

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT  
UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ  
PRÉPARÉE À L'INSTITUT DE RECHERCHE  
**FEMTO-ST**

ÉCOLE DOCTORALE N° 37  
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR ET MICROMECHANIQUE

Doctorat de Sciences pour l'ingénieur

PAR  
**Maxence LEVEZIEL**

**Conception, modélisation et  
commande de robots parallèles à  
articulations souples pour la  
micromanipulation à haute cadence**

(Version provisoire)

Thèse présentée et soutenue à Besançon, le 20 décembre 2022

Composition du Jury :

Stéphane CARO	Rapporteur	Directeur de recherche au CNRS, LS2N
Christian DURIEZ	Rapporteur	Directeur de recherche à l'INRIA Lille
François PIERROT	Examinateur	Directeur de recherche au CNRS, LIRMM
Selman SAKHAR	Examinateur	Associate professor at EPFL
Guillaume LAURENT	Directeur de thèse	MCF HDR à SUPMICROTECH-ENSMM, FEMTO-ST
Redwan DAHMOUCHE	Co-directeur de thèse	MCF à l'Université de Franche-Comté, FEMTO-ST
Michaël GAUTHIER	Co-directeur de thèse	Directeur de recherche au CNRS, FEMTO-ST



# Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	iii
<b>Liste des Figures .....</b>	vii
<b>Liste des Tables.....</b>	xi
<b>Glossaire .....</b>	xiii
<b>Liste des publications .....</b>	xv
<b>Introduction générale.....</b>	1
<b>1 Positionnement scientifique .....</b>	3
<b>1.1 Introduction à la microrobotique.....</b>	4
1.1.1 Micromonde .....	4
1.1.2 Micro-robots.....	5
1.1.3 Micromanipulation et micro-assemblage .....	7
<b>1.2 Enjeux de la thèse.....</b>	8
1.2.1 Réduction du rapport de taille.....	10
1.2.2 Intégration de la préhension .....	10
<b>1.3 Robotique parallèle.....</b>	12
1.3.1 Robots parallèles remarquables .....	13
1.3.2 Miniaturisation .....	14
1.3.3 Synthèse .....	15
<b>1.4 Robots parallèles à plateforme configurable.....</b>	17
1.4.1 Description et définition.....	17
1.4.2 Utilisation .....	17
1.4.3 Architectures remarquables.....	18
1.4.4 Synthèse .....	19
<b>1.5 Miniaturisation d'articulation .....</b>	19
1.5.1 Amincissements locaux.....	20
1.5.2 Déformations continues .....	20
1.5.3 Articulations souples.....	22

1.5.4	Synthèse .....	24
<b>1.6</b>	<b>Actionnement à l'échelle microscopique .....</b>	<b>24</b>
<b>1.7</b>	<b>Positionnement des travaux au sein de l'équipe de recherche .....</b>	<b>25</b>
<b>1.8</b>	<b>Conclusion et démarche scientifique.....</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation des robots à articulations souples .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2</b>	<b>Présentation du problème .....</b>	<b>31</b>
2.2.1	Mise en contexte .....	31
2.2.2	Structure considérée dans le cadre de l'étude .....	32
2.2.3	Hypothèses et contraintes de l'étude.....	34
<b>2.3</b>	<b>Présentation des modèles et outils .....</b>	<b>35</b>
2.3.1	Méthode des éléments finis .....	35
2.3.2	Modèle cinématique .....	38
2.3.3	Synthèse des modèles considérés .....	39
<b>2.4</b>	<b>Modélisation de la structure avec des articulations cubiques .....</b>	<b>40</b>
2.4.1	Principe de l'étude .....	40
2.4.2	Modèles considérés .....	41
2.4.3	Comparaison des modèles .....	43
2.4.4	Choix du modèle .....	44
<b>2.5</b>	<b>Extension à des articulations avec d'autres rapports de forme.....</b>	<b>44</b>
2.5.1	Présentation de l'étude.....	44
2.5.2	Analyse de deux cas spécifiques.....	45
2.5.3	Analyse des résultats .....	48
<b>2.6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>Conception et modélisation d'un microrobot pour la prise-dépose rapide .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2</b>	<b>Présentation et modélisation de la structure robotique.....</b>	<b>58</b>
3.2.1	Architecture robotique.....	58
3.2.2	Modélisation géométrique .....	58
3.2.3	Modélisation cinématique .....	63
3.2.4	Analyse de l'espace de travail de la structure.....	64

---

<b>3.3</b>	<b>Recherche de la pose de référence</b>	68
3.3.1	Hypothèses et paramétrisation	68
3.3.2	Mise en équation	69
3.3.3	Optimisation de la position de référence	70
<b>3.4</b>	<b>Conception du micromanipulateur MiGriBot</b>	72
3.4.1	Dimensionnement du mécanisme parallèle	72
3.4.2	Approximation des articulations complètes	74
3.4.3	Obtention de la pose initiale de MiGriBot	74
3.4.4	Espace de travail de MiGriBot	75
3.4.5	Modélisation par la méthode des éléments finis	76
3.4.6	Conception de la structure complète	80
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	83
<b>4</b>	<b>Réalisation et commande de MiGriBot</b>	85
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	86
<b>4.2</b>	<b>Réalisation du démonstrateur</b>	86
4.2.1	Fabrication en salle blanche	86
4.2.2	Assemblage de MiGriBot	87
4.2.3	Dispositif expérimental	89
4.2.4	Architecture de commande	89
<b>4.3</b>	<b>Analyses des performances de MiGriBot</b>	91
4.3.1	Espace de travail	92
4.3.2	Répétabilité	94
4.3.3	Capacité de préhension	95
4.3.4	Performances dynamiques	97
<b>4.4</b>	<b>Réalisation d'opérations de prise-dépose</b>	100
4.4.1	Manipulation télé-opérée	100
4.4.2	Réalisation d'un cycle de prise-dépose type ADEPT	102
4.4.3	Réalisation d'un cycle avec position d'attente	105
4.4.4	Comparaison avec les autres robots de prise-dépose de micro-objets	107
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	107
<b>5</b>	<b>Ouverture vers la robotique macroscopique : robot pour le tri de déchets</b>	109
<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	111
<b>5.2</b>	<b>Contexte du tri de déchets</b>	111
5.2.1	Le tri de déchets	111

5.2.2	Enjeux et problématiques à résoudre .....	113
5.2.3	Travaux précédents .....	113
<b>5.3</b>	<b>Conception de la structure robotique .....</b>	<b>115</b>
5.3.1	Influence de la structure microrobotique .....	115
5.3.2	Présentation de la structure .....	115
5.3.3	Avantage de la conception pour le tri de déchets .....	116
<b>5.4</b>	<b>Modélisation de la structure .....</b>	<b>117</b>
5.4.1	Définition des paramètres et fermeture géométrique ..	118
5.4.2	Modèle géométrique inverse .....	120
5.4.3	Modèle cinématique .....	121
<b>5.5</b>	<b>Analyse de l'espace de travail .....</b>	<b>121</b>
5.5.1	Espace de travail en translation .....	121
5.5.2	Analyse de la manipulabilité .....	123
<b>5.6</b>	<b>Validation expérimentale .....</b>	<b>126</b>
5.6.1	Réalisation d'un prototype .....	126
5.6.2	Espace de travail du manipulateur .....	127
5.6.3	Utilisation du manipulateur .....	128
<b>5.7</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>132</b>
<b>5.8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>133</b>
	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>135</b>
<b>A</b>	<b>Graphes d'agencement .....</b>	<b>141</b>
<b>B</b>	<b>Process de fabrication salle blanche .....</b>	<b>143</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>147</b>

# Liste des Figures

1.1	Positionnement de la microrobotique et du micromonde . . . . .	5
1.2	Exemples de micro-robots. . . . .	6
1.3	Exemple de tâches de micromanipulation et de micro-assemblage. . . . .	7
1.4	Exemples de micro-préhenseurs et leur intégration. . . . .	9
1.5	Rapport de taille entre le manipulateur et l'objet manipulé. . . . .	11
1.6	Les robots manipulateurs industriels. . . . .	12
1.7	Plateforme de Gough-Stewart et son graphe d'agencement. . . . .	14
1.8	Robot Delta et son graphe d'agencement. . . . .	15
1.9	Exemples de robots parallèles miniaturisés dans l'industrie et la recherche. . . . .	16
1.10	Robot parallèle Quattro. . . . .	19
1.11	Robot parallèle à 8ddl (3 rotations + 3 translations + préhension + alignement des doigts) . . . . .	19
1.12	Mécanismes avec des articulations issues amincissement locaux. . . . .	21
1.13	Exemples de robots à articulations continues. . . . .	22
1.14	Utilisation des articulations souples . . . . .	23
1.15	Résumé graphique de l'objectif de la thèse et de la démarche mise en œuvre. . . . .	27
2.1	Structure considérée pour l'étude composée d'éléments rigides en Silicium et d'articulations souples en PDMS. . . . .	33
2.2	Différences sur les simulations par éléments finis sous ANSYS avec la prise en compte des grandes déformations. . . . .	35
2.3	Exemples d'éléments finis 1D et 3D. . . . .	36
2.4	Méthodes de modélisation des articulations souples. . . . .	40
2.5	Structure d'étude avec des articulations souples cubiques. . . . .	41
2.6	Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 0,4 mm. . . . .	43
2.7	Structure d'étude avec des articulations souples avec un rapport de forme de 4. . . . .	46

2.8	Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 1,6 mm.....	47
2.9	Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 2,9 mm.....	48
2.10	Erreur relative moyenne des erreurs effectuées avec les différents modèles. ....	50
2.11	Temps d'exécution des simulations utilisant les différents modèles....	51
2.12	Synthèse de la comparaison des modèles pour la modélisation à articulations souples. ....	52
3.1	Présentation de la structure robotique à 4 ddl intégrant la préhension. ....	59
3.2	Représentation schématique de deux singularités remarquables du manipulateur.....	65
3.3	Manipulabilité en translation de la structure sans contrainte sur la course d'actionnement.....	66
3.4	Manipulabilité en rotation de la structure sans contrainte sur la course d'actionnement.....	67
3.5	Principe de la recherche de la position de référence et paramétrisation. ....	69
3.6	Calcul de l'espace accessible suivant $\mathbf{z}_w$ et position initiale correspondante à choisir. ....	71
3.7	Dimensionnement du mécanisme parallèle.....	73
3.8	Étude de l'hypothèse de l'approximation de l'articulation complète par une articulation cubique. ....	74
3.9	Évolution de l'amplitude accessible $\delta h$ en fonction de la hauteur $h_0$ de la position home. ....	75
3.10	Espace de travail théorique du micromanipulateur MiGriBot.....	76
3.11	Paramétrisation et initialisation de la simulation mécanique par éléments finis. ....	77
3.12	Simulation par éléments finis du mécanisme parallèle dans différentes configurations. ....	79
3.13	Représentation des modes de résonances du mécanisme parallèle....	81
3.14	Actionneur piézoélectrique multicouches en flexion. ....	82
3.15	Structure du micromanipulateur robotique MiGriBot.....	83
4.1	Réalisation de la structure parallèle.....	87

4.2	Mise en place de MiGriBot. . . . .	88
4.3	Présentation de la plateforme expérimentale. . . . .	90
4.4	Architecture de commande de MiGriBot. . . . .	91
4.5	Analyse de l'espace de travail de MiGriBot. . . . .	93
4.6	Définition de la fidélité, de la justesse et de l'exactitude. . . . .	94
4.7	Mesure de la répétabilité de positionnement de MiGriBot. . . . .	96
4.8	Manipulation de divers micro-objets. . . . .	98
4.9	Analyse dynamique des unités d'actionnement. . . . .	99
4.10	Analyse dynamique de MiGriBot. . . . .	101
4.11	Présentation des cycles de prise-dépose. . . . .	102
4.12	Présentation du cycle d'étude de MiGriBot. . . . .	103
4.13	Réalisation du cycle de prise-dépose en quasi-statique (temps de cycle de 2 s). . . . .	104
4.14	Réalisation du cycle de prise-dépose à haute vitesse (temps de cycle de 100 ms). . . . .	106
4.15	Définition du cycle avec position d'attente. . . . .	106
4.16	Résumé des principales caractéristiques de MiGriBot. . . . .	108
5.1	Exemple de robots parallèles dans un centre de tri de déchets. . . . .	112
5.2	Schéma architectural du robot trieur de déchets. . . . .	116
5.3	Schéma cinématique du manipulateur à 4 ddl. . . . .	117
5.4	Paramétrisation de la structure robotique. . . . .	119
5.5	Vues en coupe de l'espace de travail pour différents angles $\theta$ de la plateforme. . . . .	122
5.6	Indice de manipulabilité angulaire $\tau$ de la plateforme en fonction de la valeur de $\theta$ au sein de l'espace de travail réduit. . . . .	125
5.7	Exemples de préhenseurs qui pourraient être intégrés à la structure robotique en fonction du besoin et de l'application. . . . .	126
5.8	Prototype expérimental du robot et du préhenseur. . . . .	128
5.9	Influence de l'angle de la plateforme sur l'espace de travail. . . . .	129
5.10	Application de prise-jeté d'un bouchon en liège. . . . .	132
5.11	Illustration d'une ligne de micro-assemblage utilisant plusieurs Mi-GriBots. . . . .	139
B.1	Procédé de fabrication de robots à articulations souples miniaturisés.	144

## Liste des Figures

---

# Liste des Tables

2.1	Propriétés mécaniques du PDMS et du Silicium utilisées pour les modélisations. . . . .	33
2.2	Modélisation des éléments en PDMS et en Silicium suivant la méthode et le logiciel utilisés. Ces différents modèles sont ceux utilisés dans l'étude de la structure à articulations souples. . . . .	42
3.1	Analyse modale de la structure parallèle à la position de référence. . . . .	80
3.2	Performances des unités d'actionnement sans et avec allonges d'amplification du mouvement. . . . .	82
4.1	Position des points choisis pour l'étude de répétabilité. . . . .	95
A.1	Conventions des graphes d'agencement . . . . .	142

## Liste des Tables

---

# Glossaire

## ABRÉVIATIONS

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AS2M	Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
DDL	Degré de Liberté
DRIE	Deep Reactive-Ion Etching
EDP	Équation aux Dérivées Partielles
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
FEMTO-ST	Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies
HDR	Habilitation à Diriger des Recherches
IHM	Interface Homme Machine
INRIA	Institut Nationale de la Recherche en Informatique et Automatique
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplification de la lumière par émission stimulée de radiation en français)
LED	Light Emitting Diode (Diode ElectroLuminescenete en français)
LIRMM	Laboratoire d' Informatique, de Robotique et de Microélectromécanique de Montpellier
LS2N	Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes
MCF	Maitre de Conférences
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MEF	Méthode des Éléments Finis
MGD	Modèle Géométrique Direct
MGI	Modèle Géométrique Inverse
MOEMS	Microsystèmes opto-électro-mécaniques
PDMS	PolyDiMethylSiloxane
RAM	Random Access Memory (mémoire vive en français)
RoMoCo	Robotique, Modélisation et Commande
RPPC	Robot Parallèle à Plateforme Configurable
SOFA	Simulation Open Framework Architecture

## Glossaire

---

# Liste des publications

## PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE

- Articles dans des journaux internationaux
  - M. Leveziel, W. Haouas, G. J. Laurent, M. Gauthier and R. Dahmouche, « **MiGriBot : A miniature parallel robot with integrated gripping for high-throughput micromanipulation** », in *Science Robotics*, vol. 7,no. 69, pp. eabn4292, Aug. 2022.
  - M. Leveziel, G. J. Laurent, W. Haouas, M. Gauthier and R. Dahmouche, « **A 4-DoF Parallel Robot With a Built-in Gripper for Waste Sorting** », in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9834-9841, Oct. 2022, doi : 10.1109/LRA.2022.3192582.
- Communications internationales
  - M. Leveziel, G.J. Laurent, M.Gauthier and R. Dahmouche, « **Modeling of soft jointed miniaturized robot for high-speed micromanipulation** », *SOFA Week Symposium*, November 2021.
  - M. Leveziel, G.J. Laurent, W. Haouas, M.Gauthier and R. Dahmouche, « **A 4-DoF Parallel Robot With a Built-in Gripper for Waste Sorting** », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, October 2022, Tokyo (Japan).
- Communications nationales
  - M. Leveziel, W. Haouas, G.J. Laurent, M. Gauthier and R. Dahmouche, « **Design, modeling and control of miniaturized parallel soft robots with configurable platforms** », *Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique*, October 2021.

## ACTIVITÉS DE VULGARISATION ET DE DIFFUSION SCIENTIFIQUE

- FEMTO-ST ambassador, Innovation Award en 2019 : Préparation d'un poster et présentation en 3 min des travaux en fin de 1ère année de thèse suivi d'un vote de l'ensemble des membres de l'institut.
- Participation à une vidéo YouTube réalisée par l'université de Franche-Comté sur la microrobotique :  
<https://www.youtube.com/watch?v=1jP2qIGcr0c&t=625s>
- Présentation des travaux de recherche lors de l'évaluation interne de l'EUR EIPHI.
- Poster pour l'université d'été en robotique chirurgicale en 2021 (SSSR2021).
- Poster pour l'université d'été sur la robotique déformable en 2022.
- Participation au micro/nano event de Micronora en 2022 : Présentation de mes travaux et discussion avec des industriels européens autour d'une potentielle valorisation.
- Séminaire donné lors de ma visite au laboratoire CNRS-AIST JRL à Tsukuba (Japon) en 2022.

# Introduction générale

Si aujourd’hui les ordinateurs portables ont l’épaisseur d’une feuille de papier, avec des autonomies pouvant atteindre facilement une journée, si les téléphones portables embarquent de plus en plus de fonctionnalités avec des performances toujours plus accrues, c’est en grande partie grâce à la miniaturisation des différents composants de ces appareils. Si cette miniaturisation est évidente et visible par le grand public dans le numérique, de nombreux autres domaines ont recours à la miniaturisation pour permettre d’améliorer les performances et de réduire l’encombrement des systèmes. C’est le cas notamment dans l’industrie aéronautique, automobile, aérospatiale ou encore horlogère. Le biomédical et la médecine sont aussi des domaines d’intérêts pour la réalisation de dispositifs médicaux ou pour la chirurgie minimalement invasive. La miniaturisation des composants amène un besoin de manipulation et d’assemblage de micro-objets avec de très grandes cadences et une grande précision.

Bien qu’il existe déjà des systèmes automatisés permettant de réaliser certaines des opérations, de nouvelles solutions de manipulation de ces micro-composants sont nécessaires. La réduction des tailles des machines et des robots permettant des opérations de micromanipulation est un enjeu majeur pour l’augmentation des performances, et la réduction de l’empreinte écologique. En effet, actuellement, les micromanipulateurs ont généralement des tailles 10 000 fois supérieures aux objets et composants à manipuler. Cette différence dans les dimensions a plusieurs impacts. Le premier est l’encombrement total pour la production. L’encombrement des machines est gigantesque en comparaison des tailles des objets fabriqués limitant le nombre de robots de manipulation implantés sur une surface. Un autre aspect directement en lien avec la taille des machines est la consommation énergétique mise en jeu. En effet, plus les machines seront petites, plus les flux d’énergie seront faibles. Elles seront donc économies en énergie. De plus, les besoins en matière première sont moins importants et donc la miniaturisation a aussi un intérêt écologique. L’idée principale est d’augmenter les performances en gardant la maîtrise énergétique et en ayant une solution précise et miniaturisée.

Conscient de ces enjeux, le milieu de la recherche scientifique lié à la microrobotique est en pleine émulation afin de proposer de nouvelles solutions. Cette recherche a été accélérée par l’introduction de nouvelles méthodes de micro-fabrication et l’utilisation de matériaux actifs. Dans ce contexte, de nombreuses structures et cinématiques ont été proposées afin de répondre aux besoins de la miniaturisation. Il reste de nombreux verrous scientifiques à lever, notamment l’augmentation des cadences de micromanipulation.

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein de l’institut FEMTO-ST en s’intégrant dans les orientations de recherche du département

AS2M et plus particulièrement de l'équipe RoMoCo. L'objectif est de lever un des verrous scientifiques en développant une structure robotique à petite échelle pour assurer la manipulation de micro-objets avec des cadences élevées. Pour remplir cet objectif, l'approche proposée repose sur deux points clés. Le premier est l'utilisation d'un robot parallèle avec une plateforme configurable. Le second est la miniaturisation de la solution pour que le micromanipulateur ait une taille plus proche de celle de l'objet.

Le manuscrit de thèse présente donc une nouvelle structure robotique miniaturisée pour des applications de prise-dépose de composants à haute vitesse. L'architecture proposée a également un intérêt à l'échelle macroscopique et un prototype à plus grande échelle est présenté. L'ensemble de ce manuscrit permet d'appréhender les contraintes, les performances et les limitations de la réalisation de telles structures.

Le manuscrit se compose d'une introduction, de cinq chapitres et d'une conclusion avec des perspectives pour ces travaux. Le chapitre 1 met en perspective l'objectif de la thèse au regard l'état de l'art actuel. Nous présentons les principaux défis à relever et le positionnement scientifique de cette thèse avant de présenter les différents domaines de la robotique nécessaires au développement de notre structure robotique.

Le chapitre 2 présente les différents modèles et outils pour la modélisation de structures robotiques à articulations souples. Il se compose aussi d'une partie comparative entre les différents modèles afin de fournir des critères de sélection du modèle en fonction des performances visées et des applications recherchées.

Le chapitre 3 présente la conception et la modélisation de la structure robotique miniaturisée spécialement développée pour des applications de prise-dépose à haute vitesse. L'intérêt de conserver plusieurs modèles y est développé. Certains sont plus adaptés à la compréhension mécanique du comportement de la structure et d'autres plus adaptés pour la commande.

Le chapitre 4 introduit la fabrication, l'assemblage et la caractérisation des performances de la structure microrobotique. Une mise en situation expérimentale de prise-dépose à haute cadence a été réalisée. Les limites du robot ont été testées avec des analyses de trajectoires et des saisies d'objets avec des formes et des tailles différentes.

Le chapitre 5 présente une version de la structure robotique à une échelle supérieure en s'inspirant de la structure miniaturisée. Ce chapitre détaille les modifications apportées pour permettre le bon fonctionnement de la structure avec des articulations conventionnelles.

---

# Chapitre 1

## Positionnement scientifique

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction à la microrobotique</b>	4
1.1.1	Micromonde	4
1.1.2	Micro-robots	5
1.1.3	Micromanipulation et micro-assemblage	7
<b>1.2</b>	<b>Enjeux de la thèse</b>	8
1.2.1	Réduction du rapport de taille	10
1.2.2	Intégration de la préhension	10
<b>1.3</b>	<b>Robotique parallèle</b>	12
1.3.1	Robots parallèles remarquables	13
1.3.1.1	La plateforme de Gough-Stewart	13
1.3.1.2	Le robot Delta	14
1.3.2	Miniaturisation	14
1.3.3	Synthèse	15
<b>1.4</b>	<b>Robots parallèles à plateforme configurable</b>	17
1.4.1	Description et définition	17
1.4.2	Utilisation	17
1.4.3	Architectures remarquables	18
1.4.4	Synthèse	19
<b>1.5</b>	<b>Miniaturisation d'articulation</b>	19
1.5.1	Amincissements locaux	20
1.5.2	Déformations continues	20
1.5.3	Articulations souples	22
1.5.4	Synthèse	24
<b>1.6</b>	<b>Actionnement à l'échelle microscopique</b>	24
<b>1.7</b>	<b>Positionnement des travaux au sein de l'équipe de recherche</b>	25
<b>1.8</b>	<b>Conclusion et démarche scientifique</b>	26

## 1.1 INTRODUCTION À LA MICROROBOTIQUE

Les microtechnologies sont omniprésentes dans le monde d'aujourd'hui et représentent un véritable enjeu actuel et futur dans de nombreux domaines. La miniaturisation des composants qui rend nos appareils toujours plus fins et toujours plus performants amène la nécessité de manipulation de microcomposants. On retrouve ce besoin dans les secteurs de l'électronique, de la médecine, de l'aéronautique. La robotique se doit de fournir de nouvelles solutions de manipulation automatisées. Les objets fabriqués, avec des dimensions caractéristiques inférieures au millimètre, nécessitent des outils de manipulation spécifiques pour permettre l'automatisation de la production. En effet, si les opérations sont effectuées à la main, quand cela est possible, la répétabilité, la reproductibilité, la précision et la vitesse de manipulation sont faibles malgré des heures de formations coûteuses [Nan 19]. Il est donc nécessaire de trouver des solutions robotisées, ce qui représente un véritable enjeu aux échelles considérées [Sitti 07, Yang 18].

C'est dans ce contexte que la microrobotique intervient, elle doit permettre de fournir des solutions de manipulation pour les micro-objets. Plusieurs définitions du terme « microrobotique » coexistent suivant que l'on qualifie la taille des objets manipulés ou la taille du robot [Chaillet 13]. Ainsi, dans le premier cas, on considère des robots de taille souvent centimétrique capables de réaliser des opérations sur des objets dont la taille caractéristique est inférieure au millimètre. On parle dans ce cas de micromanipulateurs [El-Badry 12]. Dans le deuxième cas, il s'agit de micro-robots, généralement de taille submillimétrique capables d'évoluer dans des milieux confinés.

La microrobotique intervient dans des applications diverses [Zhang 19] telles que le domaine biomédical [Bogue 08, Soto 20] avec la chirurgie minimalement invasive [Peyron 19, Mattos 21], des applications intracorporelles [Nguyen 20, Min 20, Ahmad 21b], le tri de cellules [Shen 19, Daguerre 20], le positionnement de précision et l'assemblage [Wu 18, Mauze 20], etc. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéresserons principalement à des applications industrielles.

### 1.1.1 Micromonde

Afin de bien comprendre les enjeux liés à la microrobotique, il faut dans un premier temps comprendre les phénomènes qui régissent le micromonde [Bellouard 10]. On désigne le micromonde comme étant l'ensemble des objets biologiques ou technologiques avec des dimensions inférieures à 1 mm. La microrobotique s'intéresse tout naturellement aux applications à ces échelles (voir figure 1.1). Le comportement de ces micro-objets est sensiblement différent de ceux du macromonde [Wautelet 01, Abbott 07]. En effet, la plupart des phénomènes physiques prédominants à l'échelle macroscopique (poids, inertie, etc.) deviennent négligeables aux échelles microscopiques. À titre d'exemple, pour un micro-objet, son poids devient négligeable devant les efforts d'adhésion entre le micro-objet et les doigts d'un

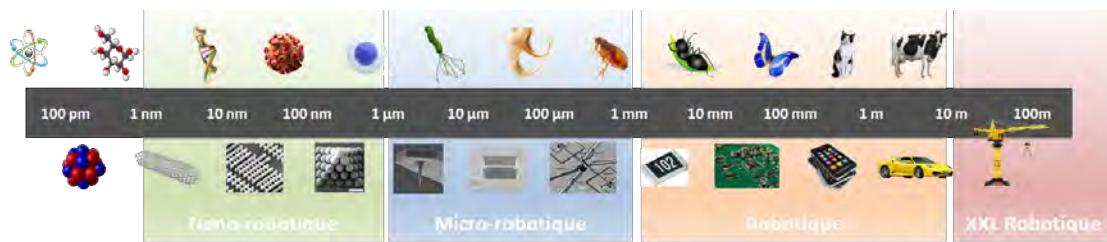


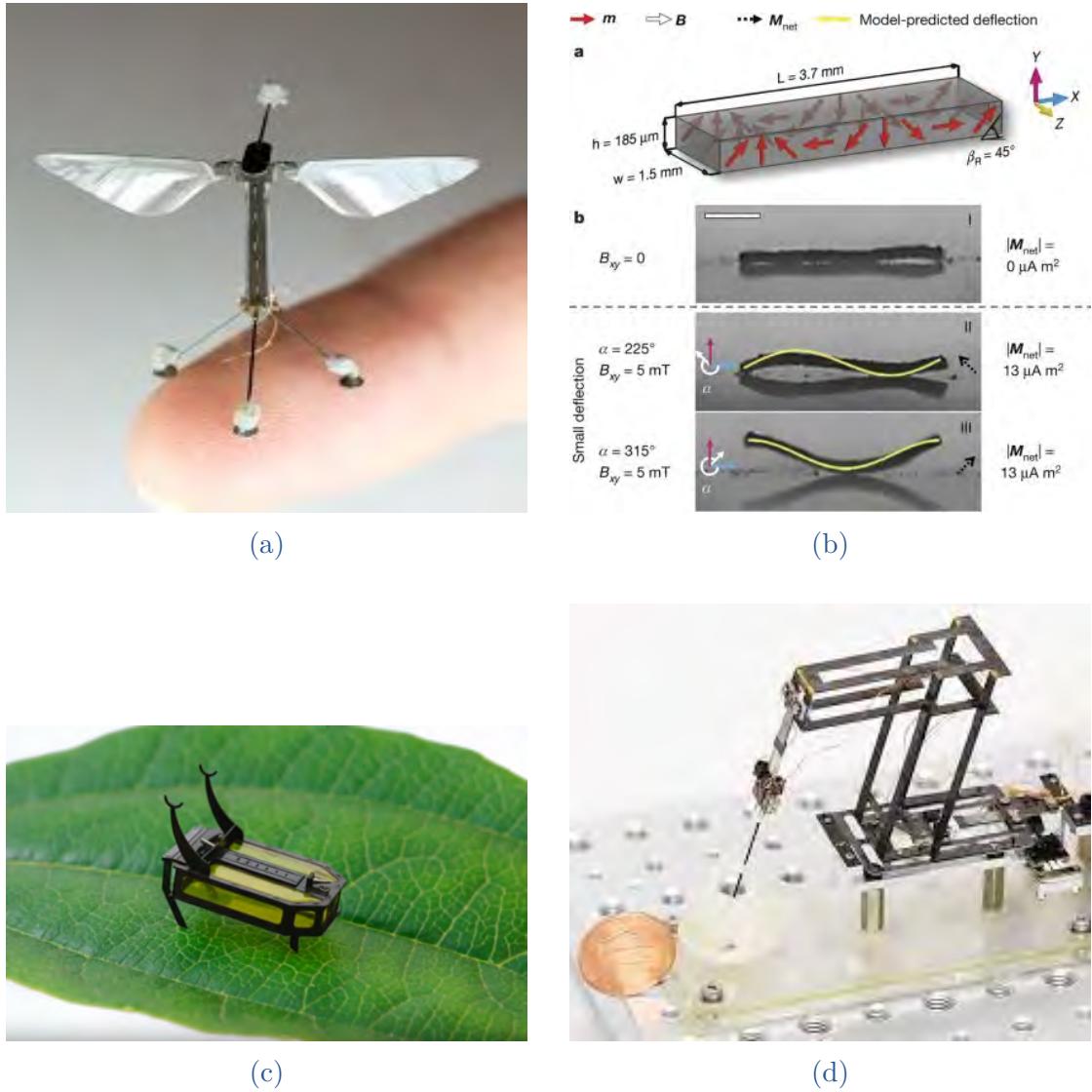
FIGURE 1.1 – Positionnement de la microrobotique et du micromonde.

Le micromonde désigne l'ensemble des objets ayant des dimensions caractéristiques comprises entre 1  $\mu\text{m}$  et 1 mm. La microrobotique (et plus spécialement la micromanipulation) désigne la branche spécifique de la robotique qui s'intéresse à la manipulation de ces micro-objets.

préhenseur. Ce phénomène, dit d'effet d'échelle peut également s'appréhender en observant les différences de comportement entre la fourmi et l'Homme. Une fourmi est capable de soulever 1000 fois son poids, mais est incapable de passer à travers une surface air-liquide. L'Homme quant à lui est capable de franchir ce type de surface, mais est dans l'incapacité de soulever 1000 fois son poids. En conséquence en microrobotique, la probabilité de ne pas réussir à relâcher un objet parce qu'il reste en contact avec le préhenseur du fait de l'adhésion est plus importante que celle de ne pas réussir à le soulever à cause de son poids. La compréhension des phénomènes régissant le micromonde permet aussi de proposer de nouvelles solutions de manipulation, de déplacement qui ne sont applicables qu'à cette échelle.

### 1.1.2 Micro-robots

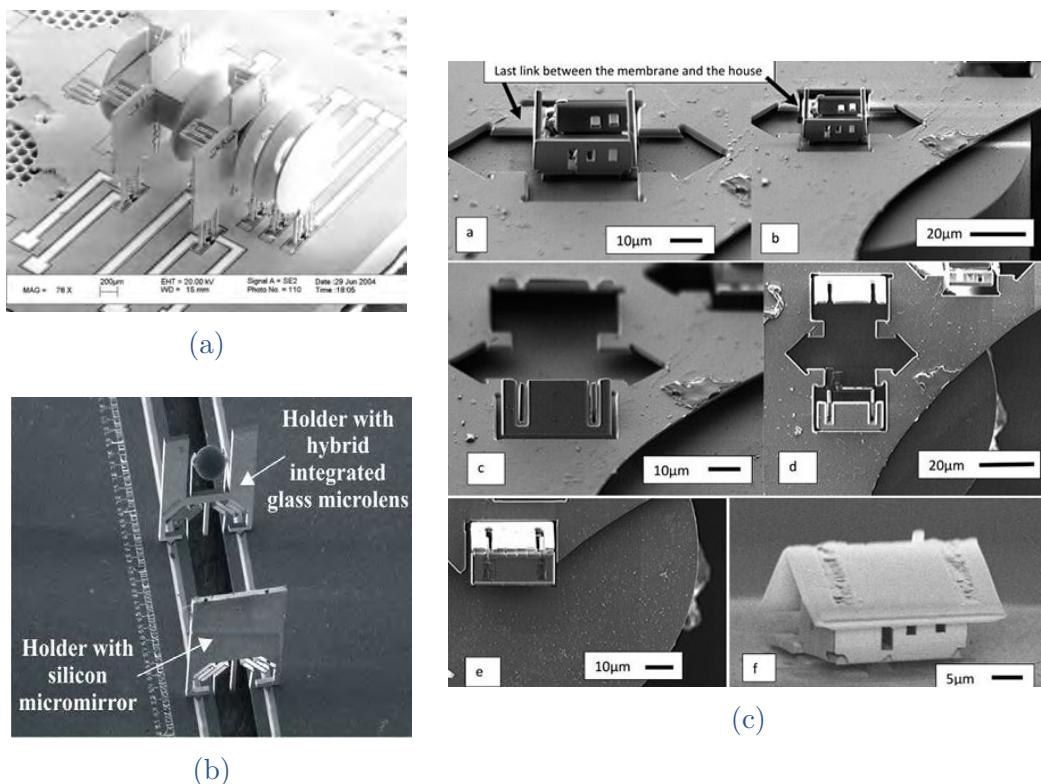
À l'échelle microscopique, il existe une grande diversité de solutions technologiques et conceptuelles. Les travaux sont très variés exploitant des phénomènes physiques différents. Les idées des équipes à travers le monde ont développé des micro-robots tous plus impressionnantes les uns que les autres. La figure 1.2 donne un panel des différents concepts et microrobots marquants des dernières années illustrant la variété des recherches en microrobotique. Parmi ces micro-robots, on trouve des robots miniaturisés aériens [Chen 19] actionnés par des muscles artificiels (figure 1.2a). Un autre aspect très important est le développement des micro-robots magnétiques actionnés à distance [Hu 18] pouvant évoluer dans des environnements complexes et divers (figure 1.2b). Certains robots miniaturisés mobiles sont aujourd'hui capables d'embarquer leur propre source d'énergie [Yang 20]. Ces robots n'ont alors pas besoin de source extérieure pour se mouvoir (figure 1.2c). Enfin, la figure 1.2d montre un concept de robot parallèle miniaturisé pour la chirurgie de l'œil [Suzuki 20]. Ces différents exemples permettent de constater l'existence de divers procédés et techniques permettant de miniaturiser les structures robotiques. Nous retiendrons dans la suite de ce manuscrit la première définition de microrobotique où le préfixe micro caractérise la taille des objets manipulés.



**FIGURE 1.2 – Exemples de micro-robots.** (a) Micro-robot aérien, l'actionnement est intégré mais le robot est alimenté par des fils [Chen 19]. (b) Micro-robot magnétique pouvant se déplacer grâce à des variations du champs magnétique. Les bobines ne sont pas intégrées [Hu 18]. (c) Micro-robot mobile intégrant sa propre énergie et ses actionneurs [Yang 20]. (d) Micromanipulateur conçu pour des tâches de chirurgie de l'œil. L'actionnement est intégré [Suzuki 20].

### 1.1.3 Micromanipulation et micro-assemblage

Les produits manufacturés sont de plus en plus complexes et avec des composants toujours plus petits ce qui requiert de nombreuses étapes d'assemblage [Tisnés 19]. Dans le cas des microsystèmes, il s'agit de tâches complexes de micromanipulation et de micro-assemblage nécessitant des micromanipulateurs pour les réaliser. Pour la micromanipulation, de nombreuses stratégies ont été développées [Gauthier 13], comme la manipulation sans contact direct avec l'objet [Youssefi 19, Mohanty 20] ou la manipulation avec contact [Savia 09, Llewellyn-Evans 20]. Concernant les applications, nous pouvons citer l'assemblage de nanocapteurs intégrant des nanofils de carbone [Yang 16], l'assemblage de MOEMS [Hollis 06] (figure 1.3a), la réalisation de micro-bancs optiques [Clévy 14] (figure 1.3b) ou encore des assemblages en bout de fibre optique comme illustré par la plus petite maison assemblée dans le monde [Rauch 18] (figure 1.3c).



**FIGURE 1.3 – Exemple de tâches de micromanipulation et de micro-assemblage.** (a) Assemblage d'un MOEMS [Hollis 06]. (b) Assemblage d'un micro-banc optique avec des micro-miroirs [Clévy 14]. (c) Assemblage d'une micro-maison en bout de fibre optique [Rauch 18].

Les stations de micro-assemblage sont l'une des solutions permettant de résoudre les problématiques de micro-assemblage et de micromanipulation. Il en existe de nombreuses dans la littérature reposant la plupart du temps sur un ou plusieurs ensembles robotiques (sérieux ou parallèles) [Gauthier 15]. On retrouve

des stations d’assemblage dans le monde industriel (figure 1.4c) et académique. Généralement, les stations de micromanipulation ont des tailles importantes et n’offrent pas des vitesses de manipulation très importantes. Cependant, ces solutions permettent l’obtention d’un grand espace de travail en comparaison avec la taille de l’objet.

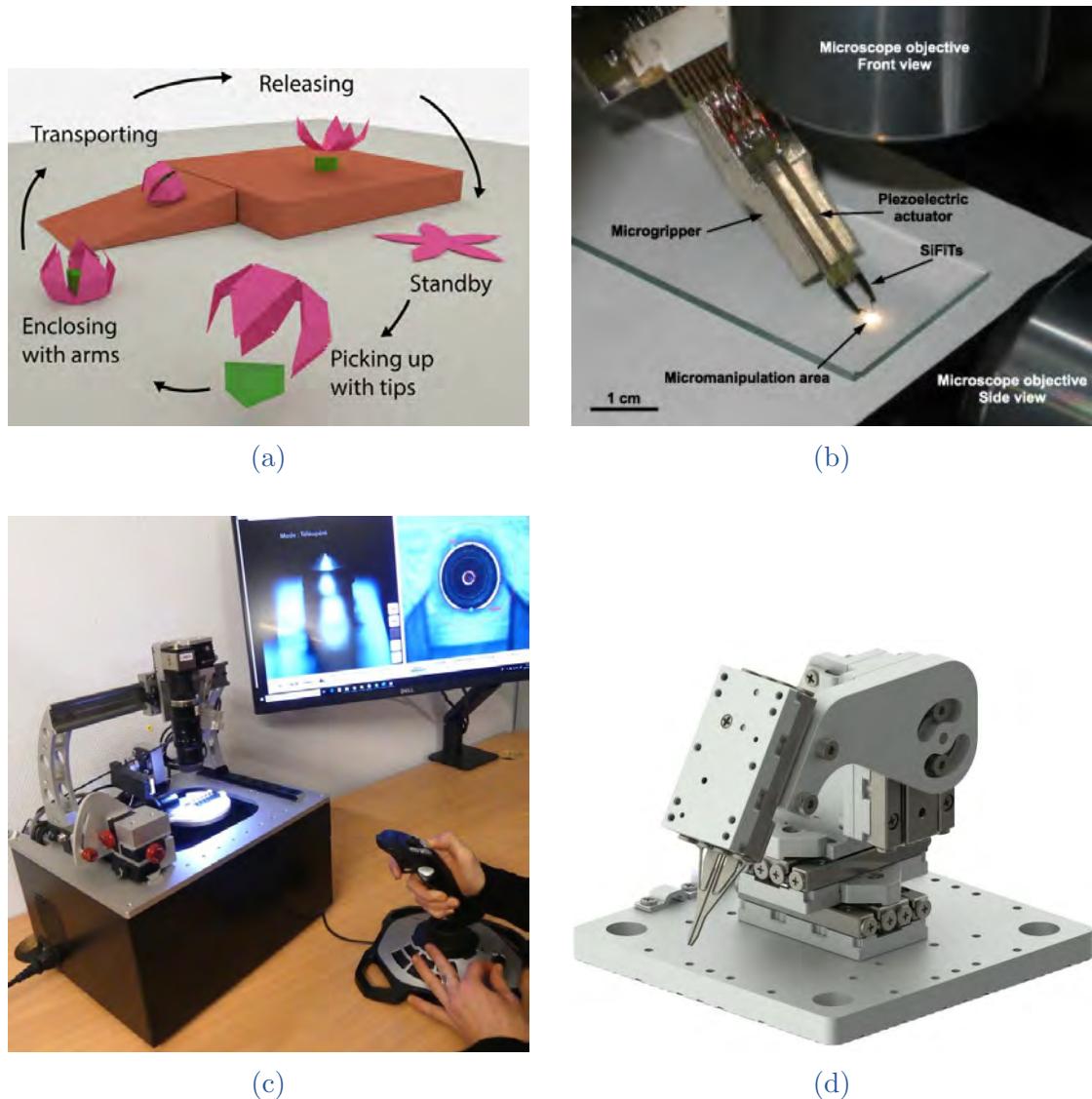
Une opération de micromanipulation et de micro-assemblage nécessite l’utilisation et le développement de micro-préhenseurs (souvent appelés micro-grippers). Dans la catégorie des micro-préhenseurs, on peut distinguer deux grandes classes : d’un côté les préhenseurs mobiles conçus pour aller chercher des objets, les attraper et les transporter vers le point de dépose avant de les relâcher (« unthetered robots » en anglais) [Yin 19] et de l’autre les préhenseurs montés au bout d’une structure robotique ou sur une plateforme de micromanipulation [Hériban 08, Lyu 21].

Parmi les micro-pinces mobiles, on retrouve plusieurs concepts intéressants tant du point de vue des matériaux utilisés que de l’actionnement. Un exemple caractéristique est une micro-pince compliante actionnée par un échauffement thermique via un laser [Ahmad 21a]. La figure 1.4a montre un exemple de système robotique magnétique déformable pouvant agir comme une micro-pince afin de récupérer des objets et de les déplacer [Xu 19]. Cependant, les micro-pinces mobiles ne permettent pas de réaliser des tâches complexes d’assemblage, car les déplacements sont effectués uniquement dans le plan. De plus, cela n’est pas adapté à la problématique de production en série dans le sens où on doit placer la pince là où se trouve le substrat de manipulation à chaque fois. Enfin, les efforts de blocage ne sont généralement pas suffisants pour réaliser une opération d’assemblage. Concrètement les préhenseurs montés au bout d’une structure sont plus adaptés pour des opérations d’assemblage complexes.

Dans le cadre de préhenseurs montés en bout de structure robotique, on retrouve, en particulier des pinces actionnées magnétiquement [Shao 21], des pinces piézoélectriques (figure 1.4b) [Agnus 09]. Ce type de pince est commercialisée aujourd’hui par Percipio Robotics SA. Les pinces commercialisés par SmarAct GmbH (figure 1.4d) utilisent aussi un actionnement piézoélectrique, mais via l’utilisation d’actionneurs stick-slips. Malheureusement, ces solutions restent encombrantes, ajoutent de l’inertie et réduisent ainsi les performances globales des structures. À travers ces exemples, nous avons pu constater que l’intégration de la fonction de préhension dans le cadre de la micromanipulation est un véritable enjeu afin de gagner en vitesse de manipulation, mais aussi en termes de compacité [Li 19].

## 1.2 ENJEUX DE LA THÈSE

La section précédente a permis d’illustrer la diversité des solutions robotiques de micromanipulation. Si les besoins d’améliorations sont nombreux, nous avons choisi dans le cadre de cette thèse de nous focaliser notre attention sur un verrou scientifique présenté ci-dessous.



**FIGURE 1.4 – Exemples de micro-préhenseurs et leur intégration.** (a) Pince mobile magnétique permettant de transporter un objet d'un point à un autre [Xu 19]. (b) Pince piezoélectrique à deux doigts pour la micromanipulation [Agnus 09]. (c) Station de micro-assemblage ChronoGrip intégrant une pince piézoélectrique commercialisée par Percipio Robotics SA. (d) Pince piézoélectrique et son système de positionnement commercialisés par SmarAct GmbH.

À l'échelle micrométrique, les manipulations sont généralement lentes avec peu de cycles par minute. La plupart des systèmes de micromanipulation ont des temps de cycles entre 6 s et 40 s [Zhang 09, Jain 15, Lofroth 19, Xie 09]. Néanmoins, deux articles relatent des déplacements de micro-objets avec une plus haute cadence. Il s'agit de cycles effectués en 960 ms [Avci 14] et 800 ms [Kim 20]. Le constat est donc le suivant, les micro-robots destinés à la micromanipulation atteignent difficilement plus d'un cycle par seconde. Cela est d'autant plus surprenant du fait que les faibles tailles d'objets devraient permettre d'aller plus vite du fait de leur faible inertie. Par ailleurs, il existe des solutions de micromanipulation à haute vitesse avec les machines spéciales qui peuvent atteindre des centaines de cycles par seconde, mais cette performance est obtenue au détriment de la compacité de l'outil de manipulation et de sa consommation énergétique pour des tailles d'objet de l'ordre du millimètre. L'objectif fixé dans cette thèse est de lever le verrou de la cadence de micromanipulation en réduisant le temps de cycle de manière à pouvoir effectuer des opérations de micromanipulation avec une cadence de 10 cycles par seconde soit 600 cycles par minute.

Nous proposons de lever ce verrou en utilisant une double approche : la réduction du rapport de taille entre le robot et l'objet et l'intégration de la fonction de préhension dans la structure robotique.

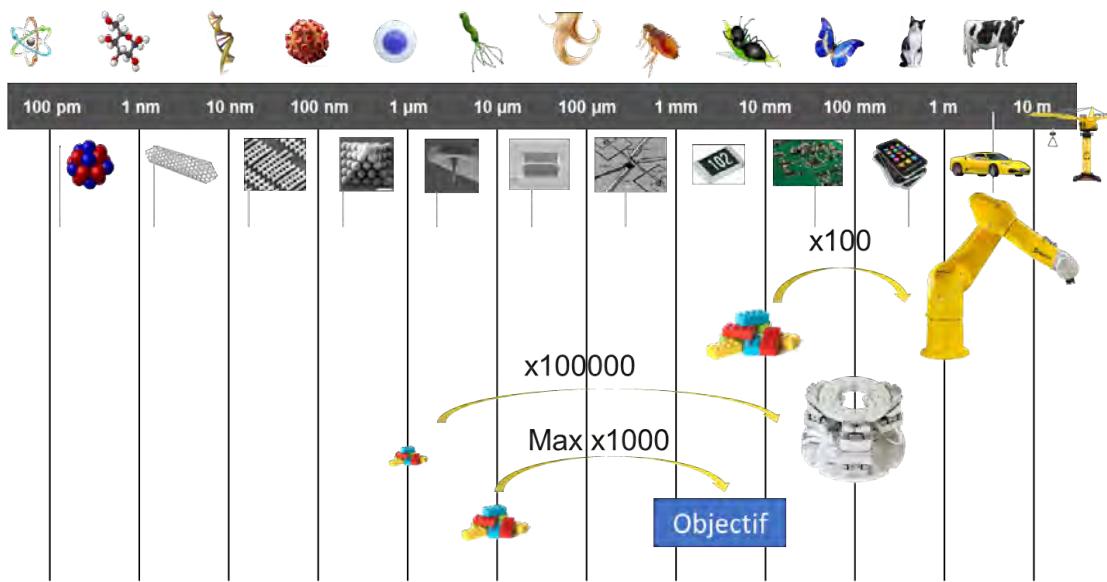
### 1.2.1 Réduction du rapport de taille

La première partie de l'approche consiste à réduire le rapport de taille entre l'objet à manipuler et le manipulateur. Dans certaines études, seule la taille du préhenseur (ou de la structure) est considérée occultant la dimension des actionneurs. Il nous semble plus cohérent de considérer le système robotique dans son ensemble incluant l'effecteur et les actionneurs. Dans le cadre de cette thèse, c'est donc la taille globale du manipulateur que l'on va chercher à réduire de manière à arriver à une solution de micromanipulation compacte.

Généralement pour les manipulateurs industriels, le rapport de taille entre un l'objet manipulé et le manipulateur varie entre 10 et 100 comme le montre la figure 1.5. Actuellement, pour les micromanipulateurs, le rapport est de l'ordre de 10 000 voire 100 000 (c'est-à-dire que pour un objet de 10  $\mu\text{m}$  le manipulateur à une taille caractéristique supérieure à 10 cm et inférieure à 1 m). Par comparaison, cela reviendrait à manipuler un smartphone (avec une taille caractéristique de 10 cm) avec un robot de la taille de la tour Eiffel. Avec un tel rapport de taille, il devient évident que le manipulateur ne peut pas être rapide et précis dans l'exécution de la tâche. L'objectif est donc de se rapprocher d'un rapport de taille compris entre 100 et 1000 afin de gagner en précision, en répétabilité et en cadence de manipulation.

### 1.2.2 Intégration de la préhension

La deuxième partie de l'approche originale de cette thèse concerne l'intégration du préhenseur dans la structure robotique. En effet, de manière usuelle le préhenseur est monté avec son système d'actionnement au bout de la structure robotique.



**FIGURE 1.5 – Rapport de taille entre le manipulateur et l’objet manipulé.** Dans le cadre de la robotique industrielle conventionnelle, le rapport de taille est de l’ordre de 100 tandis qu’en micromanipulation ce rapport atteint 100 000. L’un des objectifs est de réduire le rapport de taille pour atteindre un rapport maximum de 1000.

Cet usage est courant tant en robotique qu’en microrobotique. Il s’agit d’un point crucial à l’échelle micrométrique pour diverses raisons. Premièrement, l’ajout de pièces externes a nécessairement un impact sur le manipulateur puisque la taille totale sera celle du manipulateur et du préhenseur. Deuxièmement, le préhenseur ajoute de la masse en mouvement et de l’inertie. Plus il y a de masse en mouvement moins la cadence pourra être élevée. Enfin, la dernière raison est aussi liée à l’intégration puisque si on ajoute un préhenseur, il faut ajouter l’actionnement, mais aussi tous les fils de connexion permettant de transmettre des signaux. Cela est particulièrement gênant aux petites échelles où les câbles ont des tailles très proches des objets à manipuler et de la structure du robot porteur, impactant son fonctionnement. À l’échelle conventionnelle, des solutions pour éviter l’ajout d’un préhenseur externe ont été développées avec les robots à plateforme configurable.

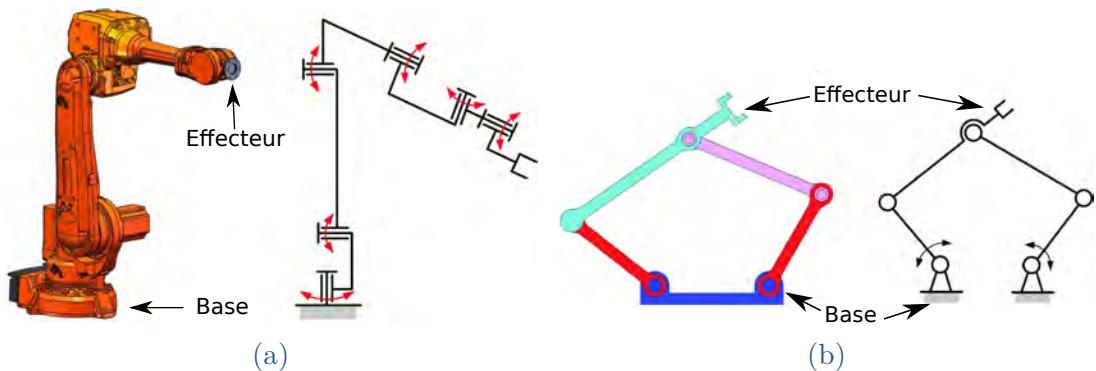
En conclusion, la thèse se base donc sur deux points cruciaux que sont l’intégration de la fonction de préhension au sein de la structure robotique et la réduction du rapport de taille entre le robot et l’objet afin de pouvoir concevoir un système compact et rapide. Cette thèse présente donc une manière de lever le verrou scientifique de la micromanipulation à haute cadence en s’appuyant sur cette double approche.

Pour cela, nous allons nous appuyer sur les différents travaux menés au cours des dernières années. La suite de ce chapitre permet de donner un aperçu des concepts existants que nous allons adapter/utiliser à l’échelle micrométrique. Nous présenterons donc dans un premier temps les grands principes des robots paral-

lèles avant de nous intéresser plus particulièrement au concept de robot parallèle à plateforme configurable pour l'intégration de la fonction de préhension. Nous verrons par la suite les techniques de miniaturisation des articulations mécaniques avant d'aborder les solutions d'actionnement en microrobotique. Cette description de différentes parties de l'état de l'art sera conclue avec l'exposition de la démarche scientifique mise en œuvre dans les chapitres suivants.

### 1.3 ROBOTIQUE PARALLÈLE

Dans le cadre des manipulateurs industriels, on distingue deux types de structures : les robots sériels et les robots parallèles. Conceptuellement ces deux types de robots sont très différents et ne visent pas les mêmes applications [Pandilov 14]. Un robot sériel est composé d'une seule chaîne cinématique ouverte, c'est-à-dire une suite de liaisons mécaniques reliant la base du robot à l'effecteur. Le robot parallèle quant à lui se compose de plusieurs chaînes cinématiques fermées. Les différentes chaînes cinématiques (au moins deux) relient la base à l'effecteur qui est souvent nommé plateforme [Merlet 06b]. La figure 1.6 donne une représentation de cette différence structurelle entre les robots séries et parallèles inspirée du chapitre 1 du livre sur la modélisation de robots parallèles pour la prise-dépose [Wu 21]. Cependant, ces deux types de robots présentent aussi des similitudes telles que la présence de singularités pouvant impacter les performances et l'espace de travail [Merlet 01b].



**FIGURE 1.6 – Les robots manipulateurs industriels.** La classification des robots manipulateurs se compose de deux grandes catégories : (a) les robots séries et (b) les robots parallèles.

Les robots parallèles sont utilisés dans de nombreux domaines de la micromanipulation aux simulateurs de vol en passant par des robots capables de transporter des charges lourdes. Ils sont utilisés dans l'industrie pour effectuer des tâches de prise-dépose (pick-and-place) à haute cadence [Patel 12, Díaz-Rodríguez 18]. Les robots parallèles ont plusieurs avantages qu'exploitent les différentes applications évoquées. Premièrement, ils ont une grande rigidité, grâce à la disposition des

bras en parallèle, ce qui permet d'avoir des robots répétables. Deuxièmement, cela permet d'avoir une masse en mouvement généralement plus faible pour les robots sériels ce qui a potentiellement une incidence sur la précision [Briot 07]. Les pièces en mouvement sont plus légères puisque les actionneurs sont tous localisés à la base du robot. Par conséquent, ces robots sont rapides et capables d'atteindre des accélérations importantes comme c'est le cas dans les projets ARROW [Germain 14] et Objectif100G [Sartori Natal 15]. L'objectif du projet ARROW était de concevoir et de fabriquer des robots capables d'atteindre une accélération de 20g avec une précision absolue inférieure à 20  $\mu\text{m}$  dans un espace de travail large. Concevoir de tels robots nécessite d'étudier les effets dynamiques [Prades 15, Mo 17], la conception du robot [Germain 12, Li 14, Nabat 05] en fonction de la tâche à effectuer [Meng 18, Germain 13]. En contrepartie, les robots parallèles ont des espaces de travail réduits en comparaison avec les robots séries et souffrent souvent d'un manque de dextérité.

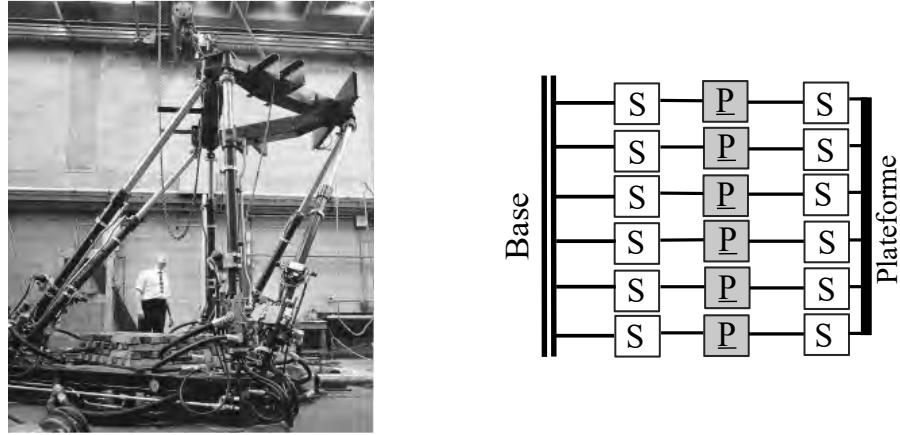
### 1.3.1 Robots parallèles remarquables

Avant de présenter deux des architectures parallèles les plus connues et les plus utilisées aujourd'hui, nous dressons d'abord un très rapide historique. Les mécanismes parallèles ont été introduits dans la recherche scientifique, il y a plus d'un siècle, d'abord par des travaux théoriques en mathématiques sur des octaèdres articulés en 1897 [Bricard 97]. Il faut alors attendre 1928 pour voir les premières traces d'un mécanisme parallèle à plus d'un degré de liberté [Gwinnell 28] puis une autre structure à 3 ddl en 1941 [Pollard 41]. Ces deux mécanismes n'ont jamais été construits ni réellement étudiés. En 1947, la plateforme de Gough-Stewart est introduite puis en 1985, c'est le robot Delta qui est inventé. À partir des années 90, les robots parallèles seront de plus en plus utilisés dans l'industrie et la recherche dans ce domaine va se développer avec notamment l'utilisation du robot Quattro. Différents ouvrages traitent de la naissance de la robotique parallèle et des trois grands moments historiques marqués par les développements de trois robots parallèles très connus : la plateforme de Gough-Stewart, le robot Delta et le robot Quattro (que nous présenterons par la suite en raison de l'une de ces caractéristiques remarquables) [Gasparetto 19b, Gasparetto 19a, Bonev 07].

#### 1.3.1.1 La plateforme de Gough-Stewart

La plateforme de Gough-Stewart est un robot parallèle à 6 ddl dont l'invention a été effectuée en deux temps. Les premières traces remontent à 1954 [Gough 57, Gough 62] où il s'agit d'une machine pour tester les pneus. En 1965, Stewart publie un article sur une plateforme à 6 ddl de liberté [Stewart 65] qui a été développé pour faire un simulateur de vol. Ces deux travaux donnent donc naissance à la plateforme de Gough-Stewart qui est le premier robot parallèle de la famille des hexapodes. Ce robot permet d'obtenir les trois translations et les trois rotations. Ce robot est toujours largement utilisé notamment pour réaliser des simulateurs ou des positionneurs de haute-précision. La figure 1.7 montre les développements

initiaux par Stewart ainsi que le graphe d’agencement de la structure. L’annexe A en page 142 fournit une explication sur la lecture des graphes d’agencement.



**FIGURE 1.7 – Plateforme de Gough-Stewart et son graphe d’agencement.** La photo montre la plateforme de Stewart pour une application de simulateur de vol [Stewart 65]. Le graphe d’agencement permet de constater que la plateforme de Gough-Stewart est fondée sur 6 liaisons glissières actionnées reliées à la base et à la plateforme par des liaisons rotules.

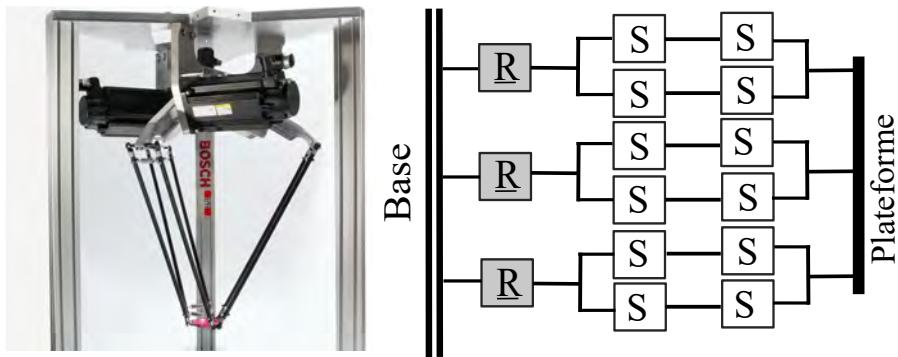
### 1.3.1.2 Le robot Delta

Le deuxième robot parallèle très utilisé est le robot Delta développé par Raymond Clavel en 1985 à l’EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) [Clavel 91, Rey 99]. Ce robot permet de générer des translations à partir de mouvements de rotation des moteurs. Cette structure robotique est très utilisée dans l’industrie pour des applications de prise-dépose et a donné lieu à de nombreux travaux de recherche.

### 1.3.2 Miniaturisation

L’idée de la miniaturisation des structures robotiques parallèles n’est pas récente puisque dès les années 1980 des équipes de recherches travaillent sur des moyens de micromanipulations utilisant des robots parallèles. Nous verrons que le développement de techniques de miniaturisation a permis d’accélérer le processus de miniaturisation lors de la dernière décennie majoritairement. Dès 1997, Pernette propose des solutions de conceptions pour les robots parallèles en microrobotique et notamment la conception des articulations permettant de réduire la taille des manipulateurs [Pernette 97]. En 2001, l’équipe de Merlet propose le MIPS, un robot à trois ddl [Merlet 01a] pour le secteur biomédical.

Cet enjeu de miniaturisation a aussi été identifié par les industriels comme le montre la mise sur le marché de deux robots que sont le PocketDelta d’Asyri (figure 1.9a) et le SmarPod de SmarAct GmbH (figure 1.9b). Le premier est une version du robot Delta avec des dimensions de 200 mm par 200 mm par 120 mm.



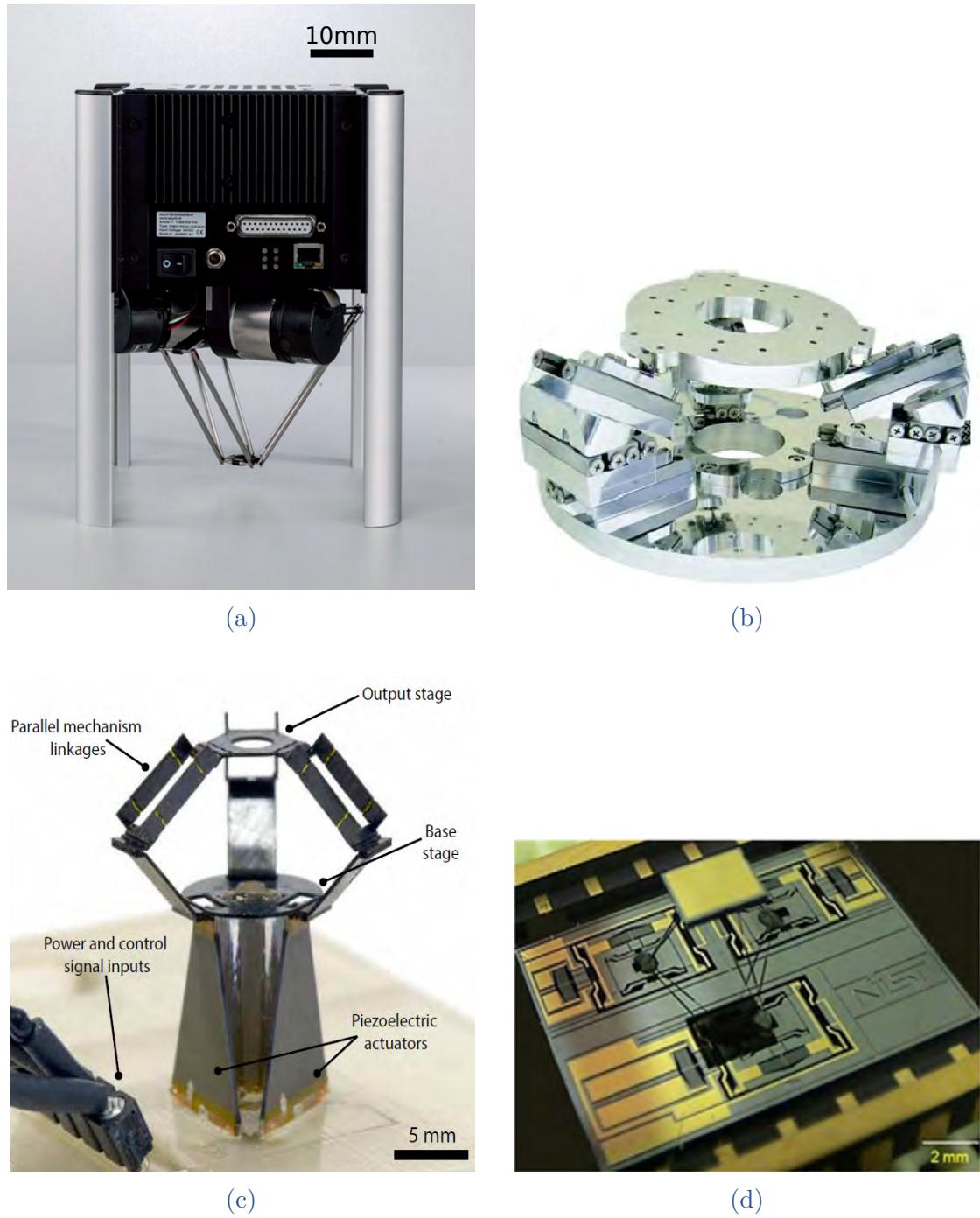
**FIGURE 1.8 – Robot Delta et son graphe d’agencement.** Photographie du robot Delta dans une maquette de démonstration. Le graphe d’agencement permet de voir que le robot Delta est actionnée par des liaisons pivots à la base. Le mouvement est ensuite transmis à la plateforme par trois bras composés de deux chaînes de deux liaisons rotules en parallèle. [Clavel 88]

Ce robot effectue des tâches de prise-dépose avec un temps de cycle de 0,4 s avec une répétabilité de 2  $\mu\text{m}$ . Le SmarPod quant à lui est un hexapode de petite taille capable d’effectuer des positionnements suivant les 6 ddl avec une répétabilité de 200 nm. Ce robot tient dans un cylindre avec un diamètre de 70 mm et une hauteur de 42 mm, pour sa version la plus petite.

Récemment les travaux de recherche ont permis d’aller encore plus loin dans la miniaturisation de ces structures robotiques avec le milliDelta [McClintock 18] et l’hexapode miniature du NIST [Yang 12]. Le milliDelta (figure 1.9c) est un robot delta miniaturisé qui affiche des performances dynamiques impressionnantes avec la réalisation de trajectoires avec des fréquences allant jusqu’à 70 Hz. L’hexapode miniaturisé du NIST (figure 1.9d) est le plus petit hexapode présent dans la littérature.

### 1.3.3 Synthèse

Les robots parallèles sont intéressants dans le cadre de la micromanipulation à haute cadence pour diverses raisons. Tout d’abord, ils sont intrinsèquement plus rigides que les robots séries ce qui permet d’avoir une meilleure précision. De plus, comme les actionneurs sont situés à la base du robot, les performances dynamiques sont meilleures permettant ainsi d’effectuer des opérations avec des cadences élevées. Néanmoins, l’espace de travail est réduit en comparaison avec la taille du robot. La miniaturisation des structures parallèles est un axe de recherche en développement avec notamment la question de la substitution des liaisons mécaniques conventionnelles qui sont difficile à miniaturiser. De manière générale, pour obtenir la fonction de préhension sur un robot parallèle, il est nécessaire de monter un préhenseur sur la plateforme. Cet ajout a pour effet d’ajouter de la masse que le robot va devoir déplacer et donc de l’inertie. En conséquence, les perfor-



**FIGURE 1.9 – Exemples de robots parallèles miniaturisés dans l’industrie et la recherche.** (a) Robot Delta à petit échelle pour la manipulation de composants millimétriques et centimétriques. (b) Robot de taille réduite pour le positionnement de précision à 6ddl. (c) Le milliDelta, robot Delta miniaturisé à articulations souples [McClintock 18]. (d) Plus petit hexapode présent dans la littérature [Yang 12].

mances dynamiques sont dégradées. Finalement, cette contrainte limite aussi la miniaturisation de la structure dans son ensemble.

## 1.4 ROBOTS PARALLÈLES À PLATEFORME CONFIGURABLE

### 1.4.1 Description et définition

Conscients que l'une des principales limitations des robots parallèles est leur manque de dextérité, les chercheurs travaillent à des solutions afin d'augmenter les capacités des robots parallèles. Les différentes équipes de recherches ont réfléchi à une solution permettant d'ajouter des degrés de liberté au bout de la structure parallèle, c'est-à-dire au niveau de la plateforme sans ajouter d'actionneur. L'idée principale est alors de conférer de nouvelles capacités aux robots en évitant au maximum l'ajout de masse en mouvement, mais aussi en essayant de ne pas impacter les dimensions globales des structures. L'une des solutions qui nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de la thèse est l'introduction d'une plateforme configurable en lieu et place de la plateforme rigide qui est usuellement utilisée en bout de robot parallèle [Lambert 15, Lambert 19]. Une nouvelle catégorie de robot parallèle est donc née avec les robots parallèles à plateforme configurable (RPPC).

D'après Mohamed *et al*, la plateforme configurable désigne une chaîne cinématique fermée montée en lieu et place de la plateforme rigide d'un robot parallèle permettant d'obtenir des mouvements supplémentaires avec des actionneurs situés à la base du robot [Mohamed 05]. Par extension, une plateforme peut être considérée comme configurable à partir du moment où elle comporte 1 ddl ou plus contrôlé depuis la base du robot parallèle.

### 1.4.2 Utilisation

Les RPPCs ont été développés dans plusieurs buts et pour obtenir plusieurs types de mouvements supplémentaires différents. Les premiers travaux sur ce type de structure datent du début des années 1990 avec le robot H4 de Pierrot [Pierrot 99]. Le but était alors de récupérer une rotation autour de l'axe Z. La recherche de ce degré de liberté souvent appelé mouvement de Schoenflies concentre une grande partie des travaux sur les RPPCs [Li 09, Schreiber 19]. Ce mouvement de rotation est, en effet, très recherché notamment pour les applications de prise-dépose. Pour cette tache spécifique, il est nécessaire de gérer l'orientation de dépose de l'objet manipulé. La seule obtention de ce nouveau degré de liberté ne résout pas entièrement le problème puisque si l'on souhaite utiliser un préhenseur à doigts, il est toujours nécessaire de l'ajouter. Néanmoins, dans le cas de préhension avec des ventouses ou des buses à dépression, ce système est adapté et permet d'effectuer des cycles de prise-dépose à très haute vitesse.

Au-delà de ce mouvement spécifique, les RPPCs permettent d'obtenir des ddl autres. Un domaine dans lequel l'ajout de ddl a un intérêt particulier est celui des interfaces haptiques [Lambert 20, Jin 21]. En effet, les RPPCs permettent alors de reproduire au mieux les sensations des déplacements de l'objet simulé pour la commande à distance (téléopération). Dans le cas de manipulateurs industriels, les 6 ddl usuels peuvent être suffisants. Dans le cas d'applications médicales ou de téléopérations complexes, l'ajout de déplacements et de fonctionnalités supplémentaires est utile. Des interfaces haptiques avec ces fonctionnalités et des architectures avec plus de 6 ddl ont été proposées [Lambert 15].

La dernière utilisation intéressante de ce concept de RPPCs dans le cadre de cette thèse est celle permettant d'intégrer la fonction de préhension. L'idée est de concevoir une plateforme sur laquelle les deux doigts de la pince seront montés. Le contrôle de ses deux doigts est alors réalisé via la plateforme configurable et donc par les actionneurs situés à la base du robot. L'avantage est qu'il n'y a plus besoin de monter des actionneurs supplémentaires au bout du robot parallèle et il n'y a pas non plus de câblage. Plusieurs structures ont alors été proposées telles que des poignets à 4 ddl (3 rotations + préhension) [Haouas 16], des robots à 7 ddl (3 rotations + 3 translations + préhension) [Haouas 18b]. Ce concept de plateforme configurable a aussi donné naissance à des robots avec des fonctionnalités parfois surprenantes comme le robot avec ses trois effecteurs proposé par Gallardo-Alvarado [Gallardo-Alvarado 20].

### 1.4.3 Architectures remarquables

Parmi les architectures remarquables intégrant une plateforme configurable, on trouve l'un des premiers robots introduisant ce concept à savoir le robot H4 [Pierrot 99]. L'idée de départ consiste à ajouter la capacité de rotation de l'effecteur autour de l'axe vertical pour des tâches de prise-dépose. Ce robot a eu plusieurs évolutions avec le Par4 [Nabat 05] et a finalement conduit à la vente d'un produit industriel commercialisé sous le nom de Quattro par Adept/Omron [Pierrot 08]. La figure 1.10 donne le graphe d'agencement du robot accompagné d'une photographie de la version commercialisée. Le robot Quattro est actuellement le robot de prise-dépose le plus rapide avec la réalisation de 200 cycles par minute.

Un deuxième exemple de robot à plateforme configurable remarquable est un robot à 8 ddl développé par Haouas [Haouas 19]. La figure 1.11 fournit le graphe d'agencement du robot accompagné d'une photographie du prototype. Ce robot illustre les possibilités qu'offre l'intégration d'une plateforme configurable tant en termes de compacité de systèmes que de capacité. En effet, ce robot permet de réaliser les 6 déplacements usuels (les 3 translations et les 3 rotations) plus le contrôle de l'ouverture / fermeture d'une pince ainsi que l'alignement des doigts. Cette dernière propriété est très intéressante pour des applications de micromanipulation où le moindre défaut d'alignement des doigts peut provoquer un cisaillement de l'objet.

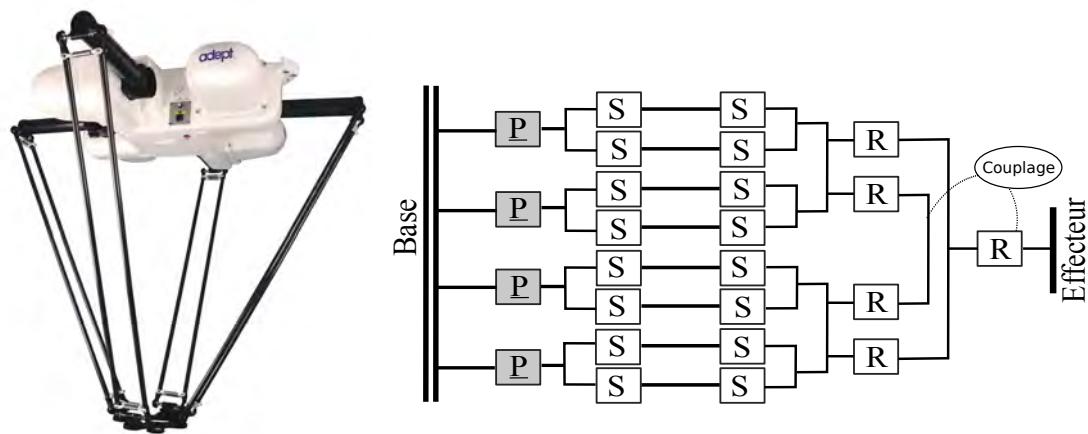


FIGURE 1.10 – Robot parallèle Quattro. Photographie du robot Quattro commercialisé et graphe d'agencement de la structure robotique [Nabat 05].

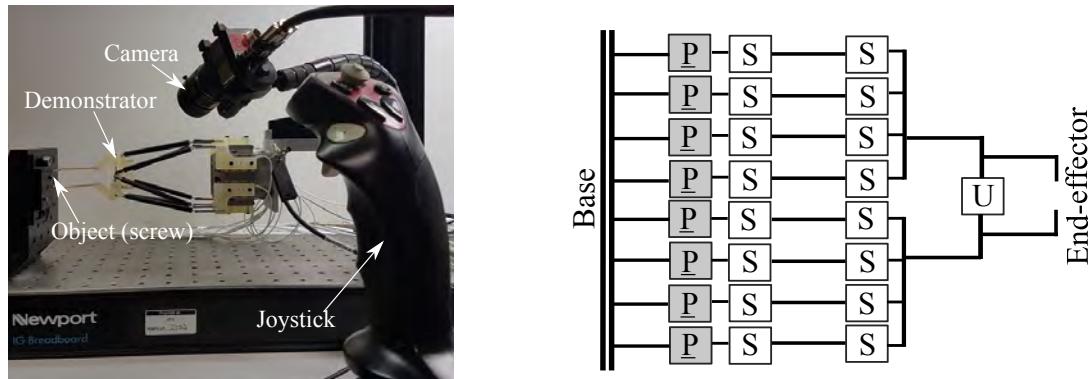


FIGURE 1.11 – Robot parallèle à 8ddl (3 rotations + 3 translations + préhension + alignement des doigts). Photographie du prototype et son graphe d'agencement [Haouas 18b].

#### 1.4.4 Synthèse

Les robots parallèles à plateforme configurable permettent d'ajouter des capacités aux robots parallèles au niveau de la plateforme. La fonctionnalité qui nous intéresse particulièrement est la fonction de préhension intégrée. La solution de la plateforme configurable permet d'avoir un préhenseur en limitant au maximum l'ajout de masse en mouvement et donc d'inertie.

### 1.5 MINIATURISATION D'ARTICULATION

Le principal frein à la miniaturisation des structures et par extension des robots parallèles est en grande partie lié aux difficultés de miniaturisation des liaisons mécaniques. En effet, les liaisons mécaniques (rotule mécanique, par exemple) telles

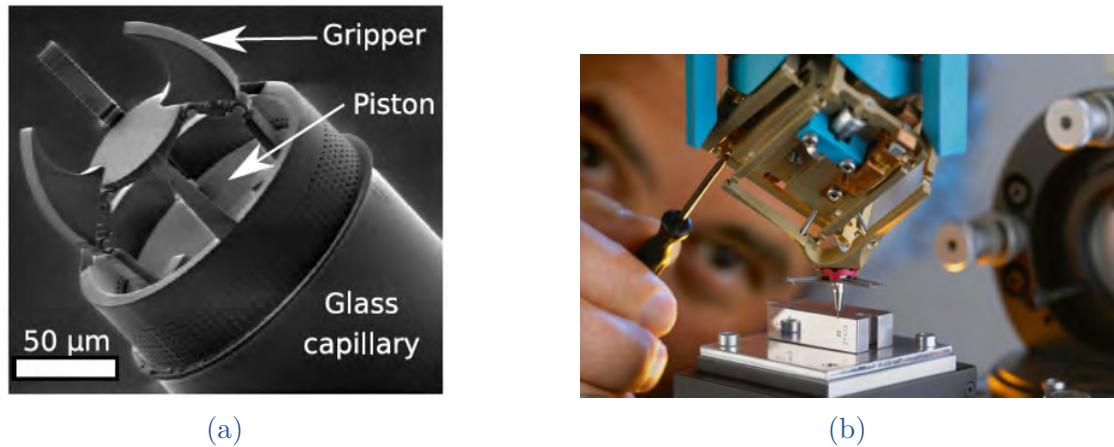
qu'elles existent aux échelles standards ne sont pas facilement réalisables aux petites échelles. Il est donc nécessaire de trouver une autre manière de reproduire les mouvements autorisés par les liaisons mécaniques.

### 1.5.1 Amincissements locaux

La première solution est l'utilisation d'amincissements locaux en lieu et place de l'articulation conventionnelle [Howell 13, Farhadi Macheckposhti 15]. L'idée est d'utiliser le même matériau dans l'ensemble de la structure mécanique et ainsi d'avoir une structure mécanique monolithique. La fabrication de la structure ne nécessite donc pas d'assemblage après la fabrication permettant en théorie de descendre plus facilement en échelle. La figure 1.12a montre comment les amincissements ont permis de réaliser une pince de toute petite dimension [Barbot 20]. Tout comme pour une liaison conventionnelle la transmission du mouvement est localisée. Le type de liaison est obtenu en changeant le rapport de forme, les propriétés mécaniques intrinsèques étant les mêmes dans l'ensemble de la structure, entre les parties que l'on souhaite « rigide » et les parties capables de se déformer afin de transmettre le mouvement [Lobontiu 02]. Un des avantages de ce type de liaison est que par nature il n'y a ni frottements, ni jeu et ni besoin de lubrifiants. La répétabilité et la précision de positionnement de ce genre de structures sont souvent bonnes, ce qui fait que ces structures sont utilisées comme nanopositionneurs [Kim 12]. La figure 1.12b montre un positionneur parallèle à 3 ddl (les 3 translations) de haute précision développé par Mecartex. La contrepartie principale est que les courses sont limitées et donc généralement peu adaptées pour concevoir des robots parallèles avec des espaces de travail assez larges en comparaison avec la taille des objets à manipuler. À noter que la modélisation peut s'avérer complexe, notamment, car le centre de rotation (à défaut le centre de la liaison) n'est pas nécessairement fixe [Linß 19].

### 1.5.2 Déformations continues

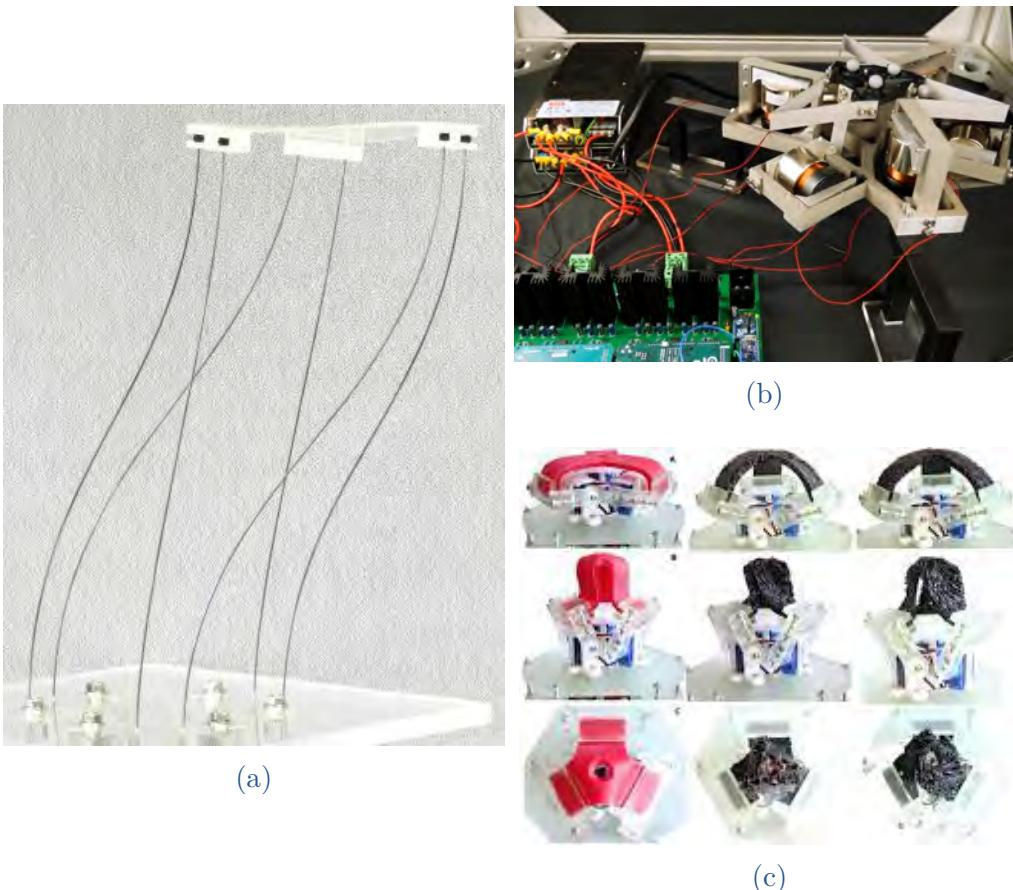
Une manière d'obtenir des courses plus importantes est d'utiliser des déformations continues à la place des articulations pour la transmission de mouvements. L'utilisation des déformations continues est un principe transposable à la robotique standard et à la microrobotique. Une première technique est l'utilisation de jambes flexibles avec de petites déformations [Awtar 21, Yang 22] comme illustré dans l'exemple de la figure 1.13b. Dans le cadre de la robotique parallèle, l'utilisation des déformations continues a donné naissance à un nouveau type de robots : les robots parallèles continus [Bryson 14]. La figure 1.13a montre un robot continu parallèle dans une configuration peu déformée. En effet, ce robot est capable de se retrouver dans des configurations nettement plus déformées grâce à ses jambes continûment déformables. Par conséquent, les espaces de travail sont plus grands que ceux obtenus avec des déformations locales. La modélisation de ces robots passe par la théorie des poutres et notamment l'utilisation de la théorie de Cosserat [Till 19]. L'utilisation de poutres continûment déformables à la



**FIGURE 1.12 – Mécanismes avec des articulations issues amincissement locaux.** (a) Pröhenseur miniature avec des amincissements locaux pour la manipulation par capillarité [Barbot 20]. (b) Structure mécanique parallèle pour un positionnement de précision développé par Mecartex.

place des liaisons standards permet d'améliorer l'espace de travail [Gallardo 21]. De plus, les performances de répétabilités ne sont pas nécessairement impactées puisque Mauzé [Mauze 20] a montré la capacité d'avoir une répétabilité de l'ordre du nanomètre avec un robot continu et une justesse de positionnement de l'ordre du micromètre [Mauze 21]. Le principal défaut est que l'intégration des éléments continûment déformables nécessite une modélisation souvent complexe pour la commande.

Une autre solution pour résoudre les problèmes liés à l'assemblage est l'utilisation de matériaux souples. Dans ce cas, on parle généralement de robotique souple [Majidi 14]. Cette solution est au croisement de la méthode des amincissement locaux et des éléments continûment déformables. En effet, les robots souples sont souvent monolithiques et sont capables de grandes déformations. Le choix des matériaux peut permettre de contrôler les déformations obtenues. La figure 1.13c montre un exemple de robots souples dont les déformations et les déplacements sont contrôlés par l'utilisation de matériaux anisotropiques [Vanneste 20]. De plus, grâce aux procédés de fabrication, la miniaturisation semble possible notamment avec l'utilisation de nouvelles machines telles que la micro impression 3D à deux photons (Nanoscribe) [Koepele 20] et l'usinage chimique tridimensionnel (Femto-print) [Bellouard 15]. L'utilisation de matériaux souples permet aussi de manipuler des objets fragiles en limitant les risques de les abîmer [Jia 19]. Une fois de plus, la modélisation est complexe et souvent très coûteuse en temps de calcul [Schegg 22]. Que ce soit avec des matériaux rigides ou souples, l'utilisation de ce type de liaison est difficile à mettre en œuvre dans le cas d'une plateforme configurable.



**FIGURE 1.13 – Exemples de robots à articulations continues.** (a) Robot parallèle continu [Bryson 14]. (b) Robot parallèles à jambes compliantes [Yang 22]. (c) Robot parallèle souple et l'utilisation de matériau anisotropique pour obtenir certains mouvements [Vanneste 20].

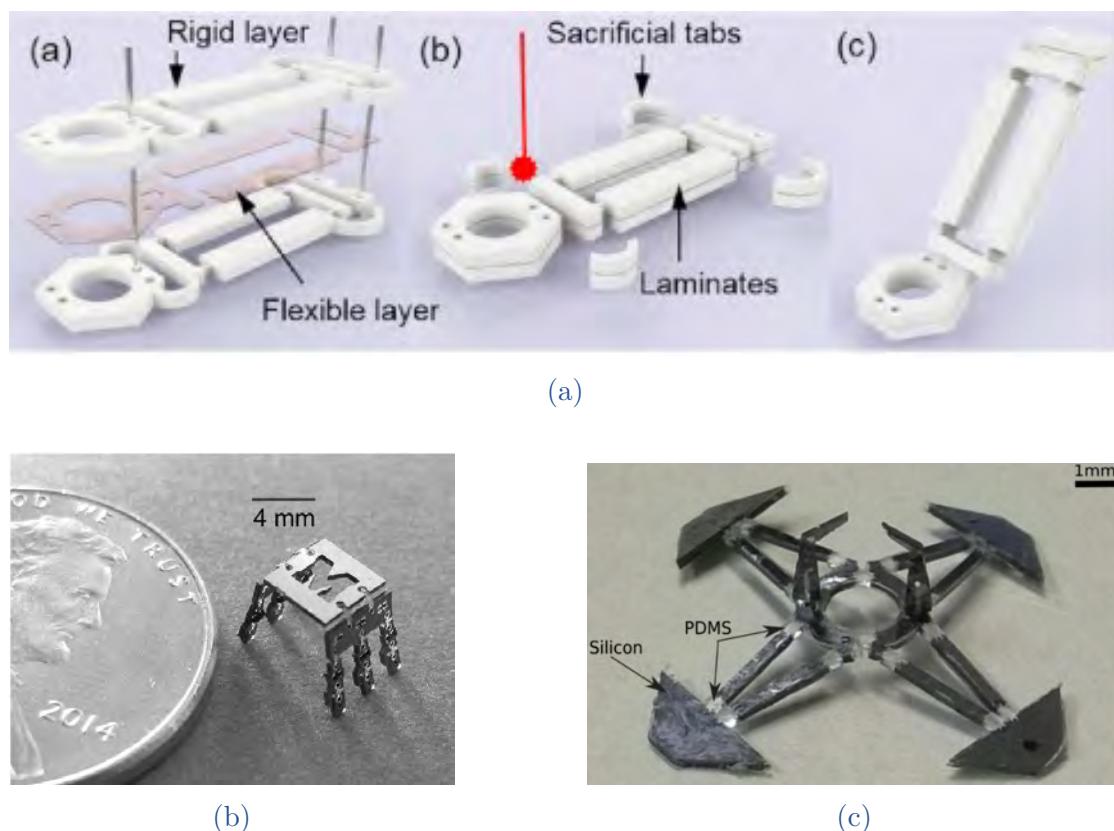
### 1.5.3 Articulations souples

Une autre solution pour la miniaturisation des liaisons mécaniques est l'utilisation d'articulations souples. Ce type d'articulation propose une déformation plus localisée que dans le cas des déformations continues. La transmission de mouvement est obtenue grâce à la différence de propriétés mécaniques, notamment le module de Young, entre deux matériaux. Dans la littérature, on distingue deux grands types d'articulations souples pour la réalisation de robots miniaturisés.

Les premières sont des articulations qui sont fabriquées avec un procédé de laminage [Correa 16]. Il s'agit d'une feuille de matériau souple laminé entre deux feuilles de matériau rigide. Les deux couches rigides sont enlevées dans les zones où l'on souhaite réaliser l'articulation souple comme l'illustre la figure 1.14a. De nombreux robots miniaturisés reposent sur ce principe [McClintock 18, Suzuki 20, Mintchev 19, Miskin 20]. Le principal inconvénient de ces articulations est le rapport entre le nombre de degrés de liberté et l'encombrement de l'articulation. En

effet, cette technique est plus adaptée pour la réalisation de liaisons pivots que pour des liaisons rotules. La réalisation d'une liaison rotule nécessite ainsi de placer en série plusieurs liaisons pivots.

Le deuxième type d'articulation est une structure hybride souple / rigide où l'articulation est un élément en matériau souple intégré dans une structure rigide [Vogtmann 13, DeMario 18]. Il est possible de concevoir des articulations avec une grande variété de géométrie permettant la réalisation d'articulations pivots ou rotules dans un espace réduit. La fabrication de ce type d'articulation peut se faire principalement par photolithographie [Zhang 21] ou par moulage des articulations dans la structure rigide [Haouas 17]. Ce procédé a aussi été utilisé dans des structures mécaniques assez simples et pour les jambes d'un robot mobile (figure 1.14b) [Vogtmann 17]. Le premier mécanisme d'un robot parallèle à utiliser ce type d'articulation souple (figure 1.14c) a été développé par Wissem Haouas dans le cadre sa thèse.



**FIGURE 1.14 – Utilisation des articulations souples.** (a) Principe de fonctionnement et exemple de réalisation des articulations souples par laminage [Correa 16]. (b) Mécanisme pour un robot mobile avec des articulations souples [Vogtmann 17]. Mécanisme parallèle à articulations souples [Haouas 18a].

La modélisation des robots à articulations souples est une problématique ouverte puisqu'il s'agit de mécanismes hybrides avec des parties rigides et des parties

souples régies par les mêmes lois de déformations de la mécanique mais avec un ou plusieurs ordres de grandeur de différence sur le module de Young [Lin 21].

#### 1.5.4 Synthèse

La littérature propose différentes alternatives aux liaisons mécaniques standards que ce soit en ayant des déformations localisées ou continus. Chacune de ces solutions présente des avantages et des inconvénients. Dans le cadre de robots avec des grands déplacements, il semble préférable d'utiliser les articulations continûment déformables ou souples. Afin de conserver la rigidité de mécanismes parallèles et de pouvoir intégrer une plateforme configurable, le choix le plus intéressant que nous retenons dans cette thèse est celui des articulations souples.

### 1.6 ACTIONNEMENT À L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE

Les possibilités d'actionnement sont nombreuses à l'échelle microscopique [Dario 92]. La plupart des principes utilisés usuellement dans la robotique n'est que très peu adaptée. La recherche d'actionnement miniaturisé est importante quand la taille globale du système est un des critères les plus importants. De nombreux systèmes se basent donc sur des actionneurs réduits ou encore des systèmes de guidage dit « stick-slip ». Si l'on cherche à miniaturiser l'actionnement dans le but d'avoir un système globalement plus compact alors les solutions d'actionnement sont très différentes. Nous reportons ici un bref état de l'art des méthodes qui nous a permis de choisir la technologie des actionneurs dans le cadre de cette thèse.

La première solution, très en vogue, actuellement, est l'actionnement magnétique. Il permet d'actionner des micro-objets et de contrôler à la fois la vitesse de déplacement et l'orientation. Ce système d'actionnement est très largement utilisé pour des robots mobiles [Li 18, Xie 19] mais finalement très peu pour des robots parallèles. Certains travaux proposent des micro-robots mobiles munis d'une pince magnétique embarquée ayant la capacité de saisir un objet, de déplacer la pince puis de le relâcher. Les problématiques scientifiques soulevées sont liées à la synthèse de commandes permettant de commander tous les ddl indépendamment. Sur le plan de l'encombrement, le système d'actionnement qui génère le champ magnétique est très encombrant au regard de la taille de l'effecteur.

Une des variantes impliquant l'actionnement magnétique est l'utilisation de voice coil [Black 93, Feng 11]. Si ces actionneurs permettent de résoudre la problématique de vitesse d'actionnement et donc par extension de manipulation, ils ne permettent l'obtention de forces de blocage suffisantes surtout s'ils sont miniaturisés.

La deuxième grande solution pour l'actionnement à petite échelle est l'actionnement piézoélectrique [Uchino 08, Gao 20]. Ce type d'actionnement repose sur l'effet piézoélectrique inverse qui conduit un matériau piézoélectrique à se déformer sous l'effet d'une tension électrique. Les actionneurs piézoélectriques peuvent

prendre plusieurs formes. L'une des plus répandues est le stack piézoélectrique. Il s'agit d'un empilement de couches de matériaux piézoélectrique qui va s'allonger ou se contracter sous l'effet de la tension. Cette solution permet d'avoir un actionnement rapide et une force de blocage importante, mais avec une course de déplacement faible. Une autre solution est d'avoir de fines couches de matériau avec des polarités différentes afin d'obtenir un mouvement de flexion de l'actionneur [Ballas 07]. Ces actionneurs sont tout aussi rapides et l'encombrement est réduit et les performances mécaniques très similaires. Dans ce cas, la course est plus importante que pour un stack piézoélectrique, mais la force de blocage est plus faible.

À l'échelle micrométrique et pour la microrobotique, il existe des solutions diverses d'actionnements exploitant des phénomènes physiques différents de l'échelle conventionnelle. Parmi ces solutions, on peut citer l'actionnement par thermocapilarité [Piñan Basualdo 21] qui permet de déplacer des micro-objets à l'interface air-liquide. Il existe aussi des applications d'actionnement acoustique [Kaynak 20], par diélectrophorèse [Lefevre 22], par des phénomène optothermiques [Ahmad 22] ou encore basé sur le pH [Chen 20]. On trouve également des actionneurs électrostatiques [Mohand-Ousaid 21] et thermiques [Belfiore 21]. Les différents solutions présentées ne permettent pas de remplir nos trois conditions que sont la miniaturisation de l'actionnement dans sa globalité, la course d'actionnement et la force de blocage assez élevée. Une grande partie des actionneurs pour la microrobotique est décrite dans le chapitre 2 du livre de Chaillet *et al.* [Chaillet 08].

En conclusion, les solutions d'actionnement sont nombreuses pour les structures miniaturisées. Cependant, la contrainte forte pour les actionneurs est la capacité de miniaturisation qui est souvent difficile à obtenir. Par exemple, dans le cadre de l'actionnement magnétique, les actionneurs nécessitent des bobines qui sont des éléments imposants et limitants pour la miniaturisation de la solution. Nous avons choisi d'utiliser les actionneurs piézoélectriques en flexion car c'est un bon compromis entre vitesse, course d'actionnement et encombrement.

## 1.7 POSITIONNEMENT DES TRAVAUX AU SEIN DE L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

Le projet de la thèse s'inscrit dans les travaux menés par l'équipe de recherche depuis quelques années. Le projet a été initié avec le projet uRoPa qui avait pour but la conception de robots parallèles miniaturisés. À la suite de ce premier projet a commencé le projet ANR MiniSoRo (Miniaturized Soft Robots) en 2020.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de la thèse de Wissem Haouas [Haouas 18a] soutenue en 2018. Son travail portait sur la conception de robots parallèles à plateforme configurable pour la manipulation dextre. Dans le cadre de sa thèse, il a développé plusieurs structures robotiques à l'échelle macroscopique. Les premiers résultats portent sur la réalisation d'un poignet à 4 ddl (3 rotations + préhension)

[Haouas 16]. Les travaux suivants ont permis la réalisation et l'étude d'un manipulateur à 7 ddl (3 translations + 3 rotations + préhension) [Haouas 18b] et d'un manipulateur à 8 ddl (3 translations + 3 rotations + préhension + alignement des doigts) [Haouas 19]. La dernière partie de ces travaux porte sur la mise au point d'un nouveau procédé de micro-fabrication permettant l'intégration d'articulations souples au sein d'une structure en Silicium [Haouas 17]. Wissem Haouas a pu réaliser une preuve de concept d'un robot miniaturisé avec une plateforme configurable, mais sans le caractériser.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la continuité des résultats obtenus par Haouas. L'objectif est de réaliser et de caractériser un micromanipulateur à haute cadence en exploitant une partie des savoir faire acquis précédemment par l'équipe.

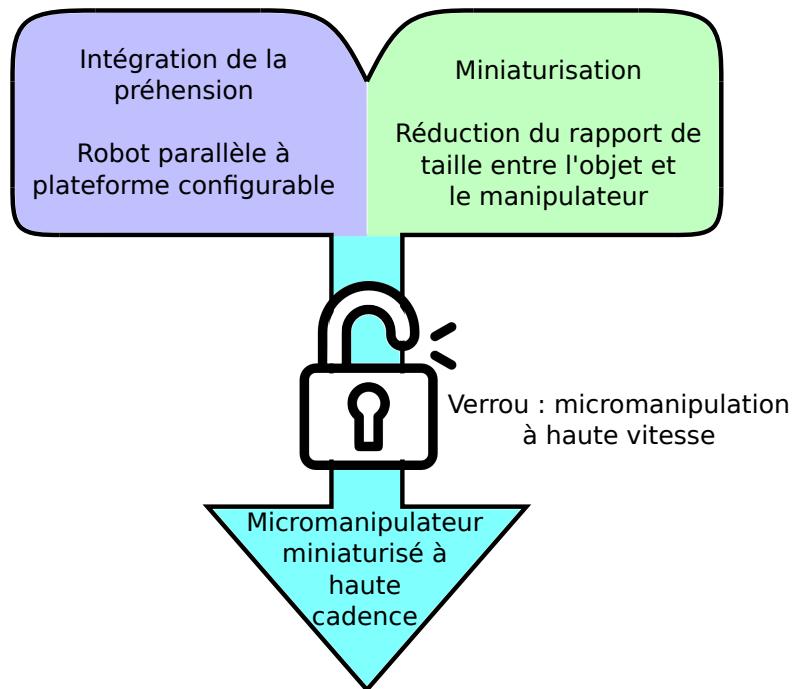
## 1.8 CONCLUSION ET DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

Afin de proposer une structure robotique permettant de lever le verrou de la cadence de manipulation des micro-objets, nous proposons d'utiliser une double approche. Cette approche s'articule autour de l'utilisation de la robotique parallèle à plateforme configurable pour l'intégration de la préhension et de la réduction du rapport de taille entre l'objet et le manipulateur (voir figure 1.15).

En détail, la première partie de l'approche est l'utilisation d'une structure parallèle pour ces propriétés bien connues en comparaison avec les structures sérielles. En effet, l'inertie est généralement moins importante, ce qui permet d'être plus rapide. De plus, la structure est plus rigide, ce qui permet d'obtenir une meilleure répétabilité de positionnement. Avec les structures parallèles, l'ensemble de l'actionnement peut être déporté à la base de la structure robotique ce qui permet d'avoir de meilleures performances dynamiques. L'une des structures robotiques représentant le mieux ces bénéfices est l'architecture robotique Delta.

L'utilisation d'une plateforme configurable permettra l'intégration de la préhension dans les structures microrobotiques parallèles. En effet, il serait possible de connecter une micro-pince sur l'effecteur, mais cela résulterait en l'augmentation de manière non-négligeable de l'inertie de la partie mobile du robot. Pour passer outre ces différents désagréments, nous nous sommes intéressés à ce qui existe à l'échelle macroscopique et notamment aux robots parallèles à plateforme configurable. Ces robots ont la particularité d'avoir des déplacements supplémentaires actionnés directement depuis la base et en lien avec les autres déplacements. Nous allons miniaturiser ce principe pour obtenir le contrôle d'une pince intégrée.

La deuxième partie de l'approche consiste à réduire la taille de la structure. L'idée est d'avoir des rapports de dimensions plus favorables en comparaison aux rapports actuels en ayant pour objectif final les rapports proches de la robotique usuelle (i.e. robotique industrielle). Cependant, pour miniaturiser la structure, la fabrication des articulations mécaniques devient très complexe, voire impossible



**FIGURE 1.15 – Résumé graphique de l’objectif de la thèse et de la démarche mise en œuvre.** L’objectif de la thèse est de lever le verrou scientifique de la cadence de micromanipulation. Pour cela, nous allons proposer un micromanipulateur miniaturisé pour effectuer des tâches de micromanipulation à haute cadence. L’approche de résolution se base sur l’intégration de la préhension et les articulations souples.

sous une certaine taille avec les technologies conventionnelles de fabrication. Pour permettre la miniaturisation du mécanisme, nous avons décidé d’utiliser des articulations souples en PDMS moulées dans une structure en Silicium. Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation de structures mécaniques à articulations souples pour de la commande à haute cadence.



---

# Chapitre 2

## Modélisation des robots à articulations souples

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	31
<b>2.2</b>	<b>Présentation du problème</b>	31
2.2.1	Mise en contexte	31
2.2.2	Structure considérée dans le cadre de l'étude	32
2.2.3	Hypothèses et contraintes de l'étude	34
<b>2.3</b>	<b>Présentation des modèles et outils</b>	35
2.3.1	Méthode des éléments finis	35
2.3.1.1	Présentation et principe d'utilisation	35
2.3.1.2	Outils d'implémentation	36
2.3.2	Modèle cinématique	38
2.3.2.1	Présentation et principe	38
2.3.2.2	Implémentation dans le cadre de la structure	39
2.3.3	Synthèse des modèles considérés	39
<b>2.4</b>	<b>Modélisation de la structure avec des articulations cubiques</b>	40
2.4.1	Principe de l'étude	40
2.4.2	Modèles considérés	41
2.4.3	Comparaison des modèles	43
2.4.3.1	Justesse des modèles	43
2.4.3.2	Temps de calcul	44
2.4.4	Choix du modèle	44
<b>2.5</b>	<b>Extension à des articulations avec d'autres rapports de forme</b>	44
2.5.1	Présentation de l'étude	44
2.5.2	Analyse de deux cas spécifiques	45
2.5.2.1	Articulation souple avec un rapport de forme de 4	45
2.5.2.2	Articulation souple avec un rapport de forme de 7,5	47

2.5.3	Analyse des résultats . . . . .	48
2.5.3.1	Erreurs obtenues avec chacun des modèles . . . . .	49
2.5.3.2	Temps de calcul . . . . .	51
2.5.3.3	Analsyse couplée . . . . .	52
<b>2.6</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>53</b>

*Le chapitre précédent a permis de situer le travail de cette thèse par rapport à l'état de l'art. L'approche scientifique mise en œuvre afin de lever le verrou de la cadence de manipulation a été présentée. Ce chapitre a pour but de présenter les différents modèles pouvant être utilisés pour décrire le comportement d'une structure à articulations souples que ce soit pour la commande ou pour la recherche d'informations structurelles. Nous présenterons donc plusieurs modèles avant de les comparer sur un cas applicatif.*

## 2.1 INTRODUCTION

Nous avons pu voir dans le chapitre précédent que la réalisation de structures robotiques miniaturisées requiert l'usage de liaisons cinématiques adaptées aux contraintes de micro-fabrication. Parmi les solutions de miniaturisation, celle retenue consiste à utiliser des articulations souples [Vogtmann 13, Haouas 17], conçues de manière à avoir le même rôle que des rotules. Si ce type de liaison permet de répondre à l'enjeu de miniaturisation des structures, un problème essentiel intervient alors, il s'agit de la modélisation. En effet, du fait la nature des articulations, le mouvement, et donc la déformation de la structure, est intrinsèquement lié à la déformation de l'articulation qui est une déformation continue. Dans le cadre de ces travaux, le but est d'avoir des structures miniaturisées pour des applications de micromanipulation à haute cadence, c'est pourquoi le temps de calcul et la justesse seront les deux critères considérés pour la comparaison entre les différents modèles utilisables.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la problématique de la modélisation de robots à articulations souples en tenant compte des problèmes liés à ce type de modélisation. Nous verrons alors quels sont les outils et les modèles que nous avons considérés. Dans le cas d'articulations souples avec un rapport de forme de 1 (c'est-à-dire cubiques) nous allons mener une étude comparative afin de déterminer le modèle le plus adaptée pour la commande d'une part et pour l'analyse structurelle de la structure d'autre part. Enfin, nous mènerons une étude comparative des différents modèles en changeant le rapport de forme de l'articulation afin de généraliser les résultats à des structures avec des tailles d'articulations variées, voire à des structures continûment déformables.

## 2.2 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

### 2.2.1 Mise en contexte

L'émergence des structures microrobotiques à articulations souples amène à une nouvelle problématique de modélisation. La modélisation peut être vue sous deux prismes différents, surtout dans le cadre robotique. D'une part, l'analyse

structurelle du mécanisme pour prédire son comportement et ses propriétés mécaniques telles que les modes de résonance, les forces mises en jeu pour déformer la structure, les contraintes dans les matériaux, etc. D'autre part, la modélisation de la structure avec pour objectif sa commande. Ce point est important, car les objectifs et les contraintes des deux modélisations diffèrent. D'un côté, nous souhaitons obtenir des résultats justes (en comparaison avec la réalité) pour avoir des informations pertinentes et exploitables. Dans ce cas-là, le temps de calcul n'est pas le critère prioritaire. Tandis que dans le cas de la modélisation pour la commande, le compromis à trouver est différent. En effet, le temps de calcul est important afin d'effectuer des commandes à haute vitesse dans le cas de la génération de trajectoires en temps réel. Cette contrainte est plus faible dans le cas où la trajectoire serait générée en amont, mais reste importante, car une trajectoire implique d'avoir de nombreux points et donc le temps de calcul est multiplié par le nombre de points. Dans le cadre de la commande, il convient donc d'essayer de limiter le temps de calcul pour des raisons de temps, mais aussi pour des questions de ressources.

L'enjeu de la modélisation provient de l'introduction des articulations souples qui sont des éléments continûment déformables contrairement aux liaisons dans les mécanismes conventionnels. Afin d'expliciter les compromis nécessaires et de proposer une méthode de modélisation adaptée aux structures à articulations souples aux échelles miniatures, nous allons analyser plusieurs méthodes sur un exemple dans le cadre de ce chapitre.

### 2.2.2 Structure considérée dans le cadre de l'étude

La structure qui a été choisie correspond à un sous-ensemble plan du robot qui sera présenté dans la suite de ces travaux de thèse. Il s'agit spécialement dans le cadre de cette étude préliminaire d'une structure dans le plan  $Ox_wz_w$ . Elle est composée d'éléments rigides et d'éléments déformables pour les articulations souples (voir fig. 2.1). Les parties rigides sont en Silicium qui a un module de Young de 160 GPa et les parties déformables sont quant à elles en Polydiméthylsiloxane (PDMS) avec un module de Young de 1,4 MPa. Les autres propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont visibles dans la table 2.1. Il est aisément de constater que les deux modules de Young sont très différents. De fait, il est possible de concevoir un robot avec des parties rigides en Silicium et des liaisons déformables en PDMS. Le prochain point n'est pas une hypothèse, mais une contrainte pour la modélisation imposée par les matériaux utilisés. Les modules de Young du PDMS et du Silicium sont très différents ce qui peut conduire à des instabilités numériques des simulations en fonction du modèle utilisé. De même, le coefficient de Poisson du PDMS très proche de 0,5 peut provoquer des instabilités numériques.

Dans sa configuration plane (voir figure 2.1), la distance entre les points  $A$  et  $B$  est de 19,1 mm. Les différents éléments ont tous la même section de 400  $\mu\text{m}$  par 400  $\mu\text{m}$ . La plateforme centrale représentée par son centre d'inertie  $P$  a une longueur fixe de 2,5 mm. La distance entre les points  $A$  et  $A_1$  et  $B$  et  $B_1$  est de

Matériau	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson
PDMS	1,4	0.49
Silicium	1,6e5	0.29

TABLE 2.1 – Propriétés mécaniques du PDMS et du Silicium utilisées pour les modélisations.

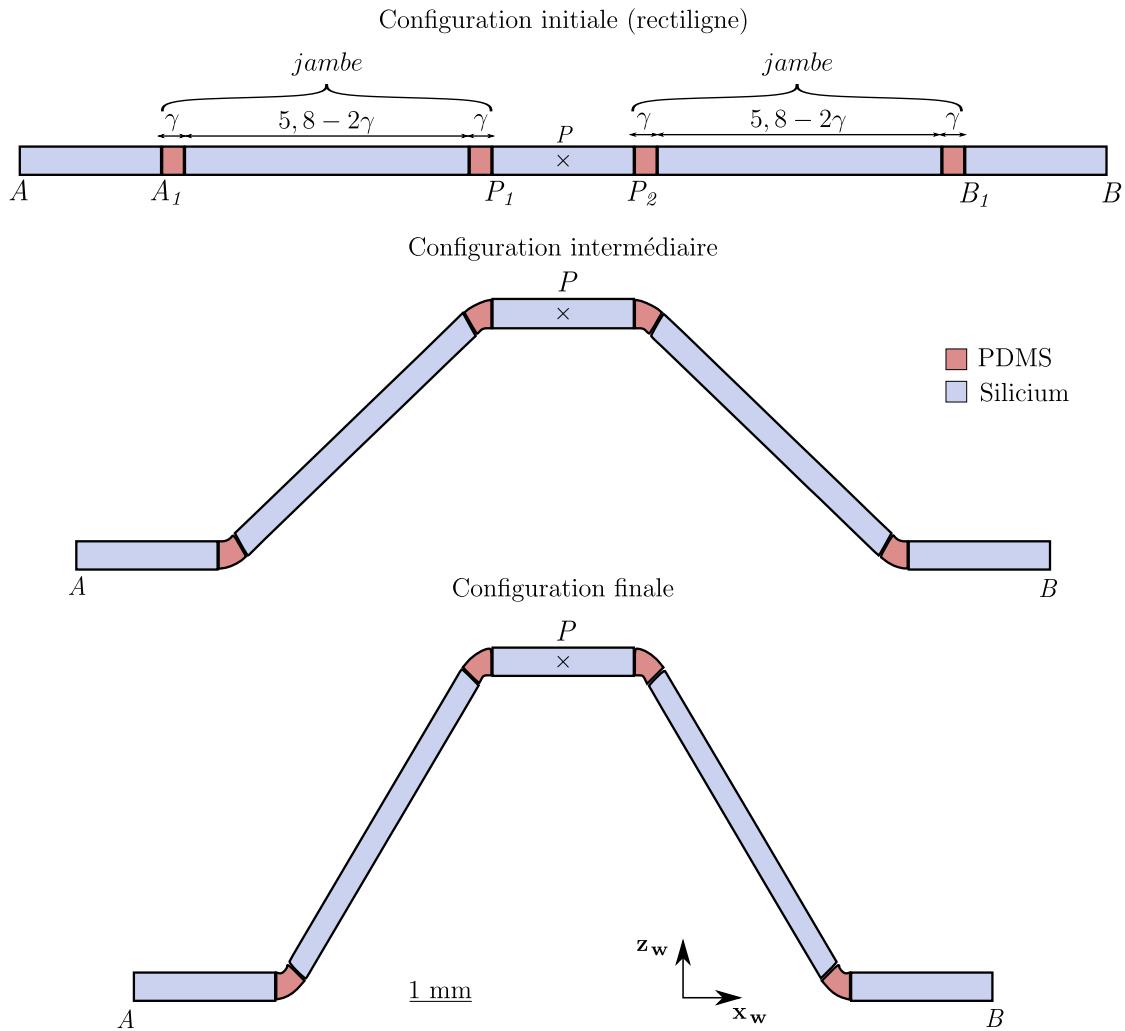


FIGURE 2.1 – Structure considérée pour l'étude composée d'éléments rigides en Silicium (en gris) et d'articulations souples en PDMS (en orange). La structure est actionnée symétriquement suivant l'axe  $x_w$  et la donnée de sortie est le déplacement du point  $P$  suivant l'axe  $z_w$ . La figure illustre un cas pour expliciter le principe de l'étude et la paramétrisation d'une jambe en fonction de la longueur des articulation  $\gamma$ .

2,5 mm. Enfin, il y a deux jambes définies par un assemblage de deux articulations souples en PDMS et d'une partie en Silicium. Les jambes (distance entre  $A_1$  et  $P_1$  et distance entre  $B_1$  et  $P_2$ ) ont une longueur de 5,8 mm. Les articulations souples ont une longueur fonctionnelle, notée  $\gamma$ , qui va varier entre 400  $\mu\text{m}$  et 2,9 mm (jambe continûment déformable). Par conséquent, la partie en Silicium de la jambe a une longueur de  $5,8 - 2\gamma$ . Dans le cadre de l'étude, nous allons nous intéresser à l'évolution la position du point  $P$  en fonction de la distance  $AB$  comme l'illustre la figure 2.1.

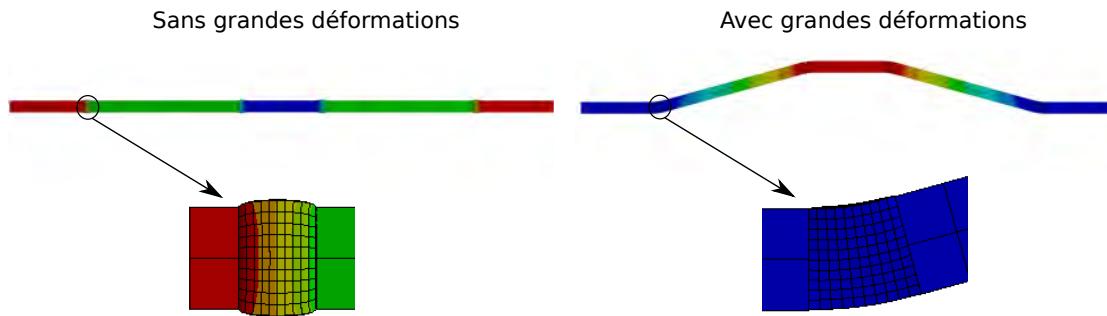
### 2.2.3 Hypothèses et contraintes de l'étude

Comme dans toute modélisation, nous cherchons à représenter une situation et à la comprendre. Cependant, il n'existe pas un modèle parfait et nous devons effectuer des hypothèses pour simplifier le problème, mais aussi tenir compte de différentes contraintes qui peuvent avoir une influence sur la modélisation.

Dans un premier temps, intéressons-nous aux hypothèses que nous avons dû faire pour la modélisation de manière générale. Premièrement, nous allons considérer une modélisation statique ou au plus quasi-statique. En effet, nous souhaitons nous intéresser aux déformations de la structure pour arriver à un point donné sans avoir nécessairement besoin du comportement dynamique dans le cadre du contrôle robotique à venir. L'information qui pourrait être utile, à savoir les modes de résonance de la structure, peut être obtenue après une analyse quasi-statique.

Une deuxième hypothèse porte sur les matériaux que nous allons considérer comme isotropes. De plus, concernant le PDMS, on peut constater que le coefficient de Poisson est de 0,49 (voir table 2.1). Cela nous indique que le PDMS est incompressible comme la plupart des polymères et que donc la sollicitation en compression va induire une déformation du cube sans perte de volume. Cette remarque est importante pour comprendre la considération d'un modèle cinématique pour la structure.

Enfin, la dernière hypothèse est l'utilisation des grandes déformations pour les articulations souples ce qui implique l'utilisation de modèles non-linéaires lors de l'utilisation de méthodes par éléments finis augmentant de fait le temps de calcul. Il est à noter que cette hypothèse des grandes déformations permet de modéliser des comportements similaires à du flambage pour lesquels une sollicitation axiale d'une structure axiale génère des déformations hors axe. La figure 2.2 donne un exemple dans le cas de notre structure de l'importance de la prise en compte des grandes déformations. En effet, un modèle aux petites déformations prédit une compression des articulations, alors qu'un modèle aux grandes déformations prédit le mouvement selon  $\mathbf{z}_w$  observé expérimentalement.



**FIGURE 2.2 – Différences sur les simulations par éléments finis sous ANSYS avec la prise en compte des grandes déformations.** Les déformations sont obtenus dans les mêmes conditions de chargement. Dans le cas d'une modélisation sans les grandes déformations, l'articulation souple subit un écrasement qui ne conduit pas à la déformation attendue de la structure. A l'inverse, avec la prise en compte des grandes déformations l'articulation se déforme conduisant à un déplacement suivant  $z_w$ .

## 2.3 PRÉSENTATION DES MODÈLES ET OUTILS

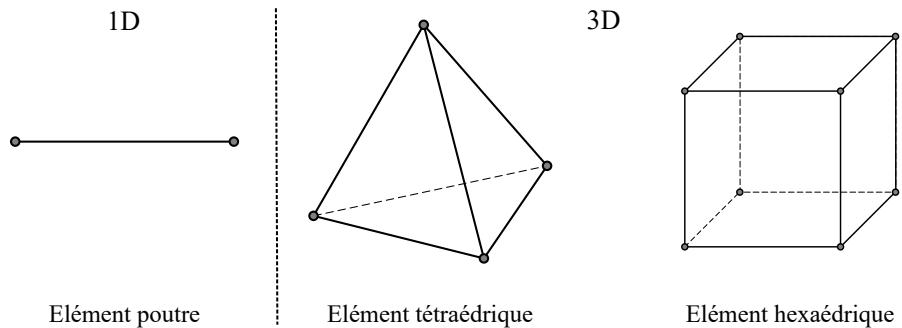
Le but de cette section est de présenter différentes stratégies de modélisation des articulations souples. Les méthodes que nous allons aborder sont la méthode des éléments finis en 3D et 1D et l'utilisation des modèles cinématiques. Nous présenterons aussi les différents outils qui ont été utilisés pour l'implémentation des différents modèles.

### 2.3.1 Méthode des éléments finis

#### 2.3.1.1 Présentation et principe d'utilisation

La modélisation par la méthode des éléments finis (MEF) est très couramment utilisée dans l'industrie ou dans la recherche lorsque l'on veut résoudre un problème impliquant des équations aux dérivées partielles (EDP) dans des domaines tels que la mécanique des milieux continus, la thermodynamique, etc. Nous avons décidé de distinguer deux cas, la modélisation avec des éléments 3D tels que des tétraèdres et des hexaèdres et des éléments 1D (éléments poutres) (voir figure 2.3). Dans la suite, un élément hexaédrique désignera un élément cubique dans sa forme initiale (avant déformations).

La méthode des éléments finis consiste en la discrétisation du milieu en plusieurs sous-éléments simples sur lesquels on va venir résoudre de proche en proche les équations numériquement. Les calculs effectués sur chacun des sous-éléments sont ensuite assemblés pour obtenir la solution globale. Cette méthode est donc une approximation numérique du problème mathématique modélisant un phénomène réel. Les simulations effectuées avec la MEF sont souvent très proches de la réalité



**FIGURE 2.3 – Exemples d’éléments finis 1D et 3D.** L’élément poutre est un élément fini unidimensionnel. Pour les éléments tridimensionnels, on distingue deux types d’éléments : les tétraèdres et les hexaèdres.

et permettent de modéliser des situations complexes tels que des déformations non-linéaires et/ou des grandes déformations.

**Éléments 3D** Les éléments 3D tels que les tétraèdres et les hexaèdres par exemple permettent de mailler la géométrie en petits éléments et de venir s’adapter aux différentes courbures ou variations géométriques de la pièce pour avoir un maillage précis et fin. Cela permet d’obtenir des résultats assez précis dans les 6 directions (3 translations et 3 rotations).

Du fait de la robustesse et de la précision de la méthode des éléments finis avec des éléments 3D, il apparaît clair que le principal avantage de cette méthode est de pouvoir modéliser un phénomène, ici de mécanique des milieux continus, de manière fiable. Cependant, cette fiabilité conduit aussi à certains inconvénients dans le cadre de l’utilisation de la méthode. Le temps de calcul et l’espace mémoire sont généralement élevés et sont intrinsèquement liés à la méthode. Il est donc difficile d’optimiser cette partie. Un autre point d’attention concerne la formalisation du problème afin de s’assurer que la solution numérique du problème pourra converger avec les conditions initiales et de chargement souhaitées.

**Éléments 1D** Dans le cadre de cette étude, une des simplifications qui peut être faite, consiste à considérer des éléments 1D pour la méthode des éléments finis. En effet, la mise en équation nécessitera moins de paramètres résultant alors en un problème « plus simple ». La résolution numérique nécessitera par conséquent moins de ressources mémoire et le temps de calcul sera réduit. Évidemment, certaines informations seront appauvries (notamment certaines informations structurelles) mais c’est un compromis intéressant pour contrôler des robots à articulations souples à haute vitesse. Dans la suite du manuscrit, la théorie des poutres qui sera utilisée est celle de Timoshenko. Les effets de cisaillements seront donc pris en compte.

### 2.3.1.2 Outils d’implémentation

Avant de passer à l’étude de ces modèles sur un exemple comparatif, nous allons présenter les différents outils que nous avons choisis pour leur implémentation :

ANSYS® Workbench™ et le Framework SOFA (Simulation Open Framework Architecture) avec les plugins SoftRobot et Beam Adapter.

**ANSYS Workbench** Le logiciel ANSYS® Workbench™ est une plateforme de simulation basée sur la MEF développée par ANSYS. Elle s'appuie sur la version classique d'ANSYS. L'avantage d'utiliser Workbench, c'est qu'il est possible de travailler sur la géométrie et toute la partie de codage en APDL (ANSYS Parametric Design Language) est générée de manière autonome avant le processus de résolution. Cela permet notamment de travailler sur des géométries complexes en important les pièces directement depuis un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Dans la majorité des cas, le logiciel permet de réaliser des simulations d'objets complexes de manière assez simple et rapide. Un autre aspect important afin d'avoir une simulation réaliste et convergente est le chargement et notamment le pas de chargement. Le chargement correspond à l'application de déplacements ou de forces extérieures sur la structure. Le pas de chargement est la quantité de déplacement ou de forces appliquée à chaque étape de simulation. Cela est d'autant plus important lorsque la modélisation est non-linéaire.

Le logiciel permet d'effectuer de nombreuses simulations, mais nous sommes particulièrement intéressés par les analyses statiques et modales dans le but de comprendre le comportement des diverses structures et de nos systèmes robotiques. En conclusion, le logiciel permet de modéliser assez simplement et rapidement des structures avec des géométries complexes et variées. Cependant, la nature de la modélisation (matériaux, grandes déformations) peut venir la complexifier. Enfin, comme tous les éléments qu'ils soient rigides ou déformables sont maillés, le temps de calcul est souvent important. Le Framework SOFA permet de différencier la modélisation des éléments rigides et des éléments déformables.

**SOFA** Le projet SOFA a commencé au début des années 2000 à Boston. Il s'agit d'un framework open source permettant de faire de la simulation numérique interactive de phénomènes physiques [Faure 12]. Le logiciel intègre plusieurs types de modèles parmi lesquels des méthodes par éléments finis [Comas 08]. La grande différence avec divers autres logiciels utilisant les éléments finis, c'est la volonté des développeurs et contributeurs d'avoir des simulations en temps réel. Cela est très intéressant pour réaliser des simulateurs ou de la commande de systèmes.

Le framework permet de modéliser des phénomènes physiques de manière générale. Les premières simulations et applications sont principalement en lien avec le biomédical [Allard 07, Cotin 08, Duriez 13]. Depuis quelques années, une nouvelle application de SOFA s'est développée dans le domaine de la robotique déformable avec notamment les travaux de l'équipe Defrost de l'INRIA Lille [Coevoet 17, Koehler 19]. Ce nouveau domaine d'application a mené au développement d'un plugin (SoftRobot) dédié à la robotique souple que nous allons utiliser. Le plugin SoftRobot permet de modéliser des systèmes robotiques déformables, des systèmes continus, mais aussi des systèmes robotiques hybrides (composés d'éléments rigides et d'éléments déformables). Ce plugin couplé aux capacités dynamique de SOFA

permet de contrôler des robots souples dynamiquement [Thieffry 19]. Cependant, dans le cas de maillage comportant un très grand nombre d'éléments, il est aussi possible de procéder à une réduction de modèle [Thieffry 19, Goury 18]. Cette réduction de modèle permet d'accélérer la simulation que ce soit pour du contrôle « simple » ou avec gestion des contacts [Katzschmann 19, Goury 21]. Une autre fonctionnalité très intéressante avec le plugin SoftRobot est la possibilité de déterminer le modèle inverse de la structure robotique [Coevoet 19], ce qui donne l'opportunité de retrouver l'un des outils importants de la robotique conventionnelle pour positionner l'effecteur du robot. Cela permet donc d'obtenir pour un robot déformable le modèle direct (obtention de la pose articulaire du robot à partir de sa pose cartésienne) et le modèle inverse (passage de la pose cartésienne à la pose articulaire).

**Utilisation** Après avoir présenté et introduit les capacités de SOFA et du plugin SoftRobot que nous allons utiliser, intéressons nous à la mise en œuvre pratique de la modélisation. Contrairement à ANSYS Workbench, la mise en place de la modélisation (la scène) se fait en ligne de code. Pour définir la modélisation et ces différents éléments, nous utilisons le langage Python. Le code permet de décrire le problèmes (composants, les propriétés mécaniques, etc.). Une interface graphique permet ensuite de visualiser le comportement de la structure. Il est alors possible d'interagir avec les différents éléments et de les déplacer/déformer.

Un robot à articulations souples est un robot hybride et la modélisation se fait en deux temps dans SOFA. Dans un premier temps, on définit les différents éléments en positionnant les centres d'inertie de chacun des éléments. Ensuite, on définit les éléments déformables reliant les éléments rigides. La grande différence avec ANSYS, c'est que dans cette modélisation les éléments rigides sont considérés comme non déformables et donc la modélisation en est simplifiée. Les éléments déformables pourront alors prendre soit la forme d'un maillage tridimensionnel ou unidimensionnel à l'aide du plugin BeamAdapter.

### 2.3.2 Modèle cinématique

#### 2.3.2.1 Présentation et principe

Le dernier type de modèle que nous avons identifié comme potentiellement utilisable pour la modélisation des articulations souple est le modèle cinématique. Cela revient à considérer que l'articulation souple se résume à une liaison rotule mécanique conventionnelle. La solution envisagée pour l'articulation étant d'utiliser un polymère avec un coefficient de Poisson de 0,5 conforte l'hypothèse de la modélisation de l'articulation souple comme étant une liaison rotule.

L'avantage d'utiliser une modélisation cinématique est dans un premier temps la simplicité de mise en œuvre et l'utilisation de l'ensemble des outils utilisés en robotique de manière conventionnelle (modélisation directe et inverse). Un autre aspect important est le temps de calcul. Cette méthode présente également des

inconvénients, il y a une perte d'information sur la déformation de l'articulation et cela est d'autant plus vrai que l'articulation est longue. En effet, si l'articulation est courte, nous pouvons supposer que la déformation est localisée tandis que pour une articulation longue, cette hypothèse ne semble plus valable.

D'un point de vue de l'implémentation, il n'y a pas besoin d'un logiciel spécifique puisqu'il s'agit de résolution d'un système d'équations simple qui peut être codé dans la plupart des langages de programmation. Néanmoins, par souci de continuité au long de la thèse, nous utiliserons Matlab pour réaliser les calculs.

### 2.3.2.2 Implémentation dans le cadre de la structure

Afin de montrer que ce genre de modélisation est plus simple que les précédentes, nous pouvons en quelques lignes écrire la relation entre la distance  $AB$  et la position cartésienne du point  $P$ . Pour cela, il faut écrire dans un premier temps les coordonnées des points  $A_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  et  $B_1$  dans le même repère. Il n'y a pas de coordonnées suivant l'axe  $\mathbf{y}_w$  car le mouvement est considéré dans le plan. De même, on fait l'hypothèse que la plateforme reste plane à tout moment de l'étude ce qui implique que les points  $P_1$  et  $P_2$  ont la même hauteur  $z_p$ . Notons  $\alpha$  la distance  $AB$ .

$$A_1 = \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{2} + 2,5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; P_1 = \begin{pmatrix} -1,25 \\ 0 \\ z_p \end{pmatrix}; B_1 = \begin{pmatrix} -\frac{\alpha}{2} - 2,5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; P_2 = \begin{pmatrix} 1,25 \\ 0 \\ z_p \end{pmatrix}$$

A partir de la position des points, nous pouvons écrire deux équations de fermeture géométrique concernant les deux jambes, de longueur  $l$ , de la structure :  $\|A_1P_1\|^2 = l^2$  et  $\|B_1P_2\|^2 = l^2$ . Ce qui donne les deux équations suivantes.

$$\left(\frac{\alpha}{2} + 3,75\right)^2 + z_p^2 = l^2 \quad (2.1)$$

$$\left(-\frac{\alpha}{2} - 3,75\right)^2 + z_p^2 = l^2 \quad (2.2)$$

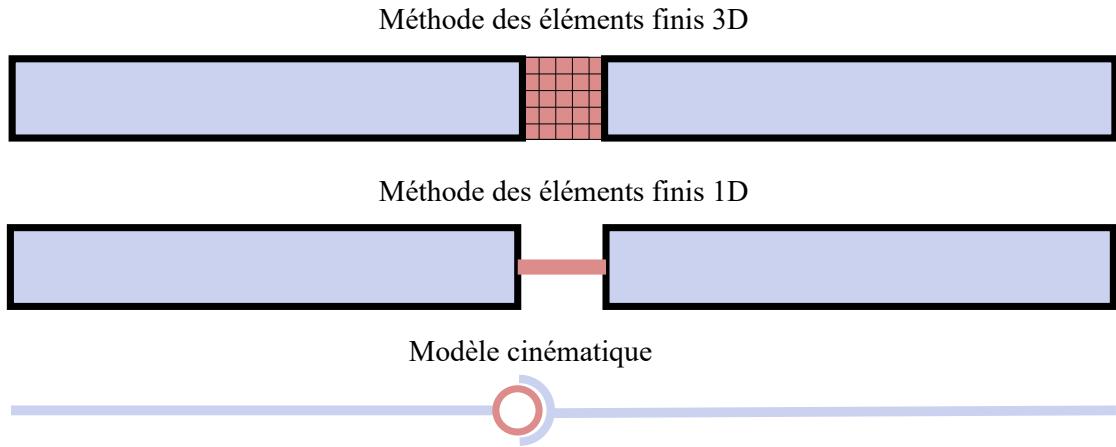
En réécrivant sous une forme directe les équations (2.1) et (2.2), il y a deux possibilités qui correspondent à deux configurations possibles. Nous avons choisi en raison de la configuration de la structure de prendre la valeur positive.

$$z_p = \sqrt{l^2 - \left(\frac{\alpha}{2} + 3,75\right)^2} \quad (2.3)$$

L'équation (2.3) forme le modèle direct de la structure considérée.

### 2.3.3 Synthèse des modèles considérés

Pour la modélisation des articulations souples nous allons considérer trois méthodes de modélisation différentes (voir figure 2.4) : méthodes des éléments finis 3D, méthode des éléments finis 1D (éléments poutres) et modèle cinématique. Ces trois méthodes seront déclinées en plusieurs modèles en changeant les différents paramètres.



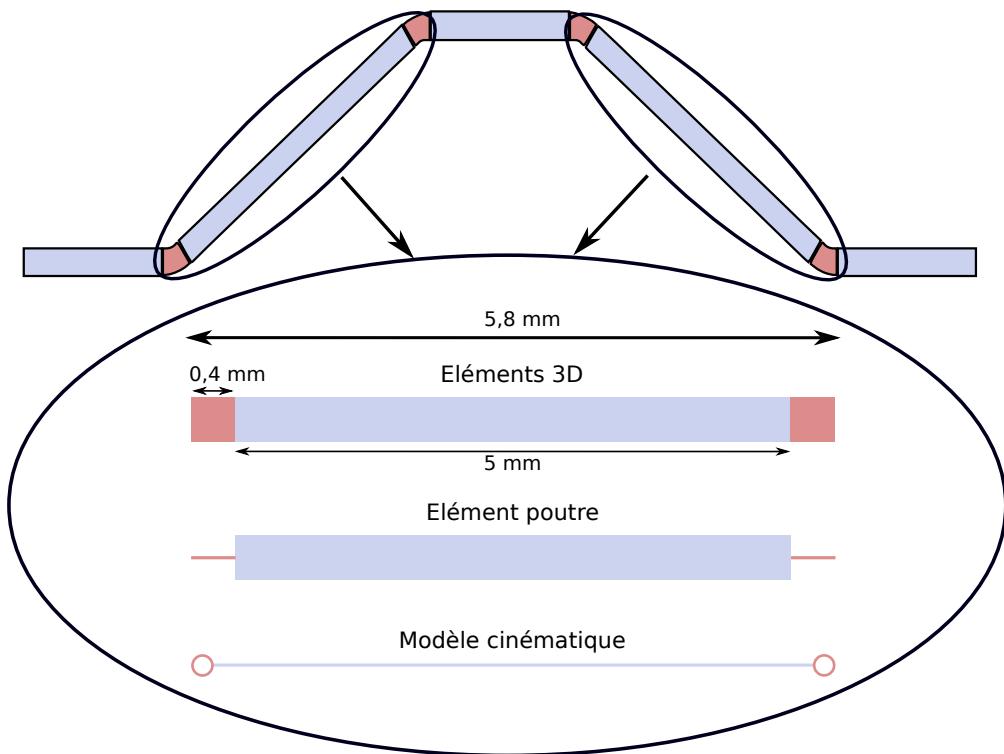
**FIGURE 2.4 – Méthodes de modélisation des articulations souples.** Les trois méthodes retenues pour la modélisation des articulations souples sont la méthode des éléments finis 3D, la méthode des éléments finis 1D et le modèle cinématique.

## 2.4 MODÉLISATION DE LA STRUCTURE AVEC DES ARTICULATIONS CUBIQUES

### 2.4.1 Principe de l'étude

Afin d'avoir une base de comparaison, la structure présentée a été modélisée suivant plusieurs modèles. La structure est alors actionnée de manière symétrique sur l'axe  $x_w$ , c'est-à-dire que l'on rapproche les points  $A$  et  $B$  en faisant varier la distance  $AB$  au cours de la simulation. Nous observons alors le déplacement de  $P$  à chaque pas de simulation qui correspond au rapprochement entre  $A$  et  $B$  de 20  $\mu\text{m}$ . La comparaison se fera selon deux éléments à savoir le temps pour réaliser l'ensemble des calculs et l'erreur relative obtenue pour chaque modèle par rapport à une référence à chaque pas de calcul, autrement dit à chaque étape de la simulation. Pour la comparaison finale, nous utiliserons la moyenne de ces erreurs relatives.

Le cas étudié correspond à une jambe qui se compose de deux articulations de 0,4 mm et une partie en Silicium de 5 mm. Dans le cadre des modélisations MEF et avec poutres, les dimensions sont les mêmes. Tandis que pour la modélisation cinématique, nous avons considéré que la partie rigide a une longueur de 5,8 mm. Ce qui signifie que les liaisons rotules sont localisées aux extrémités de la jambe (voir fig.2.5). Pour des raisons de simulations une force suivant  $z_w$  a été appliquée pour permettre à la structure de sortir du plan. Cette force n'est pas nécessaire dans le cadre de la modélisation cinématique.



**FIGURE 2.5 – Structure d'étude avec des articulations souples cubiques.**  
 Modélisation et dimensions des parties souples et rigides de la jambe dans le cas d'articulation avec un rapport de forme égal à 1.

### 2.4.2 Modèles considérés

Afin de mener cette étude, nous avons retenu trois types de modèles : les éléments finis 3D, les éléments finis 1D et le modèle cinématique. Ces trois modèles requièrent alors l'utilisation de plusieurs logiciels. Pour la partie éléments finis, nous avons utilisés ANSYS Workbench ® et SOFA. Pour les éléments poutres, c'est le logiciel SOFA qui a été utilisé avec le plugin Beam Adapter. Enfin, les calculs concernant la modèle cinématique ont été fait avec Matlab ®. Les différentes déclinaisons des modèles utilisées et les détails sont donnés dans la table 2.2.

Le premier modèle réalisé avec ANSYS ( $A_{3Dfin}$ ) a été réalisé avec un maillage volontairement surdimensionné de manière à avoir les résultats les plus proches possibles de la réalité. Le modèle  $A_{3Dfin}$  servira de modèle de référence pour la comparaison.

Nom	Logiciel	Modèle des parties Silicium	Paramètres des parties Silicium	Modèle des parties PDMs	Paramètres des parties en PDMs
$A_{3Df/m}$	ANSYS	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,2 mm	3D	Maillage tétraédrique avec une taille d'éléments de 0,04 mm et un raffinement d'ordre 1
$A_{3D0,04}$	ANSYS	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,2 mm	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,04 mm
$A_{3D0,08}$	ANSYS	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,2 mm	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,08 mm
$S_{3D0,04}$	SOFA	Rigide	Élément rigide non déformable de longueur fixe et définie	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,04 mm
$S_{3D0,08}$	SOFA	Rigide	Élément rigide non déformable de longueur fixe et définie	3D	Maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,08 mm
$S_{1D}$	SOFA Beam Adapter	Rigide	Élément rigide non déformable de longueur fixe et définie	3D	Poutre de longueur 0,4 mm et de section de 0,4 mm par 0,4 mm
$C_{sphérique}$	Matlab	Rigide	Élément rigide non déformable de longueur fixe et définie	Cinématique	Liaison rotule parfaite

TABLE 2.2 – Modélisation des éléments en PDMs et en Silicium suivant la méthode et le logiciel utilisés. Ces différents modèles sont ceux utilisés dans l'étude de la structure à articulations souples.

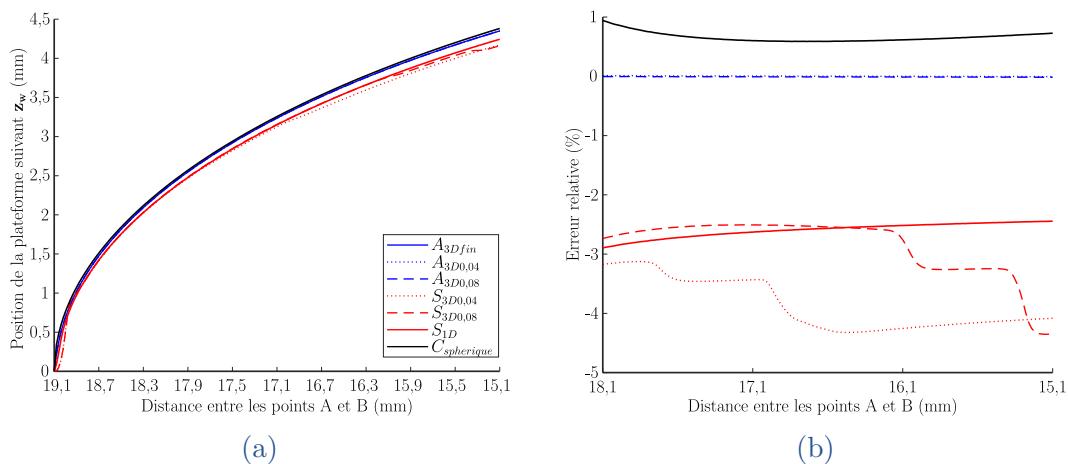
### 2.4.3 Comparaison des modèles

Le but de cette comparaison est de trouver un bon compromis entre le type de modèle, le logiciel, la taille du maillage, le temps de calcul et la justesse pour la commande d'une structure robotique à articulations souples. Dans ce premier cas d'étude, on s'intéresse à des articulations cubiques.

#### 2.4.3.1 Justesse des modèles

La figure 2.6 permet de visualiser la position suivant  $\mathbf{z}_w$  de la plateforme en fonction de la distance  $AB$ , pour chacune des modèles présentés dans le tableau 2.2, d'une part et l'erreur relative de la position du point  $P$  obtenue avec chacun des différents modèles en comparaison avec le modèle  $A_{3Dfin}$ . Cette erreur relative a été considéré à partir de l'étape 50 (rapprochement de 1 mm des points  $A$  et  $B$ ) afin de tenir compte de la stabilisation numérique des simulations effectuées sur la structure avec chacun des différents modèles.

Nous pouvons constater que dans le cas d'articulation de 0,4 mm les différents modèles sont proches et donnent des résultats très similaires. En effet, pour une réduction de 4 mm de la distance  $AB$  l'erreur relative reste en valeur absolue inférieure à 5%. Le modèle  $C_{sphérique}$  (en noir sur les figures) surestime légèrement le déplacement du point  $P$  tandis que les modèles  $S_{3D0,04}$ ,  $S_{3D0,08}$  et  $S_{1D}$  implémentés sous SOFA (en rouge) le sous-estime (voir fig. 2.6a). Il est aussi important de remarquer que les trois modèles utilisés sous ANSYS ( $A_{3Dfin}$ ,  $A_{3D0,04}$  et  $A_{3D0,08}$ ) donnent les mêmes résultats. Dans le cas de la modélisation avec un maillage hexaédrique, nous pouvons voir des « sauts » dans l'erreur (voir fig. 2.6b).



**FIGURE 2.6 – Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 0,4 mm.** (a) Déplacement dans la direction  $\mathbf{z}_w$  du point  $P$  en fonction de la distance  $AB$ . (b) Erreur relative de la position du point  $P$  obtenue avec chacun des modèles par rapport à la référence qui est le modèle  $A_{3Dfin}$ .

### 2.4.3.2 Temps de calcul

Une autre information importante dans le cadre de ces comparaison de modèles est le temps nécessaire pour converger vers la solution de la simulation. Pour le modèle  $C_{sphérique}$ , le temps de calcul total est de 3,1 ms tandis que pour le modèle  $S_{1D}$  ce temps est de 5,75 s. Les modèles  $S_{3D0,08}$  et  $A_{3D0,08}$  donnent des temps d'exécution de 35,46 s et de 508 s. Les simulations avec des maillages hexaédriques un peu plus fins, c'est-à-dire les modèles  $S_{3D0,04}$  et  $A_{3D0,04}$  donnent respectivement des temps de 421,9 s et 1324 s. Ces résultats nous permettent de constater que dans ce cas le modèle  $C_{sphérique}$  est vraiment un très bon compromis puisque l'erreur reste inférieure à 1% et le temps de calcul est compatible pour des applications à haute vitesse. Il faut cependant garder en tête que certaines informations ne peuvent pas être obtenues avec le modèle cinématique ( $C_{sphérique}$ ).

### 2.4.4 Choix du modèle

Dans le cas d'articulations avec un rapport de forme de 1, c'est-à-dire des articulations souples cubiques nous avons pu voir que tous les modèles donnent des erreurs inférieures à 5%. La déformation nécessaire pour déformer la structure reste localisée ce qui est visible par la bonne concordance du modèle  $C_{sphérique}$ . La simulation réalisée avec ce modèle est par ailleurs la plus rapide.

En conclusion pour ce type d'articulations souples, le modèle  $C_{sphérique}$  est très intéressant pour la commande et permet d'obtenir les informations et outils de la robotique conventionnelle. Cependant, il est intéressant d'utiliser également des modèles, utilisant la méthode de éléments finis, de l'articulation complète pour obtenir des informations structurelles (contraintes dans l'articulation souple) qui ne nécessite pas d'être exécutées à haute vitesse.

## 2.5 EXTENSION À DES ARTICULATIONS AVEC D'AUTRES RAPPORTS DE FORME

### 2.5.1 Présentation de l'étude

Après avoir étudié le cas d'une articulation souple avec un rapport de forme de 1, nous allons nous intéresser à l'influence de la taille des articulations sur le choix du modèle en faisant varier le rapport de forme de l'articulation élastique. Afin de quantifier cet impact sur la modélisation, nous allons le faire varier dans l'étude. Comme explicité dans la figure 2.1 page 33, nous allons faire varier le paramètre  $\gamma$  représentant la longueur de la partie en PDMS. La longueur de la partie en Silicium vaut alors  $5,8 - 2\gamma$ , de manière à ce que la somme de la longueur de la partie en Silicium et des parties souples en PDMS reste fixe (5,8 mm). Un point important à noter est que les deux articulations d'une jambe ont toujours la même longueur. Nous avons considéré les cinq cas suivants :

1. Articulation souple de longueur  $\gamma = 0,4$  mm et partie en Silicium de 5 mm soit 14% d'éléments déformables dans la jambe et un rapport de forme de 1.
2. Articulation souple de longueur  $\gamma = 0,8$  mm et partie en Silicium de 4,2 mm soit 28% d'éléments déformables dans la jambe et un rapport de forme de 2.
3. Articulation souple de longueur  $\gamma = 1,6$  mm et partie en Silicium de 2,6 mm soit 55% d'éléments déformables dans la jambe et un rapport de forme de 4.
4. Articulation souple de longueur  $\gamma = 2$  mm et partie en Silicium de 1,8 mm soit 69% d'éléments déformables dans la jambe et un rapport de forme de 5.
5. Articulation souple de longueur  $\gamma = 2,9$  mm et partie en Silicium de 0 mm soit 100% d'éléments déformables dans la jambe et un rapport de forme de 7,5.

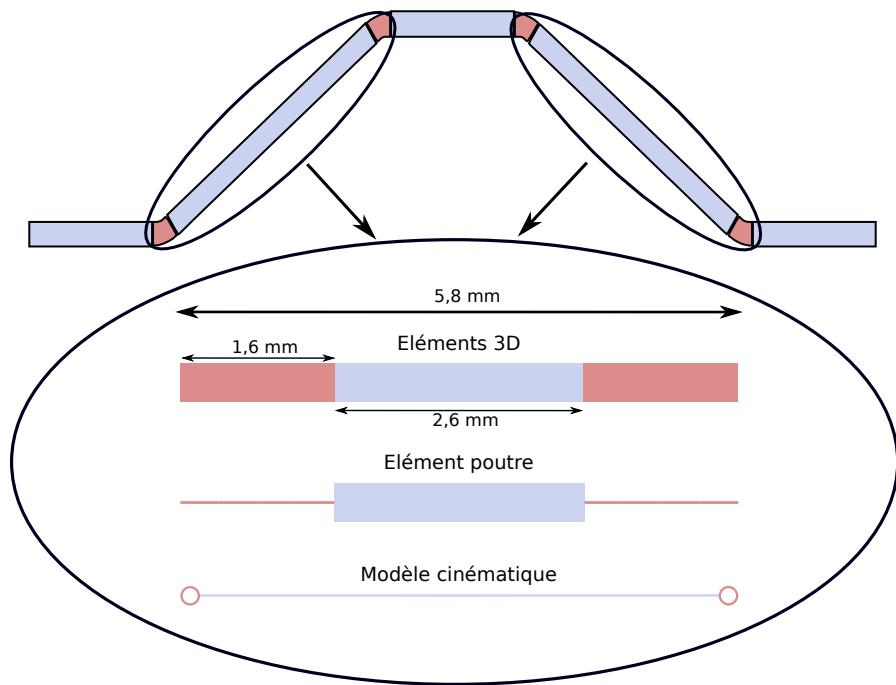
Dans la suite de l'étude, nous allons nous intéresser en détail aux 3 et 5, le cas 1 ayant été traité dans la section précédente. Néanmoins les figures de conclusion de l'étude présenteront les 5 cas.

## 2.5.2 Analyse de deux cas spécifiques

### 2.5.2.1 Articulation souple avec un rapport de forme de 4

Le deuxième cas que nous avons décidé d'étudier en détails est le cas 3, c'est-à-dire le cas où les articulations souples ont une longueur de 1,6 mm (voir figure 2.7). Dans cette configuration, la jambe est composée à 55% d'éléments déformables, c'est pourquoi nous avons sélectionné ce cas qui permet d'étudier une structure bien différente du cas avec des articulations de longueur 0,4 mm. En effet, de par la taille des articulations, la déformation ne pourra plus être considérée comme localisée ce qui risque de conduire à une erreur avec le modèle cinématique  $C_{sphérique}$  beaucoup plus importante. Les dimensions des parties rigides et déformables pour ce cas et pour chacune des modélisations sont visibles en figure 2.7. Dans ce cas, la modélisation sous forme de poutre des articulations se fait par 4 sous-poutres de longueur 0,4 mm.

Le déplacement du point  $P$  est cette fois assez différent entre le modèle  $C_{sphérique}$  et les autres modèles (voir fig. 2.8a). En effet, le modèle  $C_{sphérique}$  donne des résultats qui sont surestimés en comparaison avec le modèle de référence  $A_{3Dfin}$ . Les différentes modèles implémentés sous ANSYS (en bleu) sont une nouvelle fois très proche ce qui confirme que le maillage hexaédrique avec une taille d'éléments de 0,08 mm est suffisant pour effectuer la modélisation de la structure sous ANSYS. Le modèle  $S_{1D}$  semble donner des résultats qui sont aussi très proches de la référence, et ce, dès le début de la simulation, ce qui n'est pas le cas des deux autres modèles implémentés dans SOFA ( $S_{3D0,08}$  et  $S_{3D0,08}$ ). En effet, nous pouvons constater une grande différence lors des premiers pas de chargement jusqu'à

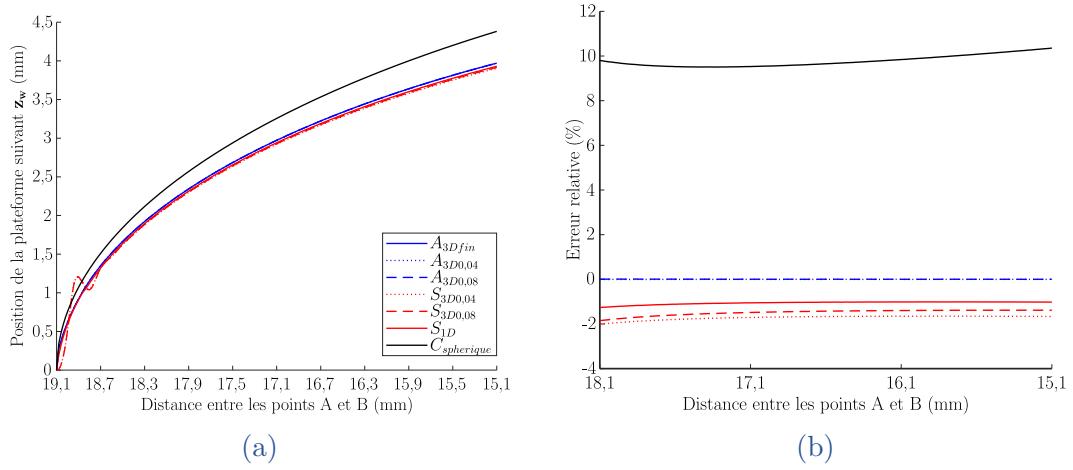


**FIGURE 2.7 – Structure d'étude avec des articulations souples avec un rapport de forme de 4.** Modélisation et dimensions des parties souples et rigides de la jambe dans le cas d'articulations avec un rapport de forme de 4.

un déplacement de chacun des actionneurs de 0,2 mm. Au-delà de cette étape de simulation, le résultat est de nouveau très cohérent avec les modèles simulés avec ANSYS. Ce temps de stabilisation est très probablement dû à l'utilisation d'une force selon  $\mathbf{z}_w$  pour faire sortir la structure du plan.

La figure 2.8b permet de visualiser l'erreur de modélisation qui est faite avec chacun des modèles. Ce que nous pouvons constater tout de suite, c'est que le modèle  $C_{sphérique}$  donne une erreur de l'ordre de 10%. Cependant, cette erreur est constante et pourrait être compensée au besoin. Mais une fois de plus comme dans le cas des articulations de longueur 0,4 mm il manque une partie de l'information liée à la forme déformée de l'articulation qui peut avoir un impact. Le modèle qui est la plus proche de la référence est la modèle  $S_{1D}$  avec une erreur relative inférieure à 1%. Les modèles composés des maillages hexaédriques donnent aussi de bons résultats avec une erreur relative de l'ordre de 2%.

D'un point de vue de la commande, le temps de calcul est aussi une donnée importante. La simulation qui donne les résultats le plus rapidement est celle effectuée avec le modèle  $C_{sphérique}$  avec un temps de calcul 3,1 ms. Ensuite, c'est le modèle  $S_{1D}$  qui a été simulé en 11,53 s. Les maillages hexaédriques avec des éléments de 0,08 mm permettent d'avoir les résultats en 163,96 s et 549 s pour  $S_{3D0,08}$  et  $A_{3D0,08}$  respectivement. Les autres modèles résultent en des simulations qui ont des temps d'exécution supérieurs à 3600 s (soit 1h) ce qui rend l'utilisation pour la commande très compliquée.



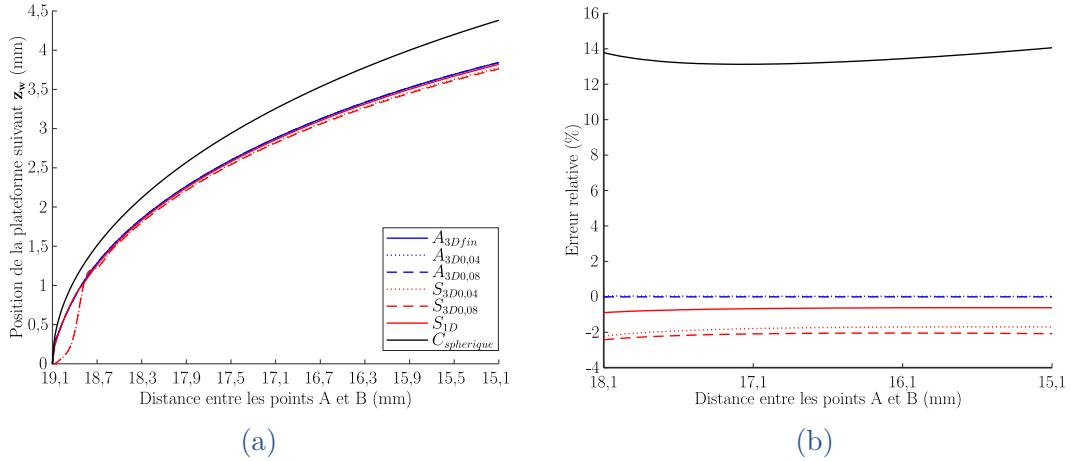
**FIGURE 2.8 – Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 1,6 mm.** (a) Déplacement dans la direction  $z_w$  du point  $P$  en fonction de la distance  $AB$ . (b) Erreur relative de la position du point  $P$  obtenue pour chacun des modèles par rapport à la référence qui est le modèle  $A_{3Dfin}$ .

En conclusion de ce cas, nous pouvons voir une première tendance se dessiner. D'une part, les simulations effectuées sous ANSYS ne sont pas adaptées pour la commande, de par l'impossibilité d'effectuer une modélisation inverse, mais aussi à cause du temps de calcul très long. Le modèle  $S_{1D}$  apparaît comme un bon compromis entre précision et temps de calcul. Suivant ce qui est recherché dans la commande entre la précision et le temps de calcul, le modèle  $C_{sphérique}$  peut encore être envisagé pour des applications à très haute vitesse en ayant conscience de l'erreur commise.

### 2.5.2.2 Articulation souple avec un rapport de forme de 7,5

Le dernier cas que nous avons décidé d'expliciter est celui de jambes entièrement composées d'éléments déformables (cas 5). Cette situation représente le cas d'une articulation continûment déformable. La jambe est alors composée de deux articulations de 2,9 mm pour former une jambe de 5,8 mm entièrement déformables. Les parties rigides en Silicium ne sont donc plus présentes dans les jambes. Le modèle  $C_{sphérique}$  est toujours considérée pour l'étude bien que les hypothèses d'une déformation localisée ne puissent plus s'appliquer à la jambe étant un corps continûment déformable. Pour la partie de modélisation par des poutres, chaque jambe est un assemblage de 14,5 poutres élémentaires de 0,4 mm de longueur.

Les résultats de déplacement du point  $P$  visible dans la figure 2.9a permettent de confirmer que le modèle  $C_{sphérique}$  n'est plus adapté dans ce cas avec une erreur dès le début du chargement de la structure. Les autres modèles donnent des résultats qui sont très proches. Une nouvelle fois, les modèles intégrant un maillage hexaédrique sous SOFA ( $S_{3D0,04}$  et  $S_{3D0,08}$ ) donnent de grandes différences sur les



**FIGURE 2.9 – Étude de la modélisation de la structure dans le cas des articulations de longueur 2,9 mm.** (a) Déplacement dans la direction  $z_w$  du point  $P$  en fonction de la distance  $AB$ . (b) Erreur relative de la position du point  $P$  obtenue pour chacun des modèles par rapport à la référence qui est le modèle  $A_{3Dfin}$ .

premières étapes de simulation avant de converger et de suivre la tendance de la référence.

La figure 2.9b permet de visualiser l'erreur obtenue pour chacun des modèles. Ce que nous pouvons constater directement, c'est l'erreur de l'ordre de 14% pour le modèle  $C_{sphérique}$ . Cette erreur serait encore plus importante si les jambes étaient plus longues. Comme on pouvait s'y attendre, ces simulations confirment que le modèle  $C_{sphérique}$  n'est pas adapté à la modélisation de jambes continues, ce qui était prévisible. Les modèles avec un maillage hexaédrique donnent des erreurs de l'ordre de 2%. Tandis que le modèle  $S_{1D}$  permet d'avoir une erreur relativement constante inférieure à 1%.

D'un point de vue du temps d'exécution, le plus rapide est toujours le modèle  $C_{sphérique}$ , mais cela est anecdotique du fait de la non-cohérence entre son utilisation et la situation à modéliser. La simulation avec le modèle  $S_{1D}$  permet d'obtenir les meilleures performances d'un point de vue temporel puisque le temps d'exécution de la simulation est de 18,6 s ce qui est au minimum 10 fois plus rapide que les simulations avec les autres modèles.

Ce qui se dégage de l'étude de ce cas, c'est que le modèle  $C_{sphérique}$  ne peut plus être utilisé désormais, mais surtout que le modèle  $S_{1D}$  offre un bon compromis entre la précision du modèle et son temps d'exécution.

### 2.5.3 Analyse des résultats

L'analyse détaillée des trois situations a permis de voir quelques tendances se dessiner quant au temps de calcul des différents modèles et de leur précision. Nous allons maintenant analyser ces données pour l'ensemble des cinq cas considérés.

Un modèle est toujours imparfait dans le sens où il nécessite de faire des hypothèses et son adéquation dépend aussi de ce qui est attendu. En effet, si l'on cherche à avoir un modèle très précis et que le temps de calcul importe peu alors le choix du modèle sera différent que si le premier critère de décision est la rapidité. Évidemment, l'idéal serait d'avoir un modèle qui remplit tous les critères de décision, mais c'est rarement le cas, il faut donc trouver un compromis.

L'analyse se fera en deux temps. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux erreurs effectuées avant chacun des modèles. Puis dans un deuxième temps, nous comparerons les complexités temporelles.

Toutes les simulations ont été effectuées sur le même poste informatique (et dans les mêmes conditions) équipé d'un processeur Intel® Core™ i5-10400H CPU cadencé à 2.6 GHz avec 8 coeurs et une RAM de 16 Go.

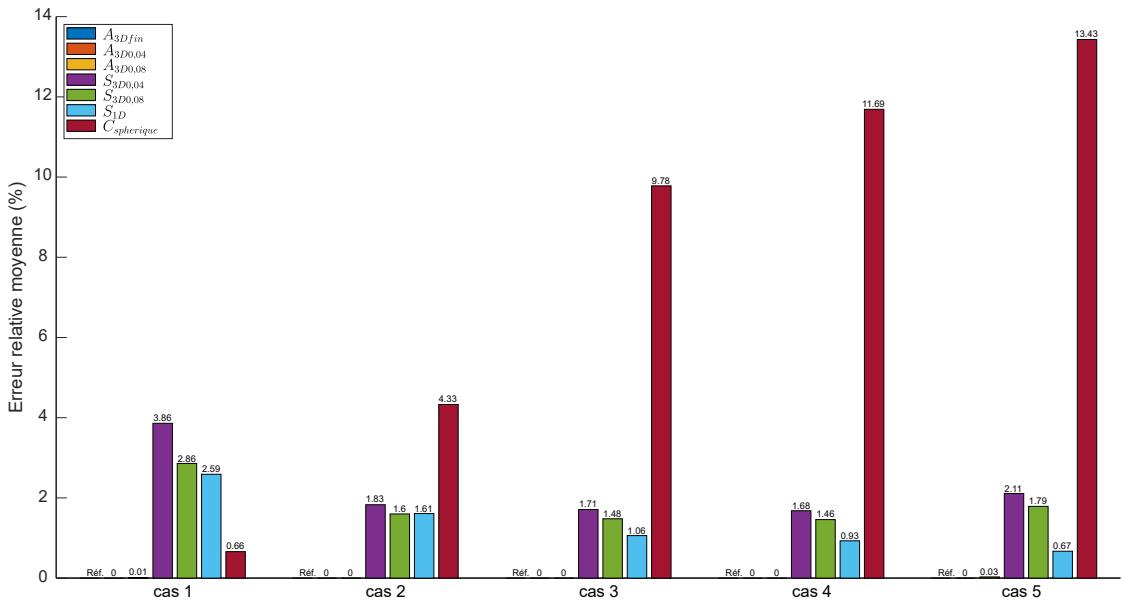
#### 2.5.3.1 Erreurs obtenues avec chacun des modèles

L'un des premiers critères dans le but de commander des structures complexes avec des articulations souples est la justesse du modèle. Dans le cadre de ces simulations, la référence est le modèle  $A_{3Dfin}$ . Ce modèle apparaît dans la figure 2.10 avec le sigle réf. puisqu'il s'agit de la référence et que calculer une erreur relative n'a pas de sens. Une des premières constatations quelque soit la longueur des articulations souples est la proximité des modèles simulés sous ANSYS ( $A_{3D0,04}$  et  $A_{3D0,08}$ ). Cela nous indique finalement que le maillage le plus « grossier » que nous avons utilisé était suffisant pour avoir des résultats satisfaisants sur ce type de structure. Si les formes mises en jeu avaient été un peu plus complexes, ce résultat aurait peut-être été légèrement différent du fait que le maillage fin aurait permis de prendre encore plus en compte les particularités géométriques.

De manière globale, le modèle  $S_{1D}$  permet d'avoir une erreur relative inférieure à 2% ce qui est très intéressant pour la modélisation de structure à articulation souple. D'autre part, les modèles  $S_{3D0,04}$  et  $S_{3D0,08}$  donnent des erreurs relatives convenables et constantes en fonction de la taille des articulations, exempté le cas 1 qui est le cas de petites articulations souples cubiques. Pour le modèle  $C_{sphérique}$ , nous pouvons distinguer deux situations. En effet, dans la figure 2.10 nous pouvons constater que plus il y a d'éléments déformables dans la jambe et plus l'erreur relative moyenne obtenue avec le modèle  $C_{sphérique}$  (en rouge) augmente rapidement. C'est exactement l'inverse qui se passe pour le modèle  $S_{1D}$  (en bleu).

Dans le cas 1, c'est-à-dire des articulations de 0,4 mm dans la jambe, les résultats sont sensiblement différents que dans les autres cas. Pour cette taille d'articulation, la modélisation qui se rapproche le plus de notre référence est le modèle  $C_{sphérique}$  avec une erreur relative moyenne à 1%. Tandis que les autres modèles ont des erreurs avoisinant les 3%. Dans ce cas précis, d'un point de vue de la précision le modèle  $C_{sphérique}$  est donc très intéressant. La figure 2.10 montre bien par ailleurs que ce cas est assez particulier.

Le deuxième cas est aussi très intéressant, puisque dans celui-ci, les trois modèles utilisés sous SOFA sont proches. En effet, l'erreur moyenne est de l'ordre



**FIGURE 2.10 – Erreur relative moyenne des erreurs effectuées avec les différents modèles.** Représentation graphique de l'erreur relative moyenne de la position du point  $P$  suivant l'axe  $z_w$  pour chacun des modèles pour les cinq cas d'études.

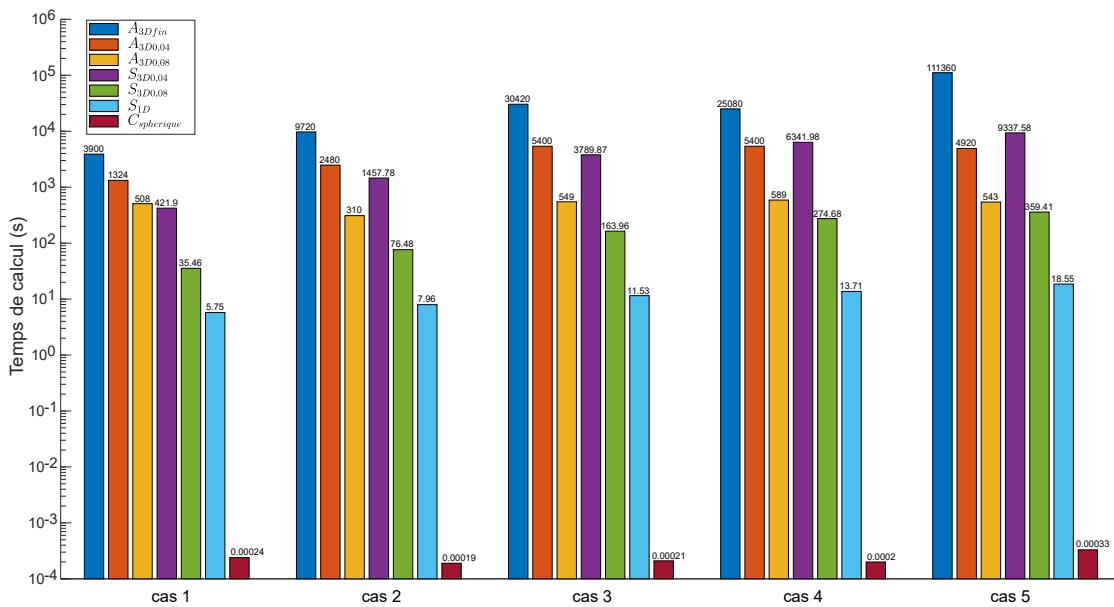
de 1,6%. Le modèle  $C_{sphérique}$  donne quant à lui une erreur de l'ordre de 4% ce qui est encore convenable. D'autant plus que dans beaucoup de cas, et notamment dans la microfabrication, cette erreur est inférieure aux incertitudes de fabrications et d'assemblages. Cela dépend une fois de plus de ce qui prime dans le choix du modèle, la modélisation rigide étant bien plus rapide que les autres solutions de modélisation.

Enfin les trois derniers cas sont très similaires dans l'analyse puisque le modèle  $C_{sphérique}$  conduit à des erreurs de l'ordre de 10% et plus. Les modèles implémentés sous SOFA donne de bons résultats avec des erreurs inférieures à 2%. Le modèle le plus prometteur est le modèle  $S_{1D}$  avec une erreur moyenne inférieure à 1%.

En conclusion concernant l'erreur commise avec chacun des modèles, il y a trois situations différentes à distinguer. La première est celle d'articulations souples de longueur réduite (comme dans le cas 1) pour laquelle le modèle la plus adapté pour la commande semble être le modèle  $C_{sphérique}$  puisque c'est ce modèle qui donne l'erreur moyenne la plus faible. La deuxième situation est celle d'articulations souples longues comme dans les cas 3, 4 et 5. Dans cette situation, le modèle qui semble devoir être privilégié pour la commande est le modèle  $S_{1D}$ . La troisième situation est celle entre les deux où le modèle  $C_{sphérique}$  donne des erreurs un peu plus grandes que le modèle  $S_{1D}$ , mais restent néanmoins sous le seuil des 5%.

### 2.5.3.2 Temps de calcul

Le deuxième indicateur qui nous intéresse particulièrement notamment dans le but de faire de la commande de système rapide est le temps d'exécution du modèle. La figure 2.11 permet de visualiser, en échelle logarithmique, les temps d'exécutions des différentes simulations dans les 5 cas que nous avons présentés. Pour une question de lisibilité du graphique, les temps d'exécution maximaux affichés sont de 4000 s (soit un peu plus de 1 heure).



**FIGURE 2.11 – Temps d'exécution des simulations utilisant les différents modèles.** Représentation graphique des temps d'exécution des différents modèles pour passer de la situation initiale à la situation finale en passant par toutes les étapes de déplacement. Cette représentation traite des cinq cas d'études.

Les temps d'exécution obtenus avec le modèle  $A_{3Dfin}$  sont donnés à titre indicatif puisque le maillage est surdimensionné et le temps n'est pas vraiment représentatif. Cela permet néanmoins de se rendre compte du temps que peuvent prendre les simulations nécessitant de travailler avec la méthode des éléments finis. Il est aussi intéressant de noter l'influence de la taille du maillage sur le temps de calcul. Si nous avons pu constater dans la section 2.5.3.1 que la taille du maillage n'avait pas forcément un très gros impact sur l'erreur relative, ce n'est pas le cas sur le temps d'exécution. D'un point de vue général, nous pouvons voir que les simulations sous SOFA sont globalement plus rapides que celle sous ANSYS. Le modèle  $S_{1D}$  a des temps d'exécution inférieurs à 30 s quel que soit la part d'articulation souple dans la jambe. Le modèle  $C_{sphérique}$  est encore plus rapide avec un temps d'exécution d'une dizaine de millisecondes.

Si lors de l'analyse de l'erreur, nous avons pu distinguer différentes situations, l'analyse du temps d'exécution ne permet pas de faire cette distinction. En effet,

dans tous les cas le modèle  $C_{sphérique}$  est 1000 fois plus rapide que le modèle  $S_{1D}$  qui est sensiblement plus rapide que les autres modèles.

### 2.5.3.3 Analysse couplée

Après avoir analysé les différents indicateurs de manière découpée, il est important de le faire de manière couplée afin d'avoir une vue d'ensemble pour le choix d'un compromis pour la commande d'un système à articulations souples. La figure 2.12 permet de placer les différentes modèles en fonction de l'erreur commise et du temps d'exécution. La modélisation de référence  $A_{3Dfin}$  n'apparaît pas sur ce graphique puisque l'erreur relative n'est pas calculée. Cependant, si ces points étaient représentés, ils conduiraient à un écrasement du graphique du fait du temps de calcul très important et largement supérieur aux autres modèles. À titre d'exemple, le maillage fin dans le cas d'étude 5 à un temps de calcul de 111 360 s (soit près de 30h).

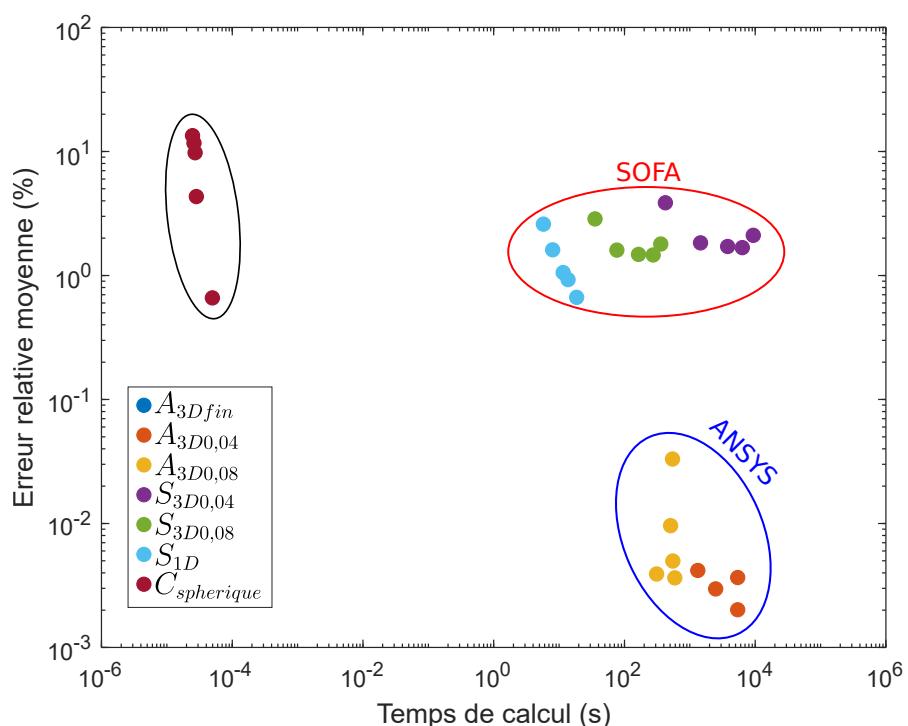


FIGURE 2.12 – Synthèse de la comparaison des modèles pour la modélisation à articulations souples. Cette synthèse met en regard le temps de calcul et l'erreur relative moyenne pour chacun des modèles. Cette représentation permet de distinguer trois grands groupes couplant modèles et outils.

Nous pouvons constater trois grands groupes : le modèle  $C_{sphérique}$  (ovale noir), les modèles implémentés sous SOFA (ovale rouge) et les modèles implémentés sous ANSYS Workbench (ovale bleu). Le premier groupe offre la meilleure performance en termes de temps de calcul quand le troisième est plus axé sur l'erreur relative

de modélisation. Les modèles implementés sous SOFA offrent un compromis. Nous pouvons d'ailleurs constater que les simulations avec des maillages hexaédriques ont des temps d'exécution assez similaires sous SOFA et ANSYS. Les simulations sous SOFA sont un peu plus rapides surtout pour des articulations courtes ou de longueur moyenne, mais moins dans le cas d'articulations longues

Avec ce que nous avons pu voir dans les sections précédentes, dans le cas des articulations de longueur 0,4 mm le modèle le plus adapté pour la commande est le modèle  $C_{sphérique}$  avec un très bon temps de calcul et une erreur relative inférieure à 1%.

Pour des articulations supérieures à 0,8 mm, le modèle le plus adapté pour la commande est le modèle  $S_{1D}$ . En effet, le temps de calcul est moins bon que le modèle  $C_{sphérique}$ , mais pour ce dernier l'erreur devient trop importante pour permettre un contrôle précis de la structure.

Le dernier cas dans le cadre de nos simulations est celui des articulations de 0,8 mm qui représente un peu plus de 50% d'éléments souples dans la jambe. L'erreur faite avec le modèle  $C_{sphérique}$  reste inférieure à 5% et le temps de calcul est de l'ordre de 10 ms. Le modèle  $S_{1D}$  permet d'avoir une erreur de l'ordre de 1%, mais le temps de calcul est 1000 fois plus important (de l'ordre de 10 s). Le modèle choisi va alors vraiment dépendre de l'application visée. Pour des applications à haute vitesse, il sera préférable de privilégier le modèle  $C_{sphérique}$  au contraire pour les applications de haute précision le modèle  $S_{1D}$  sera sans doute à privilégier.

## 2.6 CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité de modélisation de structures à articulations souples, et ce, notamment dans le cadre de la commande robotique. Nous avons pu dans un premier temps voir quelques modèles et outils pour tenter de répondre à cette question. Nous avons cherché à comparer ces modèles et outils en simulant une structure plane dans laquelle nous avons considéré des articulations souples en PDMS. La taille de ces articulations est un paramètre que nous avons fait varier afin de quantifier l'impact sur le temps de calcul et l'erreur relative de positionnement de la taille de ces articulations.

Cette étude a permis de mettre en évidence que suivant le rapport de forme des articulations et l'application visée, le choix du modèle à utiliser pour la commande varie. En effet, pour des articulations courtes (de l'ordre de 0,4 mm) le modèle  $C_{sphérique}$  est particulièrement adaptée à la commande. Dans la plupart des autres cas, nous privilégierons le modèle  $S_{1D}$ . Pour des articulations entre 0,4 mm et 0,8 mm, la question se pose entre les deux modèles précédemment cités. Le critère de décision se fera par rapport à l'application et les performances les plus importantes entre la précision et la vitesse.

Le modèle  $C_{sphérique}$  et le modèle  $S_{1D}$  sont particulièrement intéressants pour la commande d'un système robotique, car ils offrent la possibilité d'obtenir le

modèle inverse. C'est-à-dire que nous sommes capables de calculer la configuration articulaire en fonction de la position et l'orientation de l'effecteur. Néanmoins, nous avons pu constater qu'ANSYS permet d'avoir une simulation plus précise et cela est intéressant pour étudier les propriétés mécaniques de la structure (effort nécessaire pour la déformation, analyse modale, etc.).

En conclusion, dans la suite des travaux nous allons concevoir une structure microrobotique pour des tâches de prise-dépose rapide. Pour cela, nous allons intégrer des articulations de longueur 0,4 mm dans les jambes. Nous utiliserons le modèle complet sous ANSYS pour étudier les propriétés mécaniques et pour la commande nous allons baser notre travail sur le modèle  $C_{sphérique}$ .

---

## Chapitre 3

# Conception et modélisation d'un microrobot pour la prise-dépose rapide

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	57
<b>3.2</b>	<b>Présentation et modélisation de la structure robotique</b>	58
3.2.1	Architecture robotique	58
3.2.2	Modélisation géométrique	58
3.2.2.1	Hypothèses et paramétrisation	58
3.2.2.2	Modèle géométrique inverse	60
3.2.2.3	Modèle géométrique direct	61
3.2.3	Modélisation cinématique	63
3.2.4	Analyse de l'espace de travail de la structure	64
3.2.4.1	Singularités remarquables	64
3.2.4.2	Espace de travail en translation	65
3.2.4.3	Manipulabilité en translation	65
3.2.4.4	Manipulabilité en rotation	66
<b>3.3</b>	<b>Recherche de la pose de référence</b>	68
3.3.1	Hypothèses et paramétrisation	68
3.3.2	Mise en équation	69
3.3.3	Optimisation de la position de référence	70
<b>3.4</b>	<b>Conception du micromanipulateur MiGriBot</b>	72
3.4.1	Dimensionnement du mécanisme parallèle	72
3.4.2	Approximation des articulations complètes	74
3.4.3	Obtention de la pose initiale de MiGriBot	74
3.4.4	Espace de travail de MiGriBot	75
3.4.5	Modélisation par la méthode des éléments finis	76
3.4.5.1	Hypothèses et mise en œuvre	76
3.4.5.2	Informations structurelles	78
3.4.6	Conception de la structure complète	80
3.4.6.1	Actionnement de la structure	81
3.4.6.2	Structure robotique complète	82

<b>3.5 Conclusion .....</b>	<b>83</b>
-----------------------------	-----------

*Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés aux stratégies de modélisation des structures robotiques à articulations souples. L'étude a mené à une double conclusion. En effet, pour la commande, une méthode de modélisation basée sur le modèle cinématique est à privilégier surtout pour des applications à haute vitesse tandis que pour effectuer une analyse structurelle, un modèle basé sur la méthode des éléments finis 3D est préférable, car plus dense en information. Dans ce chapitre, nous introduisons une nouvelle architecture robotique avec préhension intégrée qui intégrera des articulations souples. Nous verrons alors comment les deux modèles nous permettent de concevoir et analyser cette nouvelle structure robotique miniaturisée.*

## 3.1 INTRODUCTION

L'augmentation de la cadence des manipulateurs robotisés est un défi depuis des décennies afin de réduire les coûts et d'augmenter le volume de production. Le besoin est encore plus grand à petite échelle où le niveau de production (par exemple, MEMS, microélectronique) est énorme. L'augmentation de la cadence de manipulation est donc un véritable enjeu pour cette industrie.

Les travaux récents en microrobotique et micromanipulation ouvrent la voie au développement de manipulateurs parallèles miniaturisés dont la faible masse mobile permet d'atteindre des vitesses inégalées pour la micromanipulation par contact. L'un des résultats marquants est le Millidelta [McClintock 18], un robot parallèle miniaturisé de type Delta capable d'effectuer des trajectoires à très grande vitesse tels que des cercles avec une fréquence pouvant aller jusqu'à 75 Hz.

Cependant, l'intégration de la fonction de préhension au sein de telles structures n'est pas résolue et reste un enjeu de taille pour permettre de tenir des cadences élevées d'assemblage et de manipulation de micro-objets au sein de micro-usines.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la conception et la modélisation d'un robot parallèle intégrant la préhension pour des applications de prise-dépose de micro-objets avec une haute cadence. Pour cela, nous présenterons une structure robotique originale avant de nous intéresser à la modélisation en utilisant les résultats du chapitre 2. Nous présenterons ensuite une méthode permettant de déterminer la position de référence optimisant l'espace accessible suivant  $\mathbf{z}_w$  en fonction de certains paramètres de la structure. Enfin, nous utiliserons les différents résultats et des simulations par la méthode des éléments finis pour dimensionner un prototype miniaturisé.

## 3.2 PRÉSENTATION ET MODÉLISATION DE LA STRUCTURE ROBOTIQUE

### 3.2.1 Architecture robotique

La structure robotique originale proposée dans le cadre de cette thèse repose sur les principes précédemment développés dans le chapitre 1. L'architecture a été spécialement pensée pour l'échelle micrométrique avec l'intégration d'articulations souples. De plus, cette architecture doit tenir compte de deux contraintes que sont la fabrication dans le plan (contrainte de microfabrication) et l'utilisation d'actionneurs piézoélectriques. L'architecture robotique proposée, dont le graphe d'agencement est visible en figure 3.1a, permet d'obtenir les trois translations usuelles de l'espace ainsi que l'ouverture et la fermeture d'une pince intégrée directement dans la structure robotique. Cette pince est donc directement actionnée et contrôlée par les actionneurs situés à la base.

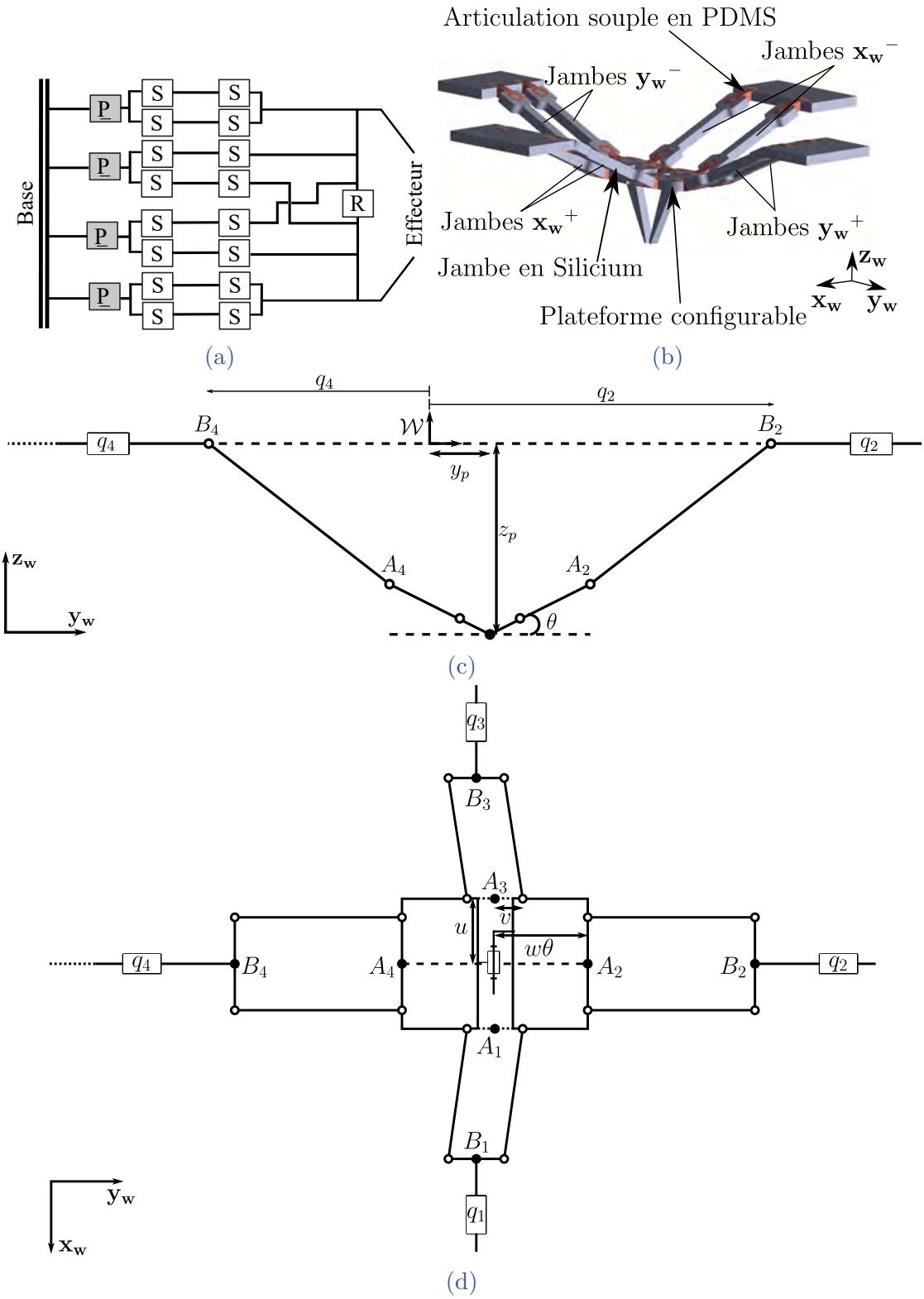
La plateforme du robot (extrémité du robot parallèle) peut être décomposée en deux parties, à savoir la partie droite  $\mathbf{y}_w^+$  et la partie gauche  $\mathbf{y}_w^-$  (voir figure 3.1b). Chacune des deux parties est équipée d'un doigt de la pince. Les jambes suivant l'axe  $\mathbf{y}_w$  (jambes  $\mathbf{y}_w^+$  et  $\mathbf{y}_w^-$ ) sont attachées respectivement à la partie droite et à la partie gauche de la plateforme. Chacune des jambes suivant l'axe  $\mathbf{x}_w$  est attachées d'une part à la partie droite et d'autre part à la partie gauche. Les deux parties de la plateforme sont liées par une liaison pivot (ou deux liaisons rotules en parallèle) qui permet de « plier » la plateforme et d'actionner la pince. Chacune des jambes a la même structure, à savoir, deux liens en parallèle reliés d'une part à l'actionneur par une liaison rotule et à la plateforme d'autre part avec une liaison rotule.

### 3.2.2 Modélisation géométrique

De manière générale pour modéliser une structure robotique, le modèle géométrique est déterminé afin de pouvoir étudier son comportement et commander le robot. Le modèle géométrique donne les contraintes géométriques de la structure robotique [Merlet 06b]. En d'autres termes, il donne les relations entre les coordonnées cartésiennes (ou pose cartésienne) du robot  $\mathbf{x}$  et les coordonnées articulaires  $\mathbf{q}$ . Il existe deux types de modèles géométriques, le modèle géométrique direct (MGD) et le modèle géométrique inverse (MGI). Le MGD permet de passer des coordonnées articulaires connues à la pose cartésienne du robot quand le MGI permet de résoudre le problème inverse. En robotique parallèle, il est usuellement plus facile d'obtenir le MGI.

#### 3.2.2.1 Hypothèses et paramétrisation

Afin de mettre en place la modélisation de la structure robotique, les articulations souples introduites pour la structure miniaturisée sont définies comme étant



**FIGURE 3.1 – Présentation de la structure robotique à 4 ddl intégrant la préhension.** (a) Graphe d'agencement de la solution proposée (voir annexe A page 142). (b) Modélisation CAO du mécanisme parallèle pour des applications microrobotiques résultant de l'architecture robotique. (c) Schéma cinématique projeté dans le plan  $Oy_w z_w$ . (d) Schéma cinématique projeté dans le plan  $Ox_w y_w$ .

des articulations rotules. Cette hypothèse de modélisation a été validée dans le chapitre 2. Les projections donnant la vue de coté (voir figure 3.1c) et la vue de dessus (voir figure 3.1d) permettent de visualiser la plupart des paramètres définis ci-contre :

- $q_i$  est la position du  $i^{\text{ème}}$  actionneur.  $\mathbf{q}$  est le vecteur de pose articulaire.
- $2u$  est la largeur de la plateforme.
- $2w$  est la longueur de la plateforme dans sa configuration plane.
- $v$  est la distance entre le centre de la plateforme et le centre des liaisons sphériques des jambes reliées aux actionneurs 1 et 3.
- $\theta$  est l'angle entre la plateforme à l'horizontale et les parties gauche et droite respectivement.
- $\mathbf{x}$  désigne la pose cartésienne du robot et est composée des trois coordonnées de déplacement  $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$  ainsi que de l'angle  $\theta$ .
- $l$  représente la longueur des jambes.

De par l'ancrage des jambes suivant l'axe  $\mathbf{x}_w$  au niveau de la plateforme, afin de garantir l'intégrité structurelle, l'angle entre la partie gauche (respectivement la partie droite) et l'horizontale est toujours le même. Ce qui permet de n'introduire qu'un seul paramètre pour définir le mouvement d'ouverture / fermeture de la plateforme. Autrement dit les deux parties de la plateforme doivent être actionnées de manière symétrique pour le pilotage du préhenseur afin de préserver l'intégrité de la structure robotique. Un autre point important, lié au précédent, concerne les valeurs que l'angle de la plateforme peut prendre. En effet, pour assurer le bon fonctionnement et l'intégrité structurelle, l'angle  $\theta$  doit rester petit. Par conséquent, nous allons utiliser le développement de Taylor de premier ordre autour de zéro pour le cosinus et le sinus menant à l'approximation suivante :  $\sin(\theta) = \theta + o(\theta^3)$  et  $\cos(\theta) = 1 + o(\theta^2)$ .

### 3.2.2.2 Modèle géométrique inverse

En vue de l'écriture du modèle géométrique, il est nécessaire d'exprimer les points dans le même repère monde  $\mathcal{W}$ . Le centre de ce repère se situe au milieu de la structure dans sa configuration plane. Ce qui donne les expressions suivantes pour les points  $A_i$  :

$${}^w A_1 = \begin{pmatrix} x_p + u \\ y_p \\ z_p + v\theta \end{pmatrix}; {}^w A_2 = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p + w \\ z_p + w\theta \end{pmatrix}; {}^w A_3 = \begin{pmatrix} x_p - u \\ y_p \\ z_p + v\theta \end{pmatrix}; {}^w A_4 = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p - w \\ z_p + w\theta \end{pmatrix}$$

Pour les points  $B_i$ , les expressions sont encore plus simples puisqu'elles sont directement reliées aux positions des actionneurs :

$${}^w B_1 = \begin{pmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; {}^w B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \end{pmatrix}; {}^w B_3 = \begin{pmatrix} q_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; {}^w B_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ q_4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Avec les points exprimés dans le même repère, nous pouvons écrire les équations de fermeture géométrique qui sont la première étape menant à la résolution du modèle géométrique inverse :

$$\forall i \in [1, 4] \quad \left\| \overrightarrow{wA_i wB_i} \right\|^2 = l^2 \quad \text{ou} \quad \left\| wB_i - wA_i \right\|^2 = l^2 \quad (3.1)$$

Pour des raisons de lisibilité et aussi pour rendre la résolution du MGD plus simple à suivre par la suite, nous avons explicité le développement des quatre équations issues de (3.1) :

$$(x_p + u - q_1)^2 + y_p^2 + (z_p + v\theta)^2 = l^2 \quad (3.2)$$

$$(x_p - u - q_3)^2 + y_p^2 + (z_p + v\theta)^2 = l^2 \quad (3.3)$$

$$x_p^2 + (y_p + w - q_2)^2 + (z_p + w\theta)^2 = l^2 \quad (3.4)$$

$$x_p^2 + (y_p - w - q_4)^2 + (z_p + w\theta)^2 = l^2 \quad (3.5)$$

Du fait de la présence d'expressions au carré, le développement et l'isolement des différents termes des différentes équations de fermeture mènent pour chaque actionneur  $q_i$  à deux configurations possibles. Les contraintes géométriques et d'assemblage permettent de n'obtenir qu'une seule solution pour chacun. En effet, sur les deux solutions mathématiques, l'une est structurellement réalisable tandis que l'autre ne l'est pas. Les quatre équations alors obtenues forment le MGI :

$$\begin{cases} q_1 &= x_p + u + \sqrt{l^2 - y_p^2 - (z_p + v\theta)^2} \\ q_2 &= y_p + w + \sqrt{l^2 - x_p^2 - (z_p + w\theta)^2} \\ q_3 &= x_p - u - \sqrt{l^2 - y_p^2 - (z_p + v\theta)^2} \\ q_4 &= y_p - w - \sqrt{l^2 - x_p^2 - (z_p + w\theta)^2} \end{cases} \quad (3.6)$$

Le MGI (voir équation (3.6)) permet aussi d'obtenir une condition pour l'appartenance d'une pose cartésienne à l'espace de travail du manipulateur. En effet, pour qu'une pose  $\mathbf{x} = (x_p; y_p; z_p; \theta)$  soit dans l'espace de travail, il est nécessaire que la condition suivante soit respectée :

$$(y_p^2 + (z_p + v\theta)^2 \leq l^2) \quad \text{ET} \quad (x_p^2 + (z_p + w\theta)^2 \leq l^2) \quad (3.7)$$

Cette condition d'appartenance sera utilisée pour déterminer l'espace de travail du manipulateur et pour vérifier qu'un point est bel et bien atteignable par le manipulateur lors de la génération de trajectoire.

### 3.2.2.3 Modèle géométrique direct

Contrairement aux robots sériels, le MGD est généralement compliqué à calculer pour un robot parallèle. Les équations mènent le plus souvent à plusieurs solutions possibles qui sont appelées les modes d'assemblage du robot. Avec quelques simplifications, il peut être possible de définir le MGD de manière analytique pour

notre structure robotique. Afin de l'obtenir, nous allons de nouveau utiliser les équations de fermeture et les manipuler en faisant des combinaisons linéaires afin d'isoler chaque composante de la pose cartésienne  $\mathbf{x}$ .

La différence entre les équations (3.2) et (3.3) permet d'extraire deux informations. La première est la valeur de  $x_p$  en fonction des paramètres articulaires  $q_1$  et  $q_3$  :

$$\forall q_1, q_3 \quad x_p = \frac{q_1 + q_3}{2} \quad (3.8)$$

La deuxième information obtenue est une relation entre la largeur de la plateforme et une position possible des actionneurs.

$$\exists q_1, q_3 \quad 2u - q_1 + q_3 = 0 \quad (3.9)$$

Cette dernière relation (équation (3.9)) correspond au fait que la distance entre les actionneurs  $q_1$  et  $q_3$  est la même que la largeur de la plateforme et, par conséquent, que les jambes  $\mathbf{x}_w^+$  et  $\mathbf{x}_w^-$  sont perpendiculaires à la plateforme. Autrement dit c'est le cas pour lequel les jambes  $\mathbf{x}_w^+$  et  $\mathbf{x}_w^-$  sont suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$ . Il s'agit d'une position singulière du manipulateur.

En effectuant une manipulation similaire avec les relations (3.4) et (3.5), on obtient l'expression de  $y_p$  et une expression reliant la longueur de la plateforme et la position des actionneurs :

$$\forall q_2, q_4 \quad y_p = \frac{q_2 + q_4}{2} \quad (3.10)$$

$$\exists q_2, q_4 \quad 2w - q_2 + q_4 = 0 \quad (3.11)$$

Concernant la relation (3.11), la conclusion est similaire à celle concernant la relation (3.9), il s'agit d'une position singulière. Dans le cas où les deux conditions précédentes sont vérifiées, il s'agit bien entendu aussi d'une configuration singulière.

Les deux dernières composantes de  $\mathbf{x}$  à savoir  $z_p$  et  $\theta$  sont couplées et donc l'obtention des expressions analytiques est moins directe que pour  $x_p$  et  $y_p$ . Il est possible d'obtenir, de nouveau par combinaisons linéaires des quatre équations de fermeture, les deux relations suivantes :

$$(3.2) + (3.4) \Rightarrow 2(z_p + v\theta)^2 = \underbrace{2l^2 - (x_p + u - q_1)^2 - (x_p - u - q_3)^2 - 2y_p^2}_a$$

$$(3.3) + (3.5) \Rightarrow 2(z_p + w\theta)^2 = \underbrace{2l^2 - (y_p + w - q_2)^2 - (y - w - q_4)^2 - 2x_p^2}_b \quad (3.12)$$

Pour permettre le découplage de  $z_p$  et  $\theta$ , les deux équations précédentes conduisent à quatre systèmes algébriques qui correspondent aux quatre modes d'assemblage qui en découlent :

$$(S_1) \left\{ \begin{array}{lcl} z_p + v\theta & = & \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \\ z_p + w\theta & = & \frac{\sqrt{b}}{\sqrt{2}} \end{array} \right.$$

$$(S_2) \begin{cases} z_p + v\theta = -\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \\ z_p + w\theta = -\frac{\sqrt{b}}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

$$(S_3) \begin{cases} z_p + v\theta = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \\ z_p + w\theta = -\frac{\sqrt{b}}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

$$(S_4) \begin{cases} z_p + v\theta = -\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2}} \\ z_p + w\theta = \frac{\sqrt{b}}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

Parmi ces quatre systèmes, deux d'entre eux ((S<sub>3</sub>) et (S<sub>4</sub>)) donnent un angle  $\theta$  avec des valeurs proches de  $2\pi$  ce qui est en contradiction avec la contrainte des petits angles. De plus, ce genre d'angle sur la plateforme n'est pas montable du fait que cela signifie que les jambes sont croisées. Les systèmes (S<sub>1</sub>) et (S<sub>2</sub>) donnent des solutions plausibles d'un point de vue angulaire. En effet, les deux donnent le même angle, mais dans des configurations différentes. L'un donne la solution avec la pince vers le haut (au dessus de 0) et l'autre avec la pince vers le bas (en dessous de 0). Du fait de la configuration choisie pour réaliser des tâches de prise-dépose et du montage, la solution qui correspond est celle avec la pince vers le bas, c'est-à-dire la solution issue du système (S<sub>2</sub>). La solution obtenue est donc la suivante :

$$\begin{cases} \theta = -\frac{\sqrt{a}-\sqrt{b}}{\sqrt{2}(v-w)} \\ z = -\frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{a}+\sqrt{b}}{\sqrt{2}} + (v+w)\theta \right) \end{cases} \quad (3.13)$$

Ce système permet de mettre en évidence le couplage entre  $z_p$  et  $\theta$  et de montrer que ces deux déplacements sont liés bien que contrôlables de manière séparée. Finalement, les équations (3.8), (3.10) et (3.13) forment le MGD de la structure robotique.

### 3.2.3 Modélisation cinématique

Les modèles géométriques direct et inverse permettent notamment de faire la commande du robot et de tracer l'espace de travail. Pour obtenir des informations sur la manipulabilité, il est nécessaire d'obtenir la matrice jacobienne  $\mathbf{J}$  liée au robot. En dérivant les équations de fermeture on obtient les matrices  $\mathbf{J}_x$  et  $\mathbf{J}_q$  reliant  $\dot{\mathbf{x}}$  et  $\dot{\mathbf{q}}$  :

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (3.14)$$

La matrice  $\mathbf{J}_x$  regroupe les termes liés à la pose cartésienne tandis que  $\mathbf{J}_q$  regroupe les termes liés aux déplacements articulaires.

$$\mathbf{J}_x = \begin{pmatrix} x_p + u - q_1 & y_p & z_p + v\theta & v(z_p + v\theta) \\ x_p & y_p + w - q_2 & z_p + w\theta & w(z_p + w\theta) \\ x_p - u - q_3 & y_p & z_p + v\theta & v(z_p + v\theta) \\ x_p & y_p - w - q_4 & z_p + w\theta & w(z_p + w\theta) \end{pmatrix}$$

La matrice  $\mathbf{J}_q$  est, quand à elle, une matrice diagonale :

$$\mathbf{J}_q = \begin{pmatrix} x_p + u - q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_p + w - q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_p - u - q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_p - w - q_4 \end{pmatrix}$$

Le modèle cinématique direct peut alors être obtenu grâce à la matrice jacobienne  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_x^{-1} \mathbf{J}_q$  seulement si  $\mathbf{J}_x$  est inversible.

### 3.2.4 Analyse de l'espace de travail de la structure

#### 3.2.4.1 Singularités remarquables

Dans le contexte robotique, lorsque le robot perd ou gagne un degré de liberté on parle de position singulière ou de singularité. De manière générale, trois types de singularité sont distingués [Gosselin 90].

Dans un premier temps, il y a les singularités de type I qui sont des singularités que l'on détermine en utilisant  $\mathbf{J}_q$ . Ces singularités correspondent à une limite de l'espace de travail le plus souvent, mais peuvent aussi se trouver au milieu de ce dernier (limite d'un aspect). Concrètement, pour les singularités de type I, on perd le contrôle d'au moins un degré de liberté de la structure. Pour les déterminer, on cherche les configurations pour lesquelles le déterminant de  $\mathbf{J}_q$  est nul. Dans le cas de notre manipulateur, ce genre de singularité apparaît lorsque l'une des composantes de  $\mathbf{J}_q$  est nulle. Il se trouve que cette condition est remplie pour des configurations similaires pour chacun des termes. Il s'agit des cas où une jambe est perpendiculaire à la plateforme, c'est-à-dire alignée avec l'axe  $\mathbf{z}_w$ .

Les singularités de type II sont, quant à elles, déterminées avec la matrice  $\mathbf{J}_x$  avec la même condition. En effet, on aura une singularité lorsque le déterminant de  $\mathbf{J}_x$  sera nul. Ce genre de singularité correspond là aussi à une perte de contrôle d'au moins un degré de liberté. Contrairement à la singularité de type I où le degré de liberté devient fixe, ici, on ne sait pas dans quelle direction et avec quelle valeur le déplacement va avoir lieu. Dans le cas de notre matrice, il est plus compliqué d'obtenir analytiquement toutes les conditions d'annulation du déterminant. C'est pourquoi nous ne mènerons pas une analyse exhaustive de ce type de singularité.

Cependant, il y a des singularités remarquables assez simples à déterminer. La première est une singularité de conception. En effet, si  $v$  est égal à  $w$  alors il y a une perte de rang de la matrice  $\mathbf{J}_x$ . Une autre singularité qui lie les deux dernières colonnes est le cas où le manipulateur est à une hauteur nulle (i.e.  $z_p = 0$ ) et avec un angle nul. Il s'agit tout simplement de la configuration plane du robot (voir figure 3.2).

Les singularités de type III sont celles qui correspondent à une annulation simultanée du déterminant des matrices  $\mathbf{J}_x$  et  $\mathbf{J}_q$ . Dans le cas de notre structure, il y en a au moins une qui est évidente. Il s'agit de la position  $x_p = 0, y_p = 0$ ,

$z_p = l$  et  $\theta = 0$ . En effet, dans ce cas, les quatre jambes sont perpendiculaires à la plateforme. Une représentation schématique de la position singulière est donnée dans la figure 3.2.

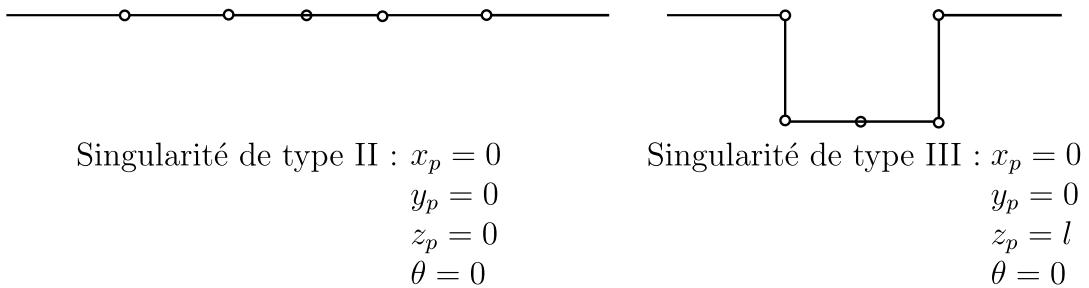


FIGURE 3.2 – Représentation schématique de deux singularités remarquables du manipulateur. La première est la configuration plane qui est une singularité de type II et la seconde une singularité de type III.

### 3.2.4.2 Espace de travail en translation

L'espace de travail en translation du manipulateur a été calculé numériquement sur un exemple en utilisant le jeu de valeurs suivant<sup>1</sup> :  $u=1,45$  mm,  $w=2,9$  mm,  $v=1,45$  mm et  $l=5,8$  mm. Dans le cas de cet exemple, aucune contrainte en termes de course d'actionnement n'a été appliquée. Pour cela, nous avons considéré un angle de plateforme fixe et fait varier les différents paramètres constituant  $\mathbf{x}$ . Pour chaque pose obtenue, nous vérifions qu'elle remplit la condition (3.7) et si c'est le cas alors la pose est ajoutée à la liste des points accessibles. Les limites de la partie basse de l'espace de travail avec  $\theta = 0$  sont visibles en bleu dans les vues en coupe des figures 3.3 et 3.4.

La limite basse de l'espace de travail correspond à la singularité de type III que nous avons identifiée. L'espace de travail dans le plan  $O\mathbf{x_w}\mathbf{y_w}$  est un carré dont la taille dépend de  $z_p$ . Au maximum, c'est-à-dire pour  $z_p = 0$ , le carré a un côté de la longueur de la jambe  $l$ . Ces figures permettent de montrer que pour cette structure la longueur des jambes  $l$  est le facteur limitant de l'espace de travail.

Après avoir analysé les singularités et tracé les limites de l'espace de travail, nous allons dans la suite étudier la manipulabilité du manipulateur c'est-à-dire la capacité à déplacer le manipulateur à une position donnée. Pour mener cette analyse nous allons distinguer deux cas, à savoir la manipulabilité en translation et la manipulabilité en rotation.

### 3.2.4.3 Manipulabilité en translation

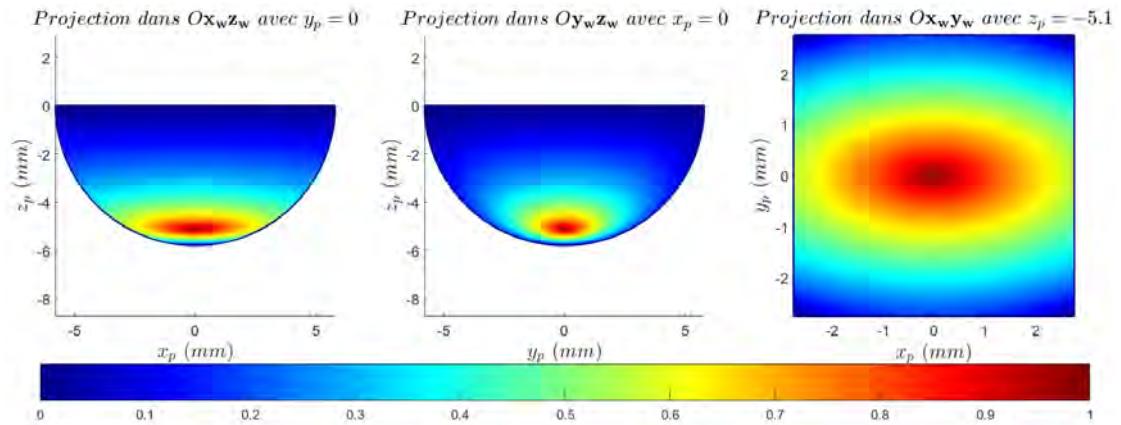
Pour représenter la manipulabilité en translation du manipulateur avec un angle  $\theta$  constant, nous avons choisi d'utiliser l'inverse du nombre de condition-

1. Les valeurs correspondent au dimensionnement du mécanisme parallèle présenté en section 3.4.1 en page 72

nement [Merlet 06a, Botello-Aceves 18, Patel 15]. Cet indice est noté  $\kappa$  et défini comme suit :

$$\kappa = \sqrt{\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{G}\mathbf{G}^T)}{\lambda_{\max}(\mathbf{G}\mathbf{G}^T)}} \quad (3.15)$$

avec  $\mathbf{G}$  la sous-matrice composée des trois premières lignes de  $\mathbf{J}$ .  $\lambda_{\max}(\cdot)$  et  $\lambda_{\min}(\cdot)$  sont les fonctions qui donnent les valeurs propres respectivement maximale et minimale. L'indice  $\kappa$  est normé entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 indique un contrôle homogène du manipulateur suivant les trois directions tandis qu'un zéro indique une singularité sans donner d'informations sur le type de la singularité. La figure 3.3 donne une représentation de  $\kappa$  pour un angle  $\theta = 0$  dans trois plans différents. On observe que l'indice est proche de 1 autour d'une configuration située dans la partie basse de l'espace de travail. Cette position est toutefois proche des limites de l'espace de travail, donc difficilement utilisable dans un cas concret de manipulation d'autant plus que l'indice évolue rapidement vers des valeurs proches de 0 dans la direction  $\mathbf{y}_w$ .



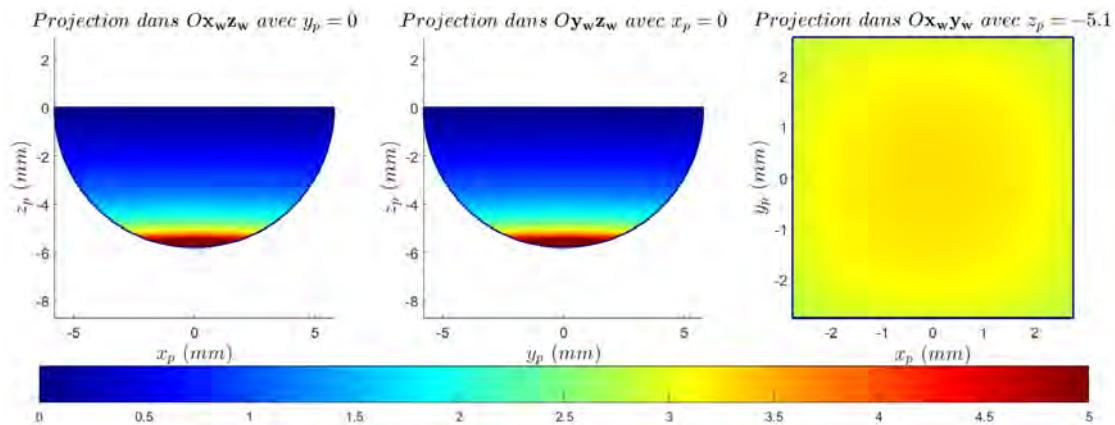
**FIGURE 3.3 – Manipulabilité en translation de la structure sans contrainte sur la course d'actionnement.** Représentation de l'indice  $\kappa$  dans trois plans. Pour cette analyse l'angle  $\theta$  est considéré constant et nul. Les limites de l'espace de travail sont tracées en bleu.

#### 3.2.4.4 Manipulabilité en rotation

Le deuxième aspect de la manipulabilité à étudier est la manipulabilité en rotation. Dans notre cas, cela nous donnera des indications sur la capacité d'actionner la pince intégrée à la structure robotique. Contrairement à ce qui a été fait pour la manipulabilité en translation, du fait qu'il n'existe qu'une unique rotation nous ne pourrons pas utiliser un indice similaire à  $\kappa$ . Nous avons donc introduit l'indice  $\tau$  :

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{H}\mathbf{H}^T}} \quad (3.16)$$

avec  $\mathbf{H}$  qui est la dernière ligne de  $\mathbf{J}$ . Le scalaire  $\tau$  n'est pas normé contrairement à  $\kappa$ . Quand  $\tau$  atteint zéro, cela signifie que l'on est dans une configuration singulière où le ratio de transmission entre  $\theta$  et les déplacements des actionneurs est infini. Au contraire, plus l'indice  $\tau$  est grand plus le rapport de transmission est faible. Si  $\tau \sim \infty$ , le rapport de transmission est nul ce qui signifie que l'angle de la plateforme ne peut plus être modifié par des mouvements des actionneurs. Pour des raisons de lisibilité, dans la représentation de cet indice en figure 3.4 nous avons tronqué les indices supérieurs à 5. On trouve ces valeurs dans la partie basse de l'espace de travail. Pour des valeurs de  $z_p$  entre -1 mm et -4 mm, l'indice  $\tau$  est compris entre 0,4 et 1,4. Ces valeurs correspondent à un rapport de transmission entre 2,5 et 0,7.



**FIGURE 3.4 – Manipulabilité en rotation de la structure sans contrainte sur la course d'actionnement.** Représentation de l'indice  $\tau$  dans trois plans. Pour cette analyse  $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$  sont constants et on calcule la capacité à modifier  $\theta$  en chacun des points de l'espace de travail. Dans le cas présenté, on se place autour de  $\theta = 0$ . Les limites de l'espace de travail sont tracées en bleu.

Il est important de noter que les paramètres géométriques de la plateforme n'ont pas d'influence sur les limites de l'espace de travail pour un angle donné et à longueur de jambe constante. Cependant ces paramètres permettent d'agir sur la manipulabilité.

Cette section a permis de déterminer les différents modèles de la structure robotique afin d'en extraire des informations générales relatives à l'espace de travail, la présence de certaines singularités et l'analyse de la manipulabilité du manipulateur. Ces informations ont été obtenues pour certaines de manière numérique en utilisant les dimensions d'une version miniaturisée de la structure parallèle qui sera utilisée pour le micromanipulateur MiGriBot.

### 3.3 RECHERCHE DE LA POSE DE RÉFÉRENCE

Nous avons pu voir les capacités en termes d'espace de travail et de manipulabilité de la structure robotique dans le cas général. Il en ressort que pour pouvoir profiter de l'espace de travail complet du manipulateur il faut que la course des actionneurs soit égale au minimum à quatre fois la longueur des jambes. En raison de diverses contraintes de conception ou matérielles (actionneurs principalement), il n'est pas toujours possible de satisfaire cette exigence. En effet, dans la majorité des cas il est nécessaire de faire un compromis sur différentes performances que peuvent être le volume de l'espace de travail, les performances dynamiques du robot et sa répétabilité de positionnement par exemple. Il y a alors plusieurs stratégies pour définir l'espace de travail utilisable. Nous avons choisi dans le cas de notre structure de nous intéresser à la position au repos (position référence), c'est-à-dire la position pour laquelle les actionneurs sont au centre de leur course. Partant de cela, nous cherchons la position référence qui permet de maximiser l'espace accessible suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$  en fonction de la course des actionneurs et de la longueur des jambes.

#### 3.3.1 Hypothèses et paramétrisation

Afin de simplifier le problème nous allons nous placer dans le cas où l'angle  $\theta$  est nul, autrement dit la plateforme est plane. L'objectif de cette section est de définir la position de référence permettant de maximiser la course suivant  $\mathbf{z}_w$  atteignable lorsque  $x_p = 0$  et  $y_p = 0$ . L'étude de l'amplitude de l'espace accessible sera faite pour  $x_p = 0$  et  $y_p = 0$  car c'est dans cette configuration que l'on peut obtenir les positions les plus hautes et les plus basses suivant  $\mathbf{z}_w$ . La figure 3.5 fournit une représentation schématique du robot avec un espace de travail quelconque et les différents paramètres que nous avons introduit pour cette étude :

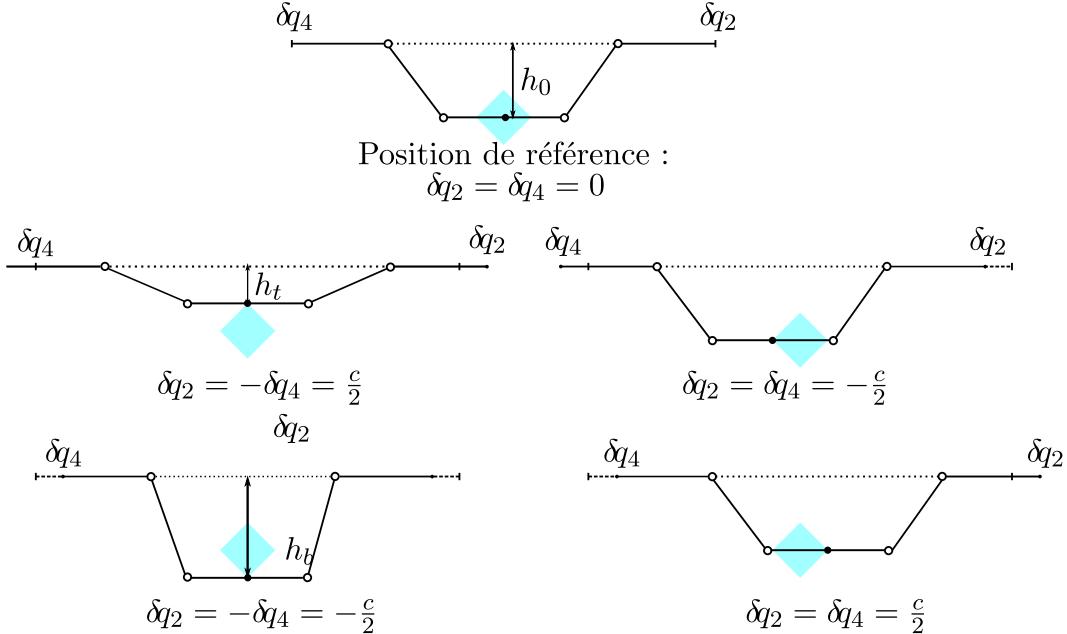
- $h = z_p$  qui correspond à l'élévation du robot par rapport à la position plane.
- $h_0$  est l'élévation de la position de référence du robot.
- $q_{i_0}$  qui est la position de l'actionneur  $q_i$  à la position de référence.
- $\delta q_i$  qui correspond au déplacement de l'actionneur  $q_i$  par rapport à  $q_{i_0}$ . On obtient alors que  $q_i = q_{i_0} + \delta q_i$ .
- $c$  qui représente la course totale de chacun des actionneurs et donc  $\delta q_i \in [-\frac{c}{2}; \frac{c}{2}]$ .
- $h_t$  est la position la plus haute qui peut être atteinte.
- $h_b$  est la position la plus basse que le robot peut atteindre.
- $\delta h$  est la course suivant  $\mathbf{z}_w$  atteignable.

Il est important de remarquer que pour  $z_p = h_0$ , les valeurs maximales (respectivement minimales) de  $x_p$  et  $y_p$  sont  $\frac{c}{2}$  (respectivement  $-\frac{c}{2}$ ).

Finalement, le problème d'optimisation à résoudre correspond à la recherche de la position de référence  $h_0$  permettant de maximiser l'espace de travail accessible  $\delta h$  par le manipulateur suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$ . Le problème à résoudre de manière générale

avec la contrainte  $\delta q_i \in [-\frac{c}{2}; \frac{c}{2}]$  est le suivant :

$$h_0^*(l, c) = \max_{h_0} \delta h(l, c, h_0) \quad (3.17)$$



**FIGURE 3.5 – Principe de la recherche de la position de référence et paramétrisation.** Représentation schématique dans le plan  $Oy_wz_w$  de 5 configurations (position home, la position la plus à gauche, la plus à droite, la plus basse et la plus haute) incluses dans l'espace de travail en cyan. Ces configurations permettent de définir les paramètres de la recherche de la position home ainsi que les valeurs des  $\delta q_i$ .

### 3.3.2 Mise en équation

L'introduction des paramètres étant faite, nous allons procéder à la mise en équation du problème. Dans un premier temps nous allons déterminer la position de chaque actionneur en fonction de la position de référence :

$$\begin{cases} q_1 = u + \sqrt{l^2 - h_0^2} + \delta q_1 \\ q_2 = w + \sqrt{l^2 - h_0^2} + \delta q_2 \\ q_3 = -u - \sqrt{l^2 - h_0^2} + \delta q_3 \\ q_4 = -w - \sqrt{l^2 - h_0^2} + \delta q_4 \end{cases} \quad (3.18)$$

Pour déterminer  $h$  dans le cas général nous allons utiliser l'expression de  $z_p$  que nous avons déterminée lors du calcul du MGD. Comme nous nous sommes placés dans le cas où  $\theta = 0$ , l'expression (3.13) permet d'obtenir  $z_p$  simplement :

$$z_p = h = -\frac{\sqrt{a} + \sqrt{b}}{2\sqrt{2}} \quad (3.19)$$

En utilisant les expressions des  $q_i$  définies en (3.18), il est possible de réécrire les expressions de  $a$  et  $b$  obtenues dans (3.12) :

$$\begin{cases} a &= 2l^2 - \left(-\sqrt{l^2 - h_0^2} - \delta q_1\right)^2 - \left(\sqrt{l^2 - h_0^2} - \delta q_3\right)^2 \\ b &= 2l^2 - \left(-\sqrt{l^2 - h_0^2} - \delta q_2\right)^2 - \left(\sqrt{l^2 - h_0^2} - \delta q_4\right)^2 \end{cases} \quad (3.20)$$

Cette étude étant faite en  $x_p = 0$  et  $y_p = 0$ , on a toujours  $\delta q_1 = \delta q_2$  et  $\delta q_3 = \delta q_4$  et donc  $a = b$ . En réinjectant les expressions obtenues dans l'équation (3.19), on obtient après développement et simplification l'expression de  $h$  :

$$h = \sqrt{h_0^2 - (\delta q_4 - \delta q_2) \sqrt{l^2 - h_0^2} - \frac{\delta q_4^2 + \delta q_2^2}{2}} \quad (3.21)$$

Dans la position la plus haute, on a  $\delta q_2 = -\delta q_4 = \frac{c}{2}$  ce qui permet de déterminer l'expression de  $h_t$  à l'aide de la course des actionneurs :

$$h_t = -\sqrt{h_0^2 - c\sqrt{l^2 - h_0^2} - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (3.22)$$

De manière similaire, on a pour la position la plus basse accessible  $\delta q_2 = -\delta q_4 = -\frac{c}{2}$  :

$$h_b = -\sqrt{h_0^2 + c\sqrt{l^2 - h_0^2} - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (3.23)$$

Finalement, on obtient l'expression de  $\delta h$  par la différence entre  $h_t$  et  $h_b$  :

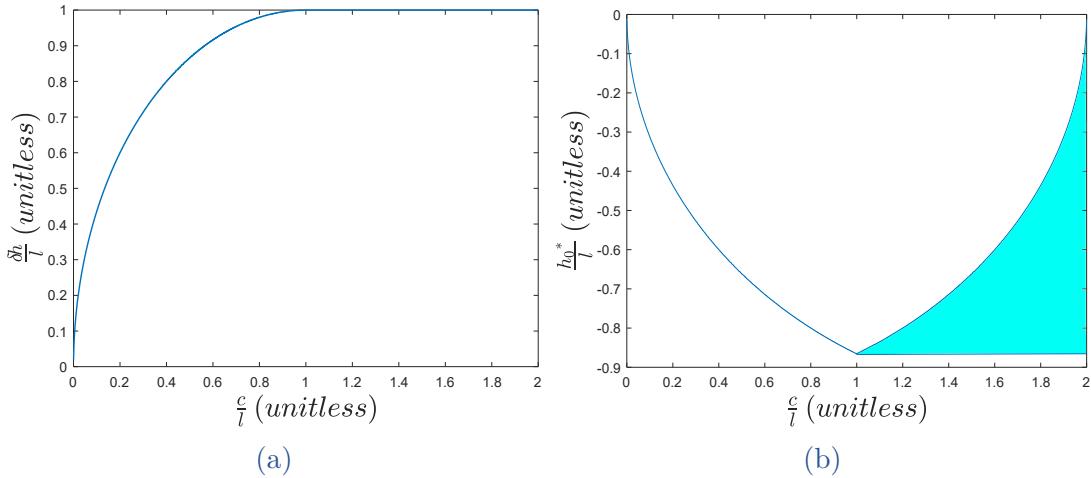
$$\delta h = h_t - h_b = -\sqrt{h_0^2 - c\sqrt{l^2 - h_0^2} - \left(\frac{c}{2}\right)^2} + \sqrt{h_0^2 + c\sqrt{l^2 - h_0^2} - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (3.24)$$

C'est cette expression de  $\delta h$  qui va permettre d'étudier et d'optimiser l'élévation de la pose initiale dans le but de maximiser la hauteur de l'espace de travail accessible.

### 3.3.3 Optimisation de la position de référence

Avant de commencer l'analyse, il y a quelques points qu'il faut bien garder en tête. Premièrement, la hauteur minimale que pourra atteindre le robot dans tous les cas est égale à l'opposé de la dimension des jambes. La course nécessaire pour utiliser l'ensemble de l'espace de travail offert par la structure est de quatre fois la longueur des jambes. Comme la course est symétrique, pour être sûr d'atteindre la partie la plus basse de l'espace de travail en partant de la position plane, il faudra avoir une course d'actionnement de deux fois la longueur des jambes. Il apparaît assez naturel d'éviter de passer la singularité de type II que nous avons identifiée, à savoir la configuration dans laquelle le robot est plan, puisque cela est inutile en vue du contrôle de la plateforme qui se trouverait inversé si nous passions dans des valeurs  $z_p$  positives et donc dommageables pour la pince intégrée

au mécanisme parallèle. C'est pourquoi nous avons considéré que le  $h_t$  maximum que nous pourrons atteindre est 0. Les remarques préliminaires ayant été faites, nous allons pouvoir procéder à la recherche de la pose de référence  $h_0$  permettant de maximiser l'espace de travail  $\delta h$  (voir équation(3.24)) accessible par le robot suivant l'axe  $z_w$ . Pour illustrer notre démarche, nous allons chercher la pose initiale en normalisant les différentes grandeurs en fonction de  $l$ .



**FIGURE 3.6 – Calcul de l'espace accessible suivant  $z_w$  et position initiale correspondante à choisir.** (a) Amplitude accessible normalisée en fonction de la course des actionneurs normalisée. (b) Hauteur normalisée de la position home en fonction de la course des actionneurs normalisée. Pour une course normalisée supérieure à 1, il existe plusieurs hauteurs de configuration de référence possibles (zone en cyan).

La figure 3.6a permet de visualiser l'espace accessible maximal normalisé  $\frac{\delta h}{l}$  en fonction de la course des actionneurs normalisée  $\frac{c}{l}$ . Nous pouvons constater que l'espace accessible maximal normalisé augmente jusqu'à ce que la course normalisée soit égale à 1 avant de rester constante pour des valeurs supérieures à 1. Cela signifie que si la course des actionneurs est supérieure à la longueur des jambes, il y aura toujours au moins une pose initiale  $h_0$  qui permettra de couvrir une plage de déplacement maximale  $\delta h = l$  entre les deux singularités suivant l'axe  $z_w$  représentée sur la figure 3.2 page 65.

La figure 3.6b permet de visualiser les poses de référence  $h_0^*$  qui permettent de maximiser  $\delta h$ . Sur la première partie de la courbe, c'est-à-dire jusqu'à  $\frac{c}{l} = 1$ , la courbe donne la valeur  $h_0^*$  tandis que sur la deuxième partie de la courbe il y a plusieurs valeurs qui permettent d'obtenir un  $\delta h = l$ . Ces différentes valeurs sont celles de la zone en cyan délimitée par la courbe bleue. Pour une course normalisée supérieure à 2, toutes les pose de référence permettent d'atteindre la course maximale  $\delta h = l$ .

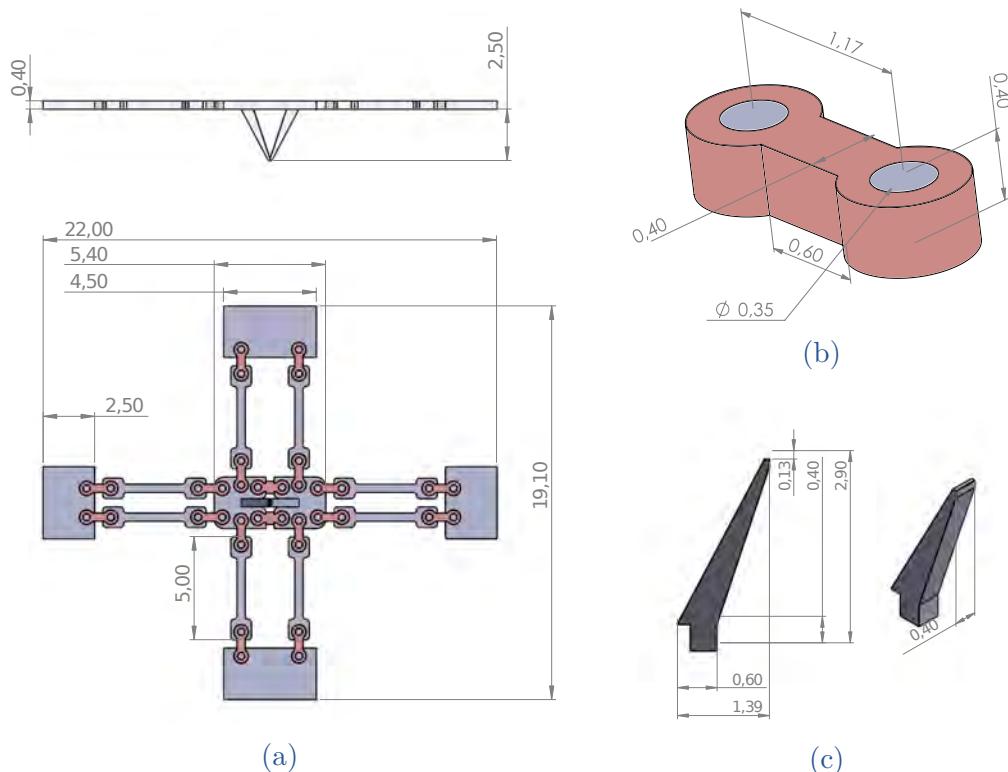
## 3.4 CONCEPTION DU MICROMANIPULATEUR MiGRI-BOT

Dans les sections précédentes nous avons analysé la structure robotique de manière générale et effectué la recherche de la position de référence permettant de maximiser l'espace de travail accessible suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$ . L'idée est maintenant de développer un micromanipulateur reposant sur cette architecture. Ce micromanipulateur, MiGriBot, se compose de deux parties distinctes. D'un côté le mécanisme parallèle qui repose sur l'architecture robotique et la partie actionnement d'autre part. MiGriBot est un micromanipulateur conçu pour répondre à plusieurs critères que sont la miniaturisation de la solution robotique, la manipulation de micro-objets dans un espace cubique de 500  $\mu\text{m}$  de coté et une cadence d'exécution élevée (de l'ordre de 10 opérations par seconde). Ces différents critères alliés à des contraintes de fabrication, d'assemblage et de commande seront pris en compte dans la conception du mécanisme parallèle et de la solution d'actionnement de MiGriBot.

### 3.4.1 Dimensionnement du mécanisme parallèle

Structurellement le mécanisme parallèle de MiGriBot est constitué de pièces en Silicium (en gris dans la figure 3.7a) reliées par des articulations souples en PDMS (en orange dans la figure 3.7a) jouant le rôle de liaisons rotules. La plateforme centrale est une plateforme configurable permettant l'intégration de la fonction de préhension. Elle est constituée de deux parties, la partie droite et la partie gauche. Les deux parties sont liées par deux articulations souples internes à la plateforme. Les deux liaisons permettent d'obtenir un comportement similaire à un pivot suivant l'axe  $\mathbf{x}_w$ . On obtient donc la rotation des deux éléments de la plateforme autour de l'axe  $\mathbf{x}_w$  et, par extension, l'ouverture/fermeture de la pince puisque chacune des parties de la plateforme configurable accueille un des doigts.

Les dimensions du mécanisme parallèle ont été choisies afin de remplir deux des objectifs fixés, le premier étant que son empreinte soit inférieure à 4  $\text{cm}^2$  tout en permettant l'intégration de la plateforme et une longueur de jambe suffisante pour effectuer des mouvements amples suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$ . Le deuxième objectif concerne l'espace de manipulation. L'idée étant de se rapprocher des volumes de travail obtenus en robotique conventionnelle. Le jeu de paramètres alors utilisé pour la conception du robot permet (voir figure 3.7) de remplir les deux objectifs précédemment énoncés. L'empreinte du mécanisme parallèle conçu est de 2,2 cm par 1,91 cm lorsqu'il est totalement plat comme ce sera le cas en fin de fabrication. Il est ensuite plié lors de son utilisation. Cette empreinte permet d'avoir un mécanisme bien plus compact que ceux existant actuellement dans la littérature. Par ailleurs, on retrouve les dimensions utilisées dans le chapitre 2 puisque le mécanisme d'étude était un sous-ensemble du mécanisme parallèle de MiGriBot suivant



**FIGURE 3.7 – Dimensionnement du mécanisme parallèle.** Mise en plan des différents éléments constitutifs du mécanisme parallèle. Les dimensions sont données en mm. (a) Dimensions du mécanisme parallèle complet. (b) Dimensions d'une articulation souple. (c) Dimensions d'un doigt constituant la pince.

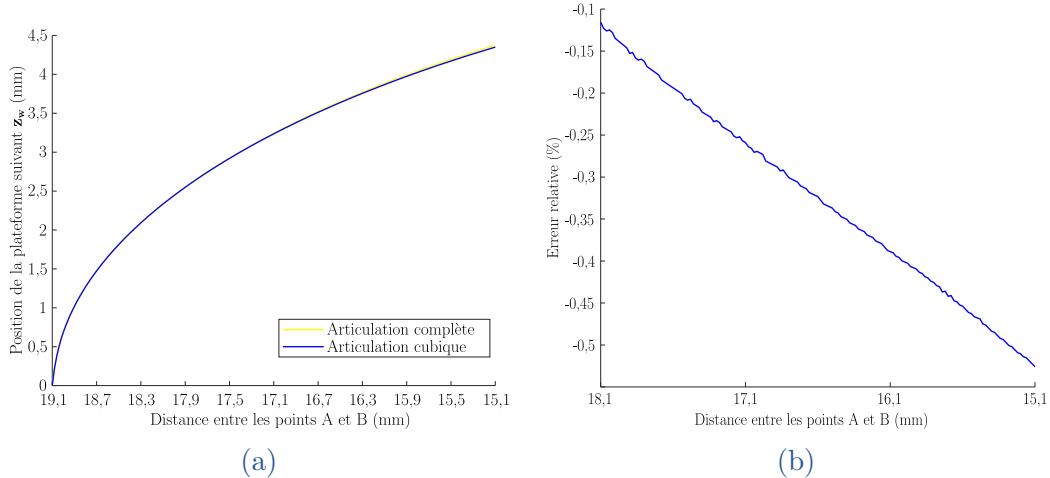
l'axe  $x_w$ . Les autres dimensions utiles du mécanisme parallèle sont données en figure 3.7a.

Les articulations souples sont une partie intégrante du mécanisme parallèle, elles vont permettre à la structure de se déformer et au mécanisme parallèle de se comporter comme un mécanisme conventionnel basé sur des articulations rotuleuses. Le mécanisme parallèle est constitué de 18 articulations souples. Les articulations permettent la jonction entre les différents éléments rigides en Silicium. L'ancrage des liaisons en PDMS sur les éléments rigides en Silicium est assuré par un cylindre en Silicium au sein de l'articulation (voir figure 3.7b). Ce cylindre a pour but d'empêcher la dislocation de l'articulation lors d'efforts en traction. Cela permet de maintenir l'intégrité du mécanisme parallèle lors de son utilisation.

Les derniers éléments formant le mécanisme parallèle sont les deux doigts qui ont une épaisseur de 0,4 mm qui permettent de saisir une large gamme d'objets. L'ensemble des autres dimensions sont visibles en figure 3.7c.

### 3.4.2 Approximation des articulations complètes

Les contraintes de fabrication et de conception nous ont mené à la conception des articulations souples visibles en figure 3.7b. Afin de s'assurer que les résultats de l'étude menée dans le chapitre 2 sur des articulations souples cubiques restent valables pour les articulations complètes conçues, incluant un cube central et les deux systèmes de fixation de part et d'autre. Pour valider cette hypothèse, nous allons simuler la structure de l'étude du chapitre 2 (voir figure 2.1 en page 33) avec les articulations complètes et avec les articulations cubiques. Nous avons alors mené cette étude comparative sous ANSYS avec le modèle  $A_{3D,fin}$  (première ligne de la table 2.2 en page 42). La figure 3.8 permet de visualiser d'une part le déplacement de la plateforme en fonction de la distance  $AB$  et l'erreur relative de la modélisation cubique par rapport à la modélisation complète. Si la figure 3.8a ne permet pas de distinguer une erreur conséquente, cela est confirmé par la figure 3.8b. En effet, nous pouvons constater que l'erreur est toujours inférieure à 0,6% en valeur absolue. De ce fait, nous pouvons valider l'hypothèse qui consiste à considérer que l'articulation complète se comporte comme une articulation cubique et donc appliquer les résultats du chapitre 2.



**FIGURE 3.8 – Étude de l'hypothèse de l'approximation de l'articulation complète par une articulation cubique.** (a) Déplacement dans la direction  $z_w$  du point  $P$  en fonction de la distance  $AB$ . (b) Erreur relative de la position du point  $P$  dans le cas de l'articulation cubique par rapport à la référence qui est l'articulation complète.

### 3.4.3 Obtention de la pose initiale de MiGriBot

Afin d'obtenir des performances dynamiques importantes, les courses des actionneurs doivent être réduites. Au vu de l'objectif de volume de manipulation, nous avons choisi de fixer l'objectif en termes de course d'actionnement à 1 mm. Cela permettra d'obtenir le volume de manipulation souhaité (cube de 500  $\mu\text{m}$  de

côté) et d'avoir la possibilité d'actionner le préhenseur intégré. Au vu des dimensions des longueurs des jambes choisies (5,8 mm), nous pouvons constater que le rapport  $\frac{c}{l}$  est d'environ 0,17. Les courbes de la figure 3.6 permettent d'obtenir les valeurs de  $h_0^*$  et de  $\delta h$ .

Afin d'illustrer les variations induites par la modification de la hauteur de la position de référence, nous avons tracé la courbe de  $\delta h$  en fonction de  $h_0$  (voir figure 3.9). Du fait des singularités visibles en figure 3.2 page 65, on obtient une valeur de  $h_0$  qui maximise l'espace accessible par MiGriBot suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$ . La figure nous permet de constater que l'on maximise  $\delta h$  quand l'espace de travail atteint en un point la singularité définie par  $z_p = 0$ . La valeur de  $h_0$  correspondante est notée  $h_0^*$ . Dans le cas de MiGriBot,  $h_0^* = -2,35 \text{ mm}$ .

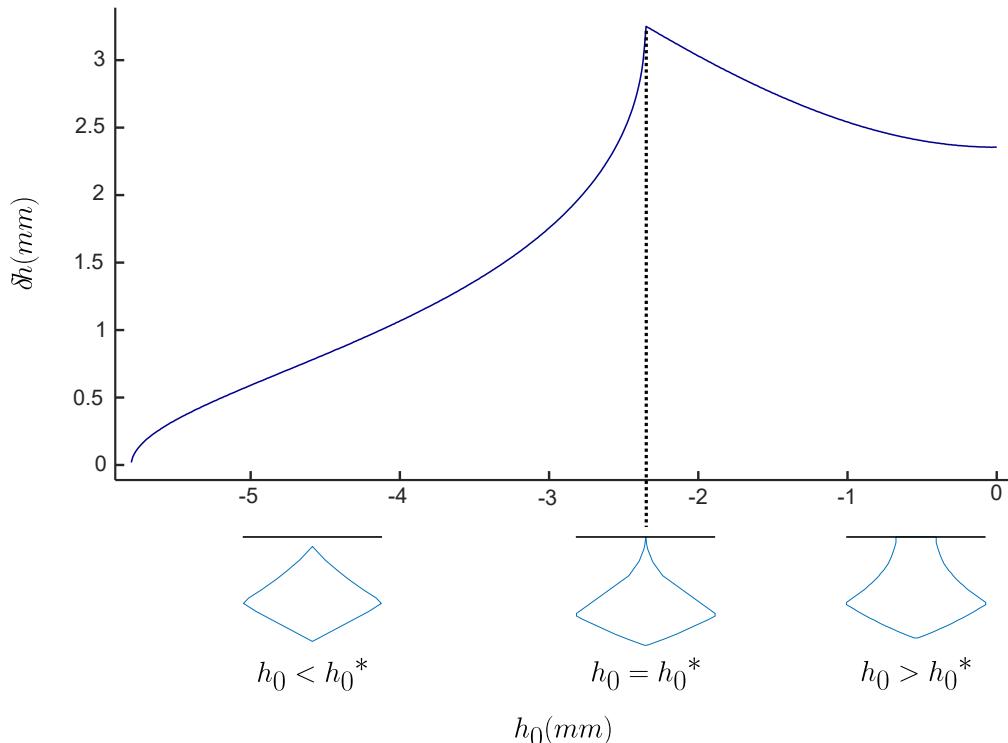
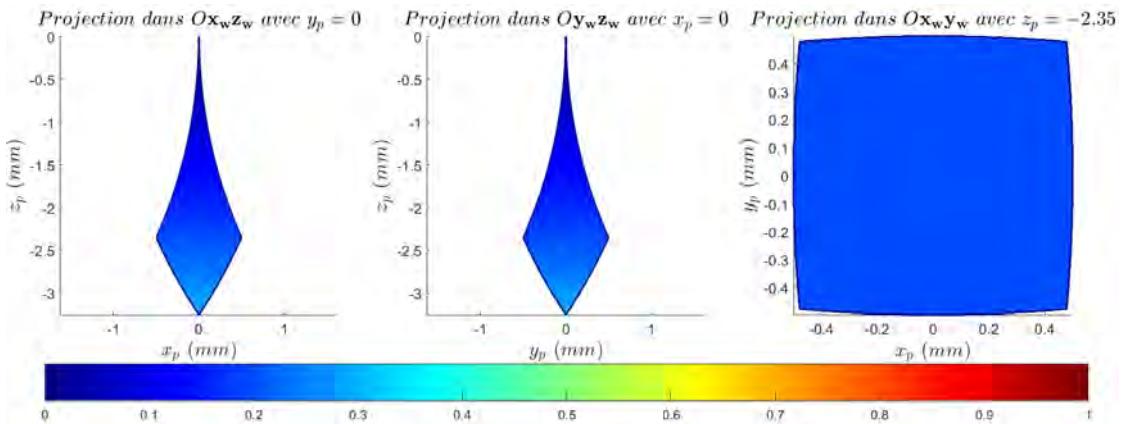


FIGURE 3.9 – Évolution de l'amplitude accessible  $\delta h$  en fonction de la hauteur  $h_0$  de la position home. Cette courbe permet de définir la hauteur initiale  $h_0^*$  permettant de maximiser  $\delta h$ . Une représentation schématique des formes d'espace de travail obtenues en fonction de la hauteur initiale est aussi visible, la ligne horizontale représente la singularité atteinte lorsque  $z_p = 0$ .

### 3.4.4 Espace de travail de MiGriBot

Maintenant que nous avons déterminé les dimensions géométriques du mécanisme parallèle, calculé la pose de référence et défini la course d'actionnement, il est possible de tracer les coupes de l'espace de travail spécifiques à MiGriBot (voir figure 3.10). L'espace de travail obtenu pour les courses d'actionnement et

les dimensions du robot est l'espace le plus grand possible suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$  avec une plage accessible de 3,25 mm. A la position de référence, il est possible d'effectuer des déplacements dans un carré de 1 mm de coté dans le plan  $Ox_wy_w$ . La manipulabilité en translation est homogène dans l'espace de travail autour de la position de référence. Les valeurs hautes de l'espace de travail, à savoir  $z_p$  proche de 0 ont une manipulabilité en translation faible. Cela s'explique par la proximité de la position singulière plane et par la variation rapide de  $z_p$  pour une variation infinitésimale des actionneurs. La zone de travail intéressante suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$  correspond à des valeurs de  $z_p$  comprises entre -1,5 mm et -3 mm.



**FIGURE 3.10 – Espace de travail théorique du micromanipulateur MiGriBot.** Les coupes de l'espace de travail sont données avec l'indice de manipulabilité en translation  $\kappa$ .

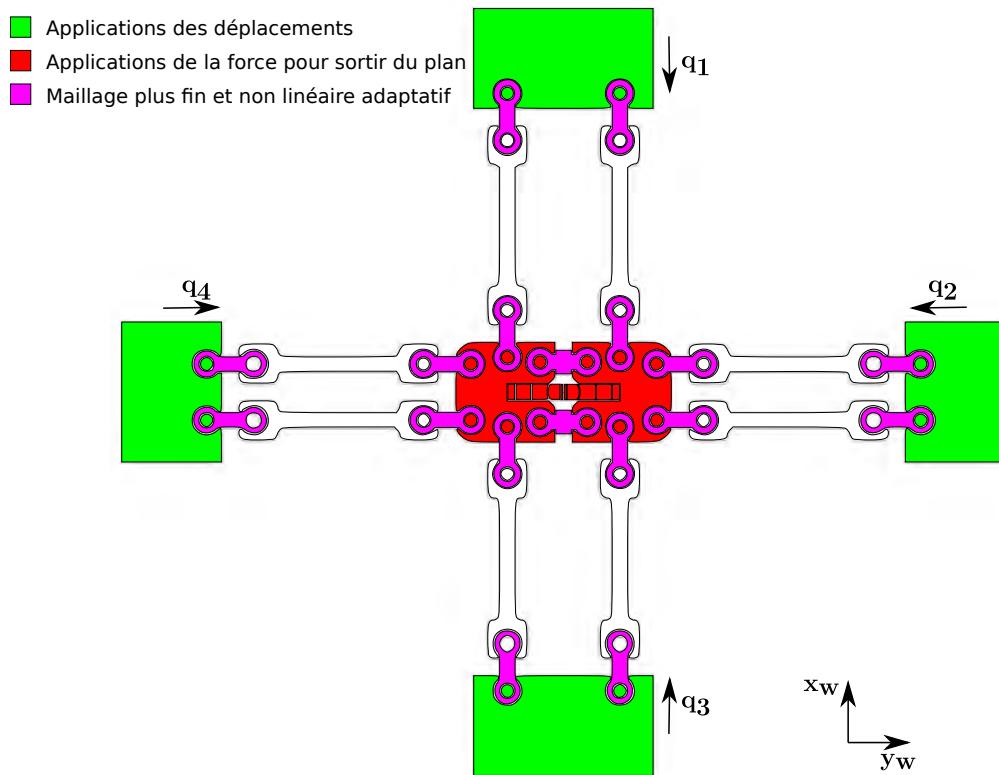
### 3.4.5 Modélisation par la méthode des éléments finis

Afin de pouvoir étudier certaines propriétés mécaniques de la structure (fréquence de résonance, efforts nécessaires pour la déplacer par exemple), nous avons considéré la modélisation du mécanisme parallèle par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel Ansys Workbench. Cette solution permettra d'avoir une simulation du comportement mécanique du mécanisme parallèle de MiGriBot au plus proche de la réalité avec la géométrie détaillée.

#### 3.4.5.1 Hypothèses et mise en œuvre

Il semble assez évident que ce n'est pas autour de la configuration plane que l'on va chercher à exploiter les capacités du mécanisme parallèle. En effet, cette position plane est une configuration singulière d'un point de vue de la structure. Par conséquent, lors de l'utilisation du robot nous allons faire en sorte de manipuler loin de la configuration plane. Pour effectuer la simulation, plusieurs techniques peuvent être envisagées.

Les techniques de fabrication en salle blanche pour le mécanisme imposent d'avoir un mécanisme dans le plan en fin de fabrication. Nous considérons donc



**FIGURE 3.11 – Paramétrisation et initialisation de la simulation par éléments finis.** Vue de dessous schématique du mécanisme parallèle permettant de visualiser la paramétrisation de la simulation par éléments finis sous ANSYS Workbench. Le maillage est généré automatiquement et nous avons ajouté une étape de raffinement du maillage et une adaptation non linéaire sur les corps en mauve. Les corps en vert sont ceux soumis directement aux déplacements des actionneurs et ceux en rouge soumis à une force permettant de sortir la structure du plan.

que cette configuration plane est caractérisée par des contraintes mécaniques nulles (positon mécanique de repos). Il est donc nécessaire d'effectuer la simulation mécanique depuis la configuration plane jusqu'à la configuration souhaitée impliquant l'utilisation des grandes déformations.

L'introduction des grandes déformations nécessite d'être précautionneux au niveau du chargement de la structure notamment afin de s'assurer d'avoir une simulation qui converge. De plus, cela nécessite aussi d'utiliser un maillage non linéaire adaptatif pour les zones concernées par ces grandes déformations. Cela va permettre au logiciel de remailler les zones largement déformées de manière à limiter les instabilités numériques. Ces zones sont représentées en mauve sur la figure 3.11. Cette figure permet aussi de mettre en évidence les autres actions mises en place pour la simulation. En effet, les corps sur lesquels sont appliqués les déplacements des quatre actionneurs sont représentés en vert et les corps sur lesquels est appliquée une force permettant de sortir le mécanisme parallèle du

plan lors de la simulation sont en rouge. Sans cette force, le mécanisme ne sort pas du plan et on constate un écrasement des liaisons plutôt que la déformation attendue. La force est utilisée au début de la simulation et lors des 10 premiers pas de déplacement. Il y a une première phase où on maintient un effort constant, puis dans une deuxième phase on diminue la valeur de la force lentement jusqu'à atteindre une valeur nulle que l'on conservera lors du reste de la simulation. Une des principales hypothèses de la simulation est la condition limite mécanique aux surfaces entre les parties rigides en Silicium et les articulations en PDMS. En effet, nous considérons que les surfaces en contact sont solidaires, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas de glissement et il y a toujours contact entre les éléments. C'est cette paramétrisation de la simulation qui a été utilisée pour l'ensemble des simulations qui seront présentées par la suite, sauf mention contraire.

Nous proposons donc de débuter la simulation depuis la configuration plane (voir figure 3.12a) jusqu'à la position de référence dont les coordonnées cartésiennes ont été préalablement définies (voir figure 3.12b). Ces étapes de calcul, qui sont les plus longues, ne sont effectuées qu'une seule fois. Pour effectuer des mouvements supplémentaires, on utilise ce résultat préliminaire permettant de définir la position de référence avec les contraintes induites dans la structure. A titre d'exemple, pour atteindre la position la plus basse (voir figure 3.12c) qui correspond à la course complète de chacun des actionneurs, la simulation depuis la configuration plane est effectué en 1h45. Le temps de simulation depuis la position de référence jusqu'à la position la plus basse est effectuée en 33 min.

#### 3.4.5.2 Informations structurelles

**Déformations de la structure** Les différentes simulations seront riches en enseignement sur la déformation de la structure et plus précisément des articulations. Comme le montrent les figure 3.12b-c, la déformation de l'articulation est concentrée sur le centre de l'articulation, ce qui permet de valider une nouvelle fois le comportement très proche d'une liaison rotule des articulations souples.

Une autre information essentielle est la force nécessaire pour déformer le mécanisme parallèle. En effet, cette information permettra de dimensionner le système d'actionnement pour que les actionneurs soient capables de fournir les efforts nécessaires pour atteindre les différents points de l'espace de travail du micromanipulateur. Cet effort pour déformer la structure a été évalué dans différentes configurations et il en ressort que l'effort total maximum nécessaire à appliquer est de 6 mN. Cette valeur montre l'intérêt de l'utilisation des articulations souples qui requièrent des efforts relativement faibles pour être déformées.

**Force de serrage** L'objectif du micromanipulateur étant de manipuler des micro-objets, il est important de s'intéresser à la force de serrage au bout des doigts. Généralement, la masse d'un micro-objet n'est pas problématique pour le déplacer mais, au vu des forces qui sont mises en jeu à l'échelle micrométrique, il est préférable de quantifier l'effort de serrage sur ce type de structure originale.

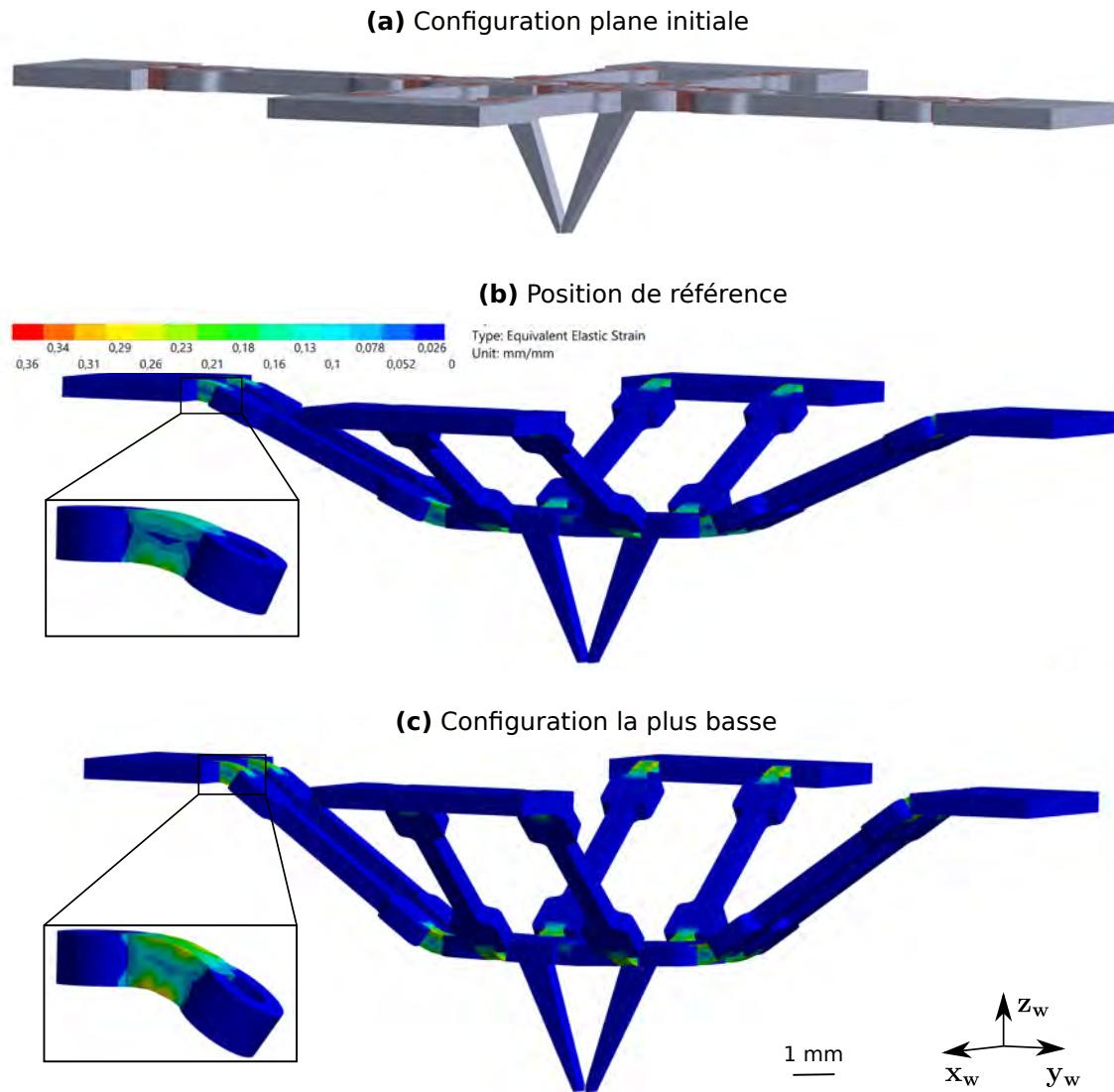


FIGURE 3.12 – Simulation par éléments finis du mécanisme parallèle dans différentes configurations. (a) Structure parallèle dans sa configuration plane. Elle le sera en fin de fabrication et au début des simulations mécaniques.

(b) Représentation des contraintes mécaniques dans la structure dans la configuration de référence (actionneurs au centre de leur course) et zoom sur les contraintes dans une des articulations. (c) Contraintes dans la structure et zoom sur une articulation dans la configuration le plus basse accessible.

Pour faire cette analyse, nous nous sommes placés à la position de référence et nous avons évalué la rigidité en appliquant un déplacement de 100  $\mu\text{m}$  sur l'un des doigts. Nous avons obtenu une valeur de  $24,5 \text{ Nm}^{-1}$ . L'utilisation de la relation entre la raideur, la force et la défexion permet de remonter à la valeur théorique de la force de serrage évaluée à 6,6 mN. Cette valeur correspond à 10 fois le poids du mécanisme parallèle qui a une masse de 65 mg en considérant un coefficient de frottement de 0,1. Une validation expérimentale sera effectuée bien que cette force de serrage soit amplement suffisante pour manipuler des micro-objets.

**Analyse modale** MiGriBot est conçu non seulement pour manipuler des micro-objets mais surtout pour le faire avec une haute cadence, à savoir plusieurs coups par seconde. Il est donc important de vérifier que le mécanisme parallèle est capable de subir ces trajectoires à haute vitesse et notamment que les fréquences de résonance de la structure ne se situent pas à des fréquences faibles ce qui compromettrait l'utilisation du micromanipulateur à haute vitesse. Nous avons donc effectué une analyse modale du mécanisme parallèle à sa configuration de référence en cherchant les six premiers modes. Il apparaît que le premier mode a pour fréquence 264.51 Hz ce qui permet d'effectuer des déplacements à haute vitesse, jusqu'à 100 Hz sans rencontrer de problèmes. Les autres modes sont visibles dans la table 3.1.

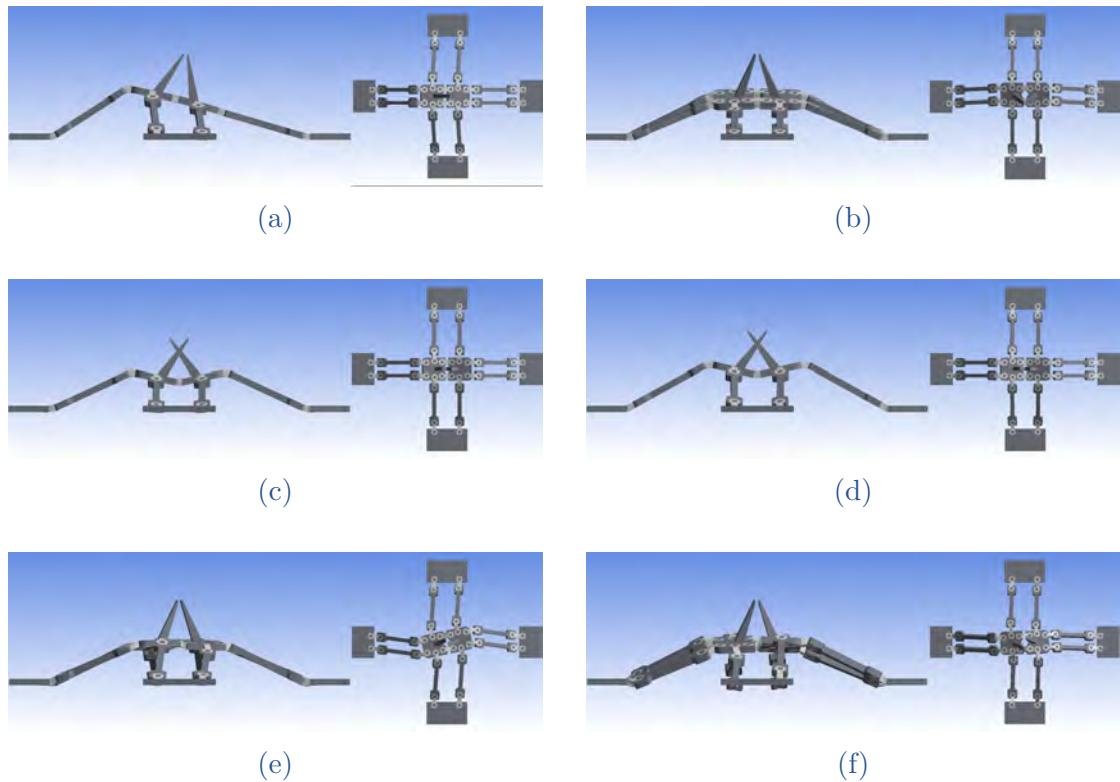
Mode	1	2	3	4	5	6
Fréquence (Hz)	264.51	392.76	455.52	639.05	715.49	1028.6

TABLE 3.1 – Analyse modale de la structure parallèle à la position de référence

La figure 3.13 permet de visualiser les déformations induites par chacun des modes du mécanisme parallèle. Le premier mode (figure 3.13a) correspond à un mouvement de vague suivant l'axe de la pince quand le deuxième mode (figure 3.13b) correspond à ce même mouvement suivant l'axe perpendiculaire à la pince. Il s'agit donc de mouvements de balancier de la plateforme configurable. Les troisième (figure 3.13c) et quatrième (figure 3.13d) modes correspondent à un pliage non maîtrisé de la pince conduisant à l'ouverture/fermeture de la pince. Le cinquième mode (figure 3.13e) est un mouvement de rotation de la plateforme autour de l'axe vertical  $\mathbf{z}_w$ . Le sixième mode (figure 3.13f) correspond à des sollicitations en torsions des articulations souples.

#### 3.4.6 Conception de la structure complète

La structure microrobotique présentée dans ce chapitre, nommée MiGriBot, peut être décomposée en deux parties distinctes. D'un côté le mécanisme parallèle que nous venons de dimensionner et de l'autre la partie actionnement.

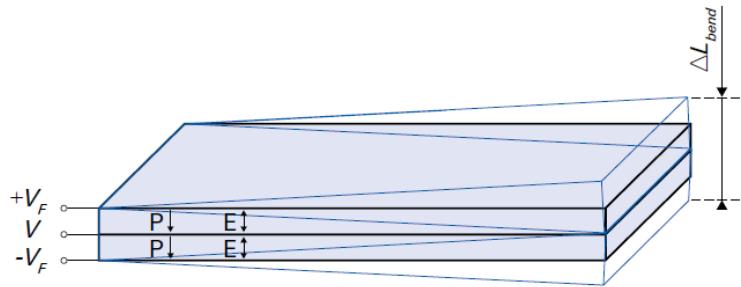


**FIGURE 3.13 – Représentation des modes de résonances du mécanisme parallèle.** (a) 264,51 Hz. (b) 392,76 Hz. (c) 455,52 Hz. (d) 639,05 Hz. (e) 715,49 Hz. (f) 1028,6 Hz.

#### 3.4.6.1 Actionnement de la structure

La partie d'actionnement est la dernière partie à dimensionner. Pour rappel, nous souhaitons réaliser des opérations avec des cadences de manipulation élevées (typiquement 10 opérations par seconde) et avoir une course d'actionnement de 1 mm. La solution qui a été retenue est l'utilisation d'un actionneur piézoélectrique multicouches en flexion notamment pour ses performances dynamiques. Ces actionneurs permettent d'amplifier la déformation mécanique obtenue en exploitant l'effet piézoélectrique inverse. En effet, avec l'utilisation de plusieurs couches piézoélectriques (voir figure 3.14), la contraction/détente des éléments piézoélectriques va conduire à la flexion de la poutre multicouches. Ce principe est utilisé dans les actionneurs PICMA® développés par Physik Instrumente GmbH.

Dans cette gamme, nous avons choisi d'utiliser l'actionneur P-871.112 qui est l'actionneur avec la poutre piézoélectrique la plus courte et donc la fréquence d'actionnement la plus élevée. Nous reviendrons sur les propriétés dynamiques de l'actionneur dans la suite de la thèse lorsque nous analyserons les performances dynamiques de MiGriBot. La course nominale de l'actionneur seul est de 160 µm, dans la réalité la course mesurée expérimentalement est inférieure. Afin de l'amplifier, nous avons conçu une allonge qui permet d'obtenir une course (au bout de



**FIGURE 3.14 – Actionneur piézoélectrique multicouches en flexion.**  
Principe de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique en flexion de la gamme PICMA® développée par Physik Instrumente GmbH [PI 22]

	Actionneur sans allonge	Actionneur avec allonge
<b>Dimension suivant <math>z_w</math></b>	22 mm	58 mm
<b>Course d'actionnement</b> (Mesurée avec les contrôleurs)	$\pm 35 \mu\text{m}$	$\pm 500 \mu\text{m}$
<b>Fréquence de coupure</b> (Mesurée avec les contrôleurs)	110 Hz	110 Hz
<b>Force de blocage</b>	$\pm 2.1 \text{ N}$	$\pm 0.8 \text{ N}$

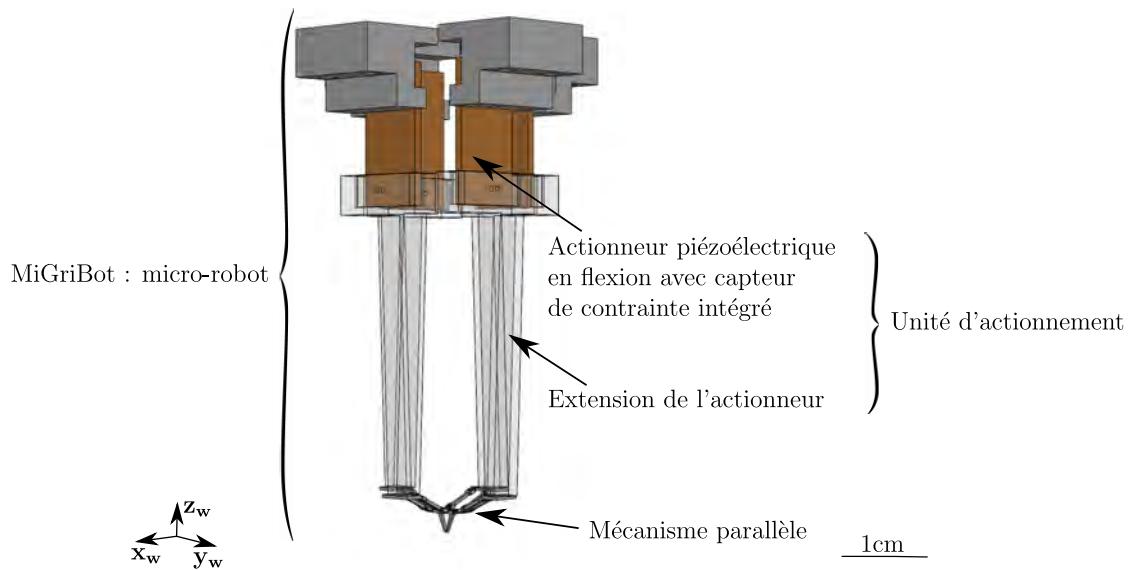
**TABLE 3.2 – Performances des unités d'actionnement sans et avec allonges d'amplification du mouvement.**

l'extension) de 1 mm. Une autre information importante est la force de blocage de l'actionneur qui est de 2,1 N sans allonge (voir table 3.2). Avec allonge, la force de blocage est de 0,8 N, soit très supérieure aux efforts nécessaires pour déformer le mécanisme parallèle (6 mN). De plus, l'actionneur peut être contrôlé en boucle fermée grâce à une jauge de contrainte intégrée, permettant d'obtenir un positionnement répétable de l'actionneur malgré le caractère hystérétique des matériaux piézoélectriques.

Compte tenu de la taille de l'unité d'actionnement (58 mm) et du déplacement obtenu (1 mm), nous pouvons considérer que le déplacement au bout de l'actionneur est une translation et donc que l'actionnement est linéaire. L'actionnement de la structure est effectué grâce à quatre unités d'actionnement distinctes composées chacune d'un actionneur piézoélectrique et d'une extension.

#### 3.4.6.2 Structure robotique complète

La structure robotique MiGriBot (Millimeter Gripper Robot) est donc la combinaison du mécanisme parallèle et des quatre unités d'actionnement (voir fi-



**FIGURE 3.15 – Structure du micromanipulateur robotique MiGriBot.** La structure est composée d'un mécanisme parallèle avec une empreinte de 2 cm par 2 cm et de quatre unités d'actionnement. MiGriBot a une empreinte de 38 mm par 35 mm avec sa base. Sa hauteur totale est de 63 mm.

gure 3.15). En considérant que le mécanisme parallèle est dans sa position de référence, la hauteur totale de MiGriBot (de la base de l'actionneur au bout du doigt de la pince) est de 63 mm pour une empreinte dans le plan  $O\mathbf{x}_w\mathbf{y}_w$  de 38 mm par 35 mm. Ce qui donne un ratio taille du robot sur la taille de l'objet est de 1 575 si l'on considère un objet manipulé avec une taille caractéristique de 40  $\mu\text{m}$ .

## 3.5 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'introduire une nouvelle architecture robotique à quatre degrés de liberté incluant les trois translations et le contrôle d'une pince intégrée. Cette structure a été pensée pour être fabriquée à l'échelle micrométrique par l'intégration d'articulations souples. Nous avons alors dans un premier temps développé le MGD, le MGI et le modèle différentiel direct. Ces différents modèles permettant d'obtenir des informations telles que l'espace de travail, la manipulabilité en rotation et en translation. Nous avons ensuite explicité la recherche de la position de référence de l'architecture robotique permettant de maximiser l'espace de travail accessible suivant  $\mathbf{z}_w$  en fonction de la longueur des jambes et de la course d'actionnement. Cette analyse a été menée sur la structure de MiGriBot afin de réaliser le dimensionnement. Enfin, pour extraire des informations structurelles et pour permettre le dimensionnement de l'actionnement, une analyse mécanique par la méthode des éléments finis a été effectuée. Le choix des action-

neurs a également été explicité. La réalisation et la validation expérimentale de MiGriBot seront exposés dans le prochain chapitre.

---

# Chapitre 4

## Réalisation et commande de MiGriBot

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction . . . . .</b>	86
<b>4.2</b>	<b>Réalisation du démonstrateur . . . . .</b>	86
4.2.1	Fabrication en salle blanche . . . . .	86
4.2.2	Assemblage de MiGriBot . . . . .	87
4.2.3	Dispositif expérimental . . . . .	89
4.2.4	Architecture de commande . . . . .	89
<b>4.3</b>	<b>Analyses des performances de MiGriBot . . . . .</b>	91
4.3.1	Espace de travail . . . . .	92
4.3.2	Répétabilité . . . . .	94
4.3.3	Capacité de préhension . . . . .	95
4.3.4	Performances dynamiques . . . . .	97
4.3.4.1	Analyse dynamique des unités d'actionnement . . . . .	98
4.3.4.2	Analyse dynamique de MiGriBot . . . . .	99
<b>4.4</b>	<b>Réalisation d'opérations de prise-dépose . . . . .</b>	100
4.4.1	Manipulation télé-opérée . . . . .	100
4.4.2	Réalisation d'un cycle de prise-dépose type ADEPT . . . . .	102
4.4.2.1	Définition du cycle de prise-dépose . . . . .	102
4.4.2.2	Réalisation du cycle en quasi-statique . . . . .	103
4.4.2.3	Réalisation du cycle à haute cadence . . . . .	105
4.4.3	Réalisation d'un cycle avec position d'attente . . . . .	105
4.4.3.1	Présentation du cycle . . . . .	105
4.4.3.2	Réalisation à haute vitesse . . . . .	107
4.4.4	Comparaison avec les autres robots de prise-dépose de micro-objets . . . . .	107
<b>4.5</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	107

*Le chapitre précédent a permis de présenter et de modéliser une architecture robotique originale conçue pour la micromanipulation à haute cadence. Ce chapitre a pour but de présenter la réalisation et la commande de ce micromanipulateur nommé MiGriBot. Nous verrons alors que le manipulateur a la capacité de manipuler des objets avec des tailles caractéristiques comprises en 40 et 100 µm et de réaliser des cycles de prise-dépose à haute cadence.*

## 4.1 INTRODUCTION

La course à la miniaturisation dans de nombreux domaines industriels amène à la nécessité de conception de nouveaux outils permettant de manipuler des objets de plus en plus petits. Couplée à cette miniaturisation, s'ajoute des cadences de fabrication très importantes. Pour répondre à ces deux besoins, nous avons introduit une nouvelle structure robotique dans le chapitre 3. La modélisation et la conception ont alors été développées. Aux petites échelles, la structure intègre des articulations souples en PDMS agissant comme des liaisons rotules. Afin de réduire l'inertie globale, la capacité de préhension a été intégrée directement dans la structure. Cela permet d'actionner la pince intégrée grâce aux actionneurs situés à la base et donc de réduire la masse en mouvement.

Dans ce chapitre, nous présentons la réalisation de cette structure robotique afin de démontrer la capacité d'une telle structure à manipuler des micro-objets avec une haute cadence. Pour cela, nous allons dans un premier temps nous intéresser à la fabrication d'un démonstrateur. Puis nous analyserons ces performances statiques et dynamiques. Enfin, nous terminerons par la réalisation de tâches de prise-dépose de micro-objets dans différentes situations.

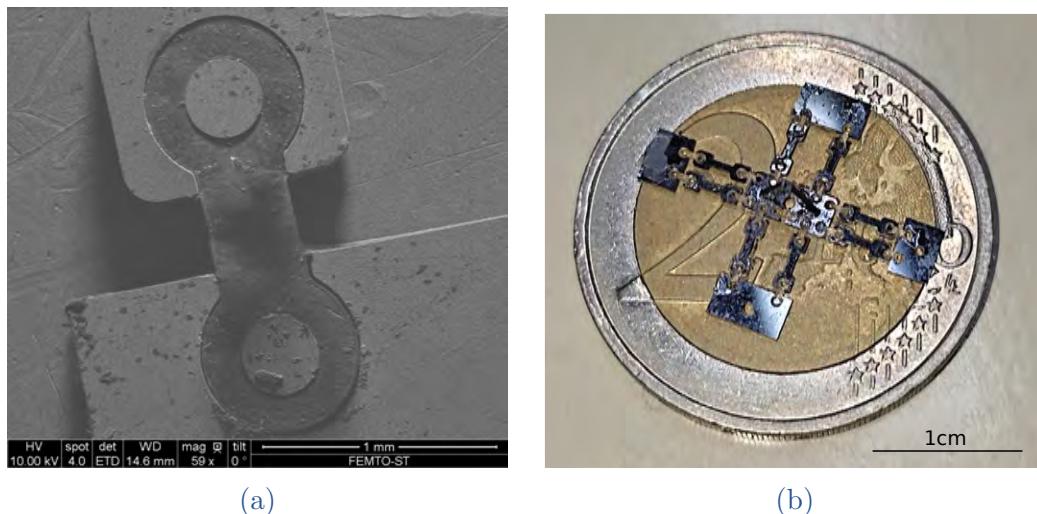
## 4.2 RÉALISATION DU DÉMONSTRATEUR

Le démonstrateur est composé de plusieurs parties comme nous avons pu le voir dans le chapitre 3. La réalisation est faite en plusieurs temps avec le mécanisme parallèle d'un côté et les unités d'actionnement de l'autre. L'ensemble devra ensuite être intégré dans le dispositif expérimental complet incluant l'architecture de commande.

### 4.2.1 Fabrication en salle blanche

La première étape de réalisation de MiGriBot est la fabrication du mécanisme parallèle qui s'effectue en salle blanche. Le processus de fabrication, détaillé en annexe A en page 142, se décompose en deux grandes phases. Dans un premier temps, le wafer de Silicium est gravé de manière à obtenir les contours des parties rigides de la structure et les zones où sera moulé le PDMS. Cette première partie s'effectue en salle blanche par des procédés de gravure profonde. Le second temps

de la fabrication correspond au moulage des articulations souples par le dépôt de PDMS liquide. Le PDMS est ensuite polymérisé avant que les structures parallèles ne puissent être libérées. À la fin de cette étape de fabrication, le mécanisme parallèle et les doigts ne sont pas assemblés, car ce processus de fabrication impose la réalisation dans le plan. La figure 4.1 montre une articulation souple en fin de fabrication ainsi que le mécanisme parallèle équipé des doigts du préhenseur. La figure 4.1a, qui est une image d'une articulation élastique obtenue dans un microscope électronique à balayage (MEB), permet de voir le principe de fonctionnement de l'articulation souple et son ancrage dans la partie Silicium.



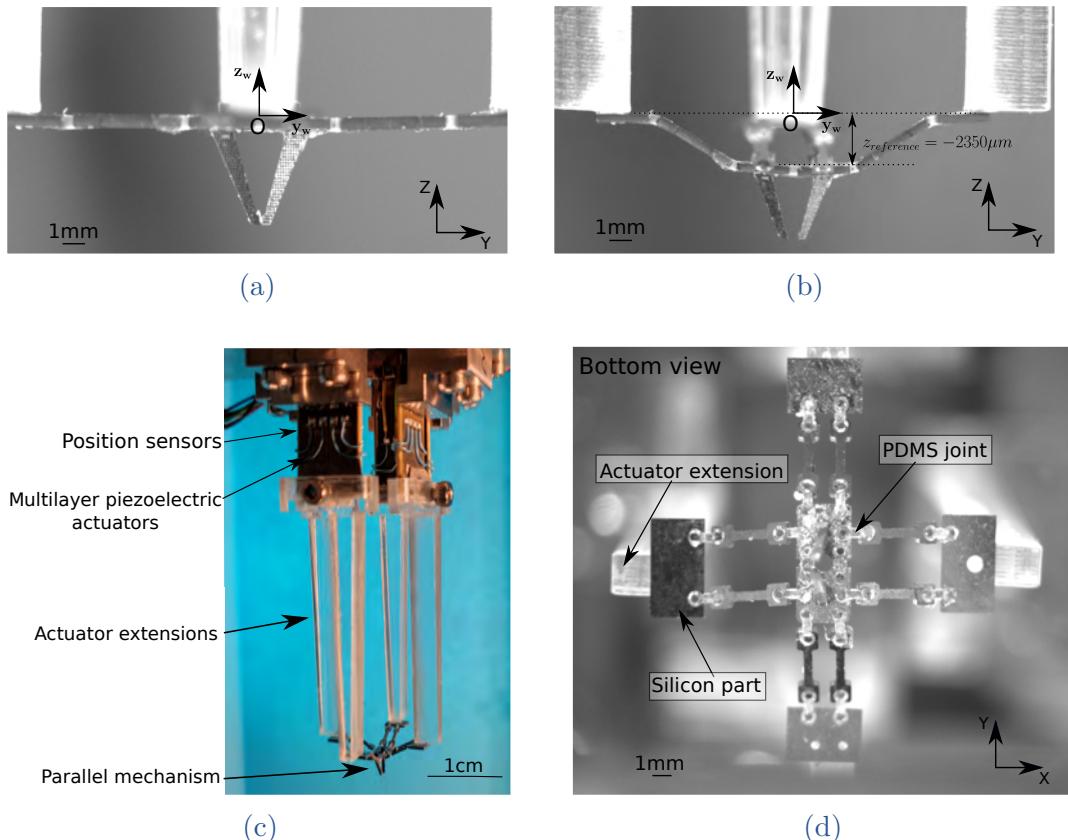
**FIGURE 4.1 – Réalisation de la structure parallèle.** (a) Image d'une articulation souple en PDMS reliant deux parties en Silicium prise à l'aide d'un microscope électronique à balayage. (b) Structure parallèle à la fin du procédé de fabrication et de l'assemblage des deux doigts de la pince. Le mécanisme parallèle dont les dimensions extérieures sont de 1,9 cm par 2,2 cm tient sur la partie centrale d'une pièce de deux euros

L'étape de fabrication est une étape importante nécessitant un savoir-faire et un apprentissage importants afin d'être en mesure de réaliser les différentes étapes de fabrication. À titre d'information, si la fabrication est réalisé de manière continue sans problème, il est nécessaire de réaliser une trentaine d'heures en salle blanche. Concrètement, l'acquisition des compétences et la définition des paramètres optimaux de gravure a nécessité près d'un an.

### 4.2.2 Assemblage de MiGriBot

À la fin de la fabrication en salle blanche du mécanisme parallèle, il reste de nombreuses étapes. Premièrement, il faut effectuer l'assemblage des doigts de la pince sur le mécanisme. Cette étape est faite manuellement par collage. Il est naturellement plus évident de faire cette étape à plat, c'est pourquoi elle est faite à la fin de la fabrication salle blanche (voir fig. 4.1b).

Le mécanisme parallèle alors équipé des doigts de la pince est alors collé aux unités d'actionnement (actionneur et son extension). À la fin de cette étape, MiGriBot est dans sa configuration plane comme illustrée dans la figure 4.2a. Il est alors nécessaire de sortir le mécanisme du plan et d'amener la structure à la position de référence (voir fig.4.2b) en appliquant une légère force suivant la direction  $-z_w$ . La position de référence correspond au centre de la course de chacun des actionneurs et  $z_{référence} = -2350 \mu\text{m}$ .



**FIGURE 4.2 – Mise en place de MiGriBot.** (a) Structure parallèle constituante MiGriBot dans sa configuration plane initiale après collage. (b) Structure parallèle à sa position de référence (i.e. actionneurs au centre de leur course et  $z_p = -2350 \mu\text{m}$ ). (c) MiGriBot en situation expérimentale avec détails des différents composants du micromanipulateur. (d) Vue de dessous de la structure parallèle permettant de distinguer les parties en Silicium et en PDMS ainsi que le bout des actionneurs.

Une fois le mécanisme monté, grâce à une vue de dessous (voir fig. 4.2d) il est possible de bien distinguer les extensions des unités d'actionnement sur lesquelles on est venu coller les bases en Silicium du mécanisme parallèle. Il est aussi possible de voir les articulations souples, mais nous ne pouvons pas bien apprécier leur déformation avec cette vue de dessous. La figure 4.2c permet de voir MiGribot dans son ensemble après l'assemblage des différents composants à savoir les actionneurs piézoélectriques avec les capteurs de position intégrés permettant le contrôle en

boucle fermée, les extensions des actionneurs et le mécanisme parallèle. MiGriBot dans sa positon de référence est à ce moment prêt pour la réalisation de diverses tâches et à être intégré dans l'environnement de manipulation.

### 4.2.3 Dispositif expérimental

Dans le cadre expérimental, et comme c'est le cas généralement pour l'ensemble des structures robotiques, il est nécessaire d'avoir des éléments externes à ce dernier pour son bon fonctionnement. La figure 4.3 permet de voir l'ensemble du matériel utilisé pour réaliser la partie expérimentale et l'étude pratique de MiGriBot. En effet, en prenant la figure de la droite vers la gauche, on retrouve l'ordinateur de supervision intégrant des interfaces homme-machine (IHM), la carte temps réel dSpace RTI1004, les contrôleurs pour les actionneurs et MiGriBot.

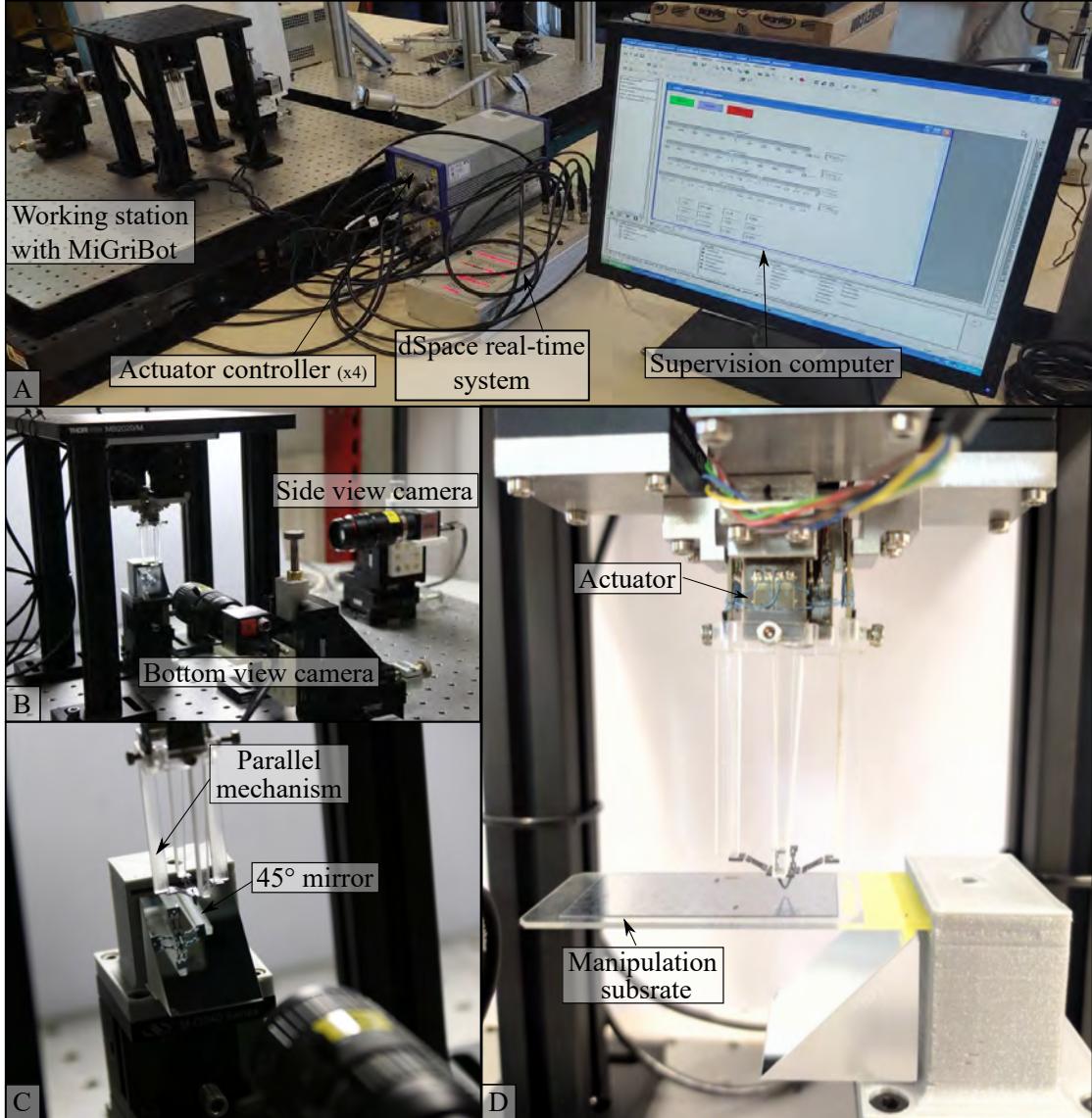
Pour permettre d'effectuer des mesures sur le système robotique et notamment par les déplacements, nous utilisons deux caméras situées autour de la structure robotique (voir fig. 4.3.b). Nous sommes en capacité de récupérer des images de côté et des images de dessous. La vue de côté est obtenue directement tandis que la vue de dessous est obtenue grâce à un miroir à  $45^\circ$  placé sous le mécanisme parallèle comme le montre la fig. 4.3.c. Les deux caméras permettent dans un premier temps de filmer les déplacements de MiGriBot et de récupérer des images afin de mesurer ces mêmes déplacements et de vérifier la corrélation entre les modèles précédemment proposés et l'expérimental. Pour étalonner la mesure des déplacements, on utilise une grille de points présente sur les doigts pour la vue de côté et la taille des articulations sur la vue de dessous. Pour localiser une zone d'intérêt de notre robot (les doigts de la pince par exemple) dans l'image, on utilise une fonction de corrélation d'images. Dans le cadre de déplacement à grandes vitesses, la caméra de côté est remplacée par une caméra rapide Phantom MIRO M310 et un éclairage LED externe est ajouté pour avoir un environnement très lumineux et ainsi pouvoir fermer un maximum l'objectif de la caméra.

Enfin, la dernière partie du dispositif expérimental est le substrat de manipulation qui se situe sous MiGriBot comme l'illustre la figure 4.3.d. Cet espace de manipulation est composé d'un film de Gel-Pak® légèrement « collant » pour permettre de relâcher plus facilement les micro-objets et éviter qu'ils ne restent « collés » aux doigts de la pince à cause des forces surfaciques prédominantes aux petites échelles.

### 4.2.4 Architecture de commande

Une partie intimement liée au dispositif expérimental est l'architecture de commande. En effet, il est possible de décomposer cette partie avec des éléments semblable à ceux du découpage du dispositif expérimental. L'architecture de commande se décompose en trois grands niveaux que sont la carte dSpace temps réel, les contrôleurs des actionneurs et la structure mécanique de MiGriBot.

La structure robotique est commandée en choisissant des poses à atteindre ou une trajectoire depuis l'ordinateur de supervision. Cette commande de pose carté-

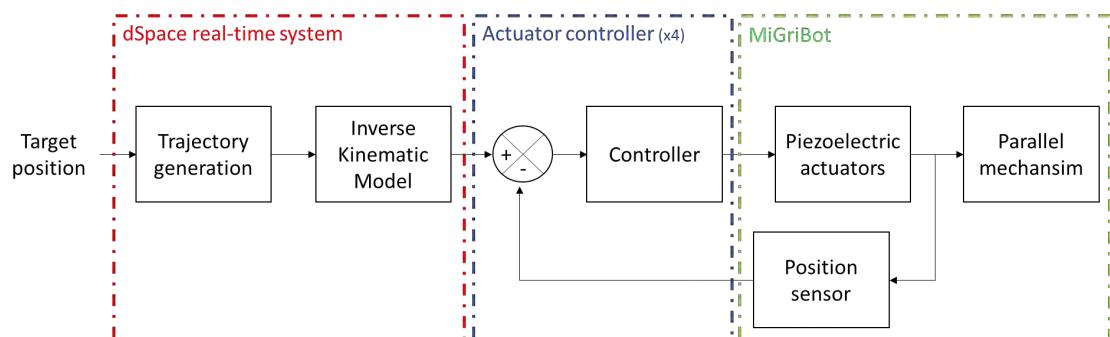


**FIGURE 4.3 – Présentation de la plateforme expérimentale.** (a) Plateforme expérimental dans sa globalité avec l'ordinateur de contrôle, la carte dSpace, les contrôleurs pour les actionneurs et la station de travail. (b) Focus sur la station de travail indiquant la position des deux caméras. (c) Détails sur l'obtention de la vue de dessous avec le miroir à 45°. (d) MiGriBot avec le substrat de manipulation.

sienne est alors envoyée sur le système temps réel implémenté sur la carte dSpace qui va avoir deux missions principales. La première étant de générer la trajectoire dans l'espace cartésien entre la pose courante et la pose à atteindre. Cette génération est faite en utilisant un profil de vitesse trapézoïdale. Cette trajectoire est ensuite convertie dans l'espace articulaire en utilisant le modèle géométrique inverse que nous avons obtenu dans le chapitre 3. Cela permet d'obtenir la trajectoire dans l'espace articulaire et donc de commander les actionneurs de manière à atteindre la pose cible.

La commande articulaire est utilisé pour envoyer le signal de commande à chacun des actionneurs à chaque pas de temps permettant le suivi de la trajectoire. Cette partie est effectuée grâce au contrôleur de chacun des actionneurs qui va envoyer la tension permettant de déformer les actionneurs piézoélectriques. Un capteur de déformation intégré sur les poutres piézoélectrique permet de connaître la déformation des actionneurs et de la corriger grâce à une boucle de rétroaction. MiGriBot est donc asservi sur la base de la position des actionneurs.

La dernière partie est la structure robotique en elle-même qui va convertir le déplacement des actionneurs en une déformation des différentes articulations souples constitutives du mécanisme parallèle pour permettre à l'effecteur (à savoir la position du centre de la plateforme configurable) d'atteindre la position souhaitée.



**FIGURE 4.4 – Architecture de commande.** L'architecture de commande se compose de trois grands blocs que sont le générateur de trajectoire temps-réel, les contrôleurs des actionneurs et la structure MiGriBot.

### 4.3 ANALYSES DES PERFORMANCES DE MIGRIBOT

Après avoir modélisé et présenté la structure robotique d'un point de vue théorique, il est intéressant d'étudier les performances réelles de MiGriBot. Rappelons que le but premier de cette structure est d'effectuer des tâches de prise-dépose de micro-objets avec de hautes cadences. Pour cela, nous allons étudier diverses performances telles que l'espace de travail, la capacité de saisie d'objets ainsi que le suivi de trajectoire à haute vitesse.

### 4.3.1 Espace de travail

Concernant les validations expérimentales à effectuer vis-à-vis de la structure, le premier travail a consisté à étudier l'étude de l'espace de travail et les mobilités de la structure<sup>1</sup>.

L'étude des mobilités consiste à générer des trajectoires suivant les trois translations de l'espace. Les figures 4.5c et 4.5d permettent de visualiser les positions extrêmales de l'espace de travail suivant l'axe  $\mathbf{y}_w$ . De manière similaire on peut observer le déplacement de la plateforme suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$  dans les figures 4.5e et 4.5f et l'ouverture fermeture de la pince dans les figures 4.5g et 4.5h.

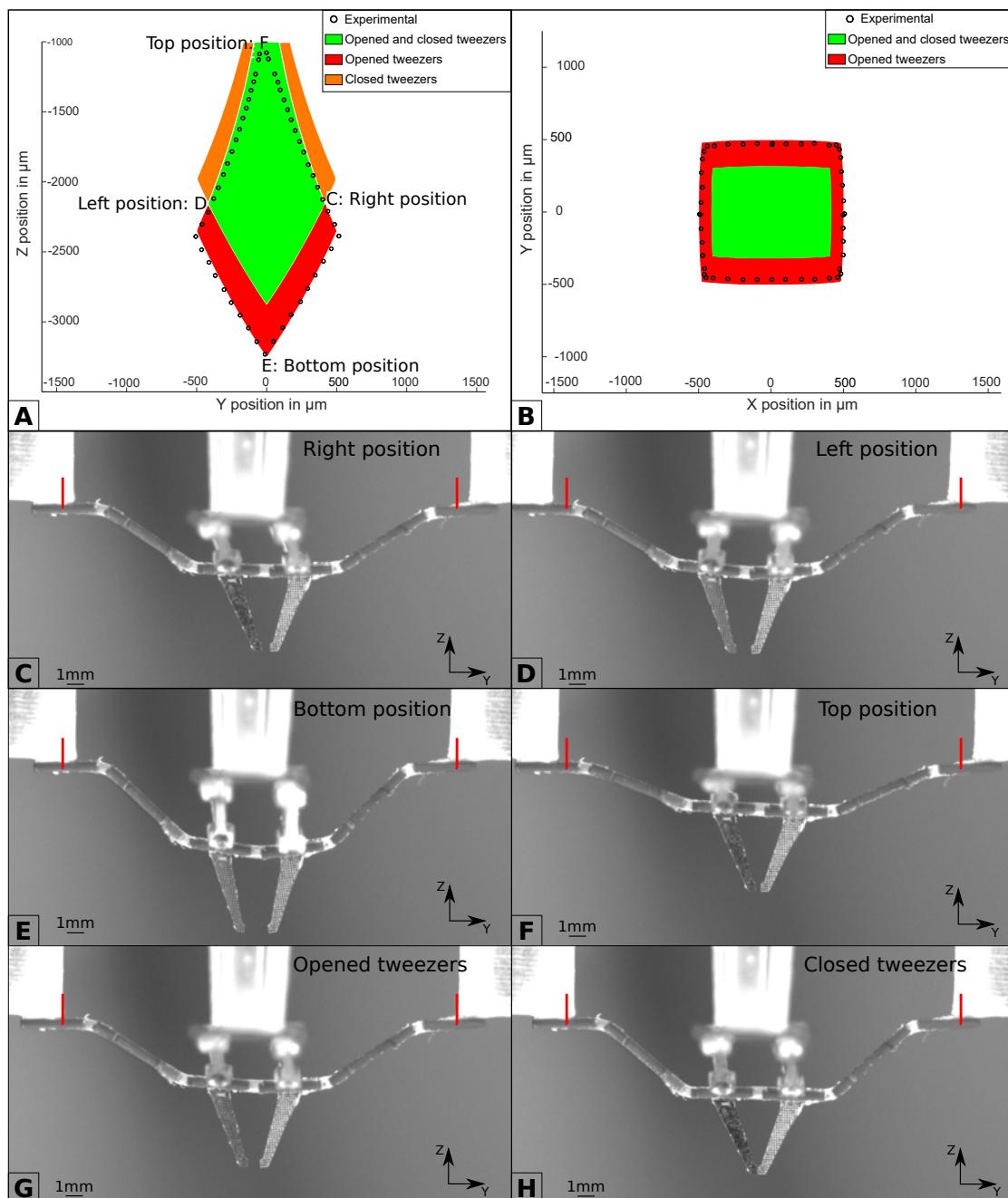
Ces expérimentations montrent que les mouvements générés sont similaires à l'attendu. Nous nous sommes également intéressés à l'espace de travail de MiGriBot afin de pouvoir définir par la suite des trajectoires convenables. L'étude de l'espace de travail porte sur deux situations à savoir le cas de la pince ouverte (i.e. un angle  $\theta$  égal à  $0^\circ$ ) et de la pince fermée (i.e. un angle  $\theta$  égal à  $-5^\circ$ ). Ces valeurs correspondent aux deux angles de la plateforme qui seront majoritairement utilisés dans la suite lors de la manipulation de micro-objets.

Dans un premier temps, nous avons considéré les différents espaces de travail résultant de manière théorique avant d'effectuer une validation expérimentale avec la pince en position ouverte. La projection des différents espaces de travail dans le plan  $O\mathbf{y}_w\mathbf{z}_w$  avec  $x_p = 0$  mm est visible en figure 4.5a. Les projections dans le plan  $O\mathbf{x}_w\mathbf{y}_w$  avec  $z_p = -2,35$  mm sont représentées dans la figure 4.5b. Dans ces deux figures établies sur la base de calculs, on retrouve l'espace de travail uniquement accessible avec la pince ouverte en rouge, celui accessible avec la pince en position fermée en orange et celui accessible dans les deux configurations en vert. Bien évidemment, la zone à privilégier pour les manipulations est l'espace vert puisque dans l'ensemble de la zone, il sera possible d'actionner la pince et donc de saisir et de relâcher l'objet. La zone orange peut être utilisée pour le transit de l'objet avec la pince fermée tandis que la zone rouge est une zone qui ne présente que peu d'intérêt dans le cadre d'une opération de manipulation. La figure 4.5a permet de constater que la fermeture de la pince a pour effet de décaler les limites de l'espace de travail vers le haut ce qui a pour effet de modifier légèrement la surface de la zone accessible à une valeur  $z_p$  donnée.

Enfin, l'espace de travail expérimental avec la pince ouverte est visible avec les points noirs dans les figures 4.5a et b. Nous pouvons alors constater que l'espace de travail obtenu par la modélisation cinématique est en cohérence avec les mesures expérimentales. Néanmoins, dans la partie haute de l'espace de travail, la correspondance s'avère moins bonne. Le rapport de transmission est très élevé dans cette zone, par conséquent une petite erreur sur les déplacements des actionneurs mène à une plus grande erreur sur la position de la plateforme de MiGriBot. Cette différence entre le modèle et l'expérience n'est pas cruciale car la zone concernée ne sera pas utilisée lors de la manipulation.

---

1. Voir la vidéo S2 disponible sur le site de Science Robotics :<https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>



**FIGURE 4.5 – Analyse de l'espace de travail de MiGrivBot.** (a) Vue en coupe de l'espace de travail dans le plan  $Oy_w z_w$  avec la partie accessible avec la pince fermée et la pince ouverte (en vert), la partie accessible avec la pince ouverte seulement (en rouge) et la partie accessible avec la pince fermée seulement (en orange). La validation expérimentale avec la pince ouverte est représentée par les points noirs. (b) Vue en coupe de l'espace de travail dans le plan  $Ox_w y_w$ . (c) Mécanisme parallèle dans la position la plus à droite. (d) Mécanisme parallèle dans sa position la plus à gauche. (e) Mécanisme parallèle dans sa position la plus basse. (f) Mécanisme parallèle dans sa position la plus haute. (g) Mécanisme à la position de référence avec la pince ouverte. (h) Mécanisme à la position de référence avec la pince fermée.

L'étude de l'espace de travail laisse apparaître un léger couplage entre deux degrés de liberté (mouvement suivant  $\mathbf{z}_w$  et la fermeture de la pince). Il apparaît en effet sur les figures 4.5e et 4.5f que la pince se ferme lors des mouvements vers le haut suivant  $\mathbf{z}_w$ .

Ce comportement avait pu être observé lors de la phase de comparaison des modèles avec les simulations effectuées sur les logiciels éléments finis. Ce couplage est également renforcé par les erreurs d'assemblage de MiGriBot. Une simulation avec SOFA nous a permis de valider ces deux hypothèses.

Ce couplage a pour effet d'accentuer la fermeture de la pince lors de la phase de transport d'un objet au-dessus du plan et ne perturbe donc pas la manipulation. Pour cette raison, nous avons fait le choix de négliger ce couplage dans la suite.

### 4.3.2 Répétabilité

Dans le cadre de manipulation de micro-objets comme dans le cas de manipulation au sens plus large, il est important de s'intéresser à la répétabilité du robot. En introduction, nous rappelons ici quelques définitions de la fidélité, la justesse et l'exactitude.

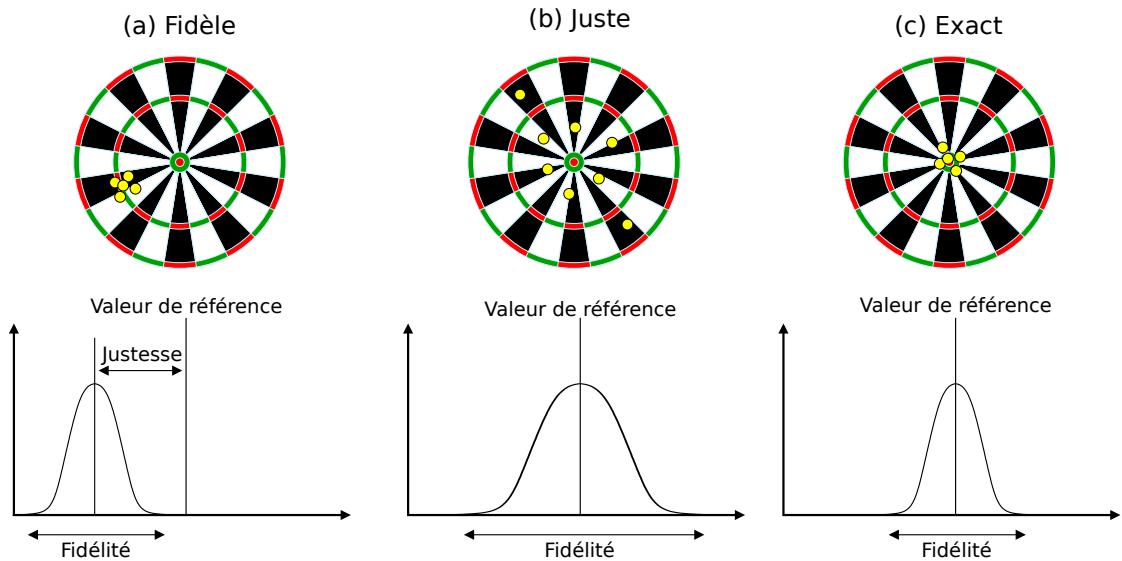


FIGURE 4.6 – Définition de la fidélité, de la justesse et de l'exactitude.

Une définition graphique de ces différents termes est donnée en figure 4.6, dans cet exemple la consigne est le centre de la cible. La fidélité (voir figure 4.6a) est la capacité du robot à atteindre toujours la même position pour une même consigne, cela correspond donc à une distribution de valeur resserrée. D'ailleurs la fidélité se mesure en considérant l'écart-type de la distribution des points. La justesse (voir figure 4.6b) est la capacité du robot à atteindre la valeur de consigne. Elle correspond donc à l'écart entre la moyenne des valeurs résultats et de la valeur de consigne. L'exactitude (voir figure 4.6c) correspond à la capacité du robot à être juste et fidèle.

Dans le cadre robotique, on définit de manière usuelle la répétabilité du robot comme étant équivalente à la fidélité de ce dernier. Il n'y a donc pas de notion de justesse dans la répétabilité d'un manipulateur. Ce que l'on cherche à quantifier, c'est bien la capacité du robot à retourner à la même position cartésienne pour une même consigne articulaire. Afin d'obtenir un ordre de grandeur de la répétabilité de MiGriBot, il est nécessaire de connaître la répétabilité des unités d'actionnements. La première étape a donc été de déterminer cette répétabilité exprimée comme l'écart-type de l'ensemble des valeurs sur 30 aller-retours. Il s'avère que chaque unité d'actionnement à une répétabilité de 200 nm au pire. Dans le cas de l'analyse de la répétabilité des actionneurs nous avons utilisé un microscope holographique dont la résolution dans le plan est proche de la répétabilité obtenue.

Afin d'étudier la répétabilité de MiGriBot, nous avons sélectionné quatre points dans l'espace de travail et à proximité des points de passage des trajectoires de manipulation expérimentales présentées dans la suite : un point *A* situé 300 µm au dessus du plan de manipulation et 3 points *B*, *C* et *D* situés sur le plan de manipulation (voir figure 4.7.e et table 4.1). Les points choisis permettent de couvrir 50% de la largeur de l'espace de travail.

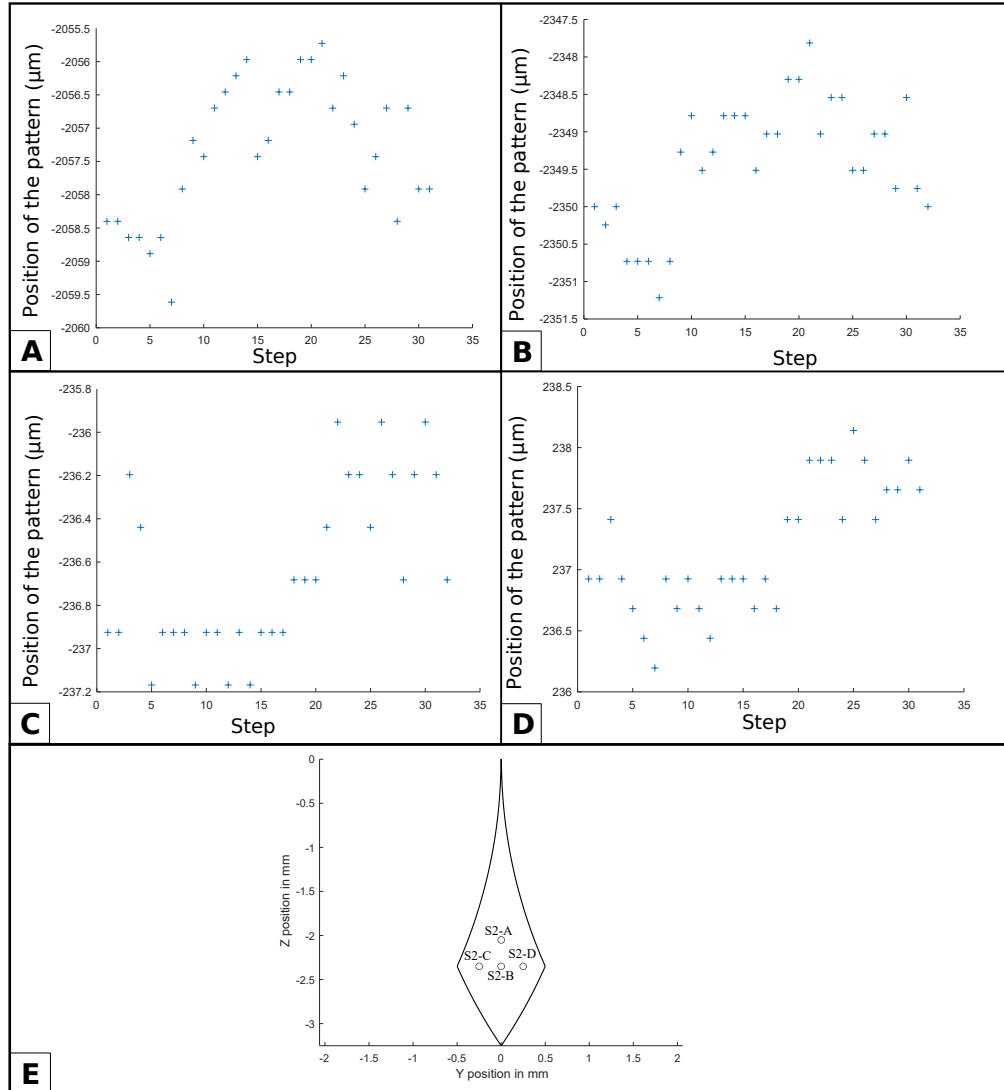
Nom du point	$y_p$ (mm)	$z_p$ (mm)
<i>A</i>	0	-2,05
<i>B</i>	0	-2,35
<i>C</i>	-0,25	-2,35
<i>D</i>	0,25	-2,35

TABLE 4.1 – Position des points choisis pour l'étude de répétabilité.

Dans le cas de cette analyse de répétabilité, nous avons utilisé la mire périodique gravée (visible sur la figure 4.2a) sur les doigts de la pince et utilisée une méthode de corrélation d'image pour retrouver un motif dans l'image (fonction imregcorr de Matlab™) et donc par extension la position du robot. Les figures 4.7a, 4.7b, 4.7c et 4.7d donnent les positions relevées pour chacune des 30 visites respectivement aux points *A*, *B*, *C* et *D*. Il en résulte que suivant l'axe  $y_w$  la répétabilité de positionnement est meilleure que 600 nm tandis que suivant l'axe  $z_w$  la répétabilité de positionnement est de l'ordre de 1 µm. Nous pouvons donc constater que la répétabilité est meilleure dans le plan  $Ox_wy_w$  que suivant l'axe  $z_w$ . Ce résultat était prévisible, car ce sont les déplacements suivant l'axe  $z_w$  qui utilisent le plus la déformation des articulations. La répétabilité de positionnement obtenue est convenable pour mener des opérations de prise-dépose de micro-objets avec des tailles caractéristiques de l'ordre de 40 µm.

### 4.3.3 Capacité de préhension

D'un point de vue de la manipulation de micro-objets, il est nécessaire de connaître les caractéristiques géométriques (taille, rapport de forme,etc.) des objets que nous sommes en capacité de manipuler. Aux échelles visées, il faut absolument



**FIGURE 4.7 – Mesure de la répétabilité de positionnement de MiGriBot.** (a) Mesure en position au point A. L'écart-type est de  $1,038 \mu\text{m}$ . (b) Mesure en position au point B. L'écart type est de  $0,8395 \mu\text{m}$ . (c) Mesure en position au point C. L'écart-type est de  $0,3910 \mu\text{m}$ . (d) Mesure en position au point D. L'écart-type est de  $0,5267 \mu\text{m}$ . (e) Position des points utilisés pour la mesure de la répétabilité dans l'espace de travail.

prendre en compte et anticiper la saisie et la dépose de l'objet. En effet, les forces surfaciques étant prédominantes et le poids négligeable la plupart du temps, il peut s'avérer complexe de relâcher l'objet. De plus, il est nécessaire de savoir si le robot est capable de manipuler des objets avec des rapports de formes différents. Pour cela, nous avons sélectionné plusieurs objets avec des dimensions et des formes différentes. Le premier objet manipulé est un cylindre en Silicium d'un diamètre de 350 µm avec une hauteur de 400 µm. Cet objet est celui que nous avons utilisé pour les tests de prise-dépose que nous présenterons dans la prochaine section. La plupart des autres objets que nous avons manipulé sont des pièces issues de l'horlogerie (voir figure 4.8). Nous avons dans un premier temps pu manipuler une levée d'ancre<sup>2</sup> d'une ancre suisse d'un mouvement horloger (voir figure 4.8a). La figure 4.8b montre la capacité de saisir un rubis cylindrique issu d'un mécanisme horloger tandis que les figures 4.8d et 4.8e montrent la manipulation d'un axe horloger depuis son extraction du mouvement d'une montre. MiGriBot est aussi capable de manipuler le mécanisme parallèle le constituant comme illustré en figure 4.8f. Enfin, le dernier objet manipulé est un fil de cuivre avec un diamètre de 40 µm que nous avons déplacé et inséré dans un alésage de 50 µm<sup>3</sup>. En conclusion, MiGriBot est capable de manipuler des micro-objets avec des formes différentes et des dimensions caractéristiques allant de 40 µm à 400 µm.

L'autre point important en lien avec la capacité de préhension est la masse que la structure est capable de soulever. La première donnée est que MiGriBot est capable de soulever le mécanisme parallèle le constituant. Le mécanisme parallèle à une masse de 65 mg. Une expérience a été menée afin de déterminer la masse maximale. Il en résulte que MiGriBot est capable de soulever une masse de 80 mg, mais que le manipulateur n'est pas capable de manipuler une masse de 110 mg<sup>4</sup>. Cette information est donnée à titre purement indicatif, car la plupart des micro-objets ont une masse bien inférieure à cette valeur. À titre d'exemple, le cylindre utilisé lors des manipulations expérimentales à une masse de 0,07 mg.

#### 4.3.4 Performances dynamiques

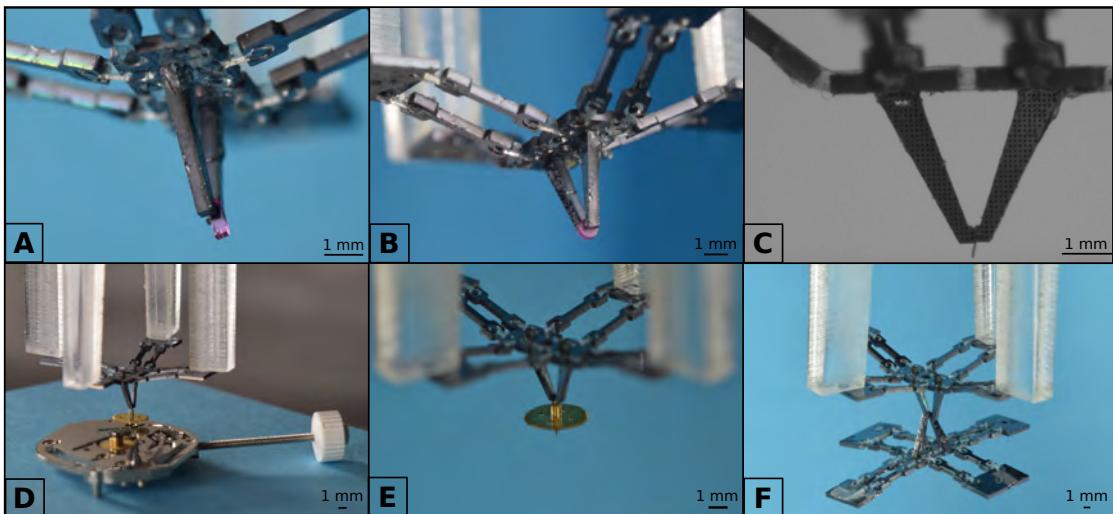
Les différentes études qui viennent d'être exposées ont été réalisées avec des vitesses faibles et donc en régime quasi-statique. Cependant, MiGriBot a été conçu pour permettre d'effectuer des tâches de prise-dépose de micro-objets avec des cadences élevées ce qui implique des vitesses et accélérations élevées. Dans ce cas, certains effets dynamiques ne peuvent plus être négligés. Nous proposons d'étudier d'une part la réponse dynamique des actionneurs avant de nous intéresser à la réponse dynamique et au suivi de trajectoires à haute vitesse du manipulateur.

---

2. Pièce en rubis placé dans l'ancre d'une montre mécanique.

3. Voir la vidéo S9 disponible sur le site de Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>

4. Voir la vidéo S7 disponible sur le site de Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>



**FIGURE 4.8 – Manipulation de divers micro-objets.** (a) Manipulation d'une levée d'ancre issue d'une ancre suisse. La levée d'ancre est un parallélépipède avec une section de 150 µm par 150 µm et une longueur de 900 µm. (b) Manipulation d'un rubis horloger cylindrique avec un diamètre de 700 µm et une épaisseur de 200 µm. (c) Manipulation d'un fil avec un diamètre de 40 µm. (d) Extraction d'un axe horloger d'un mouvement de montre. La partie saisie a un diamètre de 100 µm. (e) Zoom sur l'axe horloger dans la pince de MiGriBot. (f) Saisie d'un mécanisme parallèle constitutif de MiGriBot. La partie saisie a une épaisseur de 400 µm.

#### 4.3.4.1 Analyse dynamique des unités d'actionnement

L'analyse dynamique des unités d'actionnement s'est effectuée en deux temps. Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier la fréquence de coupure des unités d'actionnement puis dans un second temps, nous avons identifié le temps de réponse de chacune des unités d'actionnement.

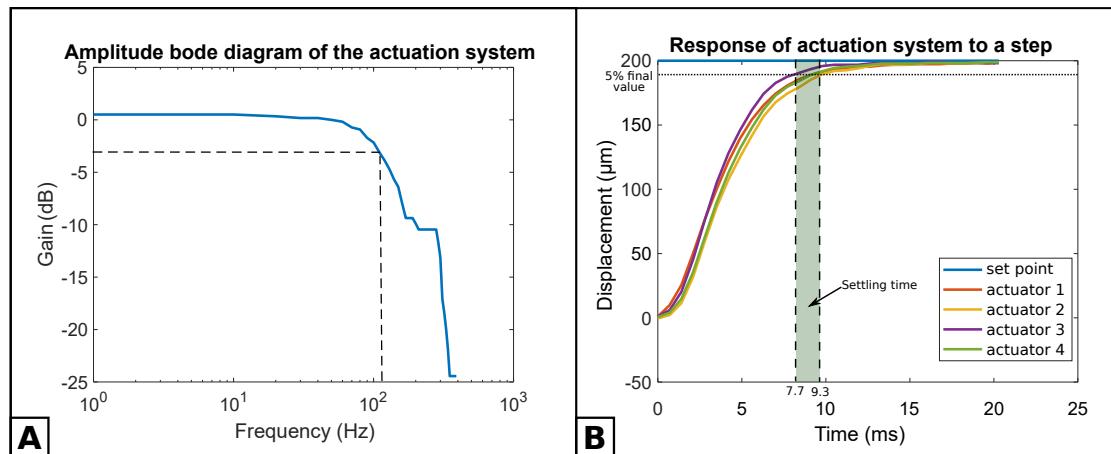
Les données du constructeur indiquent que l'actionneur a une fréquence de résonance de 1800 Hz. Cependant, afin de protéger l'actionneur, il y a un filtre réjecteur de bande et un filtre passe-bas pour rejeter les hautes fréquences et ainsi éviter d'endommager l'actionneur lorsqu'il sera utilisé avec une charge tel que c'est le cas avec les allonges et la structure robotique. Il est possible de modifier les paramètres des filtres de manière à changer la fréquence de coupure de l'actionneur et donc par extension de l'unité d'actionnement. Le réglage a été effectué sur l'actionneur avec son extension, car c'est dans ce cas-là qu'il sera utilisé.

Le réglage repose sur plusieurs critères. Le premier est de ne pas avoir de fréquence de résonance qui pourrait être dommageable pour le système et pour la commande. Le deuxième critère est de tenir compte du premier mode de la structure parallèle que nous avons identifié à 264 Hz. Enfin, le dernier critère est de ne pas avoir de dépassement lors de la réponse à un échelon des unités d'action-

nement, si c'était le cas cela pourrait conduire à des mouvements incontrôlés et potentiellement à des collisions avec le substrat de manipulation par exemple.

La figure 4.9a donne le diagramme de Bode en amplitude des unités d'actionnement. Ce diagramme a été obtenu en envoyant un signal de commande sinusoïdale avec une amplitude de déplacement de 400 µm. On peut observer que le gain exprimé en décibel est proche de 0 jusqu'à une fréquence de 80 Hz. Cela signifie qu'entre 0 et 80 Hz, la réponse du système d'actionnement correspond à la consigne sans amplification ou atténuation. Le diagramme permet aussi de déterminer la fréquence de coupure à -3 dB. Cette fréquence est de 110 Hz. Cela correspond donc à une valeur deux fois inférieure au premier mode du mécanisme parallèle. Nous pouvons constater avec le diagramme de Bode que les deux premiers critères de réglage sont remplis.

Le dernier critère à vérifier correspond à la réponse indicielle des unités d'actionnement. Cela permet d'une part de connaître le temps de réponse à 5% du système ainsi que de vérifier qu'il n'y a pas de dépassement de la valeur de consigne. Pour cela, nous avons soumis les quatre unités d'actionnement à un échelon de déplacement de 200 µm. La figure 4.9b permet de visualiser la réponse pour chacune des quatre unités. Nous pouvons constater que les réponses sont très similaires même si certaines unités sont plus rapides. Globalement, on a un temps de réponse à 5% compris entre 7,7 et 9,3 ms. De plus, nous vérifions qu'il n'y a pas de dépassement.



**FIGURE 4.9 – Analyse dynamique des unités d'actionnement.** (a) Diagramme de Bode en amplitude des unités d'actionnement permettant d'identifier la fréquence de coupure à -3 dB (50 Hz). (b) Réponse des quatre unités d'actionnement à un échelon de déplacement de 200 µm. Les unités d'actionnement ne souffrent pas de dépassement et affichent un temps de réponse entre 7,7 ms et 9,3 ms.

#### 4.3.4.2 Analyse dynamique de MiGriBot

L'étape suivante de l'analyse concerne la dynamique de MiGriBot. La première analyse portera sur le suivi d'une trajectoire proche de ce qu'on peut trouver dans

les cycles de prise-dépose à l'échelle macroscopique. Nous verrons par la suite le suivi d'une trajectoire circulaire.

La première trajectoire qui sera utilisée par la suite pour le cycle de prise-dépose est inspiré de la trajectoire du cycle ADEPT (trajectoire noire figure 4.10a). Elle est composée d'une première partie en arc de cercle avec un rayon de 200  $\mu\text{m}$  suivi d'un déplacement linéaire de 200  $\mu\text{m}$  puis de nouveau un arc de cercle avec un rayon de 200  $\mu\text{m}$ . Il s'agit donc finalement d'un déplacement de 600  $\mu\text{m}$  entre les points de départ et d'arrivée. Le déplacement suivant l'axe  $\mathbf{z}_w$  est de 200  $\mu\text{m}$ . Cette trajectoire a ensuite été réalisée avec quatre temps de cycles différents à savoir 100 ms, 25 ms, 15 ms et 7 ms. Les différentes trajectoires sont visibles dans la figure 4.10a. Les trajectoires à 100 ms et 25 ms sont proches de la référence de trajectoire. Celle réalisée avec un temps de cycle de 15 ms laisse apparaître une erreur plus grande surtout sur le début de la trajectoire (partie gauche de la courbe). Enfin avec une trajectoire effectuée en 7 ms, le robot ne parvient plus à suivre la trajectoire de manière convenable. Ce résultat était attendu puisque nous sommes sous le temps de réponse des actionneurs.

La deuxième partie de l'étude dynamique de MiGriBot est la réalisation d'une trajectoire circulaire avec plusieurs fréquences de rotation. La trajectoire de référence est un cercle dans le plan  $Ox_wy_w$  avec un rayon de 300  $\mu\text{m}$ . La figure 4.10b permet de visualiser les trajectoires pour une partie des fréquences à savoir 1 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 90 Hz et 140 Hz. En nous basant sur le rayon minimal des trajectoires nous avons tracé le diagramme de Bode en amplitude (voir fig. 4.10c). Ce diagramme permet de mettre en exergue la fréquence de coupure à -3 dB qui est de 50 Hz.

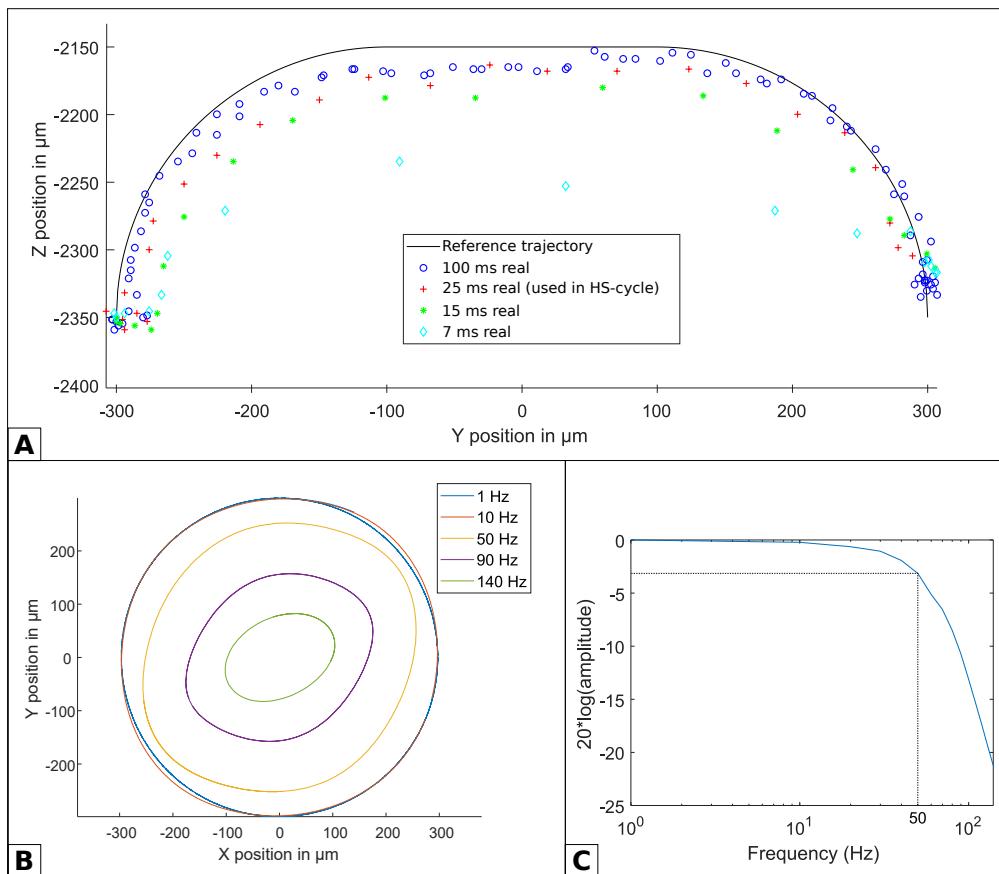
L'ensemble des performances dynamiques du robot relevées expérimentalement laisse présager la possibilité d'effectuer un grand nombre d'opérations par seconde présente dans la suite de ce chapitre.

## 4.4 RÉALISATION D'OPÉRATIONS DE PRISE-DÉPOSE

Après avoir étudié les différentes performances de MiGriBot, nous allons étudier la capacité de préhension et notamment la réalisation de cycles de prise-dépose. Nous avons tout d'abord procédés à des tests de manipulation d'objets en téléopération puis nous avons effectué la validation des opérations automatiques de prise-dépose en deux temps. Dans une première partie, nous avons considéré un cycle se rapprochant du cycle ADEPT qui est un cycle de référence dans la caractérisation des robots de prise-dépose. Puis nous avons considéré un deuxième cycle contenant une position d'attente depuis laquelle le cycle commence et termine.

### 4.4.1 Manipulation télé-opérée

La première étape a été de réaliser des opérations de prise-dépose en téléopération de manière de vérifier que le robot était bien capable de saisir un objet, le



**FIGURE 4.10 – Analyse dynamique de MiGriBot.** (a) Suivi de trajectoire avec des dynamiques importantes. La trajectoire testée correspond à la trajectoire entre le point de prise et le point de dépôt. (b) Réponse de MiGriBot à une trajectoire circulaire avec une fréquence augmentant au fur et à mesure. (c) Diagramme de Bode en amplitude correspondant au rapport entre le diamètre du cercle de référence et le diamètre minimal obtenu en réel. On remarque une fréquence de coupure de 50 Hz.

déplacer et le relâcher. Ces trois opérations sont la base d'un cycle de prise-dépose. Cette opération de vérification peut sembler triviale, cependant aux échelles visées, il est nécessaire de vérifier la faisabilité de chaque opération. Il est par exemple nécessaire de s'assurer de la capacité du robot à relâcher l'objet.

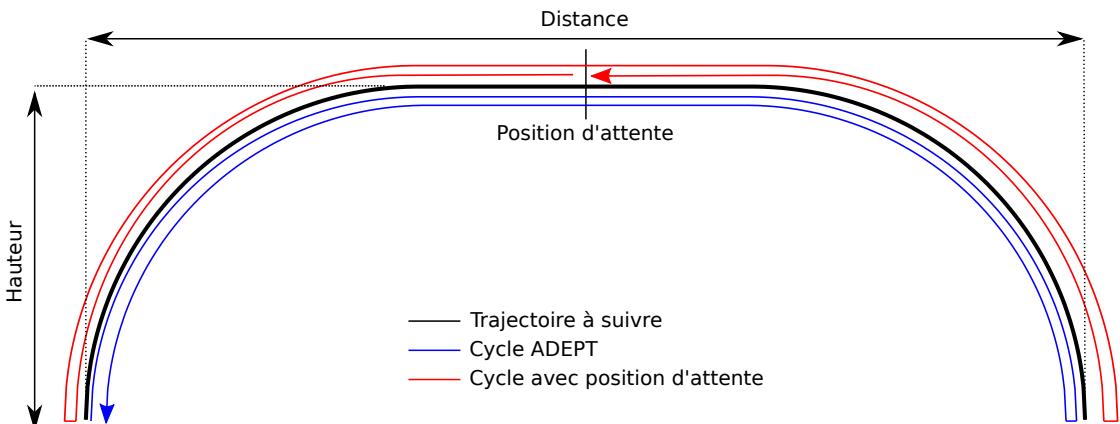
Pour cela, nous avons manipulé le cylindre en Silicium d'une hauteur de 400 μm et un diamètre de 350 μm évoqué précédemment. Cet objet sera utilisé pour l'ensemble des tests de prise-dépose automatiques. Cette première étape de validation nous a permis de montrer que l'effort de serrage était assez important pour saisir l'objet et le déplacer sans le relâcher. De plus, nous avons pu valider que l'effort d'adhésion du Gel-Pak® était suffisant pour poser l'objet.

Dans un second temps, nous avons testé la manipulation d'un objet plus petit, un fil avec un diamètre de 40 μm. Nous avons alors effectué un cycle de prise-dépose. Pour cela nous avons placé le fil dans un trou de 50 μm, puis nous avons

déplacé le fil dans l'espace de travail avant de venir le déposer de nouveau dans le trou de 50 µm<sup>5</sup>. Ces opérations ont pu être réalisées assez simplement confirmant la capacité de MiGriBot de réaliser des tâches de prise-dépose avec des objets de diverses tailles et formes.

#### 4.4.2 Réalisation d'un cycle de prise-dépose type ADEPT

Le cycle ADEPT est un cycle permettant de caractériser les robots de prise-dépose. Ce cycle est défini par trois grandeurs qui sont la hauteur entre le point de prise et le haut de la trajectoire, la distance entre le point de prise et le point de dépose et la hauteur entre le haut de la trajectoire et le point de dépose. De manière usuelle, les deux hauteurs sont les mêmes. Le cycle ADEPT est noté de la manière suivante hauteur/distante/hauteur (voir figure 4.11). Le cycle le plus utilisé par les industriels pour caractériser les robots est 25/305/25 mm. Le robot le plus rapide, à savoir le OMRON-ADPET Quattro, réalise le cycle en 300 ms ce qui permet d'atteindre une cadence supérieure à 200 prises par minute.



**FIGURE 4.11 – Présentation des cycles de prise-dépose.** La courbe noire est la trajectoire de référence à suivre pour chacun des cycles de prise-dépose. La courbe bleue représente le cycle ADEPT avec la définition des paramètres du cycle. La courbe rouge est le cycle de prise-dépose avec la position d'attente.

##### 4.4.2.1 Définition du cycle de prise-dépose

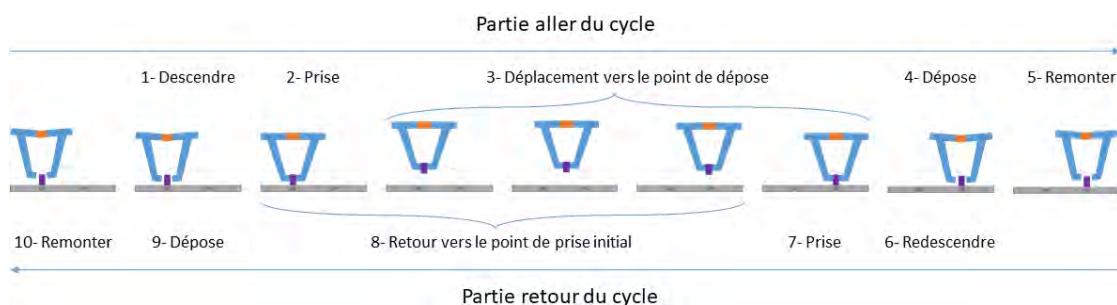
Le robot que nous cherchons à caractériser étant un micromanipulateur, il n'est pas possible d'utiliser le cycle ADEPT directement. Nous avons donc proposé un cycle s'inspirant de ce dernier afin d'avoir une base de comparaison pour les travaux futurs dans le domaine de la prise-dépose automatisé de micro-objets. De plus, afin de pouvoir effectuer plusieurs cycles à la suite et en l'absence d'un système d'approvisionnement en pièce, nous allons revenir à la position de départ avec l'objet lors de ces tests.

5. Voir la vidéo S9 disponible sur la page de Science Robotics :<https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>

La figure 4.11 permet de visualiser le cycle (en bleu) qui a été mis en place ainsi que la décomposition des étapes. Le cycle se compose de dix étapes successives<sup>6</sup> (voir figure 4.12) :

1. Descendre pour se positionner au niveau de l'objet
2. Fermer la pince pour saisir l'objet
3. Effectuer la trajectoire entre le point de prise et le point de dépose
4. Ouvrir la pince afin de déposer l'objet
5. Remonter au-dessus de l'objet
6. Redescendre au niveau de l'objet
7. Fermer la pince pour saisir l'objet
8. Revenir au point de prise initial
9. Ouvrir la pince afin de déposer l'objet
10. Remonter au-dessus de l'objet

La hauteur du cycle est de 200 µm et la distance est de 600 µm. Nous nommerons donc ce cycle dans la suite par la notation cycle 200/600/200 µm.



**FIGURE 4.12 – Présentation du cycle d'étude de MiGriBot.** Ce cycle se compose d'une phase aller permettant de saisir un micro-objet et de l'emmener à un point de dépose et d'une phase de retour qui permet de rapporter le micro-objet à la position de départ. Ce cycle permet de revenir à la situation initiale et de pouvoir enchaîner plusieurs cycles les uns après les autres.

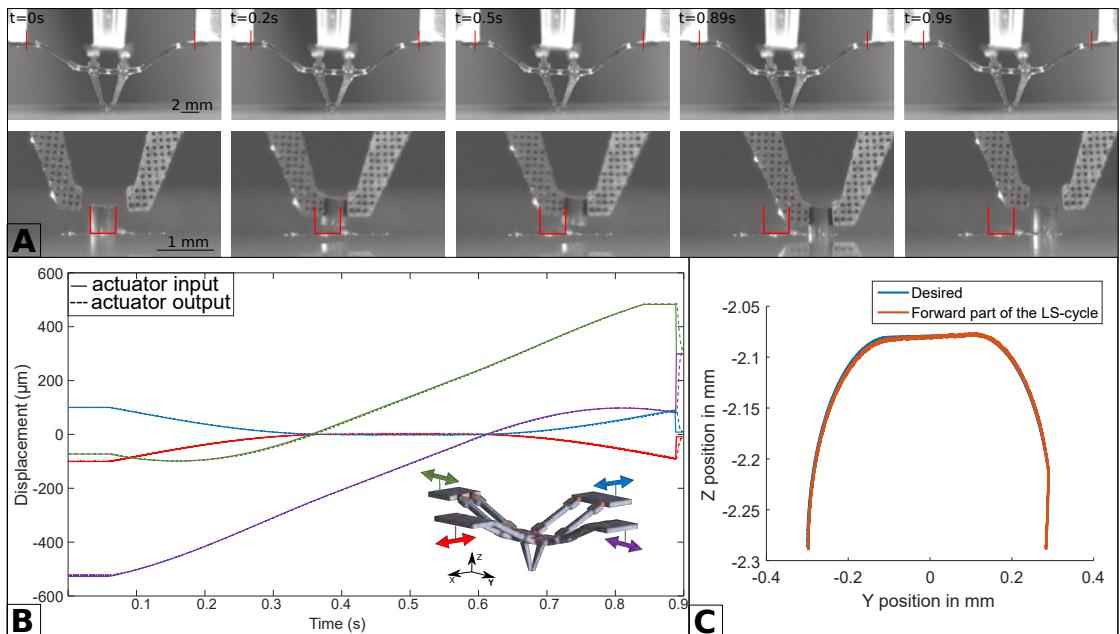
### 4.4.2.2 Réalisation du cycle en quasi-statique

Afin de vérifier le bon déroulement du cycle 200/600/200 µm, nous avons réalisé les premiers tests à faible vitesse, c'est-à-dire avec un temps de cycle de 2 s. À la vue des performances dynamiques de la structure parallèle et des unités d'actionnement, nous pouvons considérer que nous sommes dans un cas quasi-statique. Pour cette phase d'expérimentation, l'objet manipulé est le cylindre en Silicium.

La figure 4.13 permet de visualiser la phase aller du cycle (les étapes 1 à 5). La figure 4.13a montre une décomposition de la phase aller du cycle de la saisie

6. Voir la vidéo S4 disponible sur le site de Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>

de l'objet à sa dépose. Les marques rouges permettent de visualiser les positions initiales de l'objet et des actionneurs. Les figures 4.13b et 4.13c montre les données issues des capteurs lors des manipulations. Ces données permettent de tracer les déplacements des actionneurs (voir fig. 4.13b), avec d'une part la commande en trait plein et le déplacement réel en trait pointillés. Comme évoqué, avec le temps de cycle de 2 s, il est aisément de constater que les actionneurs suivent la consigne sans problème confirmant que le mouvement est quasi-statique avec ce temps de cycle. Cela se confirme aussi avec le tracé de la trajectoire en figure 4.13c, où la trajectoire désirée et celle obtenue sont de nouveau superposées. Cette première réalisation du cycle à faible vitesse permet de montrer et de valider la capacité du robot à effectuer des tâches de prise-dépose de micro-objets.



**FIGURE 4.13 – Réalisation du cycle de prise-dépose en quasi-statique (temps de cycle de 2 s).** (a) Décomposition de la phase aller du cycle en photos. La première frise donne la vue globale de MiGribot tandis que la seconde fournit une vue serrée sur l'objet. Les positions initiales des actionneurs et de l'objet sont visibles en rouge. (b) Analyse de la réponse des actionneurs au cours de la phase aller du cycle. (c) Trajectoire entre le point de prise et le point de dépose. La consigne et la trajectoire réelle sont superposées.

Un robot quel qu'il soit n'a pas pour vocation de réaliser une seule fois une tâche, mais bien de la répéter à de nombreuses reprises. Pour permettre de vérifier la capacité de réaliser plusieurs cycles, nous avons réalisé ce cycle lent dix fois de suite sans interruptions<sup>7</sup>. Cela a permis de montrer que MiGriBot est capable de réaliser plusieurs fois le cycle avec succès. Le prochain jalon à valider est la réalisation du cycle 200/600/200 μm à haute vitesse.

7. Voir la vidéo S5 disponible sur le site de Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>

#### 4.4.2.3 Réalisation du cycle à haute cadence

Le cycle à haute vitesse a pour but de montrer la capacité de MiGriBot de manipuler des micro-objets avec des cadences élevées. L'étude des performances dynamiques, et notamment le suivi de trajectoire, nous permettent de fixer la vitesse d'exécution. De manière à avoir une trajectoire suivant la consigne, nous avons choisi d'utiliser la trajectoire réalisée en 25 ms. Le temps d'ouverture et de fermeture est incompressible dans le sens où il dépend du temps de réponse des actionneurs qui pour rappel est de l'ordre de 10 ms. Le temps cible pour le cycle complet à haute vitesse est alors de 100 ms, représentant 10 cycles par seconde<sup>8</sup>. En raison de la vitesse, nous avons dû utiliser une caméra rapide couplée avec un éclairage LED externe. La vérification expérimentale a été effectuée avec le cylindre en Silicium comme le montre la figure 4.14a. Les positions initiales des différents éléments sont visibles en rouge. Comme dans le cas quasi-statique, les analyses ont été faites sur la partie aller du cycle qui dure 40 ms. Les figures 4.14b et 4.14c permettent de visualiser le comportement des actionneurs lors de la réalisation du cycle. Contrairement au cas « lent », on constate un retard dans l'exécution du déplacement par rapport à la consigne ainsi qu'un léger écrêtement des valeurs atteintes. Cela se traduit aussi sur la visualisation de la trajectoire où l'on constate que la trajectoire est légèrement déformée. Une fois de plus, on parvient à atteindre la position désirée. Cependant, cette expérimentation nous montre que nous sommes à la limite de ce qu'il est possible de réaliser en grande partie à cause des performances dynamiques de l'actionnement limitant la réponse aux sollicitations dynamiques. Cette limitation se remarque par un retard de la sortie par rapport à la consigne générant de légères différences sur la trajectoire réelle obtenue.

Nous avons montré la capacité de MiGriBot de réaliser le cycle 200/600/200  $\mu\text{m}$  avec un cylindre en Silicium de 350  $\mu\text{m}$  de diamètre et une hauteur de 400  $\mu\text{m}$ . Ce cycle a été réalisé avec un temps de cycle de 2 s et avec un temps de cycle de 100 ms. De plus, nous avons pu montrer que MiGriBot est capable de réaliser ce cycle à plusieurs reprises avec succès.

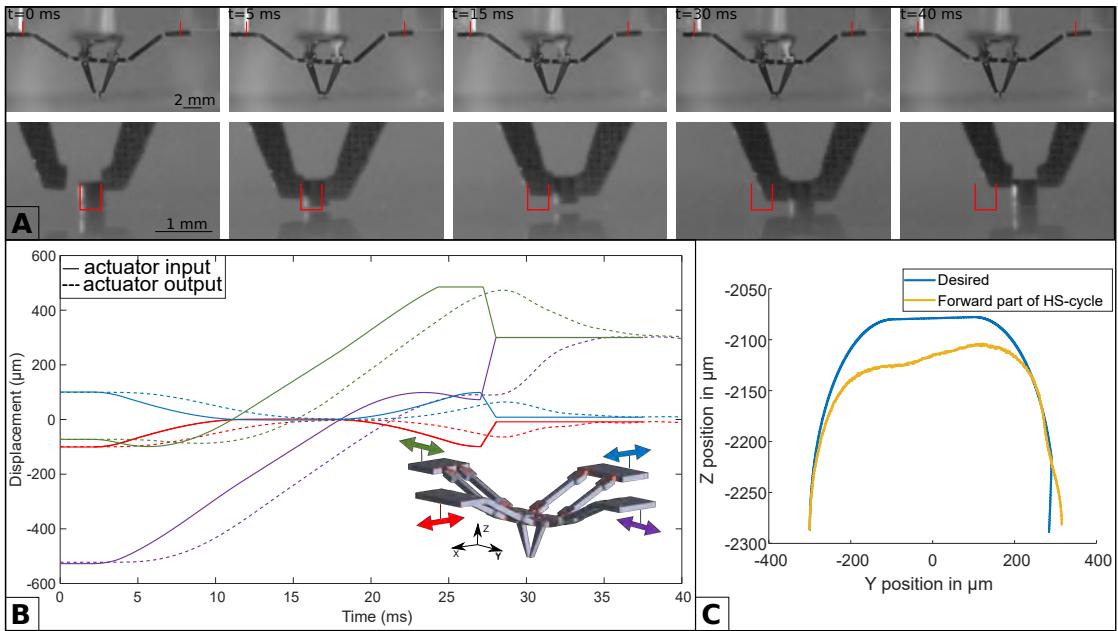
### 4.4.3 Réalisation d'un cycle avec position d'attente

#### 4.4.3.1 Présentation du cycle

Afin de démontrer l'adaptabilité de MiGriBot, nous avons réalisé un deuxième cycle de prise-dépose plus proche d'un cas applicatif. Ce cycle, représenté en rouge sur la figure 4.11, est légèrement différent de par les étapes qui sont mises en jeu. L'idée de ce cycle est de démarrer d'une position d'attente, une position à laquelle le manipulateur attend que l'ordre de manipulation lui soit transmis. Dès que celui-ci lui parvient, MiGriBot effectue le déplacement vers le point de prise

---

8. Voir la vidéo S6 disponible sur le site de Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>



**FIGURE 4.14 – Réalisation du cycle de prise-dépose à haute vitesse (temps de cycle de 100 ms).** (a) Décomposition de la phase aller du cycle en photos. La première frise donne la vue globale de MiGribot tandis que la seconde fournit une vue serrée sur l’objet. Les positions initiales des actionneurs et de l’objet sont visibles en rouge. (b) Analyse de la réponse des actionneurs au cours de la phase aller du cycle. (c) Trajectoire entre le point de prise et le point de dépose.

afin de saisir l’objet. Il effectue ensuite le déplacement entre le point de prise et le point de dépose, ce déplacement est exactement le même que celui du cycle ADEPT 200/600/200  $\mu\text{m}$ . Une fois l’objet déposé, MiGriBot retourne à sa position d’attente. La figure 4.15 présente de manière schématique ce second cycle. La principale différence entre les deux cycles est la position du micromanipulateur au départ et en fin de cycle. Ce deuxième cycle est plus complexe, car la trajectoire d’approche avant la prise (et la trajectoire d’éloignement après la dépose) est une trajectoire dans le plan  $Oy_wz_w$  avec un risque de collision entre les doigts de la pince et l’objet. Ce cycle nous permet donc d’observer de manière qualitative la justesse du positionnement du robot.



**FIGURE 4.15 – Définition du cycle avec position d’attente.** Dans le cadre de ce cycle, le robot attend l’objet à une position d’attente avant d’aller le chercher au point de prise pour l’emmener au point de dépose et retourner à la position d’attente avant d’aller chercher l’objet suivant.

#### 4.4.3.2 Réalisation à haute vitesse

Ce cycle avec point d'attente a aussi pour vocation d'être réalisé à haute vitesse. De par la nature de ce cycle, il est possible d'aller plus vite qu'avec le cycle 200/600/200  $\mu\text{m}$  puisqu'une fois que l'objet est posé au point de dépose, MiGriBot retourne à sa position d'attente. Cela a pour effet de faire économiser 20 ms sur le temps de cycle et donc ce nouveau cycle est réalisé en 80 ms du départ de la position d'attente au retour à cette dernière. Cela permet d'atteindre une cadence de 12 opérations par seconde. Ce cycle a été effectué avec succès de manière expérimentale avec le cylindre en Silicium.

Ce cycle a été testé avec deux autres objets avec des formes et des tailles bien différentes. Dans un premier temps, nous avons effectué le cycle en utilisant la levée d'ancre, qui est un parallélépipède avec une section de 150  $\mu\text{m}$  par 150  $\mu\text{m}$ . Le cycle a été réalisé avec succès avec un temps de cycle de 80 ms. Le dernier test que nous avons effectué concerne la réalisation du cycle à haute vitesse avec un fil de 40  $\mu\text{m}$  de diamètre réalisé avec succès une nouvelle fois.

La manipulation de ces trois objets nous a permis de montrer que MiGriBot est capable de manipuler des objets avec des tailles et des formes variées avec le même temps de cycle, à savoir 80 ms dans le cas de ce cycle avec position d'attente<sup>9</sup>.

#### 4.4.4 Comparaison avec les autres robots de prise-dépose de micro-objets

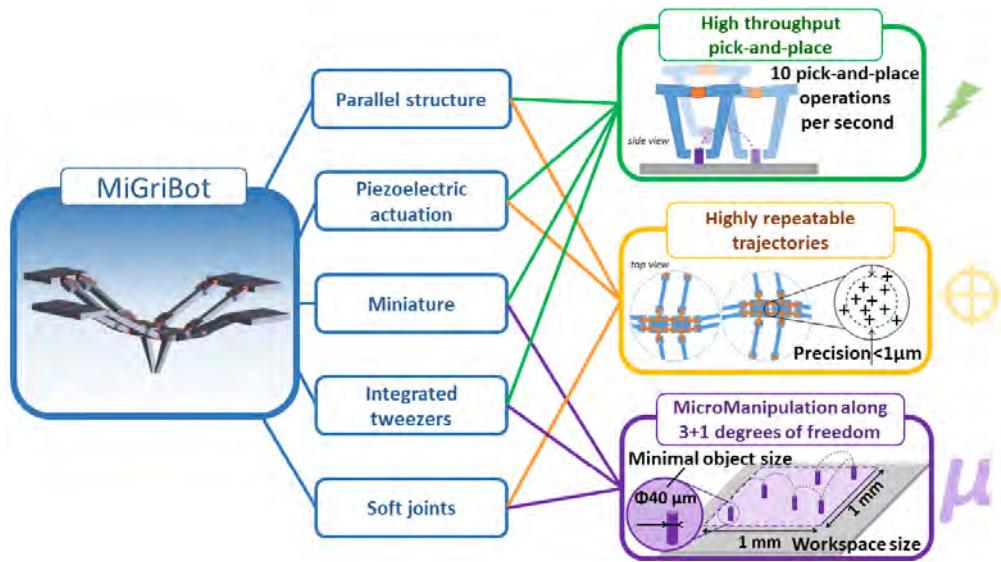
La plupart des cycles de prise-dépose de micro et nano objets présent dans l'état de l'art ont des temps de cycle compris entre 6 s et 480 s [Zhang 09, Jain 15, Lofroth 19, Xie 09]. Il y a également d'autres travaux qui revendentiquent des cycles à haute vitesse avec des temps de cycle de 960 ms [Avci 14] et de 800 ms [Kim 20]. Dans ces deux derniers cas, la distance entre le point de prise et le point de dépose est de 60  $\mu\text{m}$ . Comme nous l'avons montré, MiGriBot est capable de réaliser des cycles de prise-dépose en 80 ms pour une distance entre le point de prise et le point de dépose de 600  $\mu\text{m}$ . À notre connaissance, MiGriBot est donc dix fois plus rapide pour une distance dix fois plus grande que les travaux précédents présents dans la littérature.

## 4.5 CONCLUSION

MiGriBot est une nouvelle structure microrobotique basée sur une architecture parallèle miniature de manière à être plus proche de la taille des objets à manipuler. Pour pouvoir réaliser MiGriBot, des articulations souples ont été introduites avec un comportement assimilable à des liaisons rotules. Afin de viser des applications

---

9. Voir la vidéo S8 disponible sur le site Science Robotics : <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abn4292>



**FIGURE 4.16 – Résumé des principales caractéristiques de MiGriBot.**

MiGriBot est une structure parallèle à articulations souples intégrant la préhension. La structure est actionnée par des actionneurs piézoélectrique. MiGriBot est capable de réaliser des manipulations de micro-objets selon 4 ddl avec une répétabilité de 1  $\mu\text{m}$  et avec une cadence de 10 cycles de prise-dépose par seconde.

de prise-dépose à haute vitesse, MiGriBot intègre un actionnement piézoélectrique ainsi qu'une pince intégrée dans la structure. Cela permet d'alléger la structure et d'éviter l'ajout de câbles de connexion puisque la pince est commandée par les actionneurs à la base du micromanipulateur.

Ces différentes caractéristiques combinées permettent à MiGriBot de déplacer des objets avec une taille allant de 40  $\mu\text{m}$  à 400  $\mu\text{m}$  suivant les trois directions usuelles de l'espace. De plus, MiGriBot est capable de réaliser des trajectoires à très haute vitesse, avec des temps de cycle permettant d'atteindre plus de 10 cycles par seconde avec une répétabilité de 1  $\mu\text{m}$ . La figure 4.16 met en exergue les principales caractéristiques de MiGriBot développée au cours de cette thèse<sup>10</sup>.

10. La vidéo YouTube permet d'avoir un condensé des résultats obtenus avec MiGriBot : <https://www.youtube.com/watch?v=cTpnnqgbfGPA&>

---

## Chapitre 5

# Ouverture vers la robotique macroscopique : robot pour le tri de déchets

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	111
<b>5.2</b>	<b>Contexte du tri de déchets</b>	111
5.2.1	Le tri de déchets	111
5.2.2	Enjeux et problématiques à résoudre	113
5.2.3	Travaux précédents	113
<b>5.3</b>	<b>Conception de la structure robotique</b>	115
5.3.1	Influence de la structure microrobotique	115
5.3.2	Présentation de la structure	115
5.3.3	Avantage de la conception pour le tri de déchets	116
<b>5.4</b>	<b>Modélisation de la structure</b>	117
5.4.1	Définition des paramètres et fermeture géométrique	118
5.4.2	Modèle géométrique inverse	120
5.4.3	Modèle cinématique	121
<b>5.5</b>	<b>Analyse de l'espace de travail</b>	121
5.5.1	Espace de travail en translation	121
5.5.2	Analyse de la manipulabilité	123
5.5.2.1	Manipulabilité en translation	123
5.5.2.2	Manipulabilité en rotation	124
<b>5.6</b>	<b>Validation expérimentale</b>	126
5.6.1	Réalisation d'un prototype	126
5.6.1.1	Conception du préhenseur	126
5.6.1.2	Dimensionnement et fabrication	127

5.6.2	Espace de travail du manipulateur . . . . .	127
5.6.3	Utilisation du manipulateur . . . . .	128
5.6.3.1	Génération de mouvements . . . . .	128
5.6.3.2	Mobilités du manipulateur . . . . .	130
5.6.3.3	Application de prise-jeté . . . . .	131
5.7	Discussion . . . . .	132
5.8	Conclusion . . . . .	133

*Le chapitre précédent a introduit la validation expérimentale d'un micromanipulateur à articulations souples pour la micromanipulation à haute cadence. Nous avons montré la capacité de manipuler des objets avec des tailles caractéristiques comprises entre 40 et 400 µm et d'effectuer 12 cycles de prise-dépose par seconde. L'architecture proposée, initialement pour la micromanipulation, présente des intérêts à l'échelle macroscopique. Ce chapitre présente donc une adaptation de la structure pour des applications de tri de déchets.*

## 5.1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés à la conception d'une structure parallèle microrobotique pour des applications de prise-dépose de micro-objets avec une haute cadence. En raison de sa conception et des solutions utilisées, la structure est particulièrement adaptée aux petites échelles. Cependant, certaines caractéristiques telles que la pince directement intégrée dans la structure parallèle et son actionnement depuis la base sont également intéressantes pour la robotique conventionnelle. Dans ce chapitre, nous allons voir comment la structure microrobotique a inspiré la conception d'une structure robotique à plus large échelle. Le domaine applicatif que nous avons sélectionné est le tri de déchets, un domaine en plein essor avec un besoin important de structures robotiques innovantes et robustes pour travailler dans des environnements non contrôlés (poussière, projections de liquide).

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser au besoin robotique dans le cadre du tri de déchets avant de présenter la structure robotique proposée. Nous continuerons avec la modélisation de la structure qui nous mènera à la conception d'un prototype. Enfin, nous présenterons une première validation expérimentale.

## 5.2 CONTEXTE DU TRI DE DÉCHETS

### 5.2.1 Le tri de déchets

Le recyclage et la valorisation des déchets constituent un enjeu environnemental majeur. Récemment, des machines robotisées de tri des déchets ont commencé à faciliter et à sécuriser le travail des opérateurs humains dans les installations de récupération des matériaux et autres centres de recyclage [Taylor 19, Wilts 21]. Ces machines s'appuient sur la vision par ordinateur pour l'identification d'une classe de déchets à partir d'images de caméras RVB et hyperspectrales. Les progrès de l'apprentissage profond permettent d'identifier et de séparer avec une efficacité allant jusqu'à 95% des matériaux ciblés sur le tapis roulant [Gundupalli 17]. Ensuite, des robots de ramassage rapides sont utilisés pour capturer les déchets directement dans le flux de matériaux.

Quelques entreprises proposent des machines automatisées pour les centres de tri de déchets. AMP Robotics, Bulk Handling Systems (BHS), Machinex, TOMRA Sorting Recycling et ZenRobotics sont parmi celles qui se concentrent sur la vision par ordinateur et la robotique. Elles utilisent des robots industriels standards pour la saisie des objets. Actuellement, ces solutions de tri peuvent atteindre des cadences de saisie presque deux fois supérieures à celles d'un opérateur humain (respectivement 70 saisies par minute contre 30 à 40 saisies par minute) [Pyzyk 19]. Pour réduire les coûts et la consommation énergétique, les robots doivent être plus rapides et plus économies en énergie.

Des robots parallèles ont été adoptés pour répondre à ces deux objectifs. Grâce aux actionneurs situés sur la base du robot, la dynamique de ces structures est particulièrement élevée avec une consommation d'énergie réduite par rapport aux robots sériels [Merlet 06b]. En particulier, les robots type Delta sont parmi les robots les plus rapides, les moins chers et les plus légers pour les opérations de prise-dépose [Clavel 88, Pierrot 90]. De plus, ils sont facilement réparables et plus propices à travailler dans des environnements non maîtrisés.

La configuration habituelle pour le tri des déchets est un robot Delta de ABB ou Omron équipé d'une ventouse. Cette solution est adaptée à la collecte de déchets légers et plats (cf. Fig. 5.1).



**FIGURE 5.1 – Exemple de robots parallèles dans un centre de tri de déchets.** Il s'agit de robots Ix4 vendus par Omron équipés de la plateforme rigide P30. Le préhenseur est un système d'aspiration, ce qui est adapté pour des déchets globalement plats et légers. [Pransky 20].

Les préhenseurs sont préférés aux ventouses pour trier les déchets lourds et les objets présentant des géométries complexes ou des surfaces irrégulières. Par exemple, les ramasseurs lourds de ZenRobotics peuvent trier les déchets de construction et de démolition, les déchets commerciaux et industriels à l'aide d'un robot portique avec 3 ddl équipé d'une grande pince [Lukka 14]. En général, les pinces sont montées sur des robots cartésiens ou articulés, ce qui entraîne des besoins en énergie plus élevés, une vitesse plus faible et des taux de prélèvement plus bas,

généralement de 30 saisies par minute [Ku 20], mais aussi une durée de vie plus courte en raison de l'environnement poussiéreux [Pransky 20].

### 5.2.2 Enjeux et problématiques à résoudre

La robotisation dans le tri de déchets permet d'améliorer d'une part la sécurité des employés et d'autre part la vitesse de la tâche effectuée.

Concernant la sécurité des employés, la robotisation peut améliorer la sécurité immédiate et la santé à long terme. Dans le cas des déchets, il y a des risques de blessures (objets coupants, lourds, etc.), de contamination ou encore de brûlures chimiques. Normalement, ces dangers sont identifiés et écartés par le premier tri qui est effectué par les usagers. Cependant, en cas d'erreur (volontaire ou non) les équipements personnels de protection pourraient ne pas être adaptés à la situation. Un robot permet de réduire encore les risques liés à la nature des déchets eux-mêmes. À plus long terme, de par le poids et la répétition de certains mouvements, les employés des centres de tri sont touchés par des troubles musculosquelettiques plus connus sous le terme TMS. Là encore l'utilisation de robots ou d'exosquelettes peut permettre de réduire le risque d'exposition et donc de préserver la santé des employés à long terme.

Les robots permettent aussi d'augmenter la cadence de tri et nous le savons la quantité de déchets à trier est très importante. La collecte de nombreux déchets et les nouveaux standards de recyclage augmentent le nombre de déchets à trier chaque jour et donc la capacité à trier de nombreux déchets par jour est d'autant plus importante.

Pour des raisons de sécurité et de cadence, l'utilisation de robots peut être une bonne solution. Cependant, le tri de déchets est très contraignant du fait de son environnement. En effet, les centres de tri sont des endroits poussiéreux avec des projections de liquide possibles. C'est pourquoi il faut essayer en concevant le robot de limiter les parties sensibles proches des tapis de tri. De plus, le préhenseur doit être capable de saisir une grande variété d'objets. Une autre contrainte importante est une contrainte énergétique. Ces contraintes seront au cœur de nos préoccupations pour la suite de la conception du robot.

### 5.2.3 Travaux précédents

Avant de présenter la structure robotique que nous proposons, intéressons-nous à ce qui existe dans l'état de l'art dans le cadre du tri de déchets automatisé. Dans une machine de tri des déchets, la tâche du robot consiste à ramasser des objets sur le tapis roulant et à les jeter dans un bac de collecte. Pour effectuer ce cycle de « pick and toss » (prise-jeté en français), trois translations sont nécessaires, mais les rotations ne le sont généralement pas, car il n'est pas nécessaire de placer l'objet collecté à un endroit précis, comme dans un cycle de « pick-and-place » (prise-dépose en français) classique [Raptopoulos 20]. De plus, si le robot est équipé d'une pince à grandes griffes ou d'une benne prenante, il sera capable de ramasser

des objets de toutes formes et de tous matériaux, quelle que soit leur orientation. Enfin, une vitesse élevée et une faible consommation d'énergie devraient permettre de réduire les coûts du tri. C'est pourquoi les structures parallèles telles que les robots Delta sont privilégiées.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour assurer la préhension en plus des 3 ddl d'un robot Delta sans avoir à transporter un préhenseur supplémentaire. Parmi celles-ci, les plus intéressantes consistent à utiliser une plateforme configurable au sommet de la structure robotique parallèle, car elle peut apporter une capacité de mouvement supplémentaire à l'effecteur final avec un poids supplémentaire très faible.

Les premiers robots parallèles avec une plateforme configurable ont été introduits par Pierrot [Pierrot 01, Nabat 05] et commercialisés par Omron/Adept (sous les noms de Quattro et Ix4). Ce robot, dédié aux opérations de pick-and-place, fournit 3 ddl en translation et 1 ddl en rotation autour de Z en utilisant 4 axes montés sur la base du robot. Ce mouvement de rotation supplémentaire obtenu est nommé le mouvement de Schonflies (« Schonflies motion » en anglais). La rotation est obtenue par un parallélogramme configurable qui remplace la plateforme rigide des robots Delta. Les avantages sont un gain de poids et un bon équilibre entre les quatre moteurs qui actionnent le robot. Plusieurs robots parallèles à quatre membres avec une plateforme configurable, proches de l'architecture cinématique du robot Quattro, ont depuis été proposés pour générer des mouvements de Schonflies [Angeles 06, Wu 16, Schreiber 19].

Au delà de la génération d'un mouvement de rotation, il est intéressant de générer un mouvement permettant d'actionner une pince directement intégrée dans la structure. Yi *et al.* [Yi 02] et Hamaza *et al.* [Hamaza 15] ont étudié une structure (3+1) ddl avec un parallélogramme configurable qui permet de déplacer deux points de l'effecteur dans le plan. Lambert *et al.* a proposé plusieurs dispositifs haptiques basés sur une structure parallèle avec des plateformes configurables. Par exemple, dans [Lambert 15], la cinématique parallèle peut être déplacée dans les 6 directions de l'espace tandis que la configuration d'un parallélogramme permet une translation entre les extrémités des doigts, conduisant au (6+1) ddl. De la même manière, le mécanisme parallèle redondant de Wen *et al.* [Wen 19] permet d'actionner un préhenseur dans les 6 ddl de l'espace avec de grandes plages de rotation.

Néanmoins, l'utilisation de plateformes à base de parallélogrammes n'est pas adaptée à l'actionnement de grandes griffes. Un autre type de plateformes configurables a été proposé par Gosselin *et al.* consistant en deux parties séparées par une liaison pivot passive [Gosselin 15, Isaksson 16]. Cette mobilité peut être utilisée pour obtenir des capacités de rotation illimitées de l'effecteur final ou pour faire fonctionner un préhenseur angulaire. L'équipe de recherche du laboratoire a également présenté plusieurs cinématiques parallèles avec une plateforme pliable pour actionner à distance un préhenseur angulaire. Dans le cas de [Haouas 18b], la cinématique génère les 6 ddl dans l'espace et une mobilité interne fournie par le pliage de la plateforme qui peut être utilisée pour la préhension ou la coupe.

Aucune de ces cinématiques n'est appropriée au ramassage des déchets, car elles ne génèrent pas la combinaison nécessaire et suffisante de degrés de liberté, qui sont trois translations plus l'ouverture et la fermeture d'une pince (rotation autour d'un axe horizontal).

## 5.3 CONCEPTION DE LA STRUCTURE ROBOTIQUE

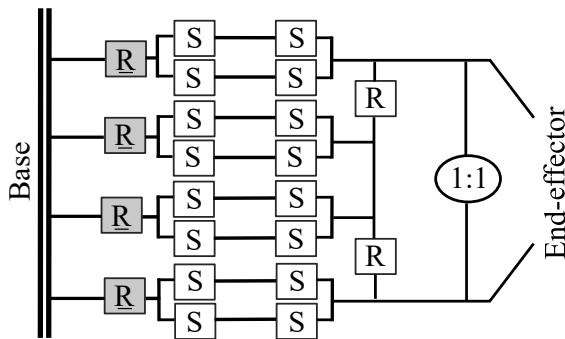
### 5.3.1 Influence de la structure microrobotique

Pour l'application de tri de déchets, il a été identifié qu'il est nécessaire et suffisant d'avoir trois translations et la préhension de manière similaire à l'architecture qui a été développée et présentée dans les chapitres précédents à l'échelle micrométrique. Nous avons donc entrepris l'adaptation de cette structure robotique à l'échelle conventionnelle. Pour cela, quelques adaptations sont nécessaires. En effet, comme nous n'utiliserons plus de liaisons souples, l'architecture de MiGriBot en tant que telle n'est plus utilisable à cause des contraintes internes. Avec des liaisons conventionnelles, il n'est plus possible de garantir l'intégrité des parallélépipèdes constitutifs des jambes. Afin d'adapter la structure, nous avons modifié la plateforme et utilisé un engrenage au centre de celle-ci.

### 5.3.2 Présentation de la structure

Après avoir évoqué les liens avec le micromanipulateur présenté précédemment, entrons dans les détails de la nouvelle structure macroscopique qui a été développée. En plus de MiGriBot, le concept est inspiré des pinces à engrenages et construit sur la base d'une structure de type Delta. Les figures 5.2 et 5.3 permettent de visualiser cette nouvelle architecture et ces différentes liaisons. Les pinces à engrenages utilisent deux roues dentées tournant dans des directions opposées avec un rapport de 1:1. Ce rapport permet de contrôler symétriquement l'ouverture et la fermeture des parties droite et gauche de la pince. Du fait de l'engrenage avec ce rapport spécifique, les angles de la partie gauche de la plateforme et de la partie droite sont toujours les mêmes. Une conception spécifique de la plateforme intègre cette pince sans rompre l'équilibre des contraintes dans l'ensemble de la structure.

Plus précisément, la cinématique du manipulateur (voir figures. 5.2 et 5.3) repose sur deux niveaux : la structure parallèle et la plateforme configurable. Le premier niveau est constitué de quatre bras indépendants actionnés par des actionneurs rotatifs et fixés à la plateforme configurable. La plateforme configurable ferme les chaînes cinématiques avec deux liaisons pivots et un engrenage composé de deux roues dentées. Les axes de rotation des engrenages coïncident avec ceux des liaisons pivots de la plateforme. Chaque bras est une chaîne R-2(S-S), qui peut être remplacée par R-2(U-S) ou R-U-U, où R représente une liaison pivot, S une liaison rotule et U une liaison universelle [Lenarčič 20] (voir notations annexe A



**FIGURE 5.2 – Schéma architectural du robot trieur de déchets.** Le robot possède trois translations et la capacité de préhension. 1 : 1 indique le rapport de réduction entre la partie droite et la partie gauche de la pince.

page 142). La cinématique du manipulateur est illustrée par le schéma architectural de la figure. 5.2.

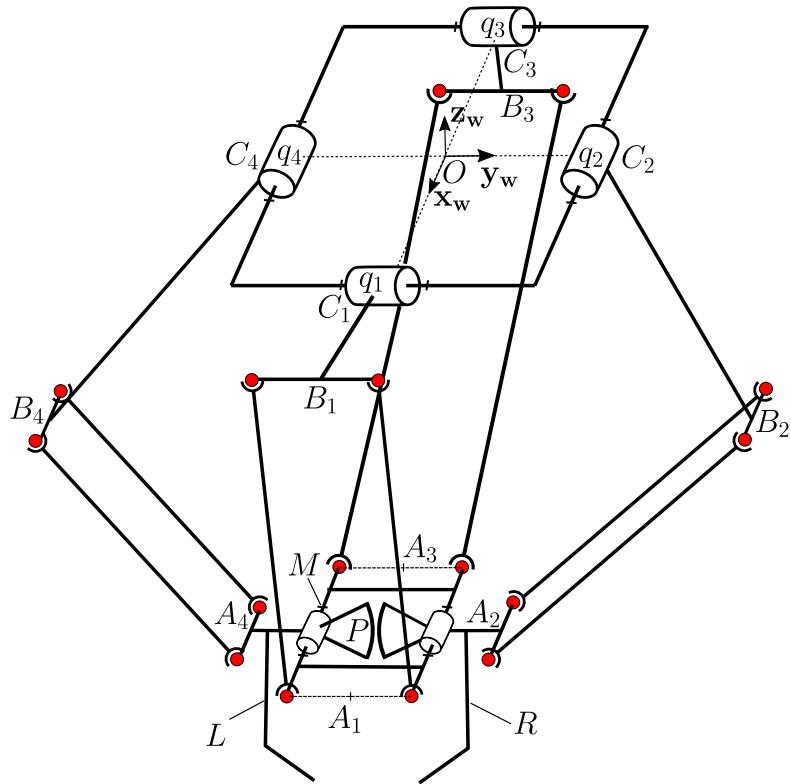
La plateforme configurable se compose de trois parties : une partie centrale  $M$ , une partie gauche  $L$  et une partie droite  $R$  (voir en figure 5.3). La partie centrale  $M$  est reliée à deux chaînes cinématiques et aux parties gauche  $L$  et droite  $R$  par des liaisons pivots. Les parties gauche  $L$  et droite  $R$  sont toutes deux reliées à un avant-bras d'un côté et à la partie centrale  $M$  de l'autre côté par une articulation pivot. Les parties gauche  $L$  et droite  $R$  tiennent les deux doigts du préhenseur et tournent symétriquement grâce à l'engrenage qui les relie.

Au final, il est possible de contrôler 4 ddl depuis la base de la structure via les actionneurs. Le robot est donc capable d'effectuer des translations selon les trois directions usuelles de l'espace en utilisant une combinaison appropriée des contributions de chacun des actionneurs. Le préhenseur est lui aussi contrôlé depuis la base. L'écriture du modèle géométrique inverse permettra de mettre en avant le principe de fonctionnement de la structure robotique notamment en ce qui concerne cette capacité de préhension.

### 5.3.3 Avantage de la conception pour le tri de déchets

En raison de sa conception et de son architecture, la structure robotique comporte plusieurs avantages pour des applications de tri de déchets. Le premier est l'obtention d'une structure parallèle à quatre moteurs ce qui est assez recherché pour ce type d'application, cela permet en effet d'avoir des déplacements rapides et de porter des charges plus lourdes. Concernant le poids que le robot est capable d'embarquer, un des avantages est l'intégration du préhenseur directement dans la structure. En effet, cela permet d'éviter l'ajout d'un préhenseur externe qui aurait pour conséquence d'ajouter de la masse sur le robot.

Un autre avantage qui est intimement lié à la raison précédente concerne la partie câblage et les éléments sensibles à la poussière ou aux liquides. Puisque tous les déplacements sont contrôlés depuis la base du robot, il n'y a ni câble ni éléments de transmission d'information ni flux d'énergie tout au long de la structure. Ces



**FIGURE 5.3 – Schéma cinématique du manipulateur à 4 ddl.** Le manipulateur est composé d'une structure parallèle et d'une plateforme configurable intégrant une pince à engrenages. Les centres de rotation des roues dentées coïncident avec ceux des liaisons pivots de la plateforme.

éléments qui peuvent être sensibles à la poussière, aux projections ou encore aux objets tranchants sont donc déportés et protégés. Cela doit permettre de prolonger la durée de vie des éléments sensibles.

Enfin, il est possible de remplacer facilement le préhenseur en cas de problème ou tout simplement pour monter un préhenseur spécifique qui correspondrait mieux à certains déchets.

## 5.4 MODÉLISATION DE LA STRUCTURE

Cette section présente le modèle géométrique inverse de la structure robotique et son modèle différentiel. La structure robotique proposée assure que la partie centrale reste horizontale pour toute configuration du robot, ce qui permet de modéliser chaque parallélogramme par deux points espacés de longueur constante.

### 5.4.1 Définition des paramètres et fermeture géométrique

Afin de modéliser la structure, différents paramètres et grandeurs ont été introduits. Les vues de côté et de dessus (voir figure. 5.4) donnent une représentation des paramètres suivants :

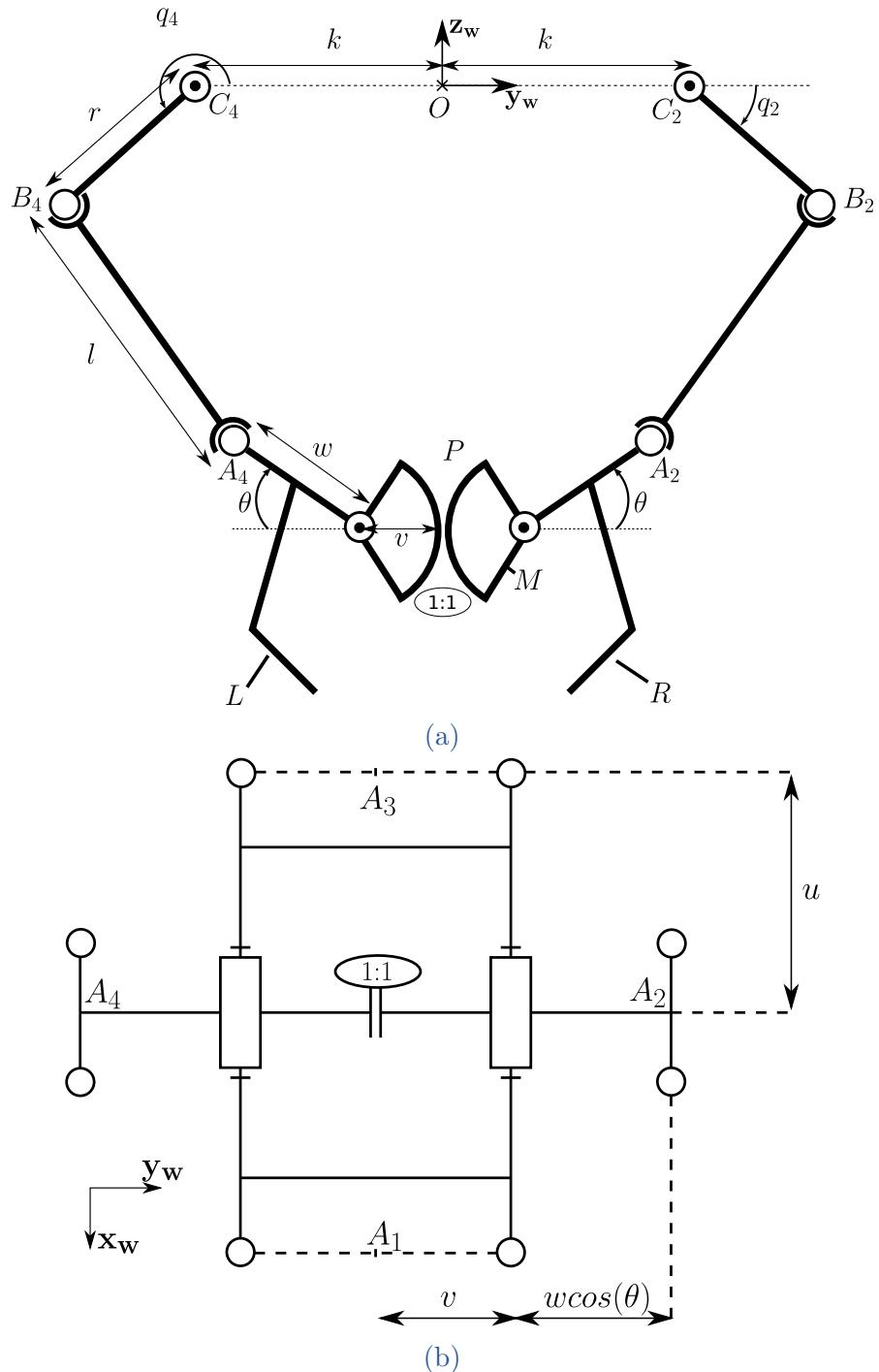
- $q_i$  est la valeur angulaire du  $i^{\text{ème}}$  actionneur rotatif.  $\mathbf{q}$  représente le vecteur des coordonnées articulaires ;
- $k$  est la distance entre le centre de rotation des actionneurs et l'origine  $O$  du repère monde ;
- $r$  représente la longueur des bras du robot, la distance entre les points  $C_i$  et  $B_i$  ;
- $l$  est la longueur des avant-bras du robot, distance entre les points  $B_i$  et  $A_i$  ;
- $\theta$  est l'angle relatif entre les deux parties de la plateforme ;
- $u$  est la demi-longueur de la plateforme, distance entre  $P$  et  $A_1$  et entre  $P$  et  $A_3$  ;
- $v$  est la distance entre le centre de la plateforme et les axes de rotation des liaisons pivots de la plateforme ;
- $w$  représente la distance entre les axes de rotation des liaisons pivots et  $A_2$  (et par symétrie  $A_4$ ) ;
- $\mathbf{x} = (x_p; y_p; z_p; \theta)$  est la pose cartésienne du manipulateur composée des coordonnées du point  $P$  (appartenant à la plateforme) dans le repère monde et de l'angle  $\theta$  de la plateforme configurable ;
- $c_i$  et  $s_i$  représentent respectivement  $\cos(q_i)$  et  $\sin(q_i)$ .

La première partie de la modélisation consiste à définir la position de tous les points d'intérêt dans le repère monde  $\mathcal{W}$  en utilisant les paramètres introduits précédemment :

$${}^w A_1 = \begin{pmatrix} x_p + u \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix}; {}^w A_2 = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p + v + w c_\theta \\ z_p + w s_\theta \end{pmatrix}; {}^w A_3 = \begin{pmatrix} x_p - u \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix}; {}^w A_4 = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p - v - w c_\theta \\ z_p + w s_\theta \end{pmatrix};$$

$${}^w B_1 = \begin{pmatrix} r c_1 + k \\ 0 \\ r s_1 \end{pmatrix}; {}^w B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ r c_2 + k \\ r s_2 \end{pmatrix}; {}^w B_3 = \begin{pmatrix} r c_3 - k \\ 0 \\ r s_3 \end{pmatrix}; {}^w B_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ r c_4 - k \\ r s_4 \end{pmatrix}.$$

Avec ces points correspondant à l'extrémité des bras du robot, représentant chaque parallélogramme, il est possible d'écrire les équations de fermeture géométrique :  $\|\overrightarrow{{}^w A_i} \overrightarrow{{}^w B_i}\|^2 = l^2$  avec  $i \in [1, 4]$ . Pour des raisons de simplicité et de lisibilité, de nouvelles notations ( $a, b, c, d, e, f, g$  et  $h$ ) sont introduites dans les



**FIGURE 5.4 – Paramétrisation de la structure robotique.** Les différents paramètres utilisés lors de la modélisation sont représentés. (a) Vue de côté de la structure. (b) Vue de dessus de la structure.

équations suivantes :

$$\overbrace{(x_p + u - k - r c_1)}^a{}^2 + y_p^2 + \overbrace{(z_p - r s_1)}^b{}^2 = l^2 \quad (5.1)$$

$$\overbrace{(x_p - u + k - r c_3)}^c{}^2 + y_p^2 + \overbrace{(z_p - r s_3)}^d{}^2 = l^2 \quad (5.2)$$

$$x_p^2 + \overbrace{(y_p + v + w c_\theta - k - r c_2)}^e{}^2 + \overbrace{(z_p + w s_\theta - r s_2)}^f{}^2 = l^2 \quad (5.3)$$

$$x_p^2 + \overbrace{(y_p - v - w c_\theta + k - r c_4)}^g{}^2 + \overbrace{(z_p + w s_\theta - r s_4)}^h{}^2 = l^2 \quad (5.4)$$

En raison de la symétrie de la structure robotique, les équations de fermeture (5.1) et (5.2) sont similaires tout comme (5.3) et (5.4). Les équations (5.1) et (5.2), reliant  $q_1$  et  $q_3$  à  $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$ , sont typiques d'un robot de type Delta. Mais, les équations (5.3) et (5.4) introduisent un couplage supplémentaire entre  $q_2$  et  $q_4$  et  $\theta$  qui n'existe pas pour la cinématique inverse d'une architecture Delta conventionnelle. De plus, si la plateforme est fixe et donc non configurable ( $\theta$  constant), alors on se retrouve avec les équations d'un robot type Delta mais avec un actionnement redondant (4 actionneurs pour 3 déplacements possibles).

#### 5.4.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse est développé indépendamment pour chaque bras. Afin de l'obtenir, chaque équation de fermeture (équations 5.1 à 5.4) doit être réécrite sous la forme suivante [Khalil 02] :

$$\forall i \in [1, 4] \quad D_i s_i + E_i c_i = F_i. \quad (5.5)$$

Pour obtenir ces équations, chaque équation de fermeture correspondante doit être développée. Le développement donne des termes qui sont des facteurs soit du sinus, soit du cosinus, soit d'aucun des deux. Ensuite, les facteurs du sinus sont rassemblés dans  $D_i$ , ceux du cosinus dans  $E_i$  et les autres dans  $F_i$ . L'équation (5.5) a plusieurs solutions qui dépendent des valeurs de  $D_i$ ,  $E_i$ , et  $F_i$ . Pour la structure robotique proposée,  $D_i$ ,  $E_i$ , et  $F_i$  ne sont pas nuls et la solution est donnée par :

$$\forall i \in [1, 4] \quad \begin{cases} s_i &= \frac{D_i F_i + \epsilon E_i \sqrt{D_i^2 + E_i^2 - F_i^2}}{D_i^2 + E_i^2} \\ c_i &= \frac{E_i F_i - \epsilon D_i \sqrt{D_i^2 + E_i^2 - F_i^2}}{D_i^2 + E_i^2} \end{cases} \quad (5.6)$$

avec  $\epsilon = \pm 1$  représentant les deux solutions pour chacun des bras pour une position donnée de la plateforme. À partir de cette équation, il est possible d'extraire une condition permettant de savoir si une pose quelconque est accessible pour le manipulateur. On en déduit qu'une pose  $\mathbf{x} = (x_p; y_p; z_p; \theta)$  est accessible si :

$$\forall i \in [1, 4] \quad (D_i^2 + E_i^2 \geq F_i^2) \text{ ET } (|s_i| \leq 1) \text{ ET } (|c_i| \leq 1) \quad (5.7)$$

Cette condition nécessaire et suffisante sera utilisée par la suite pour déterminer si une pose appartient à l'espace de travail accessible du manipulateur.

### 5.4.3 Modèle cinématique

À partir des équations de fermeture, il est aussi possible d'obtenir le modèle différentiel. Pour cela, il est nécessaire de dériver d'un point de vue temporel les équations de fermeture. Le calcul de la dérivée temporelle de ces équations permet d'obtenir deux matrices  $\mathbf{J}_x$  et  $\mathbf{J}_q$  telles que :

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (5.8)$$

où  $\mathbf{J}_x$  et  $\mathbf{J}_q$  sont respectivement les matrices avec les coefficients de la dérivée temporelle dans l'espace cartésien et dans l'espace articulaire :

$$\mathbf{J}_x = \begin{pmatrix} a & y_p & b & 0 \\ x_p & e & f & f w c_\theta - e w s_\theta \\ c & y_p & d & 0 \\ x_p & g & h & h w c_\theta + g w s_\theta \end{pmatrix}; \quad \mathbf{J}_q = \begin{pmatrix} j_{q11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j_{q22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j_{q33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j_{q44} \end{pmatrix}$$

avec  $\begin{cases} j_{q11} = b r c_1 - a r s_1; & j_{q22} = f r c_2 - e r s_2 \\ j_{q33} = d r c_3 - c r s_3; & j_{q44} = h r c_4 - g r s_4 \end{cases} \quad (5.9)$

Le modèle différentiel direct peut être obtenu par la matrice jacobienne  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_x^{-1} \mathbf{J}_q$  lorsque  $\mathbf{J}_x$  est inversible. Si au moins l'une des matrices  $\mathbf{J}_x$  ou  $\mathbf{J}_q$  n'est pas de rang plein, cela signifie que le robot se trouve dans une configuration singulière.

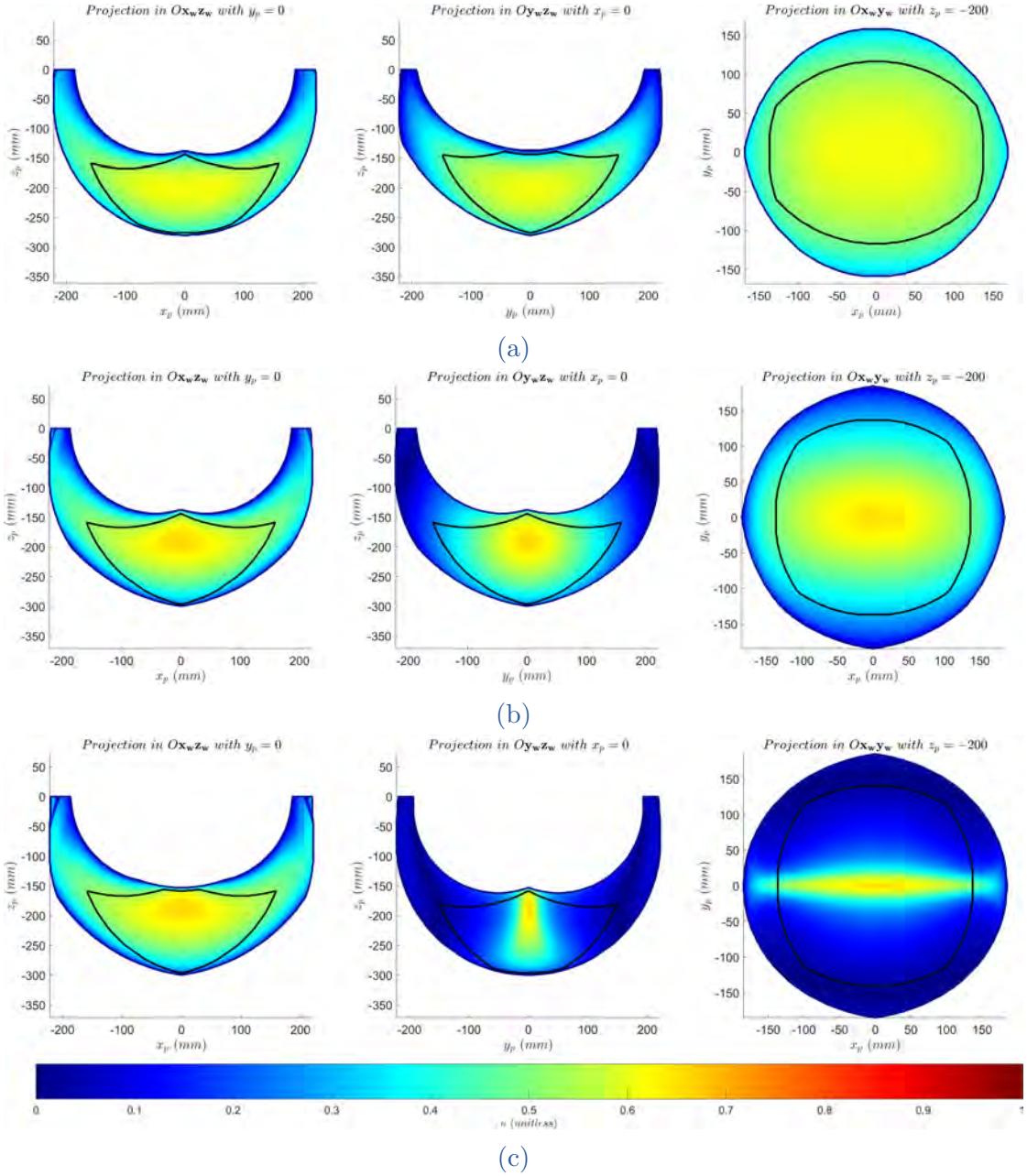
## 5.5 ANALYSE DE L'ESPACE DE TRAVAIL

Comme pour tous les robots, il est essentiel d'analyser l'espace de travail afin de définir l'ensemble des configurations atteignables. Cette analyse permettra de déterminer si le robot est adapté à la tâche pour laquelle on souhaite l'utiliser. Dans le cas où le cahier des charges est fixé sur des propriétés de l'espace de travail (taille, zones accessibles) cette analyse pourra être utilisée.

### 5.5.1 Espace de travail en translation

L'espace de travail en translation du manipulateur a été calculé numériquement pour différents angles  $\theta$  de la plateforme en utilisant une discrétisation de l'espace cartésien. À titre d'exemple, l'espace de travail est calculé comme l'ensemble des poses discrètes  $\mathbf{x} = (x_p; y_p; z_p; \theta)$  respectant la condition (5.7) établie à partir du modèle géométrique inverse. Les limites de l'espace de travail ont été déterminées numériquement, avec les dimensions du manipulateur expérimental données par la suite dans la section 5.6.1.2 page 127, et sont dessinées en bleu dans les vues en coupe de la figure 5.5.

De plus, un deuxième espace de travail appelé « espace de travail réduit » prenant en compte les butées articulaires a également été calculé. Cet espace de



**FIGURE 5.5 – Vues en coupe de l'espace de travail pour différents angles  $\theta$  de la plateforme.** Les valeurs de la manipulabilité sont indiquées avec l'inverse du nombre de conditionnement  $\kappa$  représenté avec une carte de couleur. Les différentes vues permettent de visualiser les limites de l'espace de travail sans contrainte (en bleu) et avec les courses des actionneurs (en noir). (a) Vues en coupe pour  $\theta = -\frac{\pi}{4}$ . (b) Vues en coupe pour  $\theta = 0$ . (c) Vues en coupe pour  $\theta = \frac{\pi}{4}$ .

travail réduit, dont les limites sont dessinées en noir sur la figure 5.5, contient les poses pour lesquelles chacune des valeurs angulaires des actionneurs est comprise entre  $45^\circ$  et  $-85^\circ$ . Les vues en coupe des espaces de travail sont données pour trois valeurs angulaires différentes de la plateforme à savoir  $-\frac{\pi}{4}$  (Fig. 5.5a), 0 (Fig. 5.5b) et  $\frac{\pi}{4}$  (Fig. 5.5c). Nous pouvons constater que les coupes de l'espace de travail sans limitation (contours bleus) sont peu impactées par la valeur de l'angle de la plateforme  $\theta$ . On peut remarquer qu'il y a un léger impact sur l'espace de travail réduit (contours noirs), notamment dans les plans  $Ox_wz_w$  et  $Oy_wz_w$ .

### 5.5.2 Analyse de la manipulabilité

Pour un angle  $\theta$  constant donné, le manipulateur présente les singularités du robot Delta. De plus, il possède des singularités spécifiques dues au mouvement de pliage de sa plateforme. En particulier, si les avant-bras  $A_2B_2$  ou  $A_4B_4$  sont respectivement coplanaires avec les parties gauche et droite de la plateforme alors le manipulateur est dans une configuration singulière.

Pour calculer les configurations singulières, nous avons considéré deux cas complémentaires. Ces deux cas permettent de décomposer l'analyse suivant les deux types de mouvements : les translations de la plateforme et son pliage. Le premier cas considère la capacité d'effectuer des translations lorsque l'angle  $\theta$  de la plateforme reste constant tandis que le second cas considère la capacité de pliage de la plateforme à une position donnée.

#### 5.5.2.1 Manipulabilité en translation

Afin de quantifier la manipulabilité en translation, nous avons utilisé l'inverse de l'indice de conditionnement  $\kappa$ , présenté précédemment dans la section 3.2.4.3 page 65. Pour rappel, plus la valeur de  $\kappa$  est proche de 1, plus les vitesses sont homogènes et meilleur est le contrôle du robot. Une valeur faible indique une mauvaise manipulabilité et un 0 une configuration singulière sans en indiquer la nature. Afin d'avoir un résultat assez exhaustif, nous avons tracé numériquement l'évolution de l'espace de travail et de la valeur de  $\kappa$  pour des valeurs de  $\theta$  allant de  $-\frac{\pi}{2}$  à  $\frac{\pi}{2}$ . Cela nous a permis d'observer quelques tendances sur le comportement de la structure. L'évolution de l'indice de conditionnement  $\kappa$  est illustré sur la figure 5.5. Dans cette figure et les trois sous-figures qui la composent, l'échelle de couleur représentant la valeur de  $\kappa$  est la même ce qui permet de comparer les résultats dans chacune des situations.

L'analyse permet de constater que pour un angle  $\theta$  positif, il existe des zones centrales dans lesquelles  $\kappa$  est proche de zéro. Notamment, certaines configurations singulières apparaissent dans l'espace de travail réduit pour des valeurs de  $\theta$  autour de  $\frac{\pi}{4}$  (zones bleus foncés dans la figure 5.5c). Dans ce cas précis, on peut aussi constater qu'une grande partie de l'espace de travail (réduit ou non) a un indice de manipulabilité faible dans les plans  $Oy_wz_w$  et  $Ox_wy_w$ .

Au contraire, lorsque l'angle est négatif, l'espace de travail réduit possède un indice  $\kappa$  relativement élevé qui indique une bonne manipulabilité du robot en

comparaison avec la situation évoquée précédemment. Par exemple, lorsque  $\theta = -\frac{\pi}{4}$  (voir figure 5.5a),  $\kappa$  est supérieur à 0,5 dans la majorité de la surface et toujours supérieur à 0,3. Il est aussi intéressant de remarquer que l'indice  $\kappa$  n'évolue pas rapidement ce qui permet d'assurer un bon contrôle sur des zones larges en limitant le risque de se retrouver dans des zones où la manipulabilité est faible.

Le dernier cas intéressant présenté sur la figure 5.5b, est celui d'une plateforme plane, c'est-à-dire avec un angle  $\theta$  nul. Il s'avère que travailler autour de cette configuration n'est pas aussi intéressant que travailler autour d'un angle  $\theta = -\frac{\pi}{4}$ . En effet, la figure 5.5b permet de montrer que pour  $\theta = 0$ , l'indice  $\kappa$  évolue assez rapidement et il y a des zones de manipulabilité faible. On peut voir notamment dans le plan  $O\mathbf{y_w}\mathbf{z_w}$  que des zones avec des indices de manipulabilité faibles font leur apparition au sein de l'espace de travail réduit. Pour plus de détails sur l'évolution de l'indice  $\kappa$  en fonction de l'angle de la plateforme, une vidéo<sup>1</sup> a été réalisée.

Enfin, la manipulabilité en translation dans le plan  $O\mathbf{x_w}\mathbf{y_w}$  est peu impactée par la valeur de l'angle de la plateforme. En effet, dans les trois cas développés, les coupes dans ce plan sont très similaires. Cela s'explique par le fait que nous sommes dans le plan orthogonal au mouvement d'ouverture / fermeture de la plateforme. Par conséquent la valeur de  $\theta$  n'a pas d'impact. Cette information se retrouve en étudiant les équations de fermeture (5.1) et (5.2).

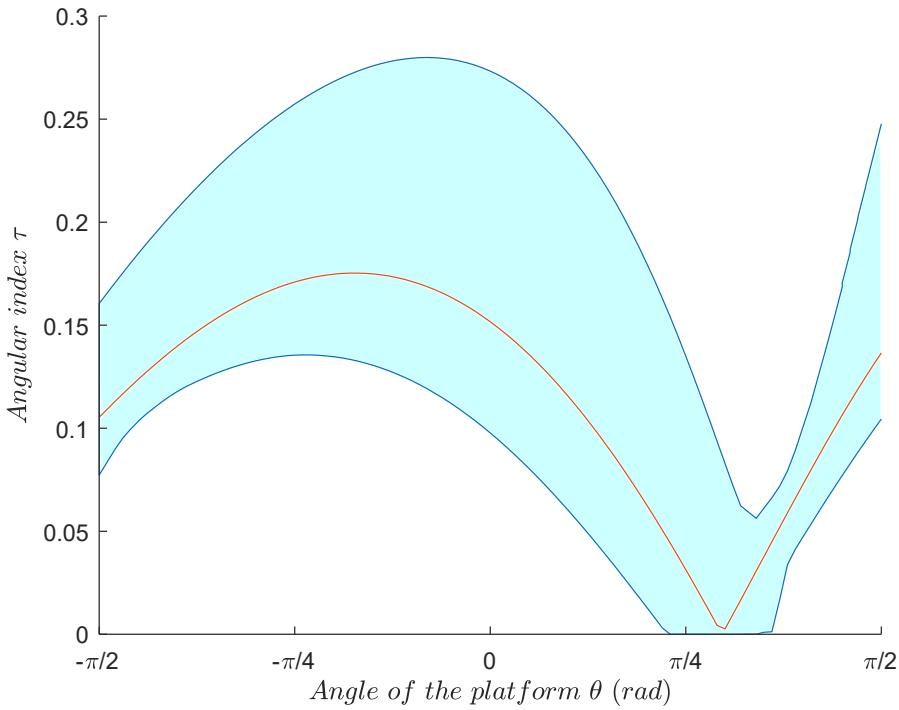
### 5.5.2.2 Manipulabilité en rotation

La deuxième partie de l'analyse concerne la capacité à plier la plateforme, avec un angle  $\theta$  afin d'actionner le préhenseur, à une position donnée de l'espace de travail ( $x_p, y_p, z_p$ ). Comme  $\kappa$ , lorsque l'indice de manipulabilité en rotation  $\tau$  (cf. section 3.2.4.4 page 3.2.4.4) atteint une valeur nulle, le manipulateur est dans une configuration singulière. Dans ce cas précis, le rapport de transmission entre les moteurs et  $\theta$  est infini. Inversement, une grande valeur signifie un rapport de transmission très faible. Autrement dit, les mouvements générés pour la pince sont de faible amplitude malgré des mouvements amples des moteurs en entrée. Dans certains cas, ce type de transmission peut être recherché notamment dans le cadre des interfaces haptiques, certains systèmes pour lesquels les tremblements doivent être éliminés par exemple. De manière générale, pour contrôler un manipulateur il faut éviter d'obtenir des rapports de transmission infinis ( $\tau$  proche de 0).

Dans le cadre expérimental, le robot ne sera utilisé que dans l'espace de travail réduit c'est pourquoi notre étude se limitera à cette partie de l'espace de travail. D'autant plus que si l'étude est menée sur l'ensemble de l'espace de travail, les valeurs de  $\tau$  deviendront importantes (proximité de poses pour lesquelles le rapport de transmission est nul) ce qui rendrait l'analyse des résultats plus compliquée. Dans l'espace de travail réduit, 51 624 positions différentes ( $x_p, y_p, z_p$ ) ont été considérées afin d'évaluer la capacité à actionner la plateforme. Ces positions sont obtenues par une discrétisation de l'espace de travail le long des trois translations

---

1. La vidéo est disponible à l'adresse suivante : <https://gjlaurent.github.io/assets/papers/Leveziel2022parallel.mp4>



**FIGURE 5.6 – Indice de manipulabilité angulaire  $\tau$  de la plateforme en fonction de la valeur de  $\theta$  au sein de l'espace de travail réduit.**

L'enveloppe en cyan est obtenue par une discréétisation de l'espace de travail réduit en 51 624 positions. Pour chacune de ces positions, on étudie l'évolution de  $\tau$  en fonction de l'angle  $\theta$ . À titre d'exemple, la ligne rouge représente cette évolution pour la position  $x_p = 0$ ,  $y_p = 0$  et  $z_p = -200$ .

avec un pas constant. Pour chaque position obtenue, 101 valeurs de  $\theta$  uniformément distribuées dans  $[-\frac{\pi}{2} ; \frac{\pi}{2}]$  ont été prises. On obtient ainsi une série de 51 624 courbes montrant l'évolution de  $\tau$  en fonction de  $\theta$ . À titre d'exemple, la courbe rouge de la figure 5.6 représente l'évolution de la manipulabilité angulaire  $\tau$  pour la position  $x_p = 0$ ,  $y_p = 0$  et  $z_p = -200$ . La figure 5.6 permet de montrer que l'indice  $\tau$  a des valeurs faibles juste après  $\theta = \frac{\pi}{4}$ .

L'enveloppe de la série de 51 624 courbes a également été calculée et est représentée en cyan sur la figure 5.6. Elle montre que pour un angle de la plateforme proche de  $\frac{\pi}{4}$ , il existe au moins une position dans l'espace de travail dans laquelle il n'est pas possible de contrôler le pliage de la plateforme car l'indice angulaire  $\tau$  est très proche, ou même est égal à zéro. On retrouve la tendance que nous avions pu constater avec la courbe rouge, à savoir que la manipulabilité angulaire n'est pas favorable pour des angles proches de  $\frac{\pi}{4}$ . De plus, l'enveloppe nous montre que les angles les plus favorables pour l'actionnement de la plateforme se situent autour de  $-\frac{\pi}{4}$  où l'indice  $\tau$  reste supérieur à 0,1. Cela permet d'actionner  $\theta$  dans les deux directions avec un bon rapport de transmission partout dans l'espace de travail réduit. Au vu de ce constat et en lien avec la manipulabilité en translation, la position de repos a été conçue de manière à avoir un angle de plateforme  $\theta = -\frac{\pi}{4}$ .

## 5.6 VALIDATION EXPÉIMENTALE

Après avoir étudié de manière théorique la structure robotique proposée, nous allons présenter la validation expérimentale. Il convient notamment de vérifier que les déplacements obtenus correspondent bien à ce qui est attendu mais aussi que les trajectoires générées sont stables. La validation expérimentale de ce prototype sera présentée de manière qualitative. La caractérisation quantitative fait partie des perspectives de ces travaux.

### 5.6.1 Réalisation d'un prototype

La réalisation du prototype a été effectuée en deux parties : la conception du préhenseur et celle du reste de la structure. Une fois de plus, l'élément central est l'intégration du préhenseur dans la structure robotique.

#### 5.6.1.1 Conception du préhenseur

Le préhenseur peut avoir des conceptions très différentes en fonction de l'application et du type de déchets à récupérer. L'idée est donc de proposer un premier prototype afin d'obtenir une première preuve de concept. Il y a néanmoins des principes qui resteront les mêmes dans les différentes conceptions possibles, à savoir l'orientation initiale de la plateforme, l'utilisation d'un train d'engrenages entre la partie droite et la partie gauche du préhenseur. Cela permettra par la suite de pouvoir changer le préhenseur sans modifier le reste de la structure robotique rendant alors le robot modulaire.

La conception du préhenseur peut être adaptée en fonction de la catégorie d'objets à prélever. Des exemples de préhenseurs sont visibles en figure 5.7. Pour les matériaux lourds, les pinces à ciseaux ou les pinces de levage sont probablement plus adaptées. Ces pinces inversées permettent de profiter du poids de l'objet saisi pour maintenir la pince fermée. Si nécessaire, des pinces à mâchoires parallèles à translation circulaire peuvent également être montées sur la plateforme.

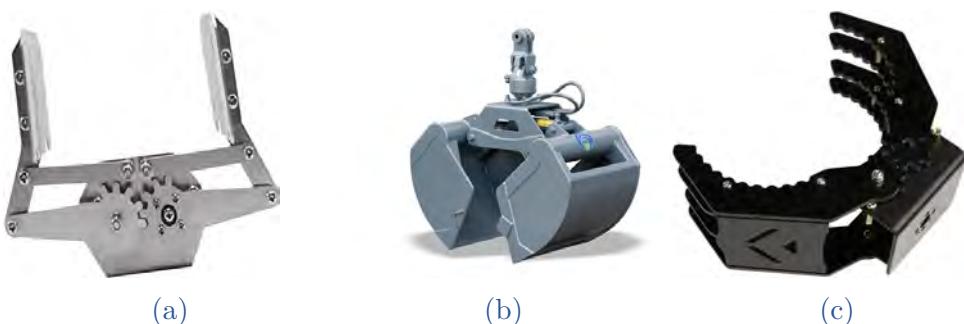


FIGURE 5.7 – Exemples de préhenseurs qui pourraient être intégrés à la structure robotique en fonction du besoin et de l'application. (a) Pince à mors parallèles. (b) Benne preneuse. (c) Pince à griffes.

Pour le préhenseur de ce démonstrateur nous avons décidé d'intégrer deux doigts solidaires de chaque roue dentée, conçus pour être parallèles dans la position de repos. En considérant les roues dentées sur l'entièreté de sa révolution, elles sont composées toutes deux de 40 dents. Le préhenseur a été réalisé en impression 3D et est visible sur la figure 5.8.

### 5.6.1.2 Dimensionnement et fabrication

Pour le dimensionnement de la structure nous nous sommes basés sur les structures robotiques existantes dans l'industrie. Nous avons choisi de réaliser un prototype à l'échelle réduite en respectant les proportions du robot Ix4 de chez Omron. Les dimensions du robot suivront donc la règle suivante :

$$r \approx 2(k - u) \approx \frac{l}{3}$$

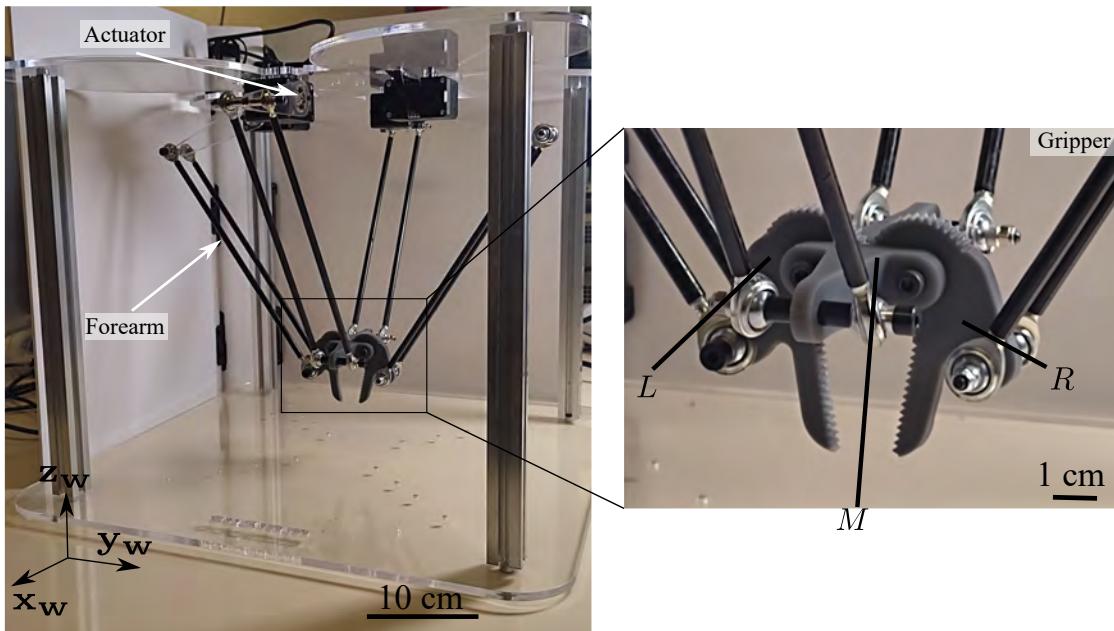
Les différentes dimensions pour le prototype sont  $k = 82,5$  mm,  $r = 80$  mm,  $l = 223$  mm,  $u = 40$  mm,  $v = 13,5$  mm, et  $w = 26,5$  mm. Le prototype réalisé est visible en figure 5.8. Il a été fabriqué avec des tubes en carbone pour les jambes du robot, des articulations rotuleuses avec des billes en acier et des parties en plexiglas coupées au laser. Les actionneurs utilisés sont des servomoteurs Dynamixel XM430-W210-R. Afin d'avoir une surface de manipulation, une plaque de plexiglas a été placée pour être atteinte par la pince du robot pour une valeur de  $z_p = -230$  mm. Nous avons choisi cette valeur car elle nous permet de manipuler des objets sur un espace de travail relativement large (voir figure 5.5).

### 5.6.2 Espace de travail du manipulateur

Connaissant les valeurs limites de  $\theta$  définies par la position de repos ( $\theta = -\frac{\pi}{4}$ ) et la pince fermée ( $\theta = -\frac{\pi}{3}$ ), nous pouvons définir l'espace de travail du manipulateur par calculs (voir figure 5.9). De manière générale, on peut constater que l'espace de travail pince fermée ( $\theta = -\frac{\pi}{3}$ ) est plus restreint mais conserve le même ordre de grandeur. Ces légers changements sont visibles surtout dans les coupes  $Ox_wy_w$  (voir figure 5.9a) et  $Oy_wz_w$  (voir figure 5.9c).

Dans le plan  $Ox_wz_w$  l'espace de travail reste identique comme le montre la figure 5.9b. Cela permet de confirmer que les actionneurs positionnés suivant l'axe  $x_w$  ne sont pas utilisés dans le cadre de l'ouverture et de la fermeture de la pince. Cette information se vérifie aussi sur la figure 5.9a où les valeurs maximales atteignables suivant l'axe  $x_w$  sont les mêmes pour les deux valeurs angulaires tandis que ce n'est pas le cas suivant l'axe  $y_w$ . Dans les différentes coupes de l'espace de travail de la figure 5.9, nous avons introduit une nouvelle contrainte expérimentale correspondant à la table de manipulation. Il est impossible de la traverser c'est pourquoi les valeurs suivant l'axe  $z_w$  sont tronquées à -230 mm.

En conclusion, nous avons pu constater que l'angle de la plateforme a une influence sur les manipulabilités en translation et rotation. Dans la section suivante, nous allons valider expérimentalement le fonctionnement du robot au sein de cet espace de travail.



**FIGURE 5.8 – Prototype expérimental du robot et du préhenseur.** Le prototype du robot est composé de tubes en carbone pour les avant-bras, de parties imprimées en 3D et de parties en plexiglas découpées au LASER. La figure fournit une vue rapprochée sur le préhenseur (à droite) dans sa position de repos. Cela permet de voir la position des différentes liaisons et les roues dentées permettant la transmission de l'angle assurant la même ouverture des parties gauche et droite du préhenseur.

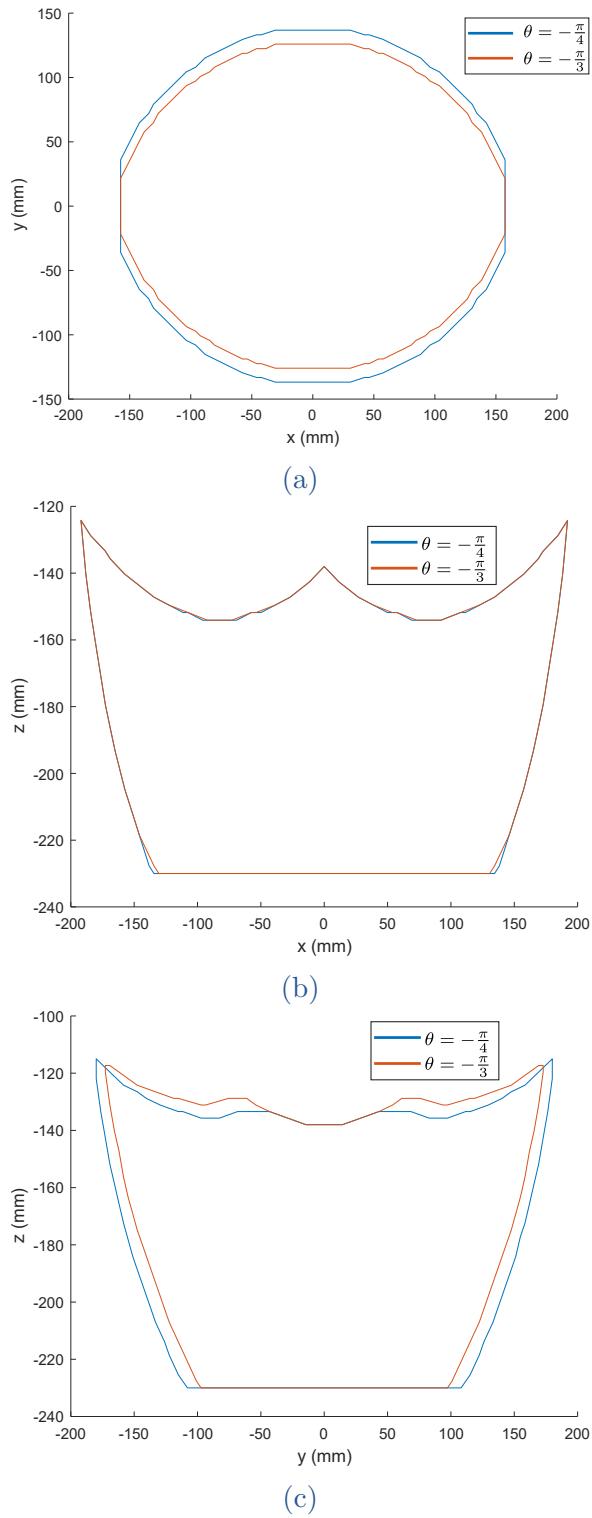
### 5.6.3 Utilisation du manipulateur

Après avoir présenté la conception du manipulateur et sa fabrication, intéressons nous au contrôle de la structure robotique et à l'étude de son comportement. Les différents points à valider sont le bon fonctionnement du robot suivant les 4 ddl. Nous validerons enfin la capacité du robot à réaliser des tâches de prise-jeté avec différents objets.

#### 5.6.3.1 Génération de mouvements

La commande du manipulateur est effectuée à l'aide du modèle géométrique inverse. Pour cela, les commandes à envoyer aux actionneurs sont calculées sur Matlab puis elles sont transmises aux différents actionneurs par un bus de données. La commande du manipulateur peut s'effectuer de deux manières différentes. La première solution est de générer des mouvements interpolés dans l'espace cartésien, cela consiste en une discréétisation de la trajectoire. On donne alors comme consigne un ensemble de points par lesquels l'effecteur du robot devra passer. Cette technique permet de s'assurer de contrôler l'ouverture de la pince à tout moment.

La deuxième technique est la génération de la trajectoire entre deux points dans l'espace articulaire. La partie clé dans cette commande afin de limiter les



**FIGURE 5.9 – Influence de l’angle de la plateforme sur l’espace de travail.** Les figures donnent les coupes de l’espace de travail pour une plateforme dans sa position de repos ( $\theta = \frac{\pi}{4}$  en bleu) et pour une position fermée ( $\theta = -\frac{\pi}{3}$  en rouge). (a) Coupe de l’espace de travail dans le plan  $Ox_wy_w$ . (b) Coupe de l’espace de travail dans le plan  $Ox_wz_w$ . (c) Coupe de l’espace de travail dans le plan  $Oy_wz_w$ .

mouvements non désirés de la pince est de s'assurer que les mouvements des quatre actionneurs sont coordonnés. Pour cela il faut calculer les déplacements à effectuer pour chacun des actionneurs et adapter la vitesse et l'accélération en fonction de cette distance. La vitesse maximale est définie par l'actionneur qui a le plus grand déplacement à faire et la vitesse maximale  $v_{max}$  admissible par les actionneurs (70 rpm). Tous les autres auront une vitesse  $v_i$  pondérée par le ratio entre le déplacement max  $d_{max}$  et leur propre déplacement  $d_i$  :

$$\forall i \in [1, 4] \quad v_i = \frac{d_i}{d_{max}} v_{max}$$

Il en est de même pour les accélérations admissibles pour chacun des actionneurs. Ainsi en connaissant les différents paramètres pour chacun des actionneurs (position initiale, position finale, vitesse et accélération), il est possible de générer une trajectoire pour chacun d'eux avec un trapèze de vitesse. Cela permet d'assurer que le robot atteint le point souhaité avec tous les actionneurs qui arrivent en même temps. Cependant, entre ces deux points on ne contrôle pas forcément ce qu'il se passe notamment par rapport à la pince. Il est donc possible d'observer des mouvements non désirés de cette dernière.

#### 5.6.3.2 Mobilités du manipulateur

Pour vérifier expérimentalement le comportement du robot, nous avons procédé par étapes en testant les deux techniques de génération de trajectoire. L'analyse du comportement a été effectuée de manière qualitative à l'aide d'observations visuelles.

Les premiers déplacements effectués sont ceux selon les trois directions  $\mathbf{x}_w$ ,  $\mathbf{y}_w$  et  $\mathbf{z}_w$ . Pour cette partie, nous avons testé les deux techniques présentées ci-dessous permettent de passer d'un point à l'autre. En utilisant une interpolation le mouvement est effectivement linéaire entre les points et l'ouverture de la pince reste constante comme attendu. Toutefois, le mouvement est saccadé et moins fluide qu'avec la deuxième technique de commande.

Ces déplacements ont aussi été effectués en utilisant la génération de trajectoire point à point dans l'espace articulaire. Cette fois dans l'espace cartésien, la trajectoire n'est pas une ligne droite, ce qui est normal du fait que la commande soit effectuée dans l'espace articulaire. L'effecteur du manipulateur atteint les positions de consigne. Cette première expérience a permis de constater également que l'angle de la plateforme ne change pas pendant ce type de déplacements, ce qui est important pour la manipulation d'objets.

Avec le prototype conçu, l'ouverture de la pince peut être contrôlée de  $\theta = -\frac{\pi}{3}$  à  $\theta = -\frac{\pi}{4}$ , ce qui donne la possibilité d'ouvrir et de fermer la pince tout en maintenant l'indice  $\tau$  supérieur à 0,1. De plus, compte tenu de la vitesse des actionneurs, le changement d'angle de la plateforme de  $\theta = -\frac{\pi}{4}$  à  $\theta = -\frac{\pi}{3}$ , conduisant à la fermeture de la pince depuis sa position de repos, est effectué en 60 ms. De plus, pendant les expériences de contrôle de l'angle de la plateforme à position carté-

sienne constante ( $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$  constantes), aucun mouvement non désiré n'a été détecté suivant les trois directions usuelles de l'espace.

Dans la nouvelle série d'expérience<sup>2</sup>, chaque mouvement a été effectué suivant une seule direction de l'espace ( $x_s, y_w$ ,  $z_w$  et  $\theta$ ), ce qui nous a permis de montrer le découplage des quatre degrés de liberté.

Afin de voir le comportement de la structure pour des mouvements plus complexes, des trajectoires circulaires ont été réalisées. Ces expériences ont été menées en utilisant l'interpolation dans l'espace cartésien. La trajectoire circulaire, avec un rayon de 80 mm, couvrant presque 80% de l'espace de travail réduit, a été effectuée dans le plan ( $O, \mathbf{x}_w, \mathbf{y}_w$ ) avec la pince en position ouverte et fermée. Ces deux réalisations de trajectoires circulaires montrent également que l'angle  $\theta$  reste inchangé pour ce type de trajectoires.

L'étude des mobilités nous a permis de constater que sur les mouvements les plus usuels, il est possible de commander chaque ddl sans provoquer de couplage sur les autres axes. La dernière partie de la vérification expérimentale concerne la mise en œuvre applicative du robot, à savoir sa capacité à effectuer du tri de déchets et plus généralement des cycles de prise-jeté d'objets.

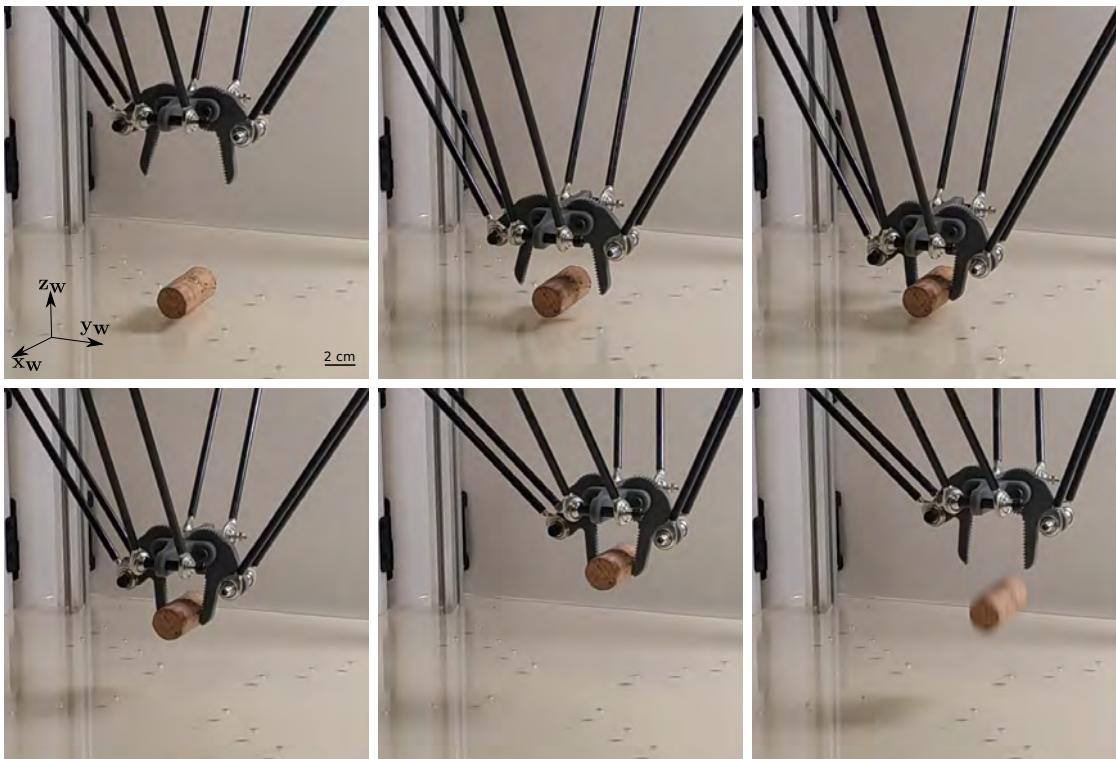
#### 5.6.3.3 Application de prise-jeté

Pour illustrer la capacité du robot à effectuer des opérations de prise-jeté, plusieurs objets ont été testés. Tout d'abord, un bouchon en liège, qui est un cylindre d'un diamètre de 24 mm et d'une hauteur de 45 mm, a été manipulé comme indiqué sur la figure 5.10. Le robot commence par se déplacer le long de l'axe  $\mathbf{z}_w$ . Ensuite, le bouchon est saisi et déplacé vers une autre position à l'aide de mouvements point à point dans l'espace articulaire le long des axes  $\mathbf{z}_w$  et  $\mathbf{y}_w$ . Enfin, l'objet est relâché en ouvrant la pince. Les déplacements obtenus sont de l'ordre de 50 mm le long de  $\mathbf{z}_w$  et 70 mm le long de  $\mathbf{y}_w$ . Au cours de ce cycle, l'angle de la plateforme, et donc la fermeture de la pince, reste constant. Par conséquent, le bouchon a pu être manipulé sans qu'il ne soit relâché pendant les déplacements.

Un autre cycle de manipulation a été effectué en utilisant des objets avec des formes, tailles et poids différents afin de montrer la versatilité du robot. Dans ce cycle, on récupère trois objets à des positions différentes sur le plateau de manipulation et on vient les relâcher au dessus d'une poubelle, ce qui symbolise l'application de tri de déchets. Dans cette application, tous les déplacements sont des mouvements point à point dans l'espace cartésien effectués à pleine vitesse avec des profils de vitesse trapézoïdaux synchronisés. Les trois objets manipulés sont le bouchon en liège, un bouchon de bouteille en plastique et une gomme parallélépipédique. On a donc des formes et des matériaux différents. La manipulation de ces trois objets a été réalisée avec succès. Ces expériences ont montré que l'angle de la plateforme semble rester constant quelle que soit la valeur de  $\theta$ .

---

2. L'ensemble des expériences décrites sont visibles dans la vidéo à l'adresse : <https://gjlaurent.github.io/assets/papers/Leveziel2022parallel.mp4>



**FIGURE 5.10 – Application de prise-jeté d'un bouchon en liège.** La manipulation comprend plusieurs étapes, à savoir la saisie du bouchon, un premier déplacement suivant l'axe  $z_w$  de 50 mm puis un déplacement de 70 mm suivant  $y_w$ . L'objet a ensuite été relâché via l'ouverture de la pince.

La validation expérimentale nous a permis de démontrer la preuve de concept de cette structure. Nous avons démontré la capacité de contrôler l'ouverture de la pince du robot lors des déplacements. Nous avons aussi montré la capacité du robot à manipuler des objets avec des formes et des tailles différentes. Il sera néanmoins nécessaire de faire une étude quantitative des performances de la structure robotique pour valider pleinement le concept.

## 5.7 DISCUSSION

L'architecture robotique développée ouvre ainsi la voie à de nouvelles solutions avec préhension intégrée dans le contexte du tri des déchets. Le prototype présenté est une première preuve de concept notamment sur le principe de fonctionnement. Les résultats actuels illustrent la capacité de la structure à actionner un préhenseur embarqué tout en générant les trois translations. Néanmoins, il y a encore des points importants qui peuvent être améliorés. Il est possible d'optimiser la vitesse de déplacement, le contrôle de la force de préhension mais aussi la génération de trajectoire permettant de garantir le contrôle de la pince dans n'importe quelle situation à la fois d'un point de vue théorique et expérimental.

Concernant la vitesse de déplacement, la solution est l'intégration d'actionneurs industriels permettant d'atteindre des cadences de tri plus élevées. L'idée à terme est d'arriver à effectuer le tri de déchets avec une cadence proche de ce que l'on retrouve sur les chaînes de prise-dépose dans l'industrie (environ 200 cycles par minute). Au delà de l'actionnement, une manière d'améliorer les performances dynamiques du manipulateur consiste en une reconception des différentes pièces afin de limiter au maximum l'inertie des pièces en mouvement.

Un autre aspect qui est directement lié à cette reconception est le mécanisme du préhenseur. En effet, le mécanisme avec un objet rigide saisi entre les doigts de la pince est hyperstatique. Pour éviter une éventuelle perte d'objets pendant le transport, il est nécessaire d'introduire une certaine compliance dans la structure. Ceci peut être fait par des moyens passifs ou actifs. Par exemple, les mâchoires de la pince pourraient être fabriquées avec un matériau souple afin d'absorber une partie des déformations et ainsi éviter l'hyperstaticité du mécanisme. Une autre solution serait d'introduire un ressort axial entre les parties de la plateforme et les doigts. Cela permettrait de mettre en place un contrôle actif. D'autant plus que cette architecture est particulièrement bien adaptée au contrôle de la position et de la force puisqu'elle comprend un nombre minimal de pièces mécaniques entre les actionneurs et les doigts.

Le dernier point d'amélioration identifié est la génération de trajectoire avec ce type de structure. En effet, on souhaite pouvoir commander le robot de la manière la plus efficace possible et surtout pouvoir contrôler l'angle  $\theta$  à tout moment. Actuellement le seul moyen d'assurer le contrôle de l'angle de manière théorique est de passer par une génération dans l'espace cartésien. De plus, si le contrôle de l'ouverture de la pince est effectué par deux actionneurs ( $q_2$  et  $q_4$ ) à une position donnée, l'étude des matrices jacobienes montre qu'un déplacement de n'importe lequel des actionneurs peut avoir une influence sur cet angle. À titre d'exemple, si on bloque tous les actionneurs sauf un et que l'on déplace cet actionneur, alors l'un des mouvements induits sera un changement de l'angle de la plateforme. C'est pourquoi la question de la génération de la trajectoire permettant d'assurer le contrôle de la pince est une question qui reste à traiter.

## 5.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une nouvelle architecture robotique a été proposée et développée. L'originalité principale est que le préhenseur est totalement intégré dans la structure robotique parallèle. Cette structure dispose donc des trois translations usuelles de l'espace et de la capacité de préhension, ce qui lui confère quatre degrés de liberté. Du fait de l'intégration de la préhension, il y a moins d'inertie et de masse embarquée sur la plateforme, par rapport aux robots conventionnels sur lesquels on vient monter un préhenseur, ce qui permettra d'augmenter les performances dynamiques. De plus, la puissance des actionneurs est utilisée pour fermer et ouvrir la pince, il n'y a donc pas besoin de connexions électriques ou pneuma-

tiques supplémentaires pour actionner cette dernière. Comme l'actionnement de la partie de préhension est déporté sur la base du robot, elle est éloignée de l'environnement poussiéreux et humide, ce qui pourrait améliorer la durée de vie du système proposé pour les applications de tri des déchets. Pour la prise d'objets avec différentes orientations, plusieurs manipulateurs avec des orientations différentes peuvent être placés sur la ligne de tri pour couvrir tous les cas rencontrés.

Enfin, un autre point intéressant à mentionner est que cette structure a été inspirée d'une structure microrobotique permettant d'illustrer les liens méthodologiques et scientifiques entre la microrobotique et la macrorobotique. Les deux mondes bien qu'ayant des contraintes très différentes peuvent présenter des similitudes sur certains problèmes rencontrés. La microrobotique peut aussi être une source d'inspiration pour la conception de robot macroscopique.

# Conclusion et perspectives

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La miniaturisation des composants, pour des raisons de compacité, de performances, d'économie de matières premières ou d'efficacité énergétique, est un besoin du plus en plus important au fil des années. L'une des problématiques liées à ces nouvelles pratiques est la capacité de manipulation et d'assemblage de micro-composants. De nombreux systèmes automatisés ont été proposés dans la littérature pour répondre à ce besoin. Cependant, les différentes solutions ne permettent pas d'offrir une cadence de manipulation élevée et une dextérité importante avec des manipulateurs compacts, c'est-à-dire sans recourir à des machines dédiées de grandes dimensions et gourmandes en énergie. L'objectif de cette thèse est de proposer une nouvelle solution permettant d'effectuer des micromanipulations à haute vitesse, un des verrous majeurs dans le domaine de la microrobotique.

Pour atteindre cet objectif, une structure robotique originale miniaturisée a été proposée. Cette architecture robotique intègre la fonction de préhension grâce à l'utilisation d'une structure parallèle à plateforme configurable réduisant ainsi les masses en mouvement et permettant de réduire la taille du manipulateur. Dans l'optique de réduire les dimensions du manipulateur, les liaisons mécaniques conventionnelles ont été remplacées par des articulations souples en polymère (PDMS). Ces deux choix de conception combinés ont permis d'obtenir un micromanipulateur plus proche de la taille des objets que les autres solutions existantes. Le rapport de taille entre les objets manipulés et le micromanipulateur développé est de 1 500 quand dans la plupart des cas en micromanipulation ce rapport est de l'ordre de 10 000. Enfin, le micromanipulateur MiGriBot a la capacité de réaliser des opérations de prise-dépose de micro-objets avec des cadences élevées, il est notamment capable d'effectuer plus de dix cycles par seconde pour des objets ayant une taille comprise entre 40 µm et 400 µm. Le manipulateur permet d'effectuer un cycle en 80 ms tout en déplaçant l'objet sur une course de 600 µm, ce qui est dix fois plus rapide et pour un déplacement 10 fois plus grand que ce qui est reporté précédemment par la littérature scientifique. Enfin, la structure robotique miniaturisée a inspiré le développement d'une architecture robotique macroscopique pour des applications de tri de déchets.

Le développement d'une structure avec des articulations souples a nécessité des travaux sur la manière de modéliser ce type de structure afin de contrôler le robot à des vitesses importantes, mais aussi dans le but d'obtenir des informations structurelles sur le robot. Les deux objectifs évoqués ont des buts très différents qui amènent à des besoins en modélisation presque opposés. En effet, dans le premier cas, il est nécessaire d'avoir un modèle rapide tandis que dans le second cas, ce

qui est le plus important est la proximité entre le modèle et le comportement réel. Afin de déterminer le modèle le plus adapté dans chacun des cas nous avons mené une étude comparative. Nous sommes arrivés à la conclusion que les modèles cinématiques et par éléments finis sont complémentaires tant pour la conception que pour l'analyse d'une structure robotique tant que les articulations souples sont courtes. Le modèle cinématique est quant à lui très adapté à la commande. Dans le cas de robots à articulations souples « longues » ou même dans le cas d'un robot souple, un modèle basé sur des éléments poutres 1D modélisés avec SOFA s'avère être un bon compromis.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques : deux articles de revues (Science Robotics et Robotics and Automation Letter), deux communications internationales (Sofa week Symposium 2021 et IROS 2022) et une communication nationale (JJCR 2021).

## PERSPECTIVES

Les performances de MiGriBot sont dépendantes de nombreux facteurs tels que l'actionnement et la qualité de fabrication de la structure. Parmi ces performances qui peuvent être impactées se trouve la répétabilité de positionnement. En effet, la répétabilité de l'unité d'actionnement est cinq fois meilleure que la répétabilité de la structure suivant l'axe  $\mathbf{z_w}$  et trois fois meilleure que la répétabilité suivant les axes  $\mathbf{x_w}$  et  $\mathbf{y_w}$ . Cela peut s'expliquer par divers phénomènes tels que le couplage entre les axes et le facteur d'amplification dû à la structure parallèle, mais aussi par la viscoélasticité des articulations souples en PDMS. Néanmoins, les articulations souples permettent des déformations beaucoup plus importantes que les articulations compliantes des structures monolithiques, ce qui entraîne une plus grande amplitude de mouvement et un plus grand espace de travail pour des structures de taille comparable. Le concept actuel est issu de choix sur la base d'un compromis entre la taille de l'ensemble du robot, son espace de travail et sa cadence de manipulation. En effet, la taille de l'espace de travail actuel a été conçue pour être relativement comparable à celle des manipulateurs robotiques à grande échelle par rapport à la taille des objets manipulés (des objets de 40 µm sur 1 mm sont comparables à des objets de 40 mm sur 1 m). La structure robotique développée est donc un exemple d'une famille plus large de robots miniatures à plateforme configurable et articulations souples. Cela ouvre la voie à de nouvelles solutions robotiques que ce soit dans le domaine de la recherche ou dans le domaine industriel. Afin de poursuivre les travaux, plusieurs axes de développement ont été identifiés.

### Actionnement

Un des points clé pour l'amélioration des performances de la structure robotique développée est la recherche d'une solution d'actionnement encore plus perfor-

mante. Dans le cadre de cette thèse, nous avons fait le choix d'avoir une très grande cadence d'actionnement. Le principal compromis à faire dans ce cas concerne la course des actionneurs et donc le volume de l'espace de travail. Le développement de nouveaux actionneurs permettant d'améliorer encore ces deux performances est donc un réel enjeu pour permettre de développer les performances dynamiques de telles structures dans des volumes de manipulation encore plus importants. D'autant plus que la fréquence de coupure du système d'actionnement (110 Hz) est actuellement deux fois inférieure à la première fréquence de résonance du mécanisme parallèle (264 Hz). Enfin, l'un des derniers enjeux concernant l'actionnement concerne cette répétabilité. Dans le but de manipuler des objets toujours plus petits, il faut que les actionneurs soient le plus répétables possible afin d'avoir un positionnement répétable. La question de l'actionnement peut aussi se poser lors de la recherche de solutions à une échelle inférieure.

En changeant de point de vue, et en se concentrant sur une structure robotique légèrement plus grande que MiGriBot, se pose aussi la question de l'actionnement. En effet, pour une structure centimétrique (une dizaine de centimètres), l'actionnement piézoélectrique paraît peu adapté. Il sera alors nécessaire de se tourner vers des solutions de type voice coil tout en essayant de garder les performances dynamiques et de répétabilité.

## Réduction d'échelle

Bien que l'architecture robotique proposée a été conçue et testée pour des opérations de prise-dépose de micro-objets, elle pourrait également être intéressante pour la nanomanipulation. En effet, l'architecture cinématique proposée a le potentiel d'être miniaturisée davantage puisque les pinces intégrées ne nécessitent aucun câblage pour être actionnées. Cependant, la fabrication d'un tel manipulateur robotique à l'échelle nanométrique reste un défi. En effet, même si la fabrication du mécanisme parallèle est principalement basée sur des techniques de microfabrication très précises qui permettent de produire des structures plus petites, l'assemblage des mécanismes sur le système d'actionnement et l'assemblage des doigts sur la plateforme sont actuellement réalisés manuellement. L'utilisation de robots de micro-assemblage de haute précision serait probablement nécessaire pour pouvoir assembler des structures plus miniatures et réduire les incertitudes. Enfin, de nouvelles solutions de fabrication se développent basées sur des systèmes tels que l'impression à deux photons (Nanoscribe) et le système de gravure de verre commercialisé par la société FemtoPrint. La principale contrainte réside dans les matériaux qu'il est possible d'utiliser. Au sein de l'institut FEMTO-ST, de premiers travaux ont été menés dans le but d'imprimer des robots avec deux types de matériaux (un rigide et un souple), ce qui pourrait permettre de reproduire le mécanisme de MiGriBot à une échelle inférieure.

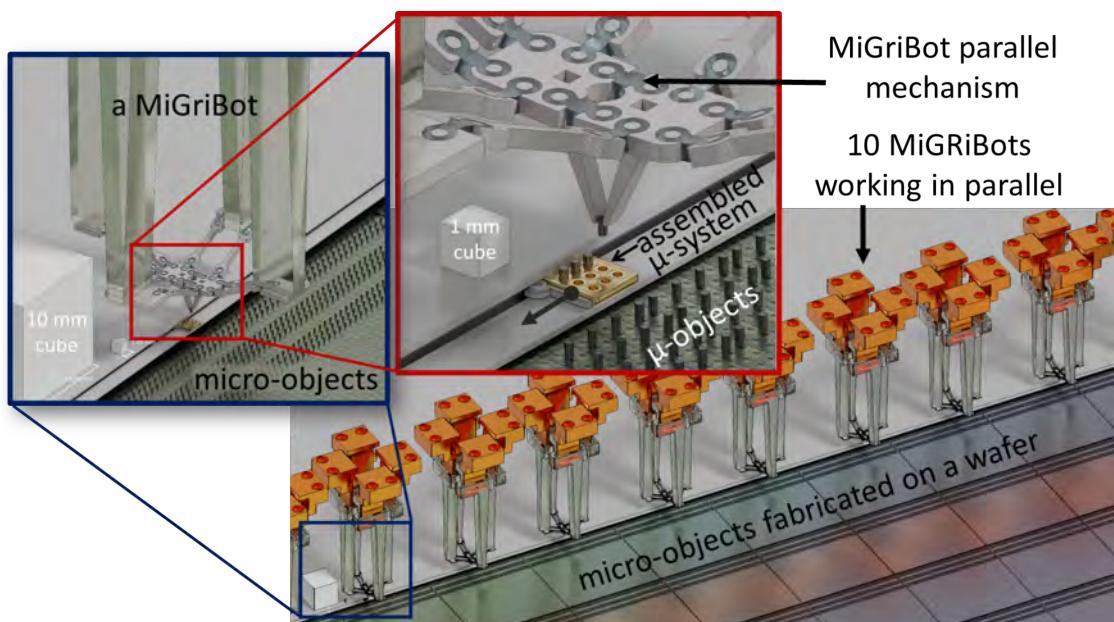
## Changement de paradigme : vers des robots souples

Dans le but de miniaturiser la structure, un changement de paradigme est peut-être aussi nécessaire. Au fil des dernières années, le développement de la robotique souple (ou continûment déformable) a explosé. Cela conduit à des structures robotiques monoblocs qui peuvent être fabriquées directement en trois dimensions dans un élastomère. Par conséquent, il n'y a plus de nécessité d'assemblage pour la structure en elle-même. La principale contrainte repose alors sur l'obtention des degrés de liberté désirés et notamment l'obtention de la fonction de préhension. En effet, il faudra s'assurer que les doigts sont capables de transmettre des efforts afin de saisir un objet. Un autre aspect important concerne la modélisation et la commande de ce type de structures souples notamment si une cadence de manipulation importante est recherchée. Dans ce cas précis, le framework SOFA semble tout à fait adapté et adaptable pour répondre aux besoins de la modélisation de phénomènes du micromonde. Certains développements logiciels sont nécessaires pour fournir un environnement de simulation permettant de modéliser au mieux la manipulation de micro-objets. Comme nous avons pu le voir, les forces prédominantes sont différentes et la versatilité de SOFA doit nous permettre de modéliser ces situations. SOFA pourrait alors être utilisé pour toutes les étapes de la conception à la supervision temps réel en passant par la commande.

## Développement de lignes d'assemblage miniaturisées

Ce nouveau type de robots parallèles miniaturisés avec préhension intégrée ouvre la voie à des opérations de micromanipulation et de micro-assemblage à grande vitesse dans les industries de microfabrication avec des caractéristiques et des performances sans précédent, à savoir l'encombrement, la répétabilité et la cadence de manipulation. En s'inspirant des lignes d'assemblage automatisées et robotisées actuelles, on peut imaginer une multitude, disons dix, de MiGriBots travaillant en parallèle pour manipuler simultanément des centaines de micro/nano-objets par seconde (dix objets par seconde pour chacun des MiGriBots) dans une micro-usine. La figure 5.11 donne une vue d'artiste d'une telle micro-usine avec plusieurs MiGriBots travaillant en parallèle pour manipuler des micro-objets directement après fabrication sur le wafer. Pour voir cette vision futuriste se réaliser, il est nécessaire de travailler à la fiabilisation du process de fabrication, d'étudier la fatigue de la structure robotique et notamment des articulations souples pour des cycles répétées à de nombreuses reprises.

Ces différents éléments font partie d'un projet global de maturation qui devra être mené pour voir émerger cette technologie sur le marché et peut être un jour dans des micro-usines.



**FIGURE 5.11 – Illustration d'une ligne de micro-assemblage utilisant plusieurs MiGriBots.** Au-delà des avantages liés à la consommation d'énergie, la compacité du MiGriBot permet de créer une micro-usine où plusieurs MiGriBot travailleraient en parallèle sur la même tranche de Silicium, augmentant ainsi le débit global d'un ordre de grandeur.



---

---

## Annexe A

### Graphes d'agencement

---

Les graphes d’agencement représentent *la topologie de la structure des robots et mettent en évidence les diverses branches et boucles* [Pierrot 91]. Les conventions relatives à ces graphes et utilisées dans le manuscrit sont représentées dans la table A.1 ci-dessous :

Liaisons	Passive	Actionnée	Mesurée
Pivot	R	R	R
Glissière (Prismatique)	P	P	P
Cardan (Universelle)	U	U	U
Rotule (Sphérique)	S	S	S
<b>Autres éléments du robots</b>			
Base			
Plateforme			
Pièce		—	

TABLE A.1 – Conventions des graphes d’agencement

---

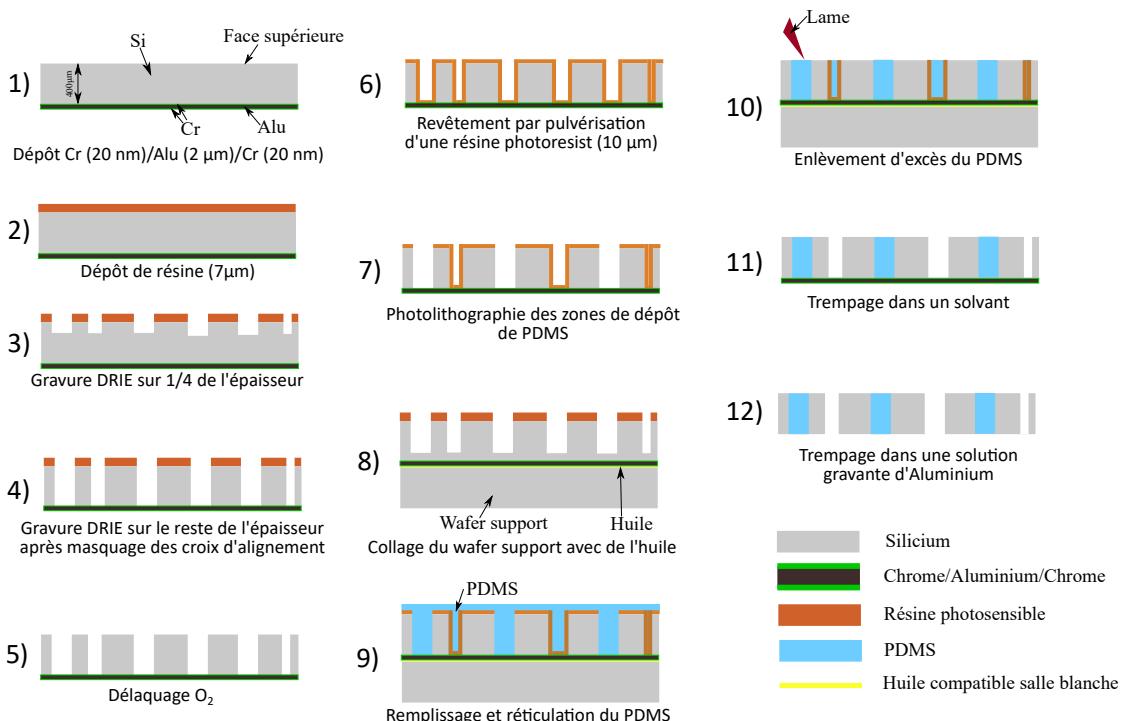
---

## Annexe B

### Process de fabrication salle blanche

---

Afin de fabriquer des structures mécaniques miniaturisées à articulations souples, il est nécessaire d'utiliser un processus de fabrication spécifique en salle blanche. Il permettant de mouler les articulations élastiques en PDMS dans une structure en Silicium et a été développé par Haouas [Haouas 17, Haouas 18a]. Ce process a servi de base pour la fabrication des mécanismes parallèles. Il a néanmoins été adapté pour pallier quelques points complexes de la fabrication et grâce à l'acquisition de nouvelles machines. La figure B.1 donne une représentation schématique du process de micro-fabrication qui a été mis en œuvre.



**FIGURE B.1 – Procédé de fabrication de robots à articulations souples miniaturisés.** Schéma explicatif du procédé de fabrication salle blanche pour la réalisation des structures à articulations élastiques telles que MiGriBot.

La fabrication des mécanismes parallèles à articulations souples s'effectue en deux grandes phases. D'abord la gravure d'un wafer en Silicium pour obtenir les contours des parties rigides de la structure ainsi que les espaces où sera moulé le PDMS. Puis le moulage des articulations souples en PDMS avant de libérer les mécanismes parallèles.

La première étape de la fabrication (voir figure B.1.1) consiste en la déposition d'une couche de 2 µm d'aluminium en face arrière d'un wafer qui va servir de couche d'arrêt pour la gravure. Afin de protéger l'aluminium contre le développeur de la résine, on applique une couche de 20 nm de Chrome avant et après la déposition de l'aluminium toujours en face arrière.

Ensuite, une couche de 7 µm de résine photosensible est déposée puis exposée (voir figure B.1.2). Le masque comporte les formes des contours des structures et des trous pour les articulations souples.

---

L'étape suivante (voir figure B.1.3) consiste en une première gravure profonde par réaction ionique (DRIE) sur environ 1/4 de l'épaisseur est effectuée afin d'amorcer la gravure. Après cette étape, on sort le wafer afin de masquer les croix d'alignements qui seront très utiles par la suite. Si on continue la gravure trop profondément, les croix seront moins faciles à distinguer lors de la deuxième phase d'alignement ce qui pourrait conduire à des erreurs dans l'application du deuxième masque.

Après le masquage des croix d'alignement, on continue la gravure DRIE sur toute l'épaisseur du wafer, c'est-à-dire jusqu'à la couche d'arrêt (voir figure B.1.4).

Afin d'enlever la couche de résine résiduelle, en raison de la membrane, il est préférable d'éviter de passer par le milieu humide qui applique une forte contrainte sur celle-ci. La solution préférée est l'utilisation d'une machine de délaquage avec un plasma  $O_2$  (voir figure B.1.5).

Une nouvelle couche de résine de 10 µm est déposé par pulvérisation pour permettre de déposer la résine dans les sillons du wafer gravés. Cette pulvérisation est suivie d'une phase de lithographie pour ne pas avoir de résine dans les zones où l'on va venir mouler le PDMS (voir figures B.1.6 et 7).

Afin de redonner un peu de rigidité au wafer et permettre de mouler le PDMS, un wafer support est collé en face arrière avec de l'huile. L'idée est de permettre à la membrane en Aluminium de résister aux étapes suivantes de fabrication.

Le PDMS est alors moulé dans les différentes zones gravées du wafer en venant recouvrir le wafer dans son intégralité de PDMS non polymérisé (voir figure B.1.9). La wafer enduit de PDMS est placé dans une pompe à vide afin d'enlever les bulles d'air et de permettre au PDMS de rentrer dans les zones gravées du wafer. Il est ensuite placé dans une étuve afin de polymériser le PDMS.

L'excédent de PDMS sur la surface du wafer est enlevé, en rasant la surface du wafer et en trempant le wafer dans un solvant qui va enlever la résine et donc enlever le PDMS des zones où il n'est pas nécessaire (contours du robot). Ces étapes sont décrites par les figures B.1.10 et 11.

Pour finir, les structures sont libérées en mettant le wafer dans une solution gravante d'aluminium comme l'illustre la figure B.1.12.



# Bibliographie

- [Abbott 07] J. J. Abbott, Z. Nagy, F. Beyeler & B. J. Nelson. *Robotics in the small, part I : microrobotics*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 14, no. 2, pages 92–103, 2007.
- [Agnus 09] J. Agnus, D. Hériban, M. Gauthier & V. Pétrini. *Silicon end-effectors for microgripping tasks*. Precision engineering, vol. 33, no. 4, pages 542–548, 2009.
- [Ahmad 21a] B. Ahmad, H. Chambon, P. Tissier & A. Bolopion. *Laser Actuated Microgripper Using Optimized Chevron-Shaped Actuator*. Micromachines, vol. 12, no. 12, page 1487, 2021.
- [Ahmad 21b] B. Ahmad, M. Gauthier, G. J. Laurent & A. Bolopion. *Mobile microrobots for in vitro biomedical applications : A survey*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 38, no. 1, pages 646–663, 2021.
- [Ahmad 22] B. Ahmad, A. Barbot, G. Ulliac & A. Bolopion. *Remotely Actuated Optothermal Robotic Microjoints Based on Spiral Bimaterial Design*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022.
- [Allard 07] J. Allard, S. Cotin, F. Faure, P.-J. Bensoussan, F. Poyer, C. Duriez, H. Delingette & L. Grisoni. *Sofa—an open source framework for medical simulation*. In MMVR 15-Medicine Meets Virtual Reality, volume 125, pages 13–18. IOP Press, 2007.
- [Angeles 06] J. Angeles, S. Caro, W. Khan & A. Morozov. *Kinetostatic design of an innovative Schönflies-motion generator*. Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 220, no. 7, pages 935–943, 2006.
- [Avci 14] E. Avci, K. Ohara, C.-N. Nguyen, C. Theeravithayangkura, M. Kojima, T. Tanikawa, Y. Mae & T. Arai. *High-speed automated manipulation of microobjects using a two-fingered microhand*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 2, pages 1070–1079, 2014.
- [Awtar 21] S. Awtar, J. Quint & J. Ustick. *Experimental characterization of a large-range parallel kinematic XYZ flexure mechanism*. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 13, no. 1, 2021.
- [Ballas 07] R. G. Ballas. Piezoelectric multilayer beam bending actuators : Static and dynamic behavior and aspects of sensor integration. Springer Science & Business Media, 2007.

- [Barbot 20] A. Barbot, M. Power, F. Seichepine & G.-Z. Yang. *Liquid seal for compact micropiston actuation at the capillary tip*. Science advances, vol. 6, no. 22, page eaba5660, 2020.
- [Belfiore 21] N. P. Belfiore, A. Bagolini, A. Rossi, G. Bocchetta, F. Vurchio, R. Crescenzi, A. Scorza, P. Bellutti & S. A. Sciuto. *Design, fabrication, testing and simulation of a rotary double comb drives actuated microgripper*. Micromachines, vol. 12, no. 10, page 1263, 2021.
- [Bellouard 10] Y. Bellouard. *Microrobotics*. Methods and applications, CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [Bellouard 15] Y. Bellouard. *Femtosecond laser-based production of 3D micro-and nano-devices in transparent substrate : a step toward system-materials*. In Laser-based Micro-and Nanoprocessing IX, volume 9351, pages 80–92. SPIE, 2015.
- [Black 93] B. Black, M. Lopez & A. Morcos. *Basics of voice coil actuators*. Pcmi ventura CA-, vol. 19, pages 44–44, 1993.
- [Bogue 08] R. Bogue. *The development of medical microrobots : a review of progress*. Industrial Robot : An International Journal, 2008.
- [Bonev 07] I. A. Bonev. *Les robots parallèles : de la recherche vers les applications*. Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Obernai, France, 2007.
- [Botello-Aceves 18] S. Botello-Aceves, S. I. Valdez, H. M. Becerra & E. Hernandez. *Evaluating concurrent design approaches for a Delta parallel manipulator*. Robotica, vol. 36, no. 5, page 697–714, 2018.
- [Bricard 97] R. Bricard. *Mémoire sur la théorie de l'octaèdre articulé*. Journal de Mathématiques Pures et Appliquées, vol. 3, pages 113–148, 1897.
- [Briot 07] S. Briot & I. A. Bonev. *Are parallel robots more accurate than serial robots ?* Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, vol. 31, no. 4, pages 445–455, 2007.
- [Bryson 14] C. E. Bryson & D. C. Rucker. *Toward parallel continuum manipulators*. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 778–785. IEEE, 2014.
- [Chaillet 08] N. Chaillet, M. Hafez & P. Lambert. *Actionneurs pour la microrobotique*. In H. Science, éditeur, *La microrobotique. Applications à la micromanipulation.*, Hermès, pages 127–209. Lavoisier, October 2008.
- [Chaillet 13] N. Chaillet & S. Régnier. *Microrobotics for micromanipulation*. John Wiley & Sons, 2013.
- [Chen 19] Y. Chen, H. Zhao, J. Mao, P. Chirarattananon, E. F. Hellbling, N.-s. P. Hyun, D. R. Clarke & R. J. Wood. *Controlled*

- [Chen 20] *flight of a microrobot powered by soft artificial muscles.* Nature, vol. 575, no. 7782, pages 324–329, 2019.
- [Clavel 88] W. Chen, M. Sun, X. Fan & H. Xie. *Magnetic/pH-sensitive double-layer microrobots for drug delivery and sustained release.* Applied Materials Today, vol. 19, page 100583, 2020.
- [Clavel 89] R. Clavel. *A fast robot with parallel geometry.* In Proc. of the Int. Symposium on Industrial Robots, pages 91–100, 1988.
- [Clavel 91] R. Clavel. *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté.* Rapport technique, EPFL, 1991.
- [Clévy 14] C. Clévy, I. Lungu, K. Rabenorosoa & P. Lutz. *Positioning accuracy characterization of assembled microscale components for micro-optical benches.* Assembly Automation, 2014.
- [Coevoet 17] E. Coevoet, T. Morales-Bieze, F. Largilliere, Z. Zhang, M. Thieffry, M. Sanz Lopez, B. Carrez, D. Marchal, O. Goury, J. Dequidt & C. Duriez. *Software toolkit for modeling, simulation and control of soft robots.* Advanced Robotics, vol. 31, pages 1208–1224, November 2017.
- [Coevoet 19] E. Coevoet. *Optimization-based inverse model of soft robots, with contact handling.* Thèse de doctorat, Université de Lille 1, Sciences et Technologies, January 2019.
- [Comas 08] O. Comas, Z. A. Taylor, J. Allard, S. Ourselin, S. Cotin & J. Passenger. *Efficient nonlinear FEM for soft tissue modelling and its GPU implementation within the open source framework SOFA.* In International Symposium on Biomedical Simulation, pages 28–39. Springer, 2008.
- [Correa 16] J. E. Correa, J. Toombs, N. Toombs & P. M. Ferreira. *Laminated micro-machine : Design and fabrication of a flexure-based Delta robot.* Journal of Manufacturing Processes, vol. 24, pages 370–375, 2016.
- [Cotin 08] S. Cotin. *Computer Based Interactive Medical Simulation.* Habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, July 2008.
- [Daguerre 20] H. Daguerre, M. Solsona, J. Cottet, M. Gauthier, P. Renaud & A. Bolopion. *Positional dependence of particles and cells in microfluidic electrical impedance flow cytometry : Origin, challenges and opportunities.* Lab on a Chip, vol. 20, no. 20, pages 3665–3689, 2020.
- [Dario 92] P. Dario, R. Valleggi, M. Carrozza, M. Montesi & M. Cocco. *Microactuators for microrobots : a critical survey.* Journal of Micromechanics and microengineering, vol. 2, no. 3, page 141, 1992.

- [DeMario 18] A. DeMario & J. Zhao. *Development and analysis of a three-dimensional printed miniature walking robot with soft joints and links*. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 10, no. 4, 2018.
- [Díaz-Rodríguez 18] M. Díaz-Rodríguez, H. F. Quintero-Riaza, L. A. Mejía-Calderón, G. Holguin, M. Herrera-López, C. Mesa & G. Daravíña-Peña. *Application of Parallel Manipulator*. In Manipuladores Paralelos : Síntesis, Análisis y Aplicaciones. sep 2018.
- [Duriez 13] C. Duriez. *Real-time haptic simulation of medical procedures involving deformations and device-tissue interactions*. Habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, February 2013.
- [El-Badry 12] H. M. El-Badry. Micromanipulators and micromanipulation, volume 3. Springer Science & Business Media, 2012.
- [Farhadi Macheckposhti 15] D. Farhadi Macheckposhti, N. Tolou & J. Herder. *A review on compliant joints and rigid-body constant velocity universal joints toward the design of compliant homokinetic couplings*. Journal of Mechanical Design, vol. 137, no. 3, page 032301, 2015.
- [Faure 12] F. Faure, C. Duriez, H. Delingette, J. Allard, B. Gilles, S. Marchesseau, H. Talbot, H. Courtecuisse, G. Bousquet, I. Peterlik & S. Cotin. SOFA : A Multi-Model Framework for Interactive Physical Simulation, volume 11 of *Studies in Mechanobiology, Tissue Engineering and Biomaterials*. Springer, June 2012.
- [Feng 11] X. Feng, Z. Duan, Y. Fu, A. Sun & D. Zhang. *The technology and application of voice coil actuator*. In 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, pages 892–895. IEEE, 2011.
- [Gallardo-Alvarado 20] J. Gallardo-Alvarado. *A Gough-Stewart parallel manipulator with configurable platform and multiple end-effectors*. Meccanica, vol. 55, no. 3, pages 597–613, 2020.
- [Gallardo 21] O. F. Gallardo, B. Mauze, R. Dahmouche, C. Duriez & G. J. Laurent. *Turning an Articulated 3-PPSR Manipulator into a Parallel Continuum Robot*. In 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 4955–4960. IEEE, 2021.
- [Gao 20] X. Gao, J. Yang, J. Wu, X. Xin, Z. Li, X. Yuan, X. Shen & S. Dong. *Piezoelectric actuators and motors : materials, designs, and applications*. Advanced Materials Technologies, vol. 5, no. 1, page 1900716, 2020.

- [Gasparetto 19a] A. Gasparetto & L. Scalera. *From the Unimate to the Delta robot : the early decades of Industrial Robotics*. In Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms, pages 284–295. Springer, 2019.
- [Gasparetto 19b] A. Gasparetto & L. Scalera. *A brief history of industrial robotics in the 20th century*. Advances in Historical Studies, vol. 8, no. 1, pages 24–35, 2019.
- [Gauthier 13] M. Gauthier, P. Lambert & S. Régnier. *Microhandling and micromanipulation strategies*. Microrobotics for micromanipulation, pages 179–242, 2013.
- [Gauthier 15] M. Gauthier, C. Clévy, D. Hériban & P. Kallio. *Industrial tools for micromanipulation*. Micro-and Nanomanipulation Tools, pages 369–392, 2015.
- [Germain 12] C. Germain, S. Briot, S. Caro & P. Wenger. *Constraint Singularity-Free Design of the IRSBot-2*. In J. Lenarcic & M. Husty, éditeurs, Latest Advances in Robot Kinematics, pages 341–348, Dordrecht, 2012. Springer Netherlands.
- [Germain 13] C. Germain, S. Caro, S. Briot & P. Wenger. *Optimal Design of the IRSBot-2 Based on an Optimized Test Trajectory*. In ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2013, Portland, Oregon, United States, August 2013.
- [Germain 14] C. Germain, S. Briot, S. Caro, J. Izard & C. Baradat. *Task-oriented design of a high-speed parallel robot for pick-and-place operations*. Task-Based Optimal Design of Robots (ICRA 2014 WS), Hong Kong, China, May, 2014.
- [Gosselin 90] C. Gosselin & J. Angeles. *Singularity analysis of closed-loop kinematic chains*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, no. 3, pages 281–290, 1990.
- [Gosselin 15] C. Gosselin, T. Laliberté & A. Veillette. *Singularity-Free Kinematically Redundant Planar Parallel Mechanisms With Unlimited Rotational Capability*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 2, pages 457–467, 2015.
- [Gough 57] V. Gough. *Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance*. Proc. of Auto Div. Inst. Mech. Eng., vol. 171, pages 392–395, 1957.
- [Gough 62] V. E. Gough. *Universal tyre test machine*. Proc. FISITA 9th Int. Technical Congr., London, 1962, pages 117–137, 1962.
- [Goury 18] O. Goury & C. Duriez. *Fast, generic, and reliable control and simulation of soft robots using model order reduction*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 6, pages 1565–1576, 2018.

- [Goury 21] O. Goury, B. Carrez & C. Duriez. *Real-Time Simulation for Control of Soft Robots With Self-Collisions Using Model Order Reduction for Contact Forces*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pages 3752–3759, 2021.
- [Gundupalli 17] S. P. Gundupalli, S. Hait & A. Thakur. *A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling*. Waste management, vol. 60, pages 56–74, 2017.
- [Gwinnett 28] J. E. Gwinnett. *Amusement device*. Brevet américain, no. 1, page 789, 1928.
- [Hamaza 15] S. Hamaza, P. Lambert, M. Carricato & J. Herder. *The QuadroG robot, a parallel robot with a configurable platform for haptic applications*. In Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, volume 57144, 2015.
- [Haouas 16] W. Haouas, R. Dahmouche, N. Le Fort-Piat & G. J. Laurent. *4-DoF spherical parallel wrist with embedded grasping capability for minimally invasive surgery*. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 2363–2368. IEEE, 2016.
- [Haouas 17] W. Haouas, R. Dahmouche, J. Agnus, N. L. Fort-Piat & G. J. Laurent. *New Integrated Silicon-PDMS Process for Compliant Micro-Mechanisms*. Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 27, no. 12, page 127001, October 2017.
- [Haouas 18a] W. Haouas. *Étude et développement de robots parallèles à plateformes configurables pour la micromanipulation dextre*. Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [Haouas 18b] W. Haouas, R. Dahmouche, N. Le Fort-Piat & G. J. Laurent. *A New Seven Degrees-of-Freedom Parallel Robot With a Foldable Platform*. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 10, no. 4, page 045001, 2018.
- [Haouas 19] W. Haouas, G. J. Laurent, S. Thibaud & R. Dahmouche. *Kinematics, design and experimental validation of a novel parallel robot for two-fingered dexterous manipulation*. In 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 6763–6768. IEEE, 2019.
- [Hériban 08] D. Hériban & M. Gauthier. *Robotic micro-assembly of microparts using a piezogripper*. In 2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, pages 4042–4047. IEEE, 2008.

- [Hollis 06] R. L. Hollis, D. O'Halloran, G. Fedder, N. Sarkar & J. R. Jones. *Vision guided pick and place in a minifactory environment*. In Proc. 5th Int'l. Symp. on Microfactories, Besancon, France, 2006.
- [Howell 13] L. L. Howell. *Compliant mechanisms*. In 21st century kinematics, pages 189–216. Springer, 2013.
- [Hu 18] W. Hu, G. Z. Lum, M. Mastrangeli & M. Sitti. *Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion*. Nature, vol. 554, no. 7690, pages 81–85, 2018.
- [Isaksson 16] M. Isaksson, C. Gosselin & K. Marlow. *An introduction to utilising the redundancy of a kinematically redundant parallel manipulator to operate a gripper*. Mechanism and Machine Theory, vol. 101, pages 50–59, 2016.
- [Jain 15] R. K. Jain, S. Majumder, B. Ghosh & S. Saha. *Design and manufacturing of mobile micro manipulation system with a compliant piezoelectric actuator based micro gripper*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 35, pages 76–91, 2015.
- [Jia 19] H. Jia, E. Mailand, J. Zhou, Z. Huang, G. Dietler, J. M. Kollinski, X. Wang & M. S. Sakar. *Biomanipulation : Universal Soft Robotic Microgripper (Small 4/2019)*. Small, vol. 15, no. 4, page 1970022, 2019.
- [Jin 21] L. Jin, X. Duan, C. Li, Q. Shi, H. Wen, J. Wang & H. Li. *Design of a novel parallel mechanism for haptic device*. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 13, no. 4, 2021.
- [Katzschmann 19] R. K. Katzschmann, M. Thieffry, O. Goury, A. Kruszewski, T.-M. Guerra, C. Duriez & D. Rus. *Dynamically Closed-Loop Controlled Soft Robotic Arm using a Reduced Order Finite Element Model with State Observer*. In 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), pages 717–724, 2019.
- [Kaynak 20] M. Kaynak, P. Dirix & M. S. Sakar. *Addressable acoustic actuation of 3D printed soft robotic microsystems*. Advanced Science, vol. 7, no. 20, page 2001120, 2020.
- [Khalil 02] W. Khalil & E. Dombre. Modeling identification and control of robots. CRC Press, 2002.
- [Kim 12] J.-J. Kim, Y.-M. Choi, D. Ahn, B. Hwang, D.-G. Gweon & J. Jeong. *A millimeter-range flexure-based nano-positioning stage using a self-guided displacement amplification mechanism*. Mechanism and Machine Theory, vol. 50, pages 109–120, 2012.
- [Kim 20] E. Kim, M. Kojima, Y. Mae & T. Arai. *High-speed manipulation of microobjects using an automated two-fingered mi-*

- [Koehler 19] M. Koehler, A. M. Okamura & C. Duriez. *Stiffness Control of Deformable Robots Using Finite Element Modeling*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pages 469–476, April 2019.
- [Koepele 20] C. A. Koepele, M. Guix, C. Bi, G. Adam & D. J. Cappelleri. *3D-printed microrobots with integrated structural color for identification and tracking*. Advanced Intelligent Systems, vol. 2, no. 5, page 1900147, 2020.
- [Ku 20] Y.-D. Ku, J.-H. Yang, H.-Y. Fang, W. Xiao & J.-T. Zhuang. *Optimization of grasping efficiency of a robot used for sorting construction and demolition waste*. International Journal of Automation and Computing, vol. 17, no. 5, pages 691–700, 2020.
- [Lambert 15] P. Lambert & J. Herder. *A novel parallel haptic device with 7 degrees of freedom*. In Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC), pages 183–188, 2015.
- [Lambert 19] P. Lambert & J. L. Herder. *A 7-DOF redundantly actuated parallel haptic device combining 6-DOF manipulation and 1-DOF grasping*. Mechanism and Machine Theory, vol. 134, pages 349–364, 2019.
- [Lambert 20] P. Lambert, L. Da Cruz & C. Bergeles. *Design, modeling, and implementation of a 7-dof cable-driven haptic device with a configurable cable platform*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 4, pages 5764–5771, 2020.
- [Lefevre 22] A. Lefevre, V. Gauthier, M. Gauthier & A. Bolopion. *Closed-Loop Control of Particles Based on Dielectrophoretic Actuation*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022.
- [Lenarčič 20] J. Lenarčič & B. Siciliano. Advances in robot kinematics 2020, volume 15. Springer Nature, 2020.
- [Li 09] Q. Li & J. M. Herve. *Parallel mechanisms with bifurcation of Schoenflies motion*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 1, pages 158–164, 2009.
- [Li 14] Y. Li, Y. Ma, S. Liu, Z. Luo, J. Mei, T. Huang & D. Chetwynd. *Integrated Design of a 4-DOF High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot*. CIRP Annals, vol. 63, no. 1, pages 185–188, 2014.
- [Li 18] J. Li, X. Li, T. Luo, R. Wang, C. Liu, S. Chen, D. Li, J. Yue, S.-h. Cheng & D. Sun. *Development of a magnetic microrobot for carrying and delivering targeted cells*. Science Robotics, vol. 3, no. 19, page eaat8829, 2018.

- [Li 19] R. Li & H. Qiao. *A Survey of Methods and Strategies for High-Precision Robotic Grasping and Assembly Tasks—Some New Trends.* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 24, no. 6, pages 2718–2732, 2019.
- [Lin 21] L. Lin, F. Zhang, L. Yang & Y. Fu. *Design and modeling of a hybrid soft-rigid hand exoskeleton for poststroke rehabilitation.* International Journal of Mechanical Sciences, vol. 212, page 106831, 2021.
- [Linß 19] S. Linß, S. Henning & L. Zentner. *Modeling and design of flexure hinge-based compliant mechanisms.* In Kinematics-Analysis and Applications. IntechOpen, 2019.
- [Llewellyn-Evans 20] H. Llewellyn-Evans, C. Griffiths & A. Fahmy. *Microgripper design and evaluation for automated  $\mu$ -wire assembly : A survey.* Microsystem Technologies, vol. 26, no. 6, pages 1745–1768, 2020.
- [Lobontiu 02] N. Lobontiu. Compliant mechanisms : design of flexure hinges. CRC press, 2002.
- [Lofroth 19] M. Lofroth & E. Avci. *Development of a novel modular compliant gripper for manipulation of micro objects.* Micromachines, vol. 10, no. 5, page 313, 2019.
- [Lukka 14] T. J. Lukka, T. Tossavainen, J. V. Kujala & T. Raiko. *Zen-robotics recycler—robotic sorting using machine learning.* In Proceedings of the International Conference on Sensor-Based Sorting (SBS), pages 1–8, 2014.
- [Lyu 21] Z. Lyu & Q. Xu. *Recent design and development of piezoelectric-actuated compliant microgrippers : A review.* Sensors and Actuators A : Physical, vol. 331, page 113002, 2021.
- [Majidi 14] C. Majidi. *Soft robotics : a perspective—current trends and prospects for the future.* Soft robotics, vol. 1, no. 1, pages 5–11, 2014.
- [Mattos 21] L. S. Mattos, A. Acemoglu, A. Geraldes, A. Laborai, A. Schoob, B. Tamadazte, B. Davies, B. Wacogne, C. Pieralli, C. Barbalata et al.  *$\mu$ RALP and beyond : Micro-technologies and systems for robot-assisted endoscopic laser microsurgery.* Frontiers in Robotics and AI, page 240, 2021.
- [Mauze 20] B. Mauze, R. Dahmouche, G. J. Laurent, A. N. Andre, P. Rougeot, P. Sandoz & C. Clevy. *Nanometer Precision with a Planar Parallel Continuum Robot.* IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 3, pages 3806–3813, 2020.
- [Mauze 21] B. Mauze, G. J. Laurent, R. Dahmouche & C. Clevy. *Micro-meter positioning accuracy with a planar parallel continuum robot.* Frontiers in Robotics and AI, vol. 8, page 196, 2021.

- [McClintock 18] H. McClintock, F. Z. Temel, N. Doshi, J.-s. Koh & R. J. Wood. *The milliDelta : A high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale Delta robot.* Science Robotics, vol. 3, no. 14, 2018.
- [Meng 18] Q. Meng, F. Xie & X.-J. Liu. *Conceptual Design and Kinematic Analysis of a Novel Parallel Robot for High-Speed Pick-and-Place Operations.* Frontiers of Mechanical Engineering, vol. 13, no. 2, pages 211–224, June 2018.
- [Merlet 01a] J.-P. Merlet. *Micro parallel robot MIPS for medical applications.* In ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 01TH8597), volume 2, pages 611–619. IEEE, 2001.
- [Merlet 01b] J.-P. Merlet & D. Daney. *A formal-numerical approach to determine the presence of singularity within the workspace of a parallel robot.* In 2nd Workshop on Computational Kinematics, pages 167–176, 2001.
- [Merlet 06a] J.-P. Merlet. *Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots.* ASME Journal of Mechanical Design, vol. 128, pages 199–206, 01 2006.
- [Merlet 06b] J.-P. Merlet. Parallel robots, volume 128. Springer Science & Business Media, 2006.
- [Min 20] J. Min, Y. Yang, Z. Wu & W. Gao. *Robotics in the gut.* Advanced Therapeutics, vol. 3, no. 4, page 1900125, 2020.
- [Mintchev 19] S. Mintchev, M. Salerno, A. Cherpillod, S. Scaduto & J. Paik. *A portable three-degrees-of-freedom force feedback origami robot for human–robot interactions.* Nature Machine Intelligence, vol. 1, no. 12, pages 584–593, 2019.
- [Miskin 20] M. Z. Miskin, A. J. Cortese, K. Dorsey, E. P. Esposito, M. F. Reynolds, Q. Liu, M. Cao, D. A. Muller, P. L. McEuen & I. Cohen. *Electronically integrated, mass-manufactured, microscopic robots.* Nature, vol. 584, no. 7822, pages 557–561, 2020.
- [Mo 17] J. Mo, Z.-F. Shao, L. Guan, F. Xie & X. Tang. *Dynamic Performance Analysis of the X4 High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 46, pages 48–57, 2017.
- [Mohamed 05] M. G. Mohamed & C. M. Gosselin. *Design and analysis of kinematically redundant parallel manipulators with configurable platforms.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, no. 3, pages 277–287, 2005.
- [Mohand-Ousaid 21] A. Mohand-Ousaid, I. Bouhadda, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab & P. Lutz. *Compact Digital Microrobot Based on*

- Multistable Modules.* IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pages 1926–1933, 2021.
- [Mohanty 20] S. Mohanty, I. S. Khalil & S. Misra. *Contactless acoustic micro/nano manipulation : a paradigm for next generation applications in life sciences.* Proceedings of the Royal Society A, vol. 476, no. 2243, page 20200621, 2020.
- [Nabat 05] V. Nabat, M. de la O Rodriguez, O. Company, S. Krut & F. Pierrot. *Par4 : very high speed parallel robot for pick-and-place.* In Proceedings of the IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS), pages 553–558, 2005.
- [Nan 19] Z. Nan, Q. Xu, Y. Zhang & W. Ge. *Force-sensing robotic microinjection system for automated multi-cell injection with consistent quality.* IEEE Access, vol. 7, pages 55543–55553, 2019.
- [Nguyen 20] K. T. Nguyen, M. C. Hoang, E. Choi, B. Kang, J.-O. Park & C.-S. Kim. *Medical microrobot—A drug delivery capsule endoscope with active locomotion and drug release mechanism : Proof of concept.* International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 18, no. 1, pages 65–75, 2020.
- [Pandilov 14] Z. Pandilov & V. Dukovski. *Comparison of the characteristics between serial and parallel robots.* Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, vol. 7, no. 1, 2014.
- [Patel 12] Y. Patel, P. Georgeet al. *Parallel manipulators applications—a survey.* Modern Mechanical Engineering, vol. 2, no. 03, page 57, 2012.
- [Patel 15] S. Patel & T. Sobh. *Manipulator performance measures-a comprehensive literature survey.* Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 77, no. 3, pages 547–570, 2015.
- [Pernette 97] E. Pernette, S. Henein, I. Magnani & R. Clavel. *Design of parallel robots in microrobotics.* Robotica, vol. 15, no. 4, pages 417–420, 1997.
- [Peyron 19] Q. Peyron. *Concept de robot à tube concentrique magnétique : introduction et analyse : application aux interventions minimalement invasives.* thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- [PI 22] PI. *Displacement Modes of Piezoelectric Actuators,* 2022. <https://www.pifrance.fr/fr/expertise/technologie/technologie-piezo/proprietes-des-actionneurs-piezo/displacement-modes/>, Consulté le 10 juin 2022.

- [Pierrot 90] F. Pierrot, C. Reynaud & A. Fournier. *DELTA : a simple and efficient parallel robot*. Robotica, vol. 8, no. 2, pages 105–109, 1990.
- [Pierrot 91] F. Pierrot. *Robots pleinement parallèles légers : conception, modélisation et commande*. PhD thesis, Montpellier 2, 1991.
- [Pierrot 99] F. Pierrot & O. Company. *H4 : a new family of 4-dof parallel robots*. In 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pages 508–513. IEEE, 1999.
- [Pierrot 01] F. Pierrot, F. Marquet, O. Company & T. Gil. *H4 parallel robot : modeling, design and preliminary experiments*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 4, pages 3256–3261, 2001.
- [Pierrot 08] F. Pierrot, V. Nabat, S. Krut *et al.* *From Par4 to adept quattro*. In Robotic Systems for Handling and Assembly-3rd International Colloquium of the Collaborative Research Center SFB 562, pages 207–220. Shaker Verlag, 2008.
- [Piñan Basualdo 21] F. N. Piñan Basualdo, A. Bolopion, M. Gauthier & P. Lambert. *A microrobotic platform actuated by thermocapillary flows for manipulation at the air-water interface*. Science Robotics, vol. 6, no. 52, page eabd3557, 2021.
- [Pollard 41] W. Pollard. *Position controlling apparatus*. Brevet américain, no. 2, page 286, 1941.
- [Prades 15] J. Prades, F. Jourdan, O. Company, S. Krut & F. Pierrot. *Dynamics Effects on Natural Frequencies in Modal Analysis of PKMs*. In 2015 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), pages 300–305, August 2015.
- [Pransky 20] J. Pransky. *The Pransky interview : Dr. Matanya Horowitz, founder and CEO of AMP robotics*. Industrial Robot, vol. 47, no. 3, pages 319–323, 2020.
- [Pyzyk 19] K. Pyzyk. *Robots move in*. Waste dive, December 11 2019.
- [Raptopoulos 20] F. Raptopoulos, M. Koskinopoulou & M. Maniadakis. *Robotic pick-and-toss facilitates urban waste sorting*. In Proceedinds of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pages 1149–1154, 2020.
- [Rauch 18] J.-Y. Rauch, O. Lehmann, P. Rougeot, J. Abadie, J. Agnus & M. A. Suarez. *Smallest microhouse in the world, assembled on the facet of an optical fiber by origami and welded in the μRobotex nanofactory*. Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films, vol. 36, no. 4, page 041601, 2018.

- [Rey 99] L. Rey & R. Clavel. *The delta parallel robot*. In Parallel Kinematic Machines, pages 401–417. Springer, 1999.
- [Sartori Natal 15] G. Sartori Natal, A. Chemori & F. Pierrot. *Dual-Space Control of Extremely Fast Parallel Manipulators : Payload Changes and the 100G Experiment*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 23, no. 4, pages 1520–1535, July 2015.
- [Savia 09] M. Savia & H. N. Koivo. *Contact micromanipulation—Survey of strategies*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 14, no. 4, pages 504–514, 2009.
- [Schegg 22] P. Schegg & C. Duriez. *Review on generic methods for mechanical modeling, simulation and control of soft robots*. Plos one, vol. 17, no. 1, page e0251059, 2022.
- [Schreiber 19] L.-T. Schreiber & C. Gosselin. *Schönflies motion PARAllel robot (SPARA) : a kinematically redundant parallel robot with unlimited rotation capabilities*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 24, no. 5, pages 2273–2281, 2019.
- [Shao 21] G. Shao, H. O. T. Ware, J. Huang, R. Hai, L. Li & C. Sun. *3D printed magnetically-actuating micro-gripper operates in air and water*. Additive Manufacturing, vol. 38, page 101834, 2021.
- [Shen 19] Y. Shen, Y. Yalikun & Y. Tanaka. *Recent advances in microfluidic cell sorting systems*. Sensors and Actuators B : Chemical, vol. 282, pages 268–281, 2019.
- [Sitti 07] M. Sitti. *Microscale and nanoscale robotics systems [grand challenges of robotics]*. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 14, no. 1, pages 53–60, 2007.
- [Soto 20] F. Soto, J. Wang, R. Ahmed & U. Demirci. *Medical micro/nanorobots in precision medicine*. Advanced Science, vol. 7, no. 21, page 2002203, 2020.
- [Stewart 65] D. Stewart. *A platform with six degrees of freedom*. Proceedings of the institution of mechanical engineers, vol. 180, no. 1, pages 371–386, 1965.
- [Suzuki 20] H. Suzuki & R. J. Wood. *Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery*. Nature Machine Intelligence, vol. 2, no. 8, pages 437–446, 2020.
- [Taylor 19] B. Taylor. *How robots are revolutionizing recycling*. Recycling today, January 30 2019.
- [Thieffry 19] M. Thieffry. *Model-Based Dynamic Control of Soft Robots*. Thèse de doctorat, Université Polytechnique des Hauts-de-France, October 2019.

- [Till 19] J. Till, V. Aloi & C. Rucker. *Real-time dynamics of soft and continuum robots based on Cosserat rod models.* The International Journal of Robotics Research, vol. 38, no. 6, pages 723–746, 2019.
- [Tisnés 19] S. D. Tisnés, Z. Shi, L. Petit, C. Prelle & F. Lamarque. *Characterization of a micro-fabricated digital actuator array as a micro-factory conveyor device.* In 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pages 382–387. IEEE, 2019.
- [Uchino 08] K. Uchino. *Piezoelectric actuators 2006.* Journal of Electroceramics, vol. 20, no. 3, pages 301–311, 2008.
- [Vanneste 20] F. Vanneste, O. Goury, J. Martinez, S. Lefebvre, H. Delingette & C. Duriez. *Anisotropic soft robots based on 3D printed meso-structured materials : design, modeling by homogenization and simulation.* IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pages 2380–2386, 2020.
- [Vogtmann 13] D. E. Vogtmann, S. K. Gupta & S. Bergbreiter. *Characterization and Modeling of Elastomeric Joints in Miniature Compliant Mechanisms.* Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 5, no. 4, October 2013.
- [Vogtmann 17] D. E. Vogtmann, R. S. Pierre & S. Bergbreiter. *A 25 MG magnetically actuated microrobot walking at > 5 body lengths/sec.* 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pages 179–182, 2017.
- [Wautelet 01] M. Wautelet. *Scaling laws in the macro-, micro-and nano-worlds.* European Journal of Physics, vol. 22, no. 6, page 601, 2001.
- [Wen 19] K. Wen, D. Harton, T. Laliberté & C. Gosselin. *Kinematically redundant (6+ 3)-dof hybrid parallel robot with large orientational workspace and remotely operated gripper.* In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 1672–1678, 2019.
- [Wilts 21] H. Wilts, B. R. Garcia, R. G. Garlito, L. S. Gómez & E. G. Prieto. *Artificial intelligence in the sorting of municipal waste as an enabler of the circular economy.* Resources, vol. 10, no. 4, page 28, 2021.
- [Wu 16] G. Wu, S. Bai & P. Hjørnet. *Architecture optimization of a parallel Schönhflies-motion robot for pick-and-place applications in a predefined workspace.* Mechanism and Machine Theory, vol. 106, pages 148–165, 2016.
- [Wu 18] Z. Wu & Q. Xu. *Survey on recent designs of compliant micro-/nano-positioning stages.* vol. 7, no. 1, page 5, 2018.

- [Wu 21] G. Wu & H. Shen. *Parallel PnP Robots*. Research on Intelligent Manufacturing, vol. 7, 2021.
- [Xie 09] H. Xie & S. Régnier. *Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip gripper with multi-feedback*. Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 19, no. 7, page 075009, 2009.
- [Xie 19] H. Xie, M. Sun, X. Fan, Z. Lin, W. Chen, L. Wang, L. Dong & Q. He. *Reconfigurable magnetic microrobot swarm : Multi-mode transformation, locomotion, and manipulation*. Science robotics, vol. 4, no. 28, page eaav8006, 2019.
- [Xu 19] T. Xu, J. Zhang, M. Salehizadeh, O. Onaizah & E. Diller. *Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions*. Science Robotics, vol. 4, no. 29, page eaav4494, 2019.
- [Yang 12] S. H. Yang, Y.-S. Kim, J.-M. Yoo & N. G. Dagalakis. *Micromechanical systems based Stewart platform with sub-nano resolution*. Applied Physics Letters, vol. 101, no. 6, page 061909, 2012.
- [Yang 16] Z. Yang, Y. Wang, B. Yang, G. Li, T. Chen, M. Nakajima, L. Sun & T. Fukuda. *Mechatronic development and vision feedback control of a nanorobotics manipulation system inside SEM for nanodevice assembly*. Sensors, vol. 16, no. 9, page 1479, 2016.
- [Yang 18] G.-Z. Yang, J. Bellingham, P. E. Dupont, P. Fischer, L. Floridi, R. Full, N. Jacobstein, V. Kumar, M. McNutt, R. Merrifield et al. *The grand challenges of Science Robotics*. Science robotics, vol. 3, no. 14, page eaar7650, 2018.
- [Yang 20] X. Yang, L. Chang & N. O. Pérez-Arcibia. *An 88-milligram insect-scale autonomous crawling robot driven by a catalytic artificial muscle*. Science Robotics, vol. 5, no. 45, page eaba0015, 2020.
- [Yang 22] Z. Yang, R. Lee & J. B. Hopkins. *Hexblade positioner : A fast large-range six-axis motion stage*. Precision Engineering, vol. 76, pages 199–207, 2022.
- [Yi 02] B.-J. Yi, H. Y. Na, J. H. Lee, Y.-S. Hong, S.-R. Oh, I. H. Suh & W. K. Kim. *Design of a parallel-type gripper mechanism*. The International Journal of Robotics Research, vol. 21, no. 7, pages 661–676, 2002.
- [Yin 19] C. Yin, F. Wei, Z. Zhan, J. Zheng, L. Yao, W. Yang & M. Li. *Untethered microgripper-the dexterous hand at microscale*. Biomedical microdevices, vol. 21, no. 4, pages 1–18, 2019.

- [Youssefi 19] O. Youssefi & E. Diller. *Contactless robotic micromanipulation in air using a magneto-acoustic system*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no. 2, pages 1580–1586, 2019.
- [Zhang 09] Y. Zhang, B. K. Chen, X. Liu & Y. Sun. *Autonomous robotic pick-and-place of microobjects*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 1, pages 200–207, 2009.
- [Zhang 19] Z. Zhang, X. Wang, J. Liu, C. Dai & Y. Sun. *Robotic Micro-manipulation : Fundamentals and Applications*. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. 2, no. 1, pages 181–203, 2019.
- [Zhang 21] J. Zhang, Z. Ren, W. Hu, R. H. Soon, I. C. Yasa, Z. Liu & M. Sitti. *Voxelated three-dimensional miniature magnetic soft machines via multimaterial heterogeneous assembly*. Science Robotics, vol. 6, no. 53, 2021.

**Titre :** Conception, modélisation et commande de robots parallèles à articulations élastiques pour la micromanipulation à haute vitesse.

**Mots clefs:** Micromanipulation, Robot parallèle à plateforme configurable, Articulation élastique, Manipulation haute cadence

### Résumé :

La miniaturisation des composants des objets manufacturés est de plus en plus importante. Afin de réduire les coûts de production, il est nécessaire de développer des solutions robotiques de micromanipulation et de micro-assemblage et d'améliorer, en particulier, la cadence de manipulation qui reste faible sur les systèmes actuels (<1 cycle par seconde). L'objet de cette thèse de doctorat est de proposer des méthodes permettant de lever ce verrou scientifique de la micromanipulation haute cadence. Nous proposons une approche originale basée sur (i) une architecture parallèle à plateforme configurable permettant l'intégration d'un préhenseur, directement dans la structure et (ii) la miniaturisation du robot manipulateur permettant de réduire le ratio de taille entre le robot et l'objet. La fabrication du robot miniature a nécessité d'adapter sa concep-

tion aux spécificités de l'échelle et notamment de substituer les liaisons mécaniques conventionnelles par des articulations souples en polymère (PDMS). Nous montrons que cette approche permet de réduire les masses en mouvement et d'atteindre des hautes cadences (>10 cycles par seconde). Le manuscrit présente plusieurs méthodes de modélisation pour des mécanismes miniatures à articulations souples avant d'introduire et d'étudier une structure robotique originale pour la micromanipulation à haute cadence. Ce micromanipulateur a été testé expérimentalement et démontre la capacité de manipuler des objets micrométriques en effectuant 12 cycles de prise-dépose par seconde. Enfin, cette structure robotique originale a été également mise en œuvre à l'échelle macroscopique et illustré par la réalisation d'un manipulateur pour le tri de déchets.

**Title :** Design, modeling and control of parallel robots with soft joints for high-speed micromanipulation.

**Keywords :** Micromanipulation, Parallel robot with configurable platform, Soft joint, High throughput manipulation

### Abstract :

The miniaturization of the components of manufactured objects is increasingly important. In order to reduce production costs, it is necessary to develop robotic solutions for micromanipulation and microassembly and to improve, in particular, the throughput which remains low on current systems (<1 cycle per second). The aim of this PhD thesis is to propose methods to overcome this scientific challenge of high-speed micromanipulation. We propose an original approach based on (i) a parallel architecture with a configurable platform allowing the integration of a gripper directly in the structure and (ii) the miniaturization of the manipulator robot allowing to reduce the size ratio between the robot and the object. The fabrication of the miniature robot required to

adapt its design to the specificities of the scale notably to substitute the conventional mechanical links by soft joints (PDMS). We show that this approach allows to reduce the moving masses and thus to reach high throughputs (>10 cycles per second). The manuscript presents several modeling methods for miniature mechanisms with flexible joints before introducing and studying an original robotic structure for high rate micromanipulation. This micromanipulator has been experimentally tested and demonstrates the ability to manipulate micrometric objects by performing 12 pick-and-place cycles per second. Finally, this original robotic structure has also been implemented at the macroscopic scale and led to the realization of a manipulator for waste sorting.