal (b).

peut être estimé par vision en calculant les vitesses horizontale et verticale du robot nageur respectivement v_{ver} et v_{hor} comme suit :

$$\delta_{\theta_i} = \tan\left(\frac{v_{\text{ver}}}{v_{\text{hor}}}\right)^{-1} \quad (4.2)$$

Les erreurs d'estimation de l'angle de compensation d'inclinaison peuvent être corrigées grâce à la commande en boucle fermée. Pour cela, nous étudions l'évolution de l'angle d'inclinaison du nageur hélicoïdal lors d'un suivi d'une sinusoïde dans le plan vertical (i.e. une altitude variable), comme illustré sur la Figure 4.16.

Le nageur hélicoïdal converge et suit la trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical avec un angle de compensation d'inclinaison de 45° comme montré sur sur la Figure 4.16a. Nous observons que lorsque θ_i est supérieur à l'angle de compensation d'inclinaison δ_{θ_i} (Figure 4.16b), le nageur gagne de l'altitude. Pendant cette montée, l'angle d'inclinaison du nageur atteint

presque sa valeur maximale de 90° car l'inclinaison de la trajectoire de référence est importante. Nous observons par la suite que lorsque l'angle d'inclinaison est inférieur à $\delta\theta_i$, le nageur perd de l'altitude. Le temps de descente est beaucoup plus petit que le temps de montée. Ainsi, ces résultats montrent que le poids du nageur est élevé mais qu'il est bien compensé par la commande en boucle fermée.

Dans la suite, une série d'expériences avec différents angles de compensation d'inclinaison est réalisée en utilisant une trajectoire sinusoïdale avec une altitude constante, afin de montrer l'efficacité de la commande en boucle fermée face aux erreurs d'estimation de l'angle $\delta\theta_i$. La fréquence de rotation du nageur hélicoïdal et les gains de commande sont maintenus constants. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.17.

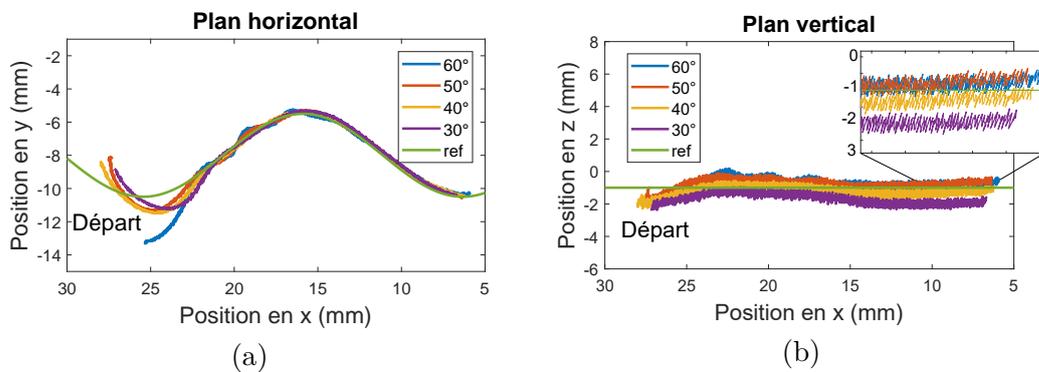


Figure 4.17. Les trajectoires du robot hélicoïdal en utilisant la commande en boucle fermée avec différents angles de compensation d'inclinaison.

Dans le plan horizontal (i.e. Figure 4.17a), toutes les trajectoires du robot nageur convergent vers le chemin de référence avec des précisions satisfaisantes. L'angle de compensation d'inclinaison n'a pas d'effet particulier sur la performance de l'algorithme du suivi de chemin dans le plan horizontal. Cependant, dans le plan vertical (Figure 4.17b), toutes les trajectoires convergent vers le chemin de référence mais avec une erreur statique plus ou moins faible en fonction de l'angle de compensation d'inclinaison. Pour cela, la moyenne et l'écart type des erreurs de distance et d'orientation dans ce plan sont mesurés et présentés sur la Figure 4.18 pour comparer les différents chemins.

Les résultats montrent que la moyenne de l'erreur de distance d_z diminue proportionnellement avec l'angle de compensation d'inclinaison comme illustré sur la Figure 4.18a. La précision est assez satisfaisante et peut être augmentée avec les gains de commande. Pour optimiser l'erreur de distance et compenser les erreurs d'estimation de l'angle $\delta\theta_i$, la commande augmente l'orientation du robot nageur θ_i . Ce qui explique l'augmentation de l'erreur d'orientation θ_{ie} sur la Figure 4.18b. Ainsi, la commande du suivi de chemin en boucle fermée corrige bien les erreurs de calcul de l'angle de compensation d'inclinaison et peut être utilisé pour compenser les erreurs de modélisation en général.

Pour conclure cette section, une comparaison entre les commandes en boucle ouverte et en boucle fermée est présentée dans la partie suivante, afin d'illustrer les différentes perturbations que le robot nageur hélicoïdal subit durant le suivi de chemin en plus de celles citées précédemment.

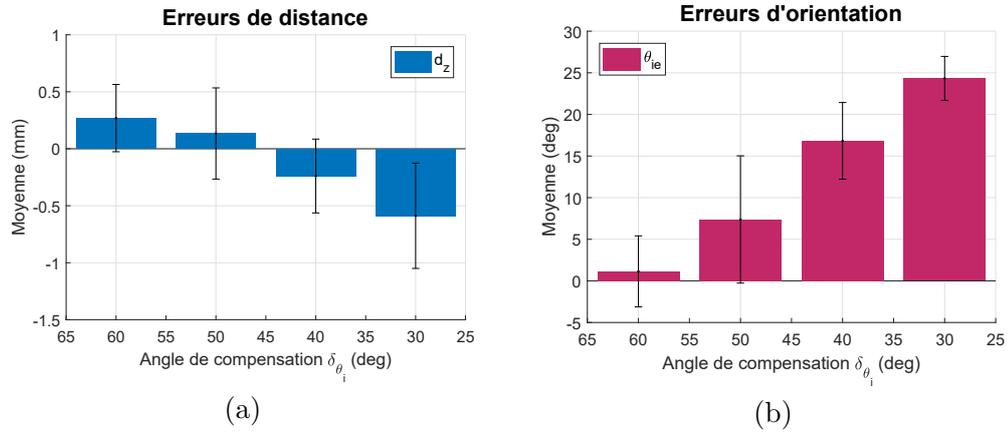


Figure 4.18. La moyenne et l'écart type des erreurs de distance (a) et d'orientation (b) dans le plan vertical en fonction de l'angle de compensation d'inclinaison.

2.4 Comparaison boucle fermée vs. boucle ouverte

Dans les sous-sections précédentes, la commande boucle fermée est testée avec différentes perturbations. Celle-ci compare les commandes en boucle fermée et en boucle ouverte du nageur hélicoïdal sous des conditions adaptées en viscosité, avec une bonne estimation de l'angle de compensation du poids et loin des bords du récipient.

Le chemin de référence est une droite spatiale avec une altitude constante. Le nageur hélicoïdal est initialement placé sur la trajectoire désirée. La commande en boucle ouverte consiste à estimer la tangente du chemin désiré. Les résultats des deux commandes sont présentés sur la Figure 4.19.

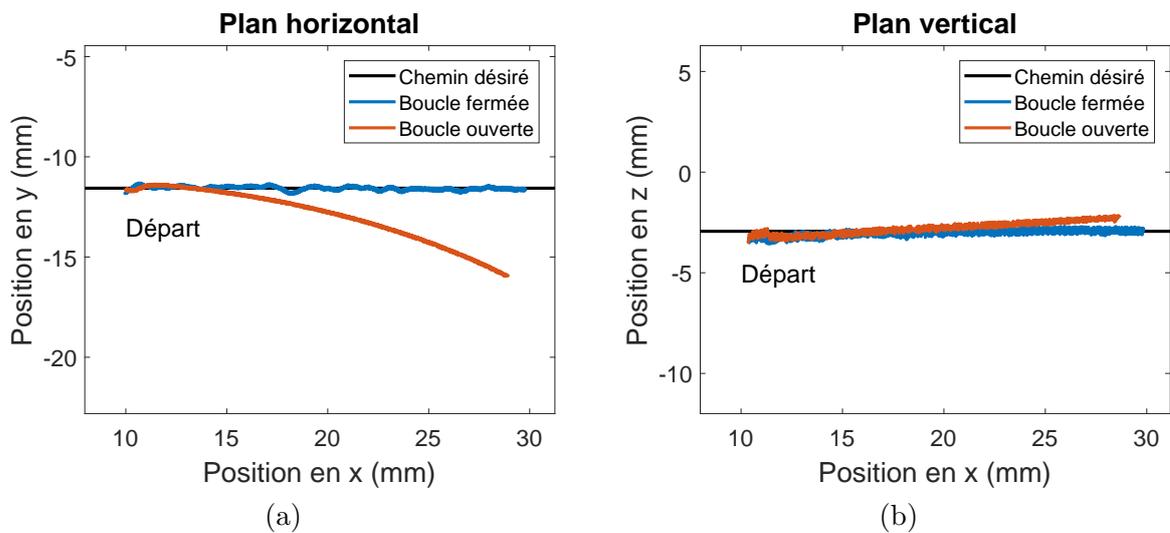


Figure 4.19. Comparaison entre les commandes en boucle fermée et en boucle ouverte avec le nageur hélicoïdal.

En utilisant la commande en boucle fermée, le nageur dérive de sa trajectoire désirée dans le plan horizontal, avec quelques dépassements dans le plan vertical. Or, en utilisant la commande en boucle fermée, ces erreurs sont corrigées avec une précision inférieure à $200\ \mu\text{m}$. Ces dérives peuvent être expliquées par : i) L'imperfection du système magnétique dans le cas où le champ magnétique n'est pas complètement uniforme, ainsi création d'un gradient de champ. ii) La non-symétrie de la queue hélicoïdale (précision de fabrication faible). iii) Les erreurs de modélisation comme les paramètres de la matrice de propulsion. iv) Le frottement entre le robot nageur et le substrat.

Pour conclure, cette section a étudié les performances de l'algorithme du suivi de chemin en boucle fermée face aux perturbations environnementales et aux erreurs de modélisation. Les résultats montrent que la précision du nageur hélicoïdal est nettement améliorée et que la commande est robuste aux perturbations comme les changements de viscosité du fluide. Dans les applications biomédicales et laboratoires sur puces, cette commande peut être utilisée pour améliorer la précision, la robustesse et la répétabilité des microrobots nageurs.

3 Critères de comparaison entre deux types différents de nageurs

Cette section montre que l'algorithme du suivi de chemin 3D est générique et peut être appliqué pour n'importe quel micronageur non-holonyme. Pour cela, il est utilisé pour commander le nageur hélicoïdal comme le nageur flexible. Ces deux classes de nageurs ont un mode d'actionnement et une topologie différents. La deuxième partie de cette section compare expérimentalement leur performances en utilisant les rayons de courbure des trajectoires désirées et les changements de viscosité du fluide, ainsi qu'en étudiant les contraintes de fabrication.

3.1 Robot avec une queue flexible

Les sections précédentes ont montré la validation de la commande du suivi de chemin 3D développée dans le chapitre 3, en utilisant le nageur hélicoïdal sous différentes conditions. Cette section montre que cet algorithme peut être utilisé pour n'importe quel nageur se comportant comme un système non-holonyme. La condition étant d'adapter le mode de propulsion propre au nageur. Pour cela, le nageur flexible présenté dans la section 4 du chapitre 2, est utilisé. Celui-ci possède une forme géométrique et un mode de propulsion complètement différents de ceux du nageur hélicoïdal. Il imite le mécanisme de locomotion d'un spermatozoïde et est actionné par un champ magnétique oscillant au lieu d'un champ magnétique rotatif.

Le schéma-bloc de l'algorithme complet, utilisé pour contrôler les mouvements du nageur dans l'espace, est présenté sur la Figure 4.20. La commande du suivi de chemin (i.e. le bloc 'Contrôleur cinématique') utilise uniquement les erreurs spatiales entre le nageur et la trajectoire désirée, indépendamment du type du robot. Ainsi, il suffit d'adapter le mode d'actionnement spécifique au robot (i.e. le bloc 'Actionneur magnétique') pour passer de la commande de mouvement du nageur hélicoïdal à celle du nageur flexible. Pour cela, la commande magnétique de pilotage du nageur est exprimée en fonction des sorties du bloc du suivi de chemin à savoir les vitesses

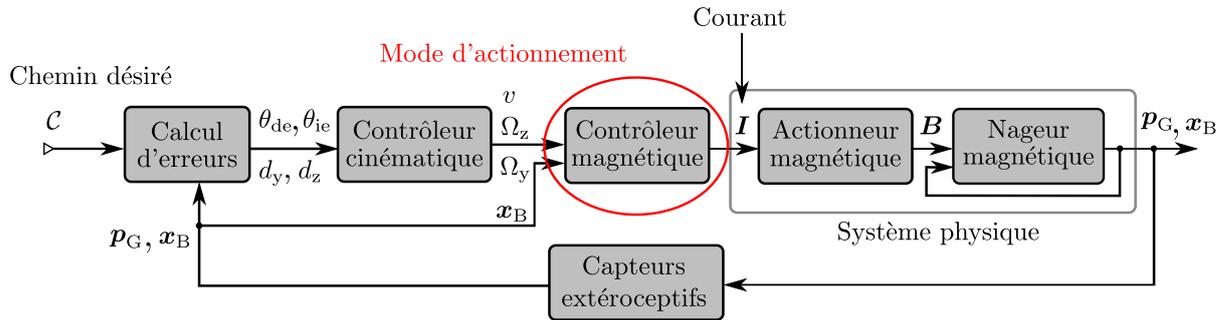


Figure 4.20. Schéma-bloc de l'algorithme utilisé pour contrôler les mouvements du robot nageur dans l'espace. Pour passer de la commande de mouvement du nageur hélicoïdal à celle du nageur flexible, il suffit d'adapter le mode d'actionnement propre au robot avec un champ magnétique oscillant plutôt que rotatif.

angulaires de pilotage Ω_y et Ω_z . Pour le nageur hélicoïdal, celle-ci est donnée par l'équation (2.28) et pour le nageur flexible par (2.37).

Pour valider la commande du suivi de chemin sur le nageur flexible, une courbe spatiale aléatoire et une trajectoire sinusoïdale inclinée sont utilisées. Les chemins réalisés par le nageur sont représentés respectivement par les Figures 4.21 et 4.22. Le nageur flexible oscille en synchronisation avec le champ magnétique appliqué à une fréquence de 1 Hz. Les résultats montrent que dans les deux cas que le nageur flexible suit bien les chemins de référence malgré la complexité des courbures des deux trajectoires. L'algorithme du suivi de chemin consiste à minimiser les erreurs de distance et d'orientation entre le nageur flexible et le chemin de référence. Quand le nageur est loin de la trajectoire de référence, il converge d'abord vers le chemin (minimisation de la distance), puis suit la direction de la tangente du chemin désiré (minimisation de l'erreur d'orientation). Le mouvement du nageur flexible est également commandé en boucle ouverte en

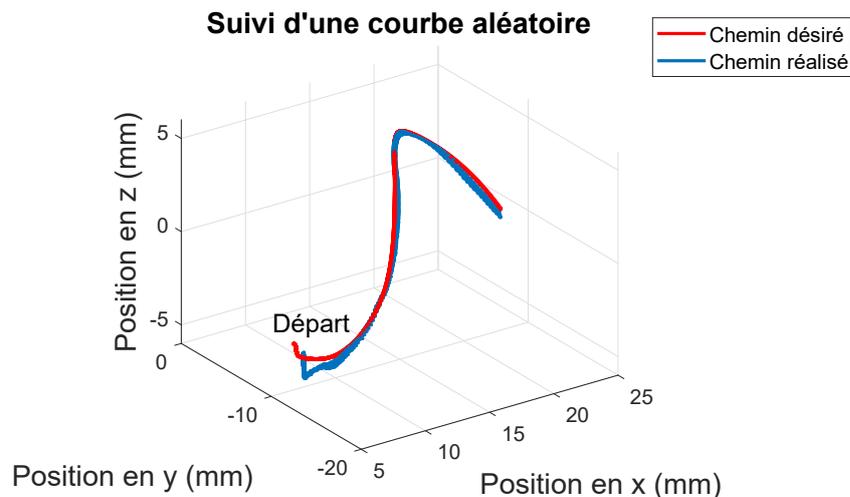


Figure 4.21. Suivi de chemin 3D d'une trajectoire arbitraire avec le nageur flexible. Les gains de commande sont réglés comme suit : $k_{d1} = 0.5$, $k_{d1} = 0.2$, $k_{d1} = 0.4$ et $k_{d1} = 0.1$.

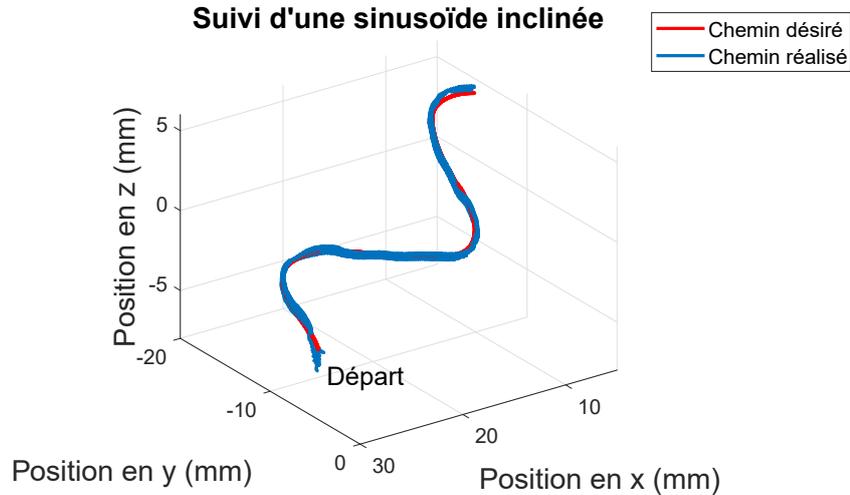


Figure 4.22. Suivi de chemin 3D d'une trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant le nageur flexible.

utilisant la même trajectoire sinusoïdale inclinée auparavant. Le principe de cette commande est de suivre le vecteur tangent du chemin de référence. Le résultat est tracé sur les mêmes figures que la trajectoire du nageur avec la commande en boucle fermée dans les plans horizontal et vertical (Figure 4.23).

Pendant l'expérience, la fréquence d'oscillation du nageur et l'angle de compensation d'inclinaison sont maintenus constants. Nous observons que le nageur flexible dérive de sa trajectoire désirée dans les plans horizontal et vertical avec la commande en boucle ouverte. Ces erreurs sont causées principalement par les imperfections du système et les erreurs de calcul de l'angle de compensation d'inclinaison. La commande en boucle fermée présente la meilleure performance

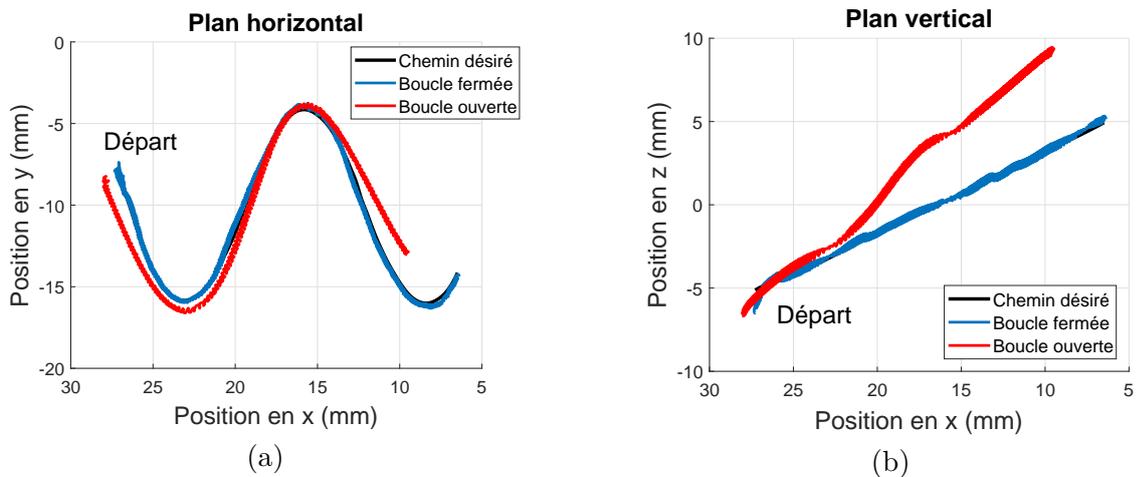


Figure 4.23. Projection des chemins réalisés par le nageur flexible dans les plans horizontal et vertical avec les commandes en boucle ouverte et en boucle fermée. La trajectoire désirée est une courbe sinusoïdale inclinée.

en termes de précision. L'erreur quadratique de distance pour l'algorithme en boucle fermée est de $99\ \mu\text{m}$ pour d_y et de $226\ \mu\text{m}$ pour d_z . Ces expériences montrent la précision du contrôleur en boucle fermée qui peut être utilisé pour réaliser des tâches réelles à l'échelle micrométrique tout en compensant les erreurs de modélisation et les perturbations environnementales.

Pour conclure, la commande du suivi de chemin en boucle fermée est testée sur deux types de nageurs distincts avec deux formes géométriques et modes de propulsion complètement différents. Les résultats montrent que la commande est précise et robuste dans les deux cas. L'algorithme du suivi de chemin 3D utilise uniquement les erreurs de distance et d'orientation pour calculer les vitesses angulaires de pilotage nécessaires pour atteindre le chemin de référence, indépendamment de la topologie et du mode d'actionnement du nageur. Ainsi, il peut être utilisé pour n'importe quel microrobot nageur se comportant comme un système non-holonome. Ce qui signifie que le nageur devrait avancer dans la même direction que son axe principal avec des déplacements latéraux nuls, exactement comme les robots mobiles pour le cas 2D et les véhicules sous-marin dans le cas 3D.

La commande en boucle fermée peut être utilisée avec le nageur hélicoïdal comme le nageur flexible afin de réaliser différentes tâches dans des domaines variés. Néanmoins, ces deux nageurs pourraient-ils accomplir les mêmes tâches avec la même efficacité ? Si non, lequel est plus adapté à utiliser ? Par ailleurs, ces deux nageurs utilisent des mouvements non-réciproques pour se propulser dans un fluide à faible nombre de Reynolds. Cependant, ils ont une forme géométrique et un mode d'actionnement complètement différents, lequel présente une meilleure propulsion ? Pour répondre à ces questions, la section suivante propose un ensemble de critères de comparaison entre des robots nageurs qui sont topologiquement différents.

3.2 Robot hélicoïdal vs. robot flexible

Il est très difficile de dire 'un robot nageur est meilleur qu'un autre', car il est impossible de choisir un seul critère pour comparer des robots qui présentent des topologies et des modes d'actionnement différents. L'objectif de cette section est de proposer une comparaison multicritère (indépendamment du type de nageur) afin de permettre aux utilisateurs de choisir le nageur le plus performant en fonction de la trajectoire à effectuer, de l'environnement dans lequel les nageurs évoluent et du processus de fabrication.

Différents critères sont alors expérimentés sur les nageurs hélicoïdal et flexible, y compris :

- i) La complexité de la trajectoire désirée : ce critère étudie la précision et la rapidité des nageurs pour exécuter des trajectoires avec différents rayons de courbure. Celui-ci est important dans la délivrance de microobjets afin de choisir, par exemple, le microrobot le plus précis pour suivre un chemin complexe tout en évitant les obstacles et les résidus présents dans l'environnement ;
- ii) Les changements de viscosité du fluide : ceci peut aider à choisir un micronageur qui est capable de travailler dans une grande variété de fluides avec différentes viscosités ;
- iii) Le processus de fabrication : il est déterminant lorsqu'il est nécessaire de changer les caractéristiques du nageur pour optimiser ou adapter sa forme pour réaliser une tâche spécifique.

3.2.1 Comparaison de nageurs topologiquement différents

Dans un fluide à faible nombre de Reynolds, les nageurs hélicoïdal et flexible utilisent des mouvements non-réciproques pour se déplacer. Cependant, ils ont une forme géométrique complètement différente. Par conséquent, les processus impliqués dans la fabrication présentent une différence importante à considérer.

Dans ce travail, Le nageur hélicoïdal a une queue rigide de forme hélicoïdale, fabriqué en utilisant une imprimante 3D. Le deuxième nageur quant à lui possède une queue plutôt flexible. Cette dernière doit respecter un certain rapport entre son élasticité et la viscosité du fluide. Cette relation est décrite par le nombre de sperme :

$$S_p = \frac{\text{Forces de viscosité}}{\text{Forces élastiques}} \quad (4.3)$$

Comme expliqué dans la section 4.1 du chapitre 2, la vitesse de propulsion du nageur est optimisée pour $S_p = 1$, et nulle pour S_p tend vers zéro ou l'infini. Concernant la magnétisation, le même aimant permanent est utilisé pour les deux nageurs. Cependant, l'aimantation est dans la même direction que l'axe principal du nageur flexible tandis qu'elle est perpendiculaire à l'axe du robot hélicoïdal.

La fabrication du nageur hélicoïdal est plus facile à l'échelle macroscopique que le robot flexible, parce que le premier nécessite uniquement une imprimante 3D, ce qui permet de réaliser des nageurs avec des formes complexes et variées. Or, le deuxième nécessite un moule où une base et un catalyseur sont mélangés avec des proportions spécifiques pour respecter le rapport entre l'élasticité de la queue et la viscosité du fluide. À l'échelle microscopique, la littérature montre que la fabrication de micronageur flexible est beaucoup plus complexe que celle de microrobot hélicoïdal (voir les sections 4.2.3 et 4.1.2 du chapitre 1 pour plus de détails). La lithographie 3D par laser a permis de réaliser des microrobots hélicoïdaux avec des formes et des mécanismes très complexes tel illustré sur la Figure 1.13. De plus, la magnétisation n'est pas maîtrisée pour la queue déformable du micronageur flexible.

Dans ce travail, comme nous maîtrisons la fabrication du nageur hélicoïdal, nous avons proposé dans le chapitre 2 une optimisation expérimentale de la forme géométrique du robot. Des nageurs avec différents flagelles sont étudiés. Pour la suite, nous avons conservé le nageur hélicoïdal optimal.

3.2.2 Rayon de courbure

La capacité des nageurs à réaliser des trajectoires complexes peut être évaluée en étudiant leur performance, i.e. la précision et la rapidité d'exécution, en fonction des rayons de courbure des trajectoires désirée. Dans des applications réelles, ce critère peut aider à choisir le nageur le plus performant (par exemple en termes de précision) pour réaliser une trajectoire complexe dans un environnement plein d'obstacles et de résidus.

Pour cela, une série d'expériences avec des courbes circulaires de différents rayons, est réalisée sachant que ces deux systèmes sont non-holonomes, i.e. leur mouvement est limité. La Figure 4.24 représente les chemins réalisés par le robot flexible pour suivre des cercles de rayons allant de

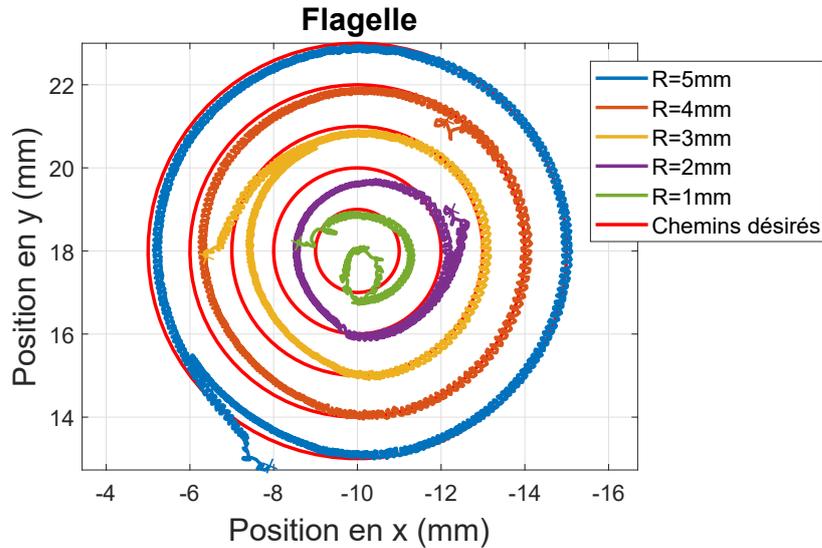


Figure 4.24. Suivi de cercles de rayons variant de 1 mm à 5 mm en utilisant le robot flagelle. Les gains de commande et l'angle d'inclinaison sont maintenus constants. La fréquence d'oscillation est de 1.4 Hz. Les croix sur le graphe représentent les points de départ de chaque chemin.

1 mm à 5 mm avec un pas de 1 mm. Pour le robot hélicoïdal, les chemins réalisés sont représentés sur La Figure 4.25. Comme la taille du nageur hélicoïdal est deux fois plus grande que la taille du nageur flexible, les courbes circulaires ont un rayon qui varie entre 2 mm et 10 mm avec un pas de 2 mm au lieu d'un pas de 1 mm comme c'est le cas pour le nageur flexible, afin de garder le même rapport (longueur du nageur/rayon de courbure) pour les deux nageurs.

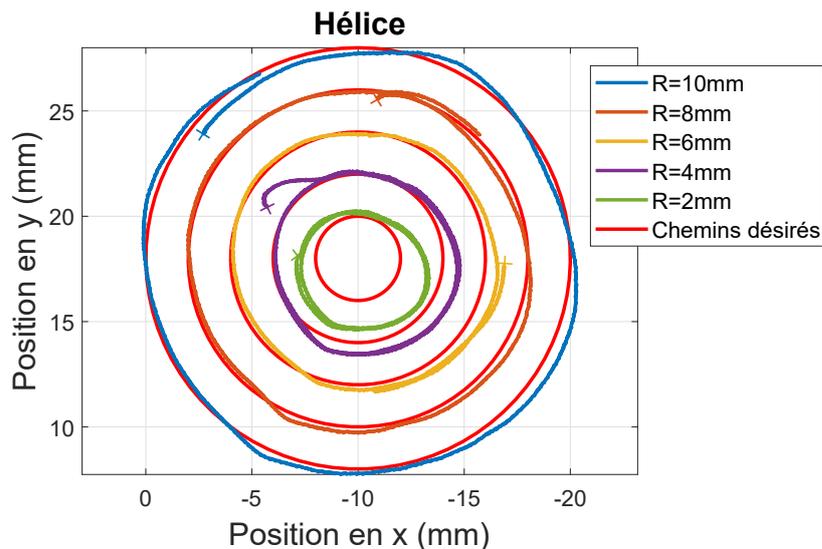


Figure 4.25. Suivi de cercles de rayons variant de 2 mm à 10 mm en utilisant le robot hélicoïdal. Les gains de commande et l'angle d'inclinaison sont maintenus constants. La fréquence de rotation est de 2.8 Hz. Les croix sur le graphe représentent les points de départ de chaque chemin.

Pour étudier la précision des deux nageurs, les erreurs quadratiques (RMS) de distance d_y lors du suivi des différents cercles sont rapportées sur la Figure 4.26a. Pour le flagelle, l'erreur est inférieure à $500 \mu\text{m}$ dans tous les cas. Or, pour l'hélice, l'erreur est de 1 mm pour un rayon de courbure de 2 mm et pour le reste des rayons de courbure, la précision est assez satisfaisante. Ces résultats montrent que le nageur flexible est beaucoup plus précis que le robot hélicoïdal. Sa queue flexible lui permet d'atteindre des courbures plus complexes contrairement au nageur hélicoïdal qui a une queue rigide. Ainsi, avec les robots nageurs actuels (i.e. sans optimisation), ce critère de comparaison montre que le nageur flexible est plus adapté pour des applications qui demandent une précision élevée.

Par ailleurs, comme la longueur du nageur hélicoïdal est deux fois plus grande que la longueur du nageur flexible, une comparaison de précision peut être faite en normalisant les rayons de courbure des chemins de référence et les moyennes quadratiques par la longueur des nageurs, comme illustré sur la Figure 4.26b. Ce graphe montre que les performances en termes de précision du nageur hélicoïdal pourraient être meilleures que celles du nageur flexible pour une longueur de robot égale.

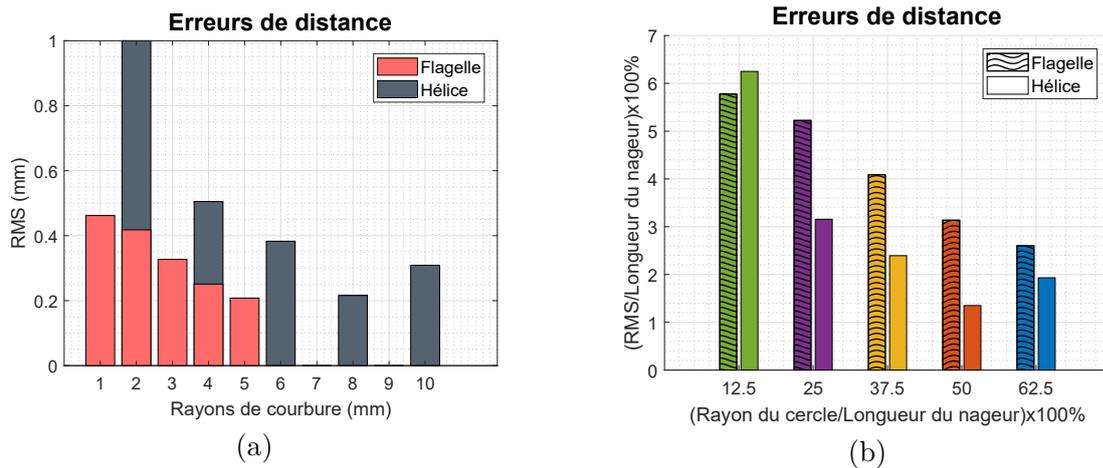


Figure 4.26. (a) Les erreurs quadratiques de distance d_y lors du suivi de chemin des différentes courbes circulaires pour les nageurs hélicoïdal et flexible. (b) Une comparaison entre les deux nageurs en normalisant les rayons de courbure des chemins de référence et les moyennes quadratiques par la longueur du robot utilisé.

En résumé, à l'état actuel avec les méthodes de fabrication que nous maîtrisons, les performances du nageur flexible sont meilleures que celles du robot hélicoïdal en termes de précision lors du suivi de chemin avec des courbures complexes. Cependant, les nageurs hélicoïdaux pourraient être plus précis que les nageurs flexibles avec des longueurs égales.

Pour compléter la comparaison, nous avons étudié la rapidité (i.e. temps d'exécution) des deux nageurs pour réaliser les chemins de référence. Le Tableau 4.3 présente le temps d'exécution des deux nageurs pour un tour de cercle. Les résultats montrent que l'hélice est plus rapide dans le suivi de chemin que le flagelle même avec des rayons de courbure normalisés (i.e. nageurs à longueurs égales).

Tableau 4.3. Le temps d'exécution des nageurs hélicoïdal et flexible pour compléter un tour de cercle (en secondes).

Rayons normalisés		12.5 %	25 %	37.5 %	50 %	62.5 %
Temps pour 1 tour (sec)	Hélice	54.01	78.15	104.73	135.06	148.46
	Flagelle	34.1	85.51	132.124	141.23	203.71

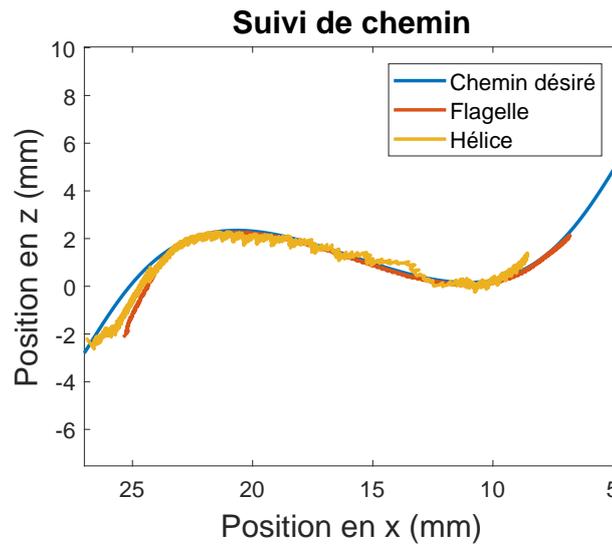


Figure 4.27. Les chemins réalisés par les nageurs hélicoïdal et flexible en suivant une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant un fluide avec une viscosité élevée.

Pour conclure cette partie, les résultats de ces expériences montrent que le nageur hélicoïdal est plus adapté pour accomplir des tâches avec des trajectoires rectilignes car il est plus rapide que le robot flexible lors de l'exécution des trajectoires désirées, mais sa précision diminue quand la courbure du chemin de référence devient complexe. Or, le nageur flexible est plus approprié pour réaliser des trajectoires avec des courbures complexes, parce qu'il est beaucoup plus précis que le nageur hélicoïdal mais est moins rapide.

3.2.3 Critère de viscosité du fluide

Les microorganismes tels que les bactéries, ont une flottabilité presque neutre, ce qui n'est pas le cas pour les nageurs artificiels. Cela peut être un critère important à prendre en compte lors de la réalisation de tâches particulièrement dans le plan vertical. Plusieurs stratégies peuvent être adoptés pour compenser le poids de ces nageurs artificiels, y compris : i) Utiliser un angle de tangage de compensation constant pour contrebalancer la dérive vers le bas (Mahoney *et al.*, 2011) ; ii) S'appuyer sur la détection extéroceptive (section 2.3). Cependant, la précision de ces stratégies dépend fortement de la viscosité du fluide. Ainsi, cette section étudie les performances des nageurs en fonction de la viscosité du liquide.

Pour montrer les performances des nageurs par rapport à la viscosité du fluide, des expériences

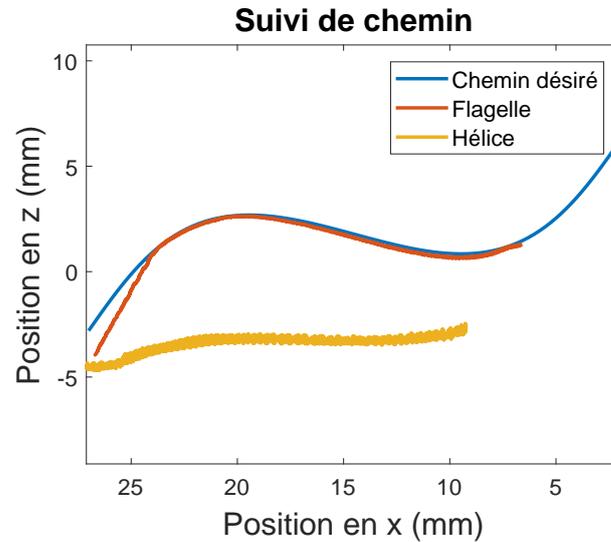


Figure 4.28. Les chemins réalisés par les nageurs hélicoïdal et flexible en suivant une trajectoire sinusoïdale dans le plan vertical en utilisant un fluide avec une viscosité faible.

sont effectuées avec une trajectoire sinusoïdale verticale en boucle fermée avec deux viscosités de glycérine élevée et faible. Les fréquences de rotation et d'oscillation sont maintenues fixes aux valeurs maximales pour toutes les expériences, ainsi que les gains de commande. Pour une viscosité élevée, les résultats sont présentés sur la Figure 4.27. Nous constatons que les deux nageurs convergent vers la trajectoire de référence et suivent bien le chemin géométrique. Les erreurs quadratiques de distance d_z une fois les nageurs sont sur le chemin (Position en $x \approx 23\text{mm}$), sont inférieures à $200\ \mu\text{m}$.

Pour la comparaison, les mêmes expériences sont réalisées avec une viscosité de glycérine plus faible. Pour des applications réelles, le fluide n'est pas toujours homogène. Donc, il est important d'évaluer le comportement de ces nageurs dans différentes conditions comme différentes viscosités de fluide. Les résultats du suivi de chemin sont illustrés sur la Figure 4.28. Il peut être observé que le nageur flexible converge vers la trajectoire désirée même avec une viscosité faible. Cependant, le nageur hélicoïdal a des difficultés pour atteindre le chemin de référence. Pour expliquer cela, les vitesses linéaires des deux nageurs dans le plan vertical pour différents angles d'inclinaison sont mesurées dans ces conditions et présentées sur la Figure 4.29.

Les résultats montrent que la vitesse verticale du nageur flexible augmente proportionnellement avec l'angle d'inclinaison du robot. Or, la vitesse du nageur hélicoïdal atteint un plateau après un angle d'inclinaison de 30° à une valeur faible proche du zéro. Cela explique pourquoi le nageur hélicoïdal ne peut pas suivre la trajectoire désirée.

Pour conclure cette partie, ces expériences montrent que le nageur flexible serait potentiellement capable de travailler dans une large gamme de fluide avec des viscosités variées, en comparaison avec le nageur hélicoïdal. Ces résultats sont valables pour les nageurs utilisés dans ce travail. Après l'optimisation des nageurs, ces résultats peuvent être différents. Cependant, la viscosité du fluide reste un critère de comparaison intéressant entre des robots de topologies différentes.

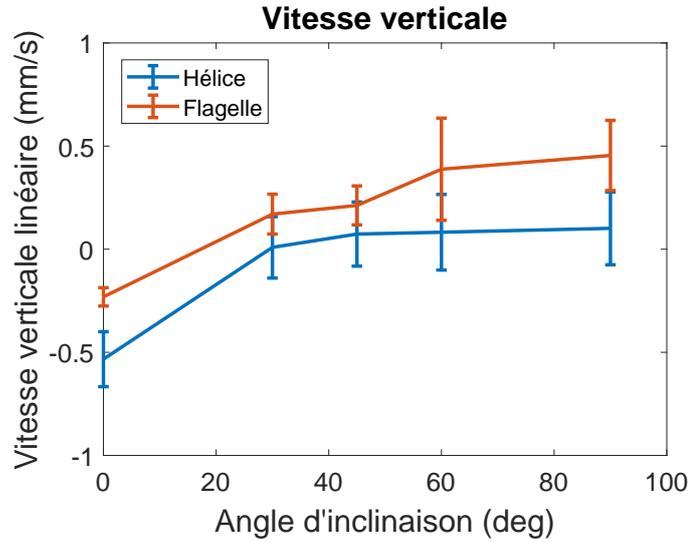


Figure 4.29. Les vitesses verticales des nageurs hélicoïdal et flexible pour différents angles d'inclinaison, en utilisant un fluide de viscosité faible. Ce graphe représente la moyenne et l'écart type de quatre mesures de vitesse pour chaque angle d'inclinaison des deux nageurs.

3.3 Conclusion

Cette section propose un ensemble de critères afin de comparer des nageurs avec des topologies différents. L'objectif est de fournir des directives aux utilisateurs pour choisir le nageur le plus performant pour effectuer une tâche. Ces critères sont testés expérimentalement sur les nageurs flexible et hélicoïdal. Ces deux robots sont non-holonomes et actionnés par un champ magnétique. Cependant, ils ont une géométrie et un mode de propulsion différents. La comparaison entre ces deux nageurs en utilisant ces critères est résumée sur la Figure 4.30.

Nous avons montré que la possibilité de fabriquer et dimensionner un nageur est un critère de choix. Comme le nageur hélicoïdal est plus facile à fabriquer, une optimisation expérimentale est réalisée en utilisant plusieurs flagelles rigides. Ce critère peut être utilisé pour des tâches où la forme du robot doit être adaptée et personnalisée. La complexité de la trajectoire à réaliser est démontrée comme étant un critère intéressant. Les résultats montrent que le nageur hélicoïdal est plus adapté pour réaliser des trajectoires rectilignes alors que le nageur flexible présente des meilleurs résultats pour des trajectoires avec des courbures complexes. Finalement, nous avons montré que la viscosité du fluide est à prendre en considération dans le choix du nageur. Ce critère montre que le nageur flexible serait capable de travailler dans une plus grande variété de fluide avec des viscosités différentes, en comparaison avec le nageur hélicoïdal. Ces résultats permettent de choisir le plus performant nageur entre l'hélice et le flagelle pour une trajectoire et une viscosité données.

Dans le futur, il pourrait être intéressant d'exploiter plus de critères comme les effets de bord, qui peuvent affecter le mouvement des nageurs. Cette mesure peut être importante dans les tâches qui ont lieu dans un espace confiné. Le critère de l'énergie consommée peut être étudié aussi.

Nageur hélicoïdal vs. nageur flexible

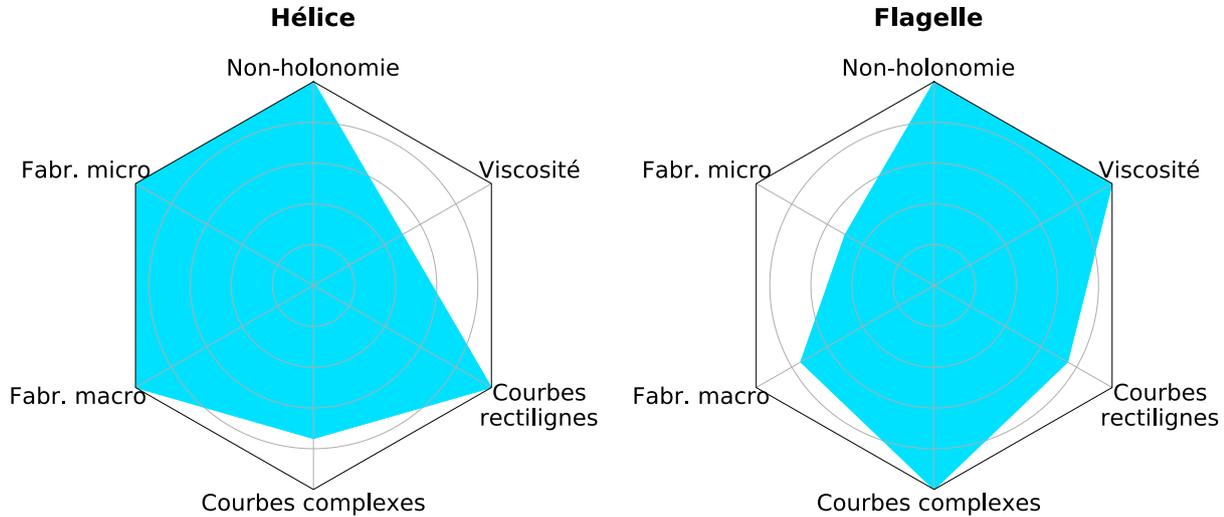


Figure 4.30. Comparaison entre les robots nageurs hélicoïdal et flexible avec différents critères.

4 Commande vectorielle

Cette section valide la loi de commande géométrique développée dans la section 4 du chapitre 3 pour le suivi de chemin 3D du robot nageur. Cette approche est plus intuitive que l'approche scalaire et plus simple à synthétiser. De plus, elle prend moins de paramètres comme les dérivées des courbure et torsion du chemin de référence. Une comparaison entre les lois de commande vectorielle et scalaire est aussi présentée en termes de précision et de rapidité.

4.1 Rapidité

La première expérience consiste à valider la commande vectorielle sur une droite spatiale avec une altitude constante. Le nageur flexible est initialement à une distance $d_y = 8$ mm et $d_z = 6$ mm de la trajectoire de référence. Nous étudions alors le temps de réponse (i.e. t_r) du nageur pour atteindre la trajectoire désirée et l'erreur statique (i.e. ε_s) en régime permanent en utilisant les commandes vectorielle et scalaire. Les résultats des chemins réalisés par le nageur sont présentés sur la Figure 4.31.

Le nageur flexible converge vers le chemin de référence avec les deux lois de commande. Nous observons que le comportement du nageur avec la commande vectorielle est similaire à celui avec la commande scalaire. Les temps de réponse du nageur et les erreurs statiques en régime permanent sont rapportés sur le Tableau 4.4. Nous constatons que les résultats de la commande vectorielle sont très proches de ceux de la commande scalaire. Ainsi, pour des trajectoires rectilignes, les performances du nageur flexible avec les deux approches vectorielle et scalaire sont similaires. La sous-section suivante compare ces deux commandes sur une trajectoire avec une courbure et une altitude variables.

Tableau 4.4. Les temps de réponse du nageur flexible et les erreurs statiques en régime permanent lors du suivi d'une droite spatiale avec une altitude constante en utilisant les commandes vectorielle et scalaire avec le nageur flexible.

Commandes	Erreurs	tr 5% (s)	ε_s (μm)	ε_s (%bl)
Scalaire	d_y (μm)	75	180	2.25
	d_z (μm)	79.9	120	1.5
Vectorielle	d_y (μm)	76	170	2.12
	d_z (μm)	80.3	220	2.75

4.2 Précision

Dans cette section, la commande vectorielle est validée sur une sinusoïde inclinée et comparée avec la commande scalaire en termes de précision. Les résultats de suivi de chemin du nageur avec les deux commandes sont illustrés sur la Figure 4.32.

Le nageur flexible, initialement proche de la trajectoire de référence, suit bien le chemin désiré en utilisant les deux lois de commande vectorielle et scalaire. L'évolution des angles de pilotage dans les plans horizontal et vertical est illustrée sur la Figure 4.33. Ces graphes montrent que les deux lois de commande réagissent de la même façon au suivi de chemin. Les erreurs quadratiques de distance et d'orientations pour les deux commandes sont aussi présentées sur le Tableau 4.5. Nous observons que les erreurs sont du même ordre de grandeur pour les deux contrôleurs.

Cette section montre que les performances du nageur flexible avec la commande vectorielle

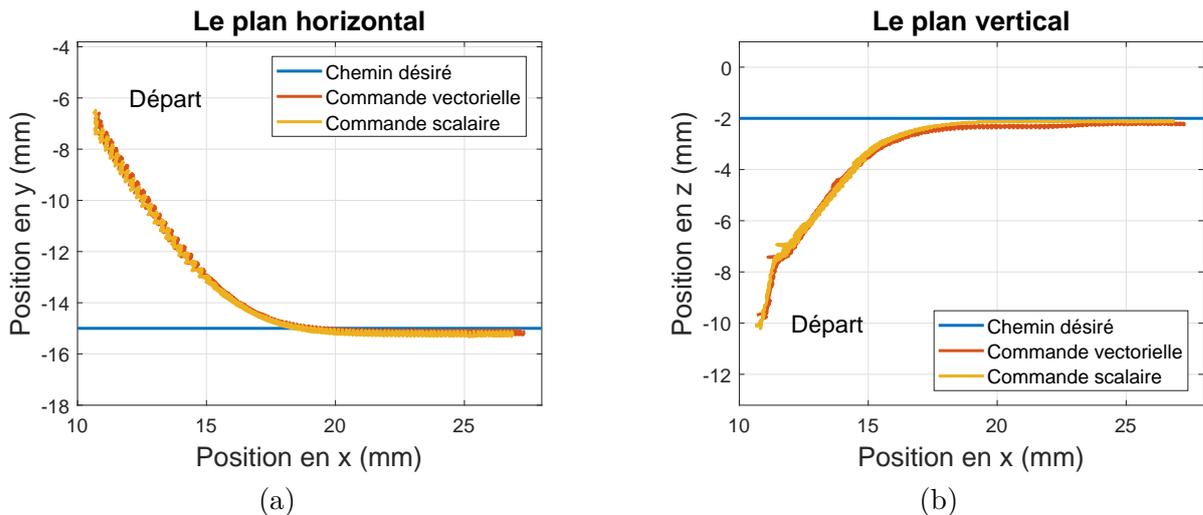


Figure 4.31. Comparaison entre les commandes vectorielle et scalaire lors du suivi d'une droite spatiale avec une altitude constante en utilisant le nageur flexible. (a) Les chemins réalisés par le nageur dans le plan horizontal. (b) Les chemins réalisés par le nageur dans le plan vertical. Lors de ces expériences, les gains de commande des deux contrôleurs sont maintenus à 0.5.

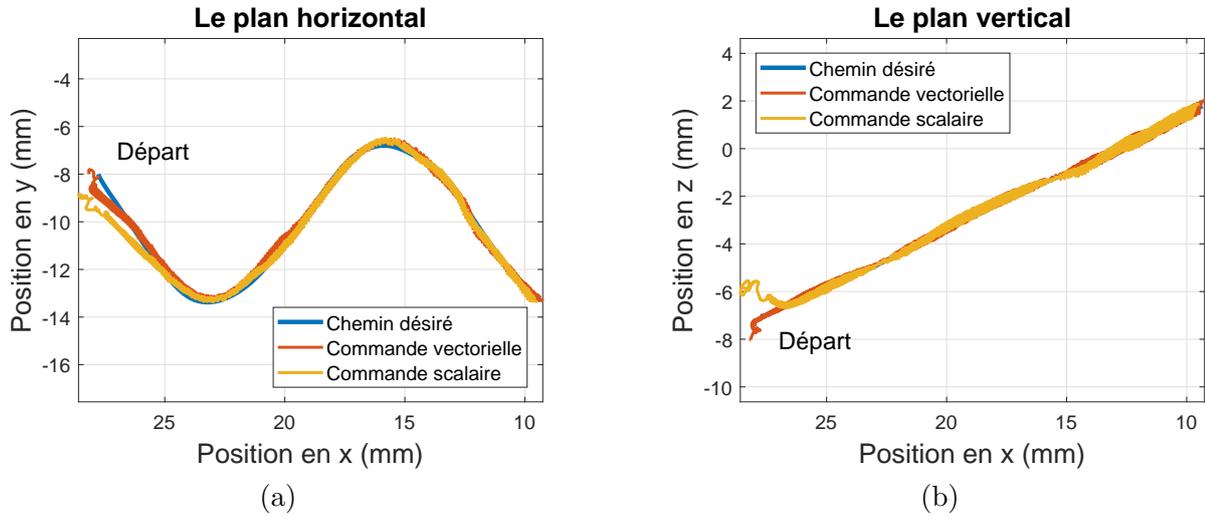


Figure 4.32. Suivi d'une sinusoïde inclinée en utilisant le nageur flexible avec les deux commandes vectorielle et scalaire. Projection des chemins réalisés par le nageur dans les plans horizontal (a) et vertical (b).

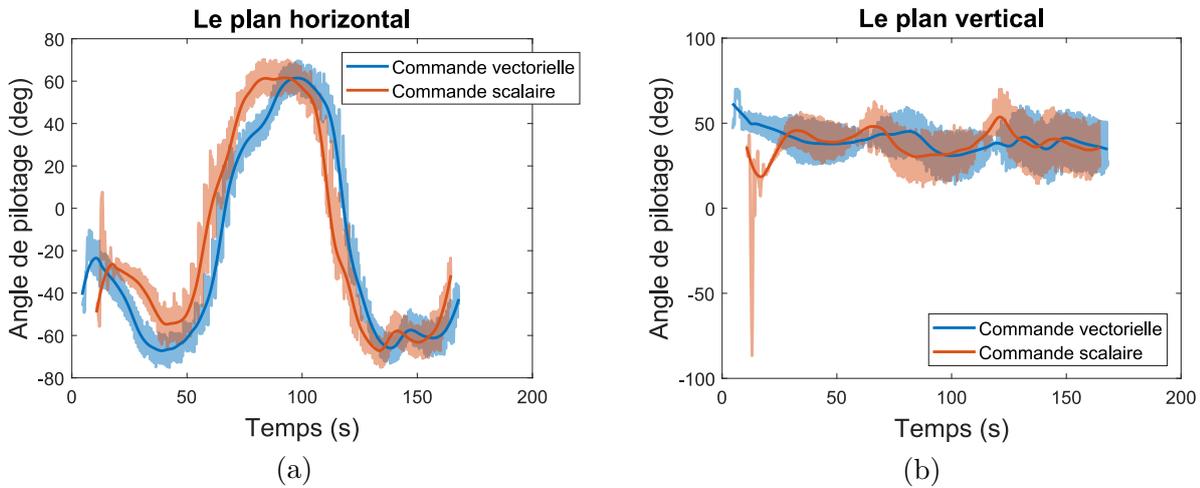


Figure 4.33. Les angles de pilotage dans les plans horizontal (a) et vertical (b) lors du suivi de la trajectoire sinusoïdale inclinée en utilisant les lois de commande vectorielle et scalaire.

Tableau 4.5. Les erreurs de suivi de la sinusoïde inclinée en appliquant les commandes vectorielle et scalaire sur le nageur flexible.

Commandes	Erreurs	d_y (μm)	d_z (μm)	θ_{de} (rad)	θ_{ie} (rad)
Scalaire	RMS	186	280	0.32	0.18
	SD	183	276	0.32	0.16
Vectorielle	RMS	151	177	0.39	0.12
	SD	150	176	0.38	0.12

sont similaires à celles du nageur avec la commande scalaire en termes de rapidité et de précision. La comparaison entre ces deux commandes est difficile car le réglage des gains amène aux mêmes résultats et il est difficile d'assurer les mêmes conditions initiales. L'avantage de la commande géométrique par rapport à la commande scalaire est dans la méthodologie. Elle est plus intuitive, nécessite la connaissance de moins de paramètres du chemin de référence et utilise uniquement deux gains de commande au lieu de quatre.

5 Conclusion

Ce travail a introduit deux nouvelles approches pour atteindre, pour la première fois, un suivi de chemin 3D avec les nageurs flexible et hélicoïdal en boucle fermée de manière générique. La première approche utilise une nouvelle forme chaînée avec cinq états et trois entrées, pour linéariser le modèle cinématique et synthétiser la loi de commande. Cette méthode est validée et analysée par des résultats expérimentaux avec le nageur hélicoïdal sur différentes courbes, tel que : une droite spatiale, une hélice et une sinusoïde inclinée. Les résultats montrent que le contrôleur est efficace en termes de précision (moyenne de précision inférieure à $200 \mu\text{m}$ avec un écart type de $\approx 200 \mu\text{m}$) et de répétabilité (plus d'une dizaine de répétitions avec le même ordre de précision).

Des perturbations environnementales et des erreurs de modélisation sont ensuite expérimentées pour tester la robustesse de la commande en boucle fermée et du nageur hélicoïdal. En effet, les mouvements du nageur hélicoïdal sont affectés par les effets de bord, les changements de viscosité et le poids du robot. Ainsi, ce chapitre explique que d'un point de vue pratique, il est nécessaire de garder une distance minimale entre le chemin de référence et les surfaces solides afin d'éviter une collision du nageur avec celles-ci. Dans ce cas, les expériences montrent que quand le nageur est en contact avec une surface solide, il roule dans un mouvement de dérive latérale à son axe de propulsion jusqu'à ce qu'il se détache et converge vers le chemin de référence. Cependant, pour des chemins de référence très proche de la surface solide, il est plus judicieux de contrôler le mouvement de roulement en boucle fermée que le mouvement de nage. Concernant les changements de viscosité et les erreurs de calcul de l'angle de compensation d'inclinaison, la dynamique du nageur hélicoïdal est fortement affectée par ces paramètres. Cependant, la commande s'est avérée plus robuste. Enfin, la commande en boucle fermée est comparée avec la commande en boucle ouverte pour illustrer toutes les dérives que le nageur peut subir lors de son mouvement comme : le gradient de champ magnétique causé par les imperfections du système et les frottements entre le nageur et le substrat. Dans les laboratoires sur puces, le nageur hélicoïdal peut être utilisé pour transporter des objets vers des positions désirées avec précision tout en évitant des obstacles et en compensant les perturbations. Pour des situations plus complexes avec des obstacles dynamiques, la planification de mouvement (i.e. planification de chemin avec les contraintes non-holonomes + commande de suivi de chemin) pourrait être une solution robuste pour éviter les collisions.

Ce chapitre montre que cet algorithme est général et peut être utilisé pour n'importe quel nageur avec des contraintes non-holonomes. La condition étant d'adapter le mode de propulsion propre au nageur car la commande de suivi de chemin utilise uniquement les erreurs spatiales entre le nageur et le chemin de référence sans prendre en compte de la dynamique du robot. Ainsi, pour commander les mouvements du nageur flexible, l'actionneur magnétique (i.e. mode

de propulsion) est adapté en utilisant un champ magnétique oscillant plutôt que rotatif. Des trajectoires aléatoires sont expérimentées et les performances du contrôleur sont toujours efficaces et précises.

La dernière partie de ce chapitre propose un ensemble de critères de comparaison entre des nageurs qui sont topologiquement différents tel que les nageurs flexible et hélicoïdal. Celle-ci ne répond pas à la question ‘quel nageur est meilleur qu’un autre?’ car cela suggère un seul critère. Or, ces deux nageurs ont une géométrie et un mode de propulsion complètement différents et il est difficile, voire impossible, de trouver un seul et unique critère. Ainsi, pour aider les utilisateurs à choisir le nageur adapté pour réaliser une application particulière, nous proposons une comparaison multicritère en fonction de la tâche à réaliser, de l’environnement dans le quel les nageurs évoluent et du processus de fabrication. En se basant sur le critère de processus de fabrication, ce chapitre montre que le nageur hélicoïdal est plus facile à fabriquer et à personnaliser. Ainsi, pour des applications qui requièrent un robot avec une forme géométrique complexe, le nageur hélicoïdal est plus adapté. Par ailleurs, le critère de viscosité du liquide suggère d’utiliser le nageur flexible si les caractéristiques du fluide (tel que la viscosité) sont non-homogènes. Enfin, le dernier critère concerne la complexité des trajectoires désirées à réaliser. Celui-ci propose d’utiliser les nageurs hélicoïdaux pour des courbes rectilignes car ils sont rapides mais moins précis quand la trajectoire devient complexe. Cependant pour des trajectoires avec des courbures complexes, le nageur flexible est plus adapté car il est plus précis que le nageur hélicoïdal. En se basant sur ces résultats expérimentaux, il est possible de choisir le nageur hélicoïdal ou flexible le plus performant pour une trajectoire ou une viscosité données.

Conclusion et perspectives

Les microrobots nageurs apparaissent très prometteurs pour la manipulation ou la caractérisation d'objets à l'échelle microscopique dans des environnements confinés et très restreints. La littérature propose une variété de micronageurs avec des tailles et des formes géométriques différentes. Cependant, leur propulsion n'est pas toujours optimisée. De plus, les commandes en mouvement proposées restent simples, peu précises et insuffisamment robustes pour la réalisation de futures tâches biomédicales. Ainsi, l'objectif de ce travail consiste à optimiser la géométrie de ces nageurs et d'améliorer leur performance avec une commande par asservissement visuel dans l'espace.

Pour répondre à cet objectif, cette thèse s'est intéressée particulièrement aux nageurs magnétiques hélicoïdal et flexible, qui imitent les mécanismes de locomotion biologiques à faible nombre de Reynolds. Le robot hélicoïdal est largement étudié dans la littérature contrairement au nageur flexible. Précédemment, [Xu \(2014\)](#) a réalisé une optimisation géométrique quantitative du nageur hélicoïdal en étudiant l'effet du pas, de la largeur et du nombre de tours de la queue hélicoïdale sur la propulsion du robot. Ce travail s'est concentré plutôt à l'effet de plusieurs flagelles rigides sur la propulsion du nageur. Ainsi, les résultats montrent qu'en dupliquant directement le nombre de flagelles, la vitesse de propulsion du robot diminue. Cette particularité est due à l'interaction fluide entre les différents flagelles quand l'espace entre eux devient petit. Cependant, en variant le nombre de flagelles mais en gardant le même volume du robot, les résultats changent. En effet, un nageur avec deux flagelles atteint la même vitesse qu'un nageur avec un seul flagelle à une fréquence plus élevée. Ce résultat pourrait être intéressant car le double flagelle peut interagir dans un fluide plus visqueux que le mono-flagelle. Cette analyse complète particulièrement les travaux réalisés par [Xu \(2014\)](#).

Concernant le nageur flexible, le nombre de travaux dans la littérature est moins important particulièrement pour la partie expérimentation. La difficulté consiste dans la fabrication car il faut respecter un certain rapport entre l'élasticité de la queue du flagelle et la viscosité du fluide contrairement à l'hélice. Cette thèse a proposé, pour la première fois, une stratégie de commande magnétique en boucle fermée pour piloter le nageur afin d'atteindre les positions désirées dans

l'espace. La réponse du nageur au champ magnétique appliqué montre des caractéristiques différentes de celles du nageur hélicoïdal. En effet, le nageur flexible présente une fréquence optimale pour laquelle la vitesse est maximale alors que le nageur hélicoïdal présente une fréquence de coupure. De plus, la vitesse linéaire du flagelle peut être modulée en utilisant soit la fréquence soit l'amplitude des oscillations du champ magnétique. Cette étude montre aussi que le nageur flexible est plus stable aux fréquences élevées car les oscillations sont moins importantes. Il serait alors très intéressant d'augmenter la fréquence d'oscillation du nageur pour stabiliser le nageur lors des phases de pose et de dépose dans des applications de délivrance de médicaments ou d'objets.

La littérature ne présente aucune commande de mouvement en boucle fermée dans l'espace pour ces deux types de nageur. Ce travail s'inspire alors de la commande des véhicules non-holonomes à l'échelle macroscopique, principalement les sous-marins, pour la réalisation de la commande de mouvement en boucle fermée dans l'espace. Ainsi, les mouvements de ces nageurs sont décrits par un modèle cinématique 3D dans le repère local du chemin de référence. Cette modélisation est générale car elle prend en compte le poids du robot, les perturbations environnementales et les contraintes de non holonomie des nageurs. La première loi de commande est une approche algébrique, qui représente une extension dans l'espace de la commande de [Morin et Samson \(2008\)](#) utilisé pour le suivi de chemin planaire de robot mobile. Une nouvelle forme chaînée avec cinq états et trois entrées est utilisée pour linéariser le modèle cinématique 3D de manière exacte. Le système résultant est alors linéaire et invariant dans le temps. Enfin, une loi de commande par retour d'état est appliquée pour stabiliser le nageur et réaliser le suivi de chemin dans l'espace. Une deuxième approche géométrique du suivi de chemin dans l'espace plus intuitive que la première est développée. Celle-ci utilise une représentation vectorielle du modèle cinématique dans l'espace. La loi de commande est synthétisée en se basant sur la fonction de Lyapunov. Une preuve de stabilité et de convergence du nageur vers le chemin de référence est présentée pour les deux approches.

Ces lois de commande sont validées et analysées expérimentalement sur les nageurs magnétiques en suivant des courbes spatiales distinctes : une droite spatiale, une hélice et une sinusoïde inclinée. Les performances des nageurs en termes de précision ($<1.25\%$) et de répétabilité sont satisfaisantes. La littérature montre que les microrobots nageurs sont perturbés principalement par les effets de bord, les changements de viscosité et les erreurs de modélisation. Ce travail évalue alors la robustesse de l'algorithme de suivi de chemin en présence de ces effets perturbateurs. Les résultats montrent qu'avec la commande en boucle fermée, le nageur compense son poids et les erreurs de changements de viscosité. Pour les effets de bord, ce travail suggère une distance minimale entre le chemin de référence et la surface solide pour éviter la collision du nageur avec celle-ci. Dans ce cas, le nageur compense bien ces effets même s'il peut être en contact direct avec la surface solide. Cependant, pour des chemins de référence très proches du bord, il serait plus judicieux de contrôler le mouvement de roulement du nageur en boucle fermée que le mouvement de nage. La littérature montre ainsi des stratégies pour commuter entre plusieurs mouvements tels que le roulement, la nage et le mouvement de type toupie. En plus de ces perturbations, la commande corrige aussi les dérives causées par les imperfections du système tels que le gradient de champ magnétique et les erreurs de fabrication. L'algorithme développé est général et peut être utilisé pour tout nageur non-holonyme en adaptant le mode de propulsion propre au robot.

Pour finir, cette thèse propose un ensemble de critères de comparaison entre des nageurs avec une topologie et un mode d'actionnement différents. Le but est de fournir des indications aux

utilisateurs afin de choisir le nageur le plus performant pour effectuer une application particulière en fonction de la tâche à réaliser, de l'environnement dans lequel le nageur évolue et du processus de fabrication. Ces critères sont expérimentés sur les nageurs flexible et hélicoïdal. Ainsi, le critère de processus de fabrication suggère d'utiliser le nageur hélicoïdal pour des applications qui nécessitent un robot avec une forme géométrique complexe ou personnalisée. Le deuxième critère concerne les trajectoires désirées à réaliser. Les performances du nageur hélicoïdal sont plus efficaces pour des trajectoires rectilignes que le nageur flexible alors que ce dernier est plus adapté pour des trajectoires avec des courbures complexes. Le troisième critère de viscosité du fluide montre que le nageur flexible serait capable de travailler dans une gamme plus large de fluide avec des viscosités différentes.

Dans le futur proche, ces travaux devraient être validés sur des nageurs microscopiques. Comme le mouvement du fluide autour des nageurs est caractérisé uniquement par le nombre de Reynolds, la propulsion à l'échelle microscopique devrait être similaire. Des micronageurs hélicoïdaux sont en cours de fabrication en utilisant la lithographie 3D par laser et la magnétisation avec un fil de fer de quelques centaines de micromètres, comme illustré sur la Figure 4.34. Les rapports 'Longueur/Diamètre' et 'Couple magnétique/Couple fluide' sont maintenus similaires à ceux du nageur macroscopique. Un nouveau système expérimental avec un dispositif optique adapté est réalisé pour l'actionnement et la détection à l'échelle microscopique. La prochaine étape serait de caractériser le micronageur en fonction du champ magnétique appliqué et de valider la commande en boucle fermée dans l'espace à cette échelle. Pour le nageur flexible, il apparaît nécessaire de faire une optimisation géométrique expérimentale pour améliorer ces performances, réfléchir à une méthode de fabrication à l'échelle microscopique et valider la commande 3D en boucle fermée avec ce type de micronageur. Les avantages de la commande en boucle fermée sont plus intéressants à l'échelle microscopique car les perturbations sont plus importantes. Les perspectives dans la partie optimisation seraient d'étudier l'influence d'un champ magnétique uniforme autre que le champ rotatif ou oscillant sur la propulsion de ces nageurs.

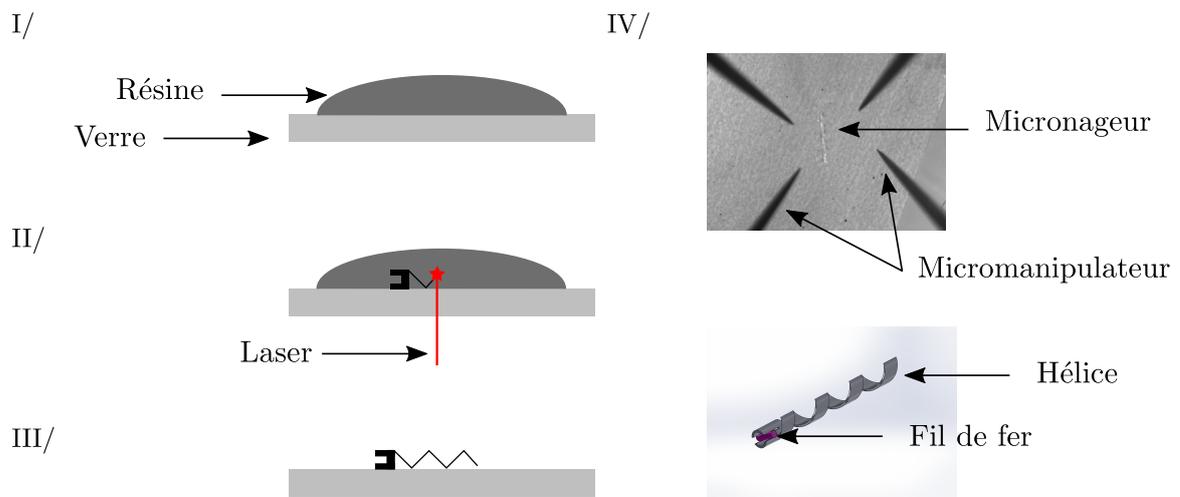


Figure 4.34. Les étapes de fabrication du microrobot nageur hélicoïdal : I/ Dépôt de la résine sur une plaque de verre, II/ Polymérisation focalisée, III/ Développement et IV/ Magnétisation en utilisant un fil de fer.

Dans la partie automatique de cette thèse, la commande simultanée d'une flotte de micro-nageurs est un enjeu à relever pour améliorer les performances de ces microrobots, comme par exemple, pour le transport de médicaments pour des cellules défectueuses. La littérature propose d'utiliser des microrobots distincts (i.e. formes géométriques et/ou caractéristiques magnétiques différentes) qui réagissent différemment au champ magnétique appliqué. Cependant, la difficulté consiste à commander des nageurs avec des propriétés similaires. Une solution serait alors d'utiliser des lois de commande de commutation avancées, telles que les commandes basées sur les fonctions de Lyapunov multiples, afin d'assurer la stabilité et la convergence de la flotte de micronageurs. Par ailleurs, intégrer les équations de propulsion des nageurs dans la commande en boucle fermée pourrait améliorer leur performances en termes de précision et de stabilité. Pour atteindre cet objectif, il faut d'abord développer des méthodes d'identification des paramètres de la matrice de propulsion robustes et précises. Les commande présentées précédemment sont robustes aux perturbations, cependant, l'estimation en ligne des angles compensateurs d'inclinaison et de direction est une perspective importante pour obtenir un haut degrés de précision, nécessaire pour des applications *in vivo*. Parmi d'autres perspectives dans ce domaine, la maîtrise de la transition entre le roulement du nageur hélicoïdal sur une surface solide et le mouvement de nage. Cela pourrait rendre le nageur beaucoup plus robuste aux perturbations telles que les flux sanguins. Cependant, la difficulté serait de gérer les forces d'adhésion avec la surface solide qui sont prédominantes à l'échelle microscopique.

Dans une perspective plus large, les recherches sur les moyens de localisation et du suivi de microrobots pour des applications *in vivo*, tels que la fluorescence et les ultrasons apparaissent comme primordiales pour leur future généralisation. Ces sources d'énergie sont biocompatibles et permettent la localisation en temps réel. La microrobotique autonome a encore beaucoup de challenges à aborder pour réaliser des futures tâches dans des environnements fortement contraints aux échelles microscopiques.

Vitesse angulaire relatives

1 Notations

Pour écrire la vitesse de rotation en termes des dérivées d'angles d'Euler, nous utilisons par définition la relation suivante (Spong *et al.*, 2006) :

$${}^A \dot{\mathbf{R}}_B {}^A \mathbf{R}_B^T = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad \text{avec } {}^A \boldsymbol{\omega}_{B,A}^r = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \quad (\text{A.1})$$

avec ${}^A \mathbf{R}_B$ la matrice de rotation du repère A par rapport au repère B en utilisant les angles d'Euler et ${}^A \boldsymbol{\omega}_{B,A}^r$ la vitesse angulaire relative entre A et B exprimée dans A . Si la matrice ${}^A \mathbf{R}_B$ est le résultat d'une succession de trois rotations comme suit :

$${}^A \mathbf{R}_B = \mathbf{R}_x(-\phi) \mathbf{R}_y(-\theta) \mathbf{R}_z(-\psi) \quad (\text{A.2})$$

Alors, la vitesse angulaire relative ${}^A \boldsymbol{\omega}_{B,A}^r$ peut être calculée par la relation suivante :

$${}^A \boldsymbol{\omega}_{B,A}^r = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(-\phi) \mathbf{R}_y(-\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_x(-\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

2 Calcul de la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B

En utilisant la relation (A.3) sur le système du nageur, il est possible de calculer la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B (équation 3.21). La matrice de rotation entre ces deux repères est donnée par la relation suivante :

$${}^B \mathbf{R}_d = \mathbf{R}_y(-\delta_{\theta_i}) \mathbf{R}_z(\delta_{\theta_d}) \quad (\text{A.4})$$

ou encore,

$${}^d\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_z(-\delta\theta_d) \mathbf{R}_y(\delta\theta_i) \quad (\text{A.5})$$

Ainsi, en appliquant (A.3), la vitesse angulaire relative ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r$ peut être calculée comme suit :

$${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r = \mathbf{R}_z(-\delta\theta_d) \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\delta\theta}_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\delta\theta}_d \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

3 Calcul des dérivées des erreurs d'orientation en fonction de la vitesse angulaire relative entre \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_F

Maintenant, nous appliquons la relation (A.1) sur le système du nageur pour calculer les dérivées des angles θ_{de} et θ_{ie} . Nous avons les relations suivantes :

$${}^F\dot{\mathbf{R}}_d = {}^F\mathbf{R}_d \mathbf{Sk} \left({}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r \right) \quad (\text{A.7})$$

$${}^F\mathbf{R}_d = \mathbf{R}_z(\theta_{de}) \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) \quad (\text{A.8})$$

$${}^F\dot{\mathbf{R}}_d = \mathbf{R}_z(\theta_{de}) \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) + {}^F\dot{\mathbf{R}}_d \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{ie} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.9})$$

À partir de (A.7) et (A.8), nous avons :

$$\mathbf{Sk} \left({}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r \right) = {}^F\mathbf{R}_d^T \mathbf{R}_z(\theta_{de}) \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) + \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{ie} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.10})$$

Or,

$$\mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) = \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) \mathbf{Sk} \left(\mathbf{R}_y(\theta_{ie})^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{ie} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.11})$$

$$= \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} S\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \\ 0 \\ C\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.12})$$

Ainsi, en remplaçant (A.12) dans (A.10),

$$\mathbf{Sk} \left({}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r \right) = \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{ie} \\ 0 \end{bmatrix} \right) + {}^F\mathbf{R}_d^T \mathbf{R}_z(\theta_{de}) \mathbf{R}_y(\theta_{ie}) \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} S\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \\ 0 \\ C\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.13})$$

$$= \mathbf{Sk} \left(\begin{bmatrix} S\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \\ \dot{\theta}_{ie} \\ C\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A.14})$$

La vitesse angulaire relative ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r$ est de la forme ${}^d\boldsymbol{\omega}_{d,F}^r = [r \ p \ q]^T$. D'où finalement,

$$\begin{bmatrix} r \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \\ \dot{\theta}_{ie} \\ C\theta_{ie}\dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

L'équation de vitesse en roulis r peut être négligée car les erreurs de roulis entre \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_F n'affectent pas la convergence du robot nageur vers le chemin de référence. Ainsi, il est possible d'écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ie} \\ \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (C\theta_{ie})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

4 Calcul de la vitesse angulaire relative entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B pour la commande vectorielle

Dans notre cas, la perturbation principale est le poids. Le nageur compense cette dérive avec un angle de correction δ_{θ_i} (constant). Ainsi, la matrice de rotation entre les repères \mathcal{F}_d et \mathcal{F}_B peut être exprimée par :

$${}^B\mathbf{R}_d = \mathbf{Rot}(\mathbf{x}_B \times \mathbf{z}, \delta_{\theta_i}) \quad (\text{A.17})$$

Dans ce cas précis, la variation temporelle des angles de compensation est pratiquement nulle (i.e. $\dot{\delta}_{\theta_i} = 0$). Ainsi, la vitesse angulaire relative entre les repères de perturbation \mathcal{F}_d et du robot \mathcal{F}_B est nulle (i.e. $\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r = 0$). Plus généralement, pour des perturbations quelconques, la vitesse angulaire relative $\boldsymbol{\omega}_{d,B}^r$ pourrait être estimée par un observateur (non-linéaire).

Compléments de démonstration de la commande vectorielle

1 Projection du modèle cinématique vectoriel dans le plan horizontal

Le modèle cinématique du robot nageur dans la deuxième approche est donné par (3.63) comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{d}} &= -(\mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F) \mathbf{x}_F + v \mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\eta}_e \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_e &= -(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F) \boldsymbol{\omega}_e + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d) \mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F) \mathbf{x}_F \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

La projection de ce modèle dans le plan horizontal nous donne le système cinématique pour le cas 2D présenté dans (3.25).

Preuve : En commençant par la partie translation du modèle cinématique, nous avons :

$$\dot{\mathbf{d}} = -(\mathbf{d} \cdot \dot{\mathbf{x}}_F) \mathbf{x}_F + v \mathbf{x}_F \times \boldsymbol{\eta}_e \quad (\text{B.2})$$

Cette relation, exprimée dans le repère de Frénet associé au chemin de référence, est donnée par :

$$\left({}^F \dot{\mathbf{d}} + {}^F \boldsymbol{\omega}_F \times {}^F \mathbf{d} \right) = (v({}^F \mathbf{x}_d \cdot {}^F \mathbf{x}_F) - \dot{s}) {}^F \mathbf{x}_F + v {}^F \mathbf{x}_F \times {}^F \boldsymbol{\eta}_e \quad (\text{B.3})$$

Dans le plan horizontal sans compensation de perturbations, les variables d_z , τ , $\delta\theta_i$, θ_{ie} , $\delta\theta_d$ et Ω_y sont mises à zéro. Ainsi, le système (B.3) peut être simplifié comme suit :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{d}_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c\dot{s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ d_y \\ 0 \end{bmatrix} = (vC\theta_{de} - \dot{s}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + v \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} C\theta_{de} \\ S\theta_{de} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{B.4})$$

Le système (B.4) est équivalent à

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{d}_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c\dot{s}d_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vC\theta_{de} - \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -S\theta_{de} \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$$= \begin{bmatrix} vC\theta_{de} - \dot{s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ vS\theta_{de} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

Finalement, la résolution de cette équation par rapport à \dot{s} et \dot{d}_y donne la partie translation du modèle cinématique 2D :

$$\dot{s} = \frac{v C\theta_{de}}{1 - c d_y} \quad (\text{B.7})$$

$$\dot{d}_y = v S\theta_{de} \quad (\text{B.8})$$

Pour la partie rotation du modèle cinématique, nous avons la relation suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_e = -(\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F)\boldsymbol{\omega}_e + (\mathbf{x}_F \cdot \boldsymbol{\omega}_d)\mathbf{x}_d - (\mathbf{x}_d \cdot \boldsymbol{\omega}_F)\mathbf{x}_F \quad (\text{B.9})$$

La projection de cette relation dans le repère de Frénet nous donne :

$${}^F\dot{\boldsymbol{\eta}}_e = -({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\mathbf{x}_F){}^F\boldsymbol{\omega}_e + ({}^F\mathbf{x}_F \cdot {}^F\boldsymbol{\omega}_d){}^F\mathbf{x}_d - ({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\boldsymbol{\omega}_F){}^F\mathbf{x}_F \quad (\text{B.10})$$

Dans le plan horizontal, le système (B.10) s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -C\theta_{de} \dot{\theta}_{de} \end{bmatrix} = -({}^F\mathbf{x}_d \cdot {}^F\mathbf{x}_F){}^F\boldsymbol{\omega}_e \quad (\text{B.11})$$

$$= -(C\theta_{de}) \left({}^F\mathbf{R}_d {}^d\boldsymbol{\omega}_d - {}^F\boldsymbol{\omega}_F \right) \quad (\text{B.12})$$

$$= -(C\theta_{de}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_z - c\dot{s} \end{bmatrix} \quad (\text{B.13})$$

Finalement, la résolution de cette équation par rapport à $\dot{\theta}_{de}$ nous donne la partie rotation du modèle cinématique 2D :

$$\dot{\theta}_{de} = \Omega_z - c\dot{s} \quad (\text{B.14})$$

En résumé, la projection du modèle cinématique (3.63) dans le plan horizontal nous donne :

$$\begin{cases} \dot{s} &= \frac{v C\theta_{de}}{1 - c d_y} \\ \dot{d}_y &= v S\theta_{de} \\ \dot{\theta}_{de} &= \Omega_z - c\dot{s} \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

■

2 Démonstration de (3.76)

Nous rappelons l'équation (3.76) :

$$\frac{1}{|\mathbf{x}_d \cdot \mathbf{x}_F|} = \frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq \max\left\{\frac{2}{\sqrt{3}}, 4 \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}}\right\} \leq \max\left\{\frac{2}{\sqrt{3}}, 8L\right\} \quad (\text{B.16})$$

avec $\frac{2}{\sqrt{3}}$ la valeur de $\frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}}$ pour $\|\boldsymbol{\eta}_e\| = \frac{1}{2}$.

Preuve :

Pour $\|\boldsymbol{\eta}_e\| \geq \frac{1}{2}$, nous avons

$$1 \leq 4 \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2 \quad (\text{B.17})$$

qui implique que

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq 4 \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \quad (\text{B.18})$$

Or, pour $0 \leq \|\boldsymbol{\eta}_e\| \leq 1$, nous avons

$$1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2 \leq \sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2} \quad (\text{B.19})$$

Ainsi,

$$\frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2} \leq 2L \quad (\text{B.20})$$

De (B.18) et (B.20), nous concluons que

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq 4 \frac{\|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}{\sqrt{1 - \|\boldsymbol{\eta}_e\|^2}} \leq 8L \quad (\text{B.21})$$

Le tracé de ces fonctions est illustré sur la Figure B.1.

■

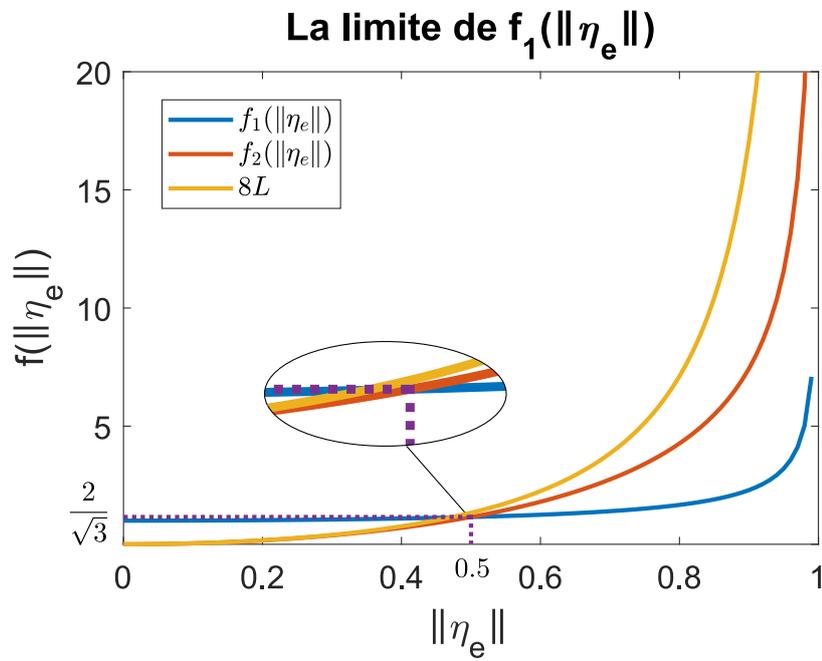


Figure B.1. Le tracé des fonctions $f_1(\|\eta_e\|) = \frac{1}{\sqrt{1-\|\eta_e\|^2}}$, $f_2(\|\eta_e\|) = 4\frac{\|\eta_e\|^2}{\sqrt{1-\|\eta_e\|^2}}$ et $8L$.

Bibliographie

- Daniel AHMED, Thierry BAASCH, Bumjin JANG, Salvador PANE, Jürg DUAL et Bradley J. NELSON : Artificial Swimmers Propelled by Acoustically Activated Flagella. *Nano Letters*, 16(8):4968–4974, août 2016. *2 citations pages 11 et 12*
- Mahmoud E. ALSHAFFEEI, Abdelrahman HOSNEY, Anke KLINGNER, Sarthak MISRA et Islam S. M. KHALIL : Magnetic-based motion control of a helical robot using two synchronized rotating dipole fields. *In 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pages 151–156, août 2014. *Cité page 30*
- Luis ALVAREZ, Benjamin M. FRIEDRICH, Gerhard GOMPPER et U. Benjamin KAUPP : The computational sperm cell. *Trends in Cell Biology*, 24(3):198–207, mars 2014. *2 citations pages v et 16*
- Arthur ASHKIN : Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Physical Review Letters*, 24(4):156–159, janvier 1970. *Cité page 7*
- Antoine BARBOT : *On-chip unthethered helical microrobot for force sensing applications*. Thèse de doctorat, Paris Saclay, décembre 2016. *3 citations pages vi, 28 et 29*
- Antoine BARBOT, Dominique DECANINI et Gilgueng HWANG : On-chip Microfluidic Multimodal Swimmer toward 3d Navigation. *Scientific Reports*, 6, janvier 2016. *4 citations pages 26, 32, 34 et 102*
- Dominik J. BELL, Lixin DONG, Bradley J. NELSON, Matthias GOLLING, Li ZHANG et Detlev GRÜTZMACHER : Fabrication and Characterization of Three-Dimensional InGaAs/GaAs Nanosprings. *Nano Letters*, 6(4):725–729, avril 2006. *Cité page 27*
- R. BENOSMAN, C. CLERCQ, X. LAGORCE, S. H. IENG et C. BARTOLOZZI : Event-Based Visual Flow. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 25(2):407–417, février 2014. *Cité page 9*

- Anthony M. BLOCH, Jerrold E. MARSDEN et Dmitry V. ZENKOV : Nonholonomic dynamics. *Notices of the AMS*, 52(3):320–329, 2005. *Cité page 65*
- Soukeyna BOUCHEBOUT, Aude BOLOPION, Michael GAUTIER et Stephane REGNIER : Position control of a ferromagnetic micro-particle in a dry environment. *In 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1–6, juillet 2014. *2 citations pages 9 et 20*
- Raymond W. BOURDEAU, Audrey LEE-GOSSELIN, Anupama LAKSHMANAN, Arash FARHADI, Sripriya Ravindra KUMAR, Suchita P. NETY et Mikhail G. SHAPIRO : Acoustic reporter genes for noninvasive imaging of microorganisms in mammalian hosts. *Nature*, 553(7686):86–90, janvier 2018. ISSN 1476-4687. *2 citations pages v et 10*
- L. G. BUSHNELL, D. M. TILBURY et S. S. SASTRY : Steering Three-Input Nonholonomic Systems : The Fire Truck Example. *The International Journal of Robotics Research*, 14(4):366–381, août 1995. *Cité page 74*
- G. CAMPION, B. d'Andrea NOVEL et G. BASTIN : Modelling and state feedback control of nonholonomic mechanical systems. *In [1991] Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1184–1189 vol.2, décembre 1991. *Cité page 64*
- Hakan CEYLAN, Joshua GILTINAN, Kristen KOZIELSKI et Metin SITTI : Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab on a Chip*, 17(10):1705–1724, mai 2017. *pas de citations*
- Xiang-Zhong CHEN, Marcus HOOP, Fajer MUSHTAQ, Erdem SIRINGIL, Chengzhi HU, Bradley J. NELSON et Salvador PANÉ : Recent developments in magnetically driven micro- and nanorobots. *Applied Materials Today*, 9(Supplement C):37–48, décembre 2017. *pas de citations*
- Gastone CIUTI, Pietro VALDASTRI, Arianna MENCIASSI et Paolo DARIO : Robotic magnetic steering and locomotion of capsule endoscope for diagnostic and surgical endoluminal procedures. *Robotica*, 28(2):199–207, mars 2010. *2 citations pages v et 19*
- John MD COEY : *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, mars 2010. *2 citations pages 17 et 18*
- Baohu DAI, Jizhuang WANG, Ze XIONG, Xiaojun ZHAN, Wei DAI, Chien-Cheng LI, Shien-Ping FENG et Jinyao TANG : Programmable artificial phototactic microswimmer. *Nature Nanotechnology*, 11(12):1087–1092, décembre 2016. *2 citations pages 11 et 12*
- Eric DILLER, Steven FLOYD, Chytra PAWASHE et Metin SITTI : Control of Multiple Heterogeneous Magnetic Microrobots in Two Dimensions on Nonspecialized Surfaces. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(1):172–182, février 2012. *Cité page 34*
- Eric DILLER, Joshua GILTINAN, Guo Zhan LUM, Zhou YE et Metin SITTI : Six-Degrees-of-Freedom Remote Actuation of Magnetic Microrobots. juillet 2014. *2 citations pages v et 19*
- Eric DILLER, Joshua GILTINAN et Metin SITTI : Independent control of multiple magnetic microrobots in three dimensions. *The International Journal of Robotics Research*, 32(5):614–631, avril 2013. *3 citations pages 31, 33 et 102*
- Eric DILLER et Metin SITTI : Micro-Scale Mobile Robotics. *Foundations and Trends® in Robotics*, 2(3):143–259, septembre 2013. *Cité page 28*

- Yun DING, Famin QIU, Xavier Casadevall i SOLVAS, Flora Wing Yin CHIU, Bradley J. NELSON et Andrew DEMELLO : Microfluidic-Based Droplet and Cell Manipulations Using Artificial Bacterial Flagella. *Micromachines*, 7(2):25, février 2016. *Cité page 26*
- Rémi DREYFUS, Jean BAUDRY, Marcus L. ROPER, Marc FERMIGIER, Howard A. STONE et Jérôme BIBETTE : Microscopic artificial swimmers. *Nature*, 437(7060):862–865, octobre 2005. *4 citations pages vi, 22, 23 et 54*
- Jens ELGETI, Roland G. WINKLER et Gerhard GOMPPER : Physics of microswimmers—single particle motion and collective behavior : a review. *Reports on Progress in Physics*, 78(5):056601, 2015. *Cité page 22*
- P. ENCARNACAO et A. PASCOAL : 3d path following for autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, volume 3, pages 2977–2982 vol.3, 2000. *4 citations pages viii, 66, 67 et 71*
- Pedro M. M; ENCARNACAO : *Nonlinear Path Following Control System for Ocean Vehicles*. Thèse de doctorat, Université technique de Lisbonne, 2002. *Cité page 71*
- Julian ESPINOSA-GARCIA, Eric LAUGA et Roberto ZENIT : Fluid elasticity increases the locomotion of flexible swimmers. *Physics of Fluids*, 25(3):031701, mars 2013. *3 citations pages vi, 23 et 58*
- Bernard ETKIN : *Dynamics of Atmospheric Flight*. Courier Corporation, août 2012. *Cité page 69*
- Arthur A. EVANS et Eric LAUGA : Propulsion by passive filaments and active flagella near boundaries. *Physical Review E*, 82(4), octobre 2010. *3 citations pages 21, 22 et 53*
- Bálint FARKAS et Sven-Ake WEGNER : Variations on Barbălat’s Lemma. *American Mathematical Monthly*, 123(8):825–830, octobre 2016. *Cité page 87*
- B. M. FRIEDRICH, I. H. RIEDEL-KRUSE, J. HOWARD et F. JÜLICHER : High-precision tracking of sperm swimming fine structure provides strong test of resistive force theory. *Journal of Experimental Biology*, 213(8):1226–1234, avril 2010. *Cité page 22*
- Henry C. FU, Mehdi JABBARZADEH et Farshad MESHKATI : Magnetization directions and geometries of helical microswimmers for linear velocity-frequency response. *Physical Review E*, 91(4):043011, avril 2015. *3 citations pages 25, 45 et 47*
- Wei GAO, Sirilak SATTAYASAMITSATHIT, Kalayil Manian MANESH, Daniel WEIHS et Joseph WANG : Magnetically Powered Flexible Metal Nanowire Motors. *Journal of the American Chemical Society*, 132(41):14403–14405, octobre 2010. *Cité page 22*
- Ambarish GHOSH et Peer FISCHER : Controlled Propulsion of Artificial Magnetic Nanostructured Propellers. *Nano Letters*, 9(6):2243–2245, juin 2009. *2 citations pages 30 et 34*
- Arijit GHOSH, Debadrita PARIA, Govindan RANGARAJAN et Ambarish GHOSH : Velocity Fluctuations in Helical Propulsion : How Small Can a Propeller Be. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5(1):62–68, janvier 2014. *2 citations pages 31 et 65*
- J. GRAY et G. J. HANCOCK : The Propulsion of Sea-Urchin Spermatozoa. *Journal of Experimental Biology*, 32(4):802–814, décembre 1955. *Cité page 21*

- Marcus HOOP, Yang SHEN, Xiang-Zhong CHEN, Fajer MUSHTAQ, Loredana M. IULIANO, Mahmut S. SAKAR, Andrew PETRUSKA, Martin J. LOESSNER, Bradley J. NELSON et Salvador PANÉ : Magnetically Driven Silver-Coated Nanocoils for Efficient Bacterial Contact Killing. *Advanced Functional Materials*, 26(7):1063–1069, février 2016. 3 citations pages vi, 26 et 27
- Abdelrahman HOSNEY, Joseph ABDALLA, Ibrahim S. AMIN, Nabila HAMDY et Islam S. M. KHALIL : In vitro validation of clearing clogged vessels using microrobots. In *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pages 272–277, juin 2016. Cité page 20
- Abdelrahman HOSNEY, Anke KLINGNER, Sarthak MISRA et Islam S. M. KHALIL : Propulsion and steering of helical magnetic microrobots using two synchronized rotating dipole fields in three-dimensional space. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1988–1993, septembre 2015. Cité page 20
- Tian-Yun HUANG, Famin QIU, Hsi-Wen TUNG, Xue-Bo CHEN, Bradley J. NELSON et Mahmut Selman SAKAR : Generating mobile fluidic traps for selective three-dimensional transport of microobjects. *Applied Physics Letters*, 105(11):114102, septembre 2014a. 3 citations pages vi, 26 et 27
- Tian-Yun HUANG, Famin QIU, Hsi-Wen TUNG, Kathrin E. PEYER, Naveen SHAMSUDHIN, Juho POKKI, Li ZHANG, Xue-Bo CHEN, Bradley J. NELSON et Mahmut SELMAN SAKAR : Cooperative manipulation and transport of microobjects using multiple helical microcarriers. *RSC Advances*, 4(51):26771–26776, 2014b. Cité page 28
- Tian-Yun HUANG, Mahmut Selman SAKAR, Angelo MAO, Andrew J. PETRUSKA, Famin QIU, Xue-Bo CHEN, Stephen KENNEDY, David MOONEY et Bradley J. NELSON : 3d Printed Microtransporters : Compound Micromachines for Spatiotemporally Controlled Delivery of Therapeutic Agents. *Advanced Materials*, 27(42):6644–6650, novembre 2015. 3 citations pages vi, 26 et 27
- G. HWANG, D. DECANINI, L. LEROY et A. M. HAGHIRI-GOSNET : Note : On-chip multifunctional fluorescent-magnetic Janus helical microswimmers. *The Review of Scientific Instruments*, 87(3):036104, mars 2016. Cité page 26
- Bumjin JANG, Emiliya GUTMAN, Nicolai STUCKI, Benedikt F. SEITZ, Pedro D. WENDEL-GARCÍA, Taylor NEWTON, Juho POKKI, Olgaç ERGENEMAN, Salvador PANÉ, Yizhar OR et Bradley J. NELSON : Undulatory Locomotion of Magnetic Multilink Nanoswimmers. *Nano Letters*, 15(7):4829–4833, juillet 2015. 3 citations pages vi, 22 et 23
- Issac KAMINER, Oleg YAKIMENKO, Antonio PASCOAL et Reza GHABCHELOO : Path Generation, Path Following and Coordinated Control for TimeCritical Missions of Multiple UAVs. In *2006 American Control Conference*, pages 4906–4913, juin 2006. Cité page 68
- Jasper D. KEUNING, Jeroen DE VRIESY, Leon ABELMANNY et Sarthak MISRA : Image-based magnetic control of paramagnetic microparticles in water. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 421–426, septembre 2011. Cité page 34
- Islam S. M. KHALIL, Herman C. DIJKSLAG, Leon ABELMANN et Sarthak MISRA : Magneto-Sperm : A microrobot that navigates using weak magnetic fields. *Applied Physics Letters*, 104(22):223701, juin 2014a. 2 citations pages 11 et 22

- Islam S. M. KHALIL, Ahmet FATIH TABAK, Anke KLINGNER et Metin SITTI : Magnetic propulsion of robotic sperms at low-Reynolds number. *Applied Physics Letters*, 109(3):033701, juillet 2016a. *Cité page 30*
- Islam S. M. KHALIL, Pedro FERREIRA, Ricardo ELEUTÉRIO, Chris L. de KORTE et Sarthak MISRA : Magnetic-based closed-loop control of paramagnetic microparticles using ultrasound feedback. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3807–3812, mai 2014b. *2 citations pages v et 10*
- Islam S. M. KHALIL, Veronika MAGDANZ, Samuel SANCHEZ, Oliver G. SCHMIDT et Sarthak MISRA : Biocompatible, accurate, and fully autonomous : a sperm-driven micro-bio-robot. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 9(3-4):79–86, août 2014c. *Cité page 13*
- Islam S. M. KHALIL, Ahmet F. TABAK, Khaled SADEK, Dalia MAHDY, Nabila HAMDY et Metin SITTI : Rubbing Against Blood Clots Using Helical Robots : Modeling and In Vitro Experimental Validation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2):927–934, avril 2017. *Cité page 20*
- Islam S. M. KHALIL, Ahmet Fatih TABAK, Abdelrahman HOSNEY, Abdalla MOHAMED, Anke KLINGNER, Maged GHONEIMA et Metin SITTI : Sperm-shaped magnetic microrobots : Fabrication using electrospinning, modeling, and characterization. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1939–1944, mai 2016b. *3 citations pages vi, 23 et 45*
- Islam SM KHALIL, Kareem YOUAKIM, Alonso SÁNCHEZ et Sarthak MISRA : Magnetic-based motion control of sperm-shaped microrobots using weak oscillating magnetic fields. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4686–4691, septembre 2014d. *3 citations pages vi, 32 et 34*
- Jinsoo KIM, Min Jun KIM, Jeonghoon YOO et Seung-Jong KIM : Novel Motion Modes for 2-D Locomotion of a Microrobot. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11):1–5, novembre 2014. ISSN 0018-9464. *Cité page 20*
- Sangwon KIM, Seungmin LEE, Jeonghun LEE, Bradley J. NELSON, Li ZHANG et Hongsoo CHOI : Fabrication and Manipulation of Ciliary Microrobots with Non-reciprocal Magnetic Actuation. *Scientific Reports*, 6:srep30713, juillet 2016. *3 citations pages 11, 12 et 34*
- Teruyuki KOZUKA, Toru TUZIUTI, Hideto MITOME et Toshio FUKUDA : Micromanipulation using a focused ultrasonic standing wave field. *Electronics and Communications in Japan (Part III : Fundamental Electronic Science)*, 83(1):53–60, janvier 2000. *Cité page 7*
- M. P. KUMMER, J. J. ABBOTT, B. E. KRATOCHVIL, R. BORER, A. SENGUL et B. J. NELSON : OctoMag : An Electromagnetic System for 5-DOF Wireless Micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6):1006–1017, décembre 2010. *4 citations pages 11, 19, 31 et 34*
- M. Cosentino LAGOMARSINO, Fabrizio CAPUANI et Christopher P. LOWE : A simulation study of the dynamics of a driven filament in an Aristotelian fluid. *Journal of Theoretical Biology*, 224(2):215–224, septembre 2003. *Cité page 22*
- L. LAPIERRE et B. JOUVENCEL : Robust Nonlinear Path-Following Control of an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2):89–102, avril 2008. *Cité page 66*

- Eric LAUGA, Willow R. DiLUZIO, George M. WHITESIDES et Howard A. STONE : Swimming in Circles : Motion of Bacteria near Solid Boundaries. *Biophysical Journal*, 90(2):400–412, janvier 2006. *3 citations pages 25, 31 et 102*
- Eric LAUGA et Thomas R. POWERS : The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics*, 72(9):096601, 2009. *Cité page 102*
- Roland LENAIN, Benoit THUILOT, Christophe CARIOU et Philippe MARTINET : Mobile robot control in presence of sliding : Application to agricultural vehicle path tracking. *In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 6004–6009, décembre 2006. *Cité page 78*
- Roland LENAIN, Benoit THUILOT, Christophe CARIOU et Philippe MARTINET : Mixed kinematic and dynamic sideslip angle observer for accurate control of fast off-road mobile robots. *Journal of Field Robotics*, 27(2):181–196, mars 2010. *Cité page 78*
- Jinxing LI, Isaac ROZEN et Joseph WANG : Rocket Science at the Nanoscale. *ACS Nano*, 10(6):5619–5634, juin 2016a. *Cité page 12*
- Tianlong LI, Jinxing LI, Hongtao ZHANG, Xiacong CHANG, Wenping SONG, Yanan HU, Guangbin SHAO, Elodie SANDRAZ, Guangyu ZHANG, Longqiu LI et Joseph WANG : Magnetically Propelled Fish-Like Nanoswimmers. *Small*, 12(44):6098–6105, novembre 2016b. *Cité page 22*
- James LIGHTHILL : Flagellar Hydrodynamics. *SIAM Review*, 18(2):161–230, avril 1976. *Cité page 24*
- Christopher P LOWE : Dynamics of filaments : modelling the dynamics of driven microfilaments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 358(1437):1543–1550, septembre 2003. *Cité page 54*
- Veronika MAGDANZ, Mariana MEDINA-SÁNCHEZ, Yan CHEN, Maria GUIX et Oliver G. SCHMIDT : How to Improve SpermBot Performance. *Advanced Functional Materials*, 25(18):2763–2770, mai 2015. *Cité page 12*
- Veronika MAGDANZ, Samuel SANCHEZ et Oliver G. SCHMIDT : Development of a Sperm-Flagella Driven Micro-Bio-Robot. *Advanced Materials*, 25(45):6581–6588, décembre 2013. *Cité page 13*
- Veronika MAGDANZ, Georgi STOYCHEV, Leonid IONOV, Samuel SANCHEZ et Oliver G. SCHMIDT : Stimuli-Responsive Microjets with Reconfigurable Shape. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(10):2673–2677, mars 2014. *Cité page 12*
- Dalia MAHDY, Abdallah MOHAMED, Anke KLINGNER, Ashraf TAMMAM, Abdelmoneim WAHDAN, Mohamed SERRY et Islam S. M. KHALIL : Experimental Characterization of Helical Propulsion in Newtonian and Viscoelastic Mediums. *In 2017 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*, août 2017. *2 citations pages vi et 20*
- Arthur W. MAHONEY et Jake J. ABBOTT : Managing magnetic force applied to a magnetic device by a rotating dipole field. *Applied Physics Letters*, 99(13):134103, septembre 2011. *2 citations pages 20 et 101*

- Arthur W. MAHONEY, John C. SARRAZIN, Eberhard BAMBERG et Jake J. ABBOTT : Velocity control with gravity compensation for magnetic helical microswimmers. *Advanced Robotics*, 25(8):1007–1028, 2011. *9 citations pages vi, 19, 20, 25, 30, 34, 45, 46 et 115*
- E. MARCHAND, F. SPINDLER et F. CHAUMETTE : ViSP for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 12(4):40–52, décembre 2005. ISSN 1070-9932. *3 citations pages vii, 41 et 92*
- Mauro MAYA : *Commande référencée capteur des robots non holonomes*. phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, avril 2007. *Cité page 64*
- Mariana MEDINA-SÁNCHEZ, Lukas SCHWARZ, Anne K. MEYER, Franziska HEBENSTREIT et Oliver G. SCHMIDT : Cellular Cargo Delivery : Toward Assisted Fertilization by Sperm-Carrying Micromotors. *Nano Letters*, 16(1):555–561, janvier 2016. *5 citations pages vi, 26, 28, 30 et 34*
- Alain MICAELLI et Claude SAMSON : *Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots*. Thèse de doctorat, INRIA, 1993. *Cité page 87*
- Alain MICAELLI et Claude SAMSON : Trajectory tracking for two-steering-wheels mobile robots. *IFAC Proceedings Volumes*, 27(14):249–256, septembre 1994. *Cité page 87*
- Pascal MORIN et Claude SAMSON : Motion Control of Wheeled Mobile Robots. In Bruno Siciliano PROF et Oussama Khatib PROF, éditeurs : *Springer Handbook of Robotics*, pages 799–826. Springer Berlin Heidelberg, 2008. *3 citations pages 67, 74 et 124*
- Konstantin I. MOROZOV et Alexander M. LESHANSKY : The chiral magnetic nanomotors. *Nanoscale*, 6(3):1580–1588, 2014. *Cité page 47*
- Fangzhi MOU, Yan LI, Chuanrui CHEN, Wei LI, Yixia YIN, Huiru MA et Jianguo GUAN : Single-Component TiO₂ Tubular Microengines with Motion Controlled by Light-Induced Bubbles. *Small*, 11(21):2564–2570, juin 2015. *Cité page 12*
- Yin MUNAN, Edison GERENA, Cécile PACORET, Sinan HALIYO et Stéphane RÉGNIER : High-bandwidth 3d Force Feedback Optical Tweezers for Interactive Bio-manipulation. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, septembre 2017. *Cité page 7*
- Bradley J. NELSON, Ioannis K. KALIAKATSOS et Jake J. ABBOTT : Microrobots for Minimally Invasive Medicine. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 12(1):55–85, 2010. *Cité page 28*
- Henk NIJMEIJER et Arjan Van der SCHAFT : *Nonlinear dynamical control systems*, volume 175. New York : Springer-Verlag, 1990. *Cité page 64*
- Tiago OLIVEIRA, Pedro ENCARNAÇÃO et A. Pedro AGUIAR : Moving path following for autonomous robotic vehicles. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pages 3320–3325, juillet 2013. *Cité page 68*
- John OPREA : *Differential geometry and its applications*. MAA, 2007. *Cité page 69*
- Christian PETERS, Marcus HOOP, Salvador PANÉ, Bradley J. NELSON et Christofer HIEROLD : Degradable Magnetic Composites for Minimally Invasive Interventions : Device Fabrication, Targeted Drug Delivery, and Cytotoxicity Tests. *Advanced Materials*, 28(3):533–538, janvier 2016. *Cité page 26*

- K. E. PEYER, L. ZHANG, B. E. KRATOCHVIL et B. J. NELSON : Non-ideal swimming of artificial bacterial flagella near a surface. *In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 96–101, mai 2010. *3 citations pages 31, 65 et 102*
- Roel PIETERS, Hsi-Wen TUNG, Samuel CHARREYRON, David F. SARGENT et Bradley J. NELSON : RodBot : A rolling microrobot for micromanipulation. *In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4042–4047, mai 2015. *3 citations pages vi, 28 et 29*
- Pierre POUPONNEAU, Gilles SOULEZ, Gilles BEAUDOIN, Jean-Christophe LEROUX et Sylvain MARTEL : MR Imaging of Therapeutic Magnetic Microcarriers Guided by Magnetic Resonance Navigation for Targeted Liver Chemoembolization. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 37(3):784–790, juin 2014. *2 citations pages 9 et 19*
- Edward M. PURCELL : Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*, 45(1):3–11, janvier 1977. *5 citations pages v, 1, 14, 15 et 24*
- Famin QIU, Satoshi FUJITA, Rami MHANNA, Li ZHANG, Benjamin R. SIMONA et Bradley J. NELSON : Magnetic Helical Microswimmers Functionalized with Lipoplexes for Targeted Gene Delivery. *Advanced Functional Materials*, 25(11):1666–1671, mars 2015. *2 citations pages 28 et 30*
- Tian QIU, Tung-Chun LEE, Andrew G. MARK, Konstantin I. MOROZOV, Raphael MÜNSTER, Otto MIERKA, Stefan TUREK, Alexander M. LESHANSKY et Peer FISCHER : Swimming by reciprocal motion at low Reynolds number. *Nature Communications*, 5:5119, novembre 2014. *2 citations pages 11 et 15*
- T. SALGADO-JIMENEZ, J. M. SPIEWAK, P. FRAISSE et B. JOUVENCEL : A robust control algorithm for AUV : based on a High Order Sliding Mode. *In OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, volume 1, pages 276–281 Vol.1, novembre 2004. *Cité page 67*
- Claude SAMSON : Control of chained systems application to path following and time-varying point-stabilization of mobile robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(1):64–77, janvier 1995. *5 citations pages 32, 67, 74, 78 et 87*
- On SHUN PAK, Wei GAO, Joseph WANG et Eric LAUGA : High-speed propulsion of flexible nanowire motors : Theory and experiments. *Soft Matter*, 7(18):8169–8181, 2011. *Cité page 22*
- Ajay Vikram SINGH et Metin SITTI : Patterned and Specific Attachment of Bacteria on Bio-hybrid Bacteria-Driven Microswimmers. *Advanced Healthcare Materials*, 5(18):2325–2331, septembre 2016. *Cité page 13*
- Alexander A. SOLOVEV, Yongfeng MEI, Esteban BERMÚDEZ UREÑA, Gaoshan HUANG et Oliver G. SCHMIDT : Catalytic Microtubular Jet Engines Self-Propelled by Accumulated Gas Bubbles. *Small*, 5(14):1688–1692, juillet 2009. ISSN 1613-6829. *Cité page 12*
- Feijun SONG et S. M. SMITH : Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model. *In OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings*, volume 2, pages 835–840 vol.2, 2000. *Cité page 67*
- Mark Westervelt SPONG, Seth HUTCHINSON et Mathukumalli VIDYASAGAR : *Robot Modeling and Control*, volume 3. New York : Wiley, décembre 2006. *2 citations pages 72 et 127*
- J. J. STOKER : *Differential Geometry*. John Wiley & Sons, janvier 1989. *Cité page 69*

- Benoît THUILOT : *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles à roues*. phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 1995. *Cité page 64*
- Soichiro TOTTORI, Naohiko SUGITA, Reo KOMETANI, Sunao ISHIHARA et Mamoru MITSUISHI : Selective control method for multiple magnetic helical microrobots. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 6(3-4):89–95, juin 2011. *Cité page 33*
- Soichiro TOTTORI, Li ZHANG, Famin QIU, Krzysztof K. KRAWCZYK, Alfredo FRANCO-OBREGÓN et Bradley J. NELSON : Magnetic Helical Micromachines : Fabrication, Controlled Swimming, and Cargo Transport. *Advanced Materials*, 24(6):811–816, février 2012. *4 citations pages 11, 26, 28 et 30*
- T. J. UI, R. G. HUSSEY et R. P. ROGER : Stokes drag on a cylinder in axial motion. *The Physics of Fluids*, 27(4):787–795, avril 1984. *Cité page 17*
- Baptiste VERON : *Modélisation et commande des systèmes de manipulation sans contact. : Vers l'amélioration du diagnostic en endoscopie digestive*. phdthesis, Université de Franche-Comté, novembre 2014. *2 citations pages 31 et 34*
- Mark Jayson VILLANGCA, Darwin PALIMA, Andrew Rafael BAÑAS et Jesper GLÜCKSTAD : Light-driven micro-tool equipped with a syringe function. *Light : Science & Applications*, 5(9):e16148, septembre 2016. *2 citations pages 11 et 12*
- Sabiha A. WADOO, Sadiksha SAPKOTA et Keerthish CHAGACHAGERE : Optimal control of an autonomous underwater vehicle. In *2012 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, pages 1–6, mai 2012. *Cité page 67*
- D. WALKER, M. KÜBLER, K. I. MOROZOV, P. FISCHER et A. M. LESHANSKY : Optimal Length of Low Reynolds Number Nanopropellers. *Nano Letters*, 15(7):4412–4416, juillet 2015. *Cité page 27*
- Gregory Charles WALSH et Linda Grace BUSHNELL : Stabilization of multiple input chained form control systems. In *Proceedings of 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 959–964 vol.2, décembre 1993. *Cité page 74*
- Rika WRIGHT CARLSEN, Matthew R. EDWARDS, Jiang ZHUANG, Cecile PACORET et Metin SITTI : Magnetic steering control of multi-cellular bio-hybrid microswimmers. *Lab on a Chip*, 14(19):3850–3859, 2014. *Cité page 13*
- T. XU, G. HWANG, N. ANDREFF et S. RÉGNIER : Scaled-up helical nanobelt modeling and simulation at low reynolds numbers. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4045–4051, mai 2012. *Cité page 25*
- Tailin XU, Fernando SOTO, Wei GAO, Victor GARCIA-GRADILLA, Jinxing LI, Xueji ZHANG et Joseph WANG : Ultrasound-Modulated Bubble Propulsion of Chemically Powered Microengines. *Journal of the American Chemical Society*, 136(24):8552–8555, juin 2014a. *Cité page 12*
- Tiantian XU : *Propulsion characteristics and Visual Servo Control of Scaled-up Helical Microswimmers*. Thèse de doctorat, Paris 6, mars 2014. *6 citations pages 40, 45, 46, 49, 52 et 123*
- Tiantian XU, Gilgueng HWANG, Nicolas ANDREFF et Stéphane RÉGNIER : The rotational propulsion characteristics of scaled-up helical microswimmers with different heads and magnetic positioning. In *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1114–1120, juillet 2013. *Cité page 51*

- Tiantian XU, Gilgueng HWANG, Nicolas ANDREFF et Stéphane RÉGNIER : Characterization of three-dimensional steering for helical swimmers. *In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4686–4691, mai 2014b. 2 citations pages 27 et 45
- Tiantian XU, Gilgueng HWANG, Nicolas ANDREFF et Stéphane RÉGNIER : Modeling and Swimming Property Characterizations of Scaled-Up Helical Microswimmers. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3):1069–1079, juin 2014c. 2 citations pages 51 et 65
- Tiantian XU, Gilgueng HWANG, Nicolas ANDREFF et Stéphane RÉGNIER : Planar Path Following of 3-D Steering Scaled-Up Helical Microswimmers. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(1):117–127, février 2015a. 7 citations pages 32, 33, 34, 47, 48, 67 et 93
- Tiantian XU, Huanbing YU, Hong ZHANG, Chi-lan VONG et Li ZHANG : Morphologies and swimming characteristics of rotating magnetic swimmers with soft tails at low Reynolds numbers. *In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1385–1390, septembre 2015b. Cité page 54
- Tiantian XU, Jiangfan YU, Xiaohui YAN, Hongsoo CHOI et Li ZHANG : Magnetic Actuation Based Motion Control for Microrobots : An Overview. *Micromachines*, 6(9):1346–1364, septembre 2015c. Cité page 29
- Zhou YE, Stéphane RÉGNIER et Metin SITTI : Rotating magnetic miniature swimming robots with multiple flexible flagella. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1):3–13, 2014. 3 citations pages 21, 22 et 49
- K. Berk YESIN, Karl VOLLMERS et Bradley J. NELSON : Modeling and Control of Untethered Biomicrobots in a Fluidic Environment Using Electromagnetic Fields. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6):527–536, mai 2006. 2 citations pages 30 et 34
- Kareem YOUAKIM, Mohamed EHAB, Omar HATEM, Sarthak MISRA et Islam S. M. KHALIL : Paramagnetic microparticles sliding on a surface : Characterization and closed-loop motion control. *In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4068–4073, mai 2015. Cité page 32
- Li ZHANG, Jake J. ABBOTT, Lixin DONG, Bradley E. KRATOCHVIL, Dominik BELL et Bradley J. NELSON : Artificial bacterial flagella : Fabrication and magnetic control. *Applied Physics Letters*, 94(6):064107, février 2009a. Cité page 27
- Li ZHANG, Jake J. ABBOTT, Lixin DONG, Kathrin E. PEYER, Bradley E. KRATOCHVIL, Haixin ZHANG, Christos BERGELES et Bradley J. NELSON : Characterizing the Swimming Properties of Artificial Bacterial Flagella. *Nano Letters*, 9(10):3663–3667, octobre 2009b. Cité page 25