

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT
UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

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

Doctorat de Automatique

PAR

Benjamin MAUZÉ

**Triskèle-Bot : Étude et
développement d'un robot parallèle
continu pour le
micro-positionnement**

Thèse présentée et soutenue à Besançon, le 11 janvier 2021

Composition du Jury :

Yassine HADDAB	Rapporteur	Professeur à l'Université de Montpellier, LIRMM
Christine PRELLE	Rapporteuse	Professeure à l'Université de Technologie de Compiègne, Roberval
Christian DURIEZ	Examineur	Directeur de recherche à l'INRIA de Lille
Michaël GAUTHIER	Examineur	Directeur de recherche au CNRS, FEMTO-ST
Pierre RENAUD	Examineur	Professeur à l'INSA Strasbourg, ICube
Cédric CLÉVY	Directeur	MFC HDR à l'Université de Franche-Comté, FEMTO-ST
Redwan DAHMOUCHE	Codirecteur	MFC à l'Université de Franche-Comté, FEMTO-ST
Guillaume LAURENT	Codirecteur	MFC HDR à l'ENSMM, FEMTO-ST

Remerciements

Réaliser et réussir une thèse est un marathon qui se fait en équipe que j'aimerais remercier.

Tout d'abord, mes directeurs de thèse Cédric Clévy, Guillaume Laurent et Redwan Dahmouche qui m'ont permis de réaliser ces travaux. Vous m'avez énormément appris que cela soit sur le côté recherche ou sur l'enseignement. Merci également pour le suivi, la rigueur, le sérieux et les conseils que vous m'avez apportés tout au long de cette thèse. Ayant tendance à foncer tête baissée pour réaliser les choses, vous m'avez appris à prendre du recul et à garder une vision d'ensemble de ce que je faisais et d'alterner ces deux états d'esprits. Vous m'avez permis de progresser sur de nombreux points et m'avez grandement soutenu dans des moments difficiles.

J'aimerais également remercier l'ensemble des membres de mon jury de thèse présidé par Michaël Gauthier, Christine Prella et Yassine Haddab, qui ont accepté de rapporter mes travaux, Christian Duriez et Pierre Renaud qui ont accepté d'examiner mes travaux. Je vous remercie pour le temps que vous avez consacré à évaluer le travail de cette thèse, le manuscrit et la soutenance, ainsi que vos remarques et discussions passionnantes.

Un grand merci à toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler et qui ont rendu cette thèse possible. Je pense notamment à Patrick Sandoz dont la collaboration sur le système de mesure a été essentielle et a mené sur des discussions passionnantes. Je pense également à Patrick Rougeot et Olivier Lehmann qui m'ont aidé à la fabrication du prototype de mon robot et au programme associé. Je voulais également remercier Aude Bolobion pour sa bonne humeur, ses discussions et la bonne ambiance lorsque tu venais dans notre bureau. Bien sûr je voulais également remercier mes camarades de bureau, les autres doctorants et chercheurs du département AS2M pour leur soutien, leur aide ponctuelle et la bonne ambiance présente au laboratoire. Je voulais remercier également le directeur du département AS2M, Philippe Lutz, qui permet cette bonne ambiance et nous permet de réaliser des activités de team-building et des temps de convivialité, organiser notamment lors de mon mandat de Président du Student chapter.

Enfin, je voulais remercier infiniment ma famille, présente physiquement ou par la pensée pour m'avoir soutenu et m'avoir permis de réaliser tout ce que j'ai fait.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Notations	ix
Listes des Abéviations	xi
Introduction	1
Introduction	1
I Vers de nouvelles alternatives robotiques	3
I.1 Introduction	4
I.2 Les défis et enjeux de la microrobotique de positionnement	6
I.2.1 Résolution de positionnement	7
I.2.2 Répétabilité de positionnement	7
I.2.3 Justesse de positionnement	8
I.2.4 Mesure du positionnement	9
I.2.5 Robustesse du positionnement	10
I.3 Solutions robotiques possibles	11
I.3.1 Architectures robotiques	11
I.3.2 Typologies robotiques	14
I.3.2.a Robots à corps rigides	14
I.3.2.b Robots continûment déformables	16
I.3.3 Synthèse	18
I.4 État de l'art sur les robots parallèles continus (RPC)	19
I.4.1 Espace de travail et singularités des RPC	19
I.4.2 Modélisation des RPC	21
I.4.3 Précision des RPC	23
I.4.4 Miniaturisation et micro-positionnement des RPC ...	24
I.5 Conclusion	25

II	Triskèle-Bot	27
II.1	Introduction	28
II.2	Concept du Triskèle-Bot	28
II.3	Formulation des modèles du Triskèle-Bot	30
II.3.1	Conditions aux extrémités des éléments flexibles conti- nus	35
II.3.1.a	Conditions aux extrémités proximales	35
II.3.1.b	Conditions aux extrémités distales	35
II.3.1.c	Équation de fermeture	35
II.3.2	Conditions d'équilibre statique de la plateforme	36
II.4	Résolutions des modèles du Triskèle-Bot	36
II.5	Espace de travail du Triskèle-Bot	38
II.6	Conclusion	40
III	Conception du Triskèle-Bot	43
III.1	Introduction	44
III.2	Préétude de la conception du Triskèle-Bot	44
III.2.1	Composition du Triskèle-Bot	44
III.2.2	Objectifs de conception du Triskèle-Bot	46
III.3	Choix des composants du Triskèle-Bot	47
III.3.1	Plateforme	47
III.3.2	Bras	48
III.3.2.a	Éléments flexibles continus	48
III.3.2.b	Fixations	49
III.3.3	Actionneurs	52
III.3.4	Platines de prépositionnement	53
III.3.5	Prototype du Triskèle-Bot	54
III.3.6	Estimation de la répétabilité du Triskèle-Bot	55
III.4	Conclusion	58
IV	Répétabilité du Triskèle-Bot	59
IV.1	Introduction	60
IV.2	Réalisation des mesures de poses du Triskèle-Bot	60
IV.2.1	Moyens de mesures aux petites échelles	61
IV.2.2	Banc de mesures	61
IV.2.3	Principe de la mesure	62
IV.2.3.a	Encodage de la mire pseudo-périodique	62

IV.2.3.b	Méthode de décodage de la mire	63
IV.3	Étude des sources d’incertitudes de mesures de poses.	65
IV.3.1	Sources d’incertitudes	65
IV.3.1.a	Mire pseudo-périodique	66
IV.3.1.b	Méthodes de traitement d’image	66
IV.3.1.c	Facteur humain	66
IV.3.1.d	Environnement	67
IV.3.1.e	Équipement et Matériel du banc de mesure	68
IV.3.2	Protocole expérimental de mesures	70
IV.3.3	Reproductibilité de la mesure	72
IV.4	Répétabilité expérimentale du Triskèle-Bot	74
IV.4.1	Quantification du bruit statique	74
IV.4.2	Quantification de la répétabilité expérimentale	76
IV.5	Conclusion	77
V	Contrôle et justesse	79
V.1	Introduction	80
V.2	Étude des sources d’erreurs	81
V.3	Principe de l’étalonnage	82
V.4	Mesures des paramètres intrinsèques du robot	84
V.4.1	Moyen et principe de mesure	84
V.4.2	Protocoles expérimentaux des mesures des paramètres 85	
V.4.2.a	Paramètres des fibres	85
V.4.2.b	Paramètres des transformations entre Qr-Codes et fibres	85
V.4.2.c	Positions relatives des extrémités des fibres	85
V.4.2.d	Orientations des axes de translation des actionneurs	86
V.4.3	Analyse de sensibilité des paramètres du modèle du Triskèle-Bot	88
V.5	Mesures des poses du Triskèle-Bot	89
V.6	Identification des paramètres du modèle	91
V.6.1	Principe de l’identification	91
V.6.2	Stratégie d’identification	93
V.6.3	Simulation de l’identification	93
V.6.4	Validation expérimentale de l’identification	94
V.7	Contrôle et étude de la justesse du Triskèle-Bot	96
V.7.1	Principe de la commande et de la quantification de la justesse du robot	96

V.7.2 Étude de la justesse du Triskèle-Bot	96
V.8 Conclusion.....	98
Conclusion et perspectives	99
Conclusion et perspectives	101
Liste des publications	107
Liste des publications	107
Bibliographie.....	109
Liste des Figures	127
Liste des Tables.....	133

Notations

Symbole	Désignation
$(\bar{})$	Désigne l'opérateur moyenne.
x_P, y_P	Position de la plateforme.
θ_P	Orientation plateforme.
q_i	Coordonnée articulaire associée à l'actionneur i .
δq_i	Incertitudes de l'actionneur i .
d	Diamètre d'un élément continu.
l_i	Longueur de l'élément continu i .
r_P	Rayon d'un cercle virtuel défini entre le centre géométrique de la plateforme et les 3 extrémités distales B_1, B_2, B_3 .
r_A	Rayon d'un cercle virtuel défini par les 3 extrémités proximales A_1, A_2, A_3 (lorsque les actionneurs sont dans leur position de référence).
φ	Angle entre l'orientation de l'axe de translation de l'actionneur i et la direction vers le centre géométrique du robot dans sa position initiale.
E	Module d'Young de l'élément continu.
G	Module de cisaillement de l'élément continu.
u	Taux de variation angulaire du repère local.
v	Taux de variation linéaire de l'origine du repère local.
I	Moment quadratique d'un élément continu.
J	Moment quadratique polaire d'un élément continu.
\mathbf{n}_i	Vecteur des effort tranchant interne à l'élément continu i .
m_i	Moment fléchissant interne à l'élément continu i .
σ_i	Contrainte interne maximale de l'élément continu i .
γ_i	Angle de la direction d'actionnement i dans le repère global.
α_i	Orientation de l'extrémité proximale i d'un élément dans le repère global.
β_i	Orientation de l'extrémité distale i d'un élément continu dans le repère global.
A_i	Extrémités proximales définies par ses coordonnées A_{xi}, A_{yi} .
B_i	Extrémités distales définies par ses coordonnées B_{xi}, B_{yi} .
$(\hat{})$	Caractérise le fait que la variable est estimée à partir d'un modèle.
l	Distance à la moyenne de la position de la plateforme.
std_l	Écart-type de la distance à la moyenne en position.
std_a	Écart-type de la distance à la moyenne en orientation.
ϕ_x, ϕ_y	Phases planaires dans leur direction respective.
λ	Période linéaire de la mire en micromètres
\mathfrak{F}	Vecteur résidu utilisé pour créer la fonction objectif du problème d'optimisation de l'étalonnage.
ξ	Coefficient de pondération inclu dans \mathfrak{F} .
$\boldsymbol{\pi}_{\text{ext}}$	Vecteur des paramètres extrinsèques.
$\boldsymbol{\pi}_{\text{rob}}$	Vecteur des paramètres intrinsèques du robot.
$\boldsymbol{\pi}$	Vecteur regroupant les paramètres extrinsèques et intrinsèques au robot.
$\mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b$	Bornes inférieures et supérieures des paramètres considérés lors du problème d'optimisation de l'identification.

Listes des Abéviations

DdL	Degré de Liberté
e.g.	Par exemple
i.e.	C'est à dire
MFC	Maître de conférences
MEF	Méthode Éléments Finis
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MEMS	Microsystèmes Électro-Mécanique
MOEMS	Microsystèmes Opto-Électro-Mécanique
MGD	Modèle Géométrique Direct
MGI	Modèle Géométrique Inverse
N.A.	Non Applicable
P	Prismatique
R	Rotoïde
RPC	Robot Parallèle Continu

Introduction

Au cours de ces dernières années, le monde microscopique n'a jamais été autant exposé. D'un point de vue technologique, les ordinateurs sont désormais aussi fins qu'un cahier, les smartphones sont devenus omniprésents, les solutions robotiques pour la chirurgie se démocratisent, etc. D'un point de vue sociétal, un virus a modifié notre façon de vivre tout en révélant les défis rencontrés par les chercheurs qui travaillent à ces échelles. L'homme recherche donc à approfondir très rapidement ses connaissances à ces dimensions.

Une manière d'interagir avec le monde microscopique consiste à utiliser des solutions issues de la microrobotique. Elles permettent de positionner, manipuler et caractériser des objets de très petites tailles pour connaître leur fonctionnement, leurs propriétés ou encore de les assembler entre eux pour en créer de nouveaux. Cependant, travailler à ces échelles représente un défi pluridisciplinaire.

Pour répondre à ces besoins grandissants, des solutions robotiques polyvalentes présentant de grandes performances de précision et un espace de travail conséquent sont requises. Cependant, les systèmes de micropositionnement actuels souffrent d'un compromis entre précision et espace de travail. Pour cela, de nouvelles alternatives doivent être développées.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la recherche de structures innovantes pour le positionnement à l'échelle micrométrique. Ils ont été effectués au sein de l'équipe Micro- et Nanorobotique du département d'Automatique et Système Micro-Mécatronique (AS2M) de l'institut FEMTO-ST.

Ce manuscrit de thèse est composé d'une introduction, de cinq chapitres, d'une conclusion et des perspectives de ce travail.

Le chapitre 1 contextualise les enjeux et les défis de la microrobotique de positionnement. Une vision globale des architectures et typologies des solutions robotiques pouvant être utilisées pour répondre aux besoins de ce domaine est présentée. Parmi ces solutions, les Robots Parallèles Continus (RPC) ont été sélectionnés pour leur potentiel en termes d'espace de travail, de miniaturisation, de robustesse et de précision. Cependant, les études de ces structures sont encore peu nombreuses dans la littérature et peu d'informations existent sur leurs performances, notamment sur celles relatives à leur précision. C'est à partir de ce constat que l'étude présentée ici est née.

Un concept original de RPC, visant à démontrer le potentiel de cette nouvelle classe de robots pour le positionnement à petites échelles, est introduit dans le chapitre 2. Ce RPC, nommé Triskèle-Bot de par sa forme, est un robot planaire à 3 Degrés de Liberté (DdL) constitué d'une plateforme et de 3 bras flexibles continûment déformables. La modélisation de ces derniers fondée sur la théorie des poutres de Kirchhoff est détaillée. Le système d'équations contraintes aux limites

est résolu numériquement pour obtenir des modèles géométrico-statiques direct et inverse. Ces derniers sont utilisés pour calculer l'espace de travail atteignable par le Triskèle-Bot.

Dans le chapitre 3, une préétude de la conception du Triskèle-Bot est menée et des objectifs sont identifiés. Nous y détaillerons les différents choix techniques effectués pour pouvoir y répondre. Un prototype est construit et sa répétabilité est estimée par une méthode statistique.

La répétabilité du Triskèle-Bot est mesurée expérimentalement dans le chapitre 4. Cette mesure est réalisée grâce à un système de vision et une mire pseudo-périodique encodée. Après avoir expliqué son fonctionnement, une analyse des sources d'incertitudes est menée de sorte à obtenir des mesures de pose avec des incertitudes nanométriques.

Le Triskèle-Bot est étalonné dans le chapitre 5 au travers d'un processus original grâce à la présence de mires Qr-Codes périodiques intégrées au robot lors de la phase de conception. Ces mires permettent de mesurer avec une incertitude connue les différents paramètres des modèles développés pour le Triskèle-Bot. Une analyse de sensibilité sur le modèle est effectuée de manière à déterminer les paramètres les plus d'influents. Les paramètres sont alors identifiés en trois fois et intégrés aux modèles. La performance de l'étalonnage est quantifiée et la justesse du Triskèle-Bot est mesurée sur deux trajectoires différentes.

Pour finir, une conclusion générale reprend les travaux réalisés, statue sur la capacité des RPC à répondre aux besoins de positionnement planaire à l'échelle micrométrique et présente des perspectives pour ces travaux.

Chapitre I

Vers de nouvelles alternatives robotiques pour le positionnement à l'échelle microscopique

I.1	Introduction	4
I.2	Les défis et enjeux de la microrobotique de positionnement	6
	I.2.1 Résolution de positionnement.....	7
	I.2.2 Répétabilité de positionnement	7
	I.2.3 Justesse de positionnement.....	8
	I.2.4 Mesure du positionnement	9
	I.2.5 Robustesse du positionnement	10
I.3	Solutions robotiques possibles	11
	I.3.1 Architectures robotiques.....	11
	I.3.2 Typologies robotiques	14
	I.3.3 Synthèse	18
I.4	État de l'art sur les robots parallèles continus (RPC)	19
	I.4.1 Espace de travail et singularités des RPC.....	19
	I.4.2 Modélisation des RPC.....	21
	I.4.3 Précision des RPC.....	23
	I.4.4 Miniaturisation et micro-positionnement des RPC	24
I.5	Conclusion	25

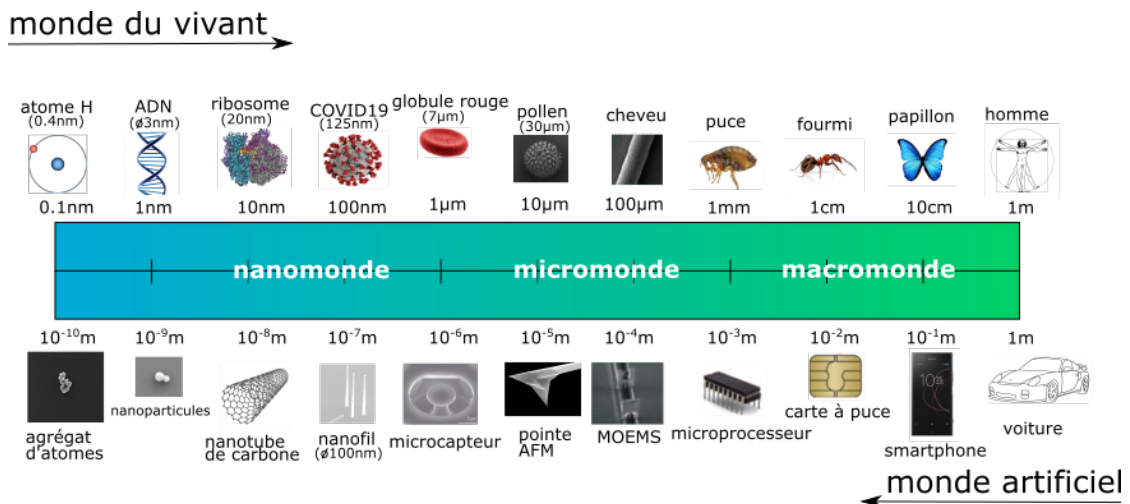


FIGURE I.1 – Les différentes échelles et les objets que l'on peut y retrouver.

Le positionnement absolu et répétable des robots est un des prérequis pour l'ensemble des applications aux petites échelles. Il constitue un des défis de la microrobotique. Ce chapitre débute en présentant les besoins, les défis et les enjeux en microrobotique de positionnement. Un panorama des différentes solutions robotiques pouvant y répondre y est exposé. Après avoir identifié la structure présentant le plus de potentiel, un état de l'art relatif à cette dernière est présenté, montrant les enjeux et les limitations existants pour que cette nouvelle alternative puisse répondre aux besoins de positionnement à haute précision à l'échelle micrométrique.

I.1 INTRODUCTION

Les microtechnologies sont omniprésentes et représentent un enjeu social, sociétal, industriel et scientifique majeur. Elles s'illustrent dans de nombreux domaines tels que la biologie, le médical, l'aérospatial, les télécommunications ou encore la robotique. L'intérêt de leur développement est double. D'un côté, ces technologies offrent de nouvelles possibilités et tendent à être davantage miniaturisées, connectées et polyvalentes. De l'autre, elles permettent d'étudier, de créer, de caractériser et d'interagir avec des micro-objets. La figure I.1 donne des ordres de grandeur de ce que représente l'échelle microscopique et des objets que l'on peut y retrouver, formant un monde à part entière (le micromonde).

Dans ce contexte de petites dimensions, l'être humain est très vite limité pour réaliser les nouvelles applications qui s'ouvrent à lui en termes de chirurgie [Peyron 19], de tri de cellules [Daguerre 20], de fabrication [Fang 17], de caractérisation mécanique [Placet 19], etc. dans des environnements variés tels que le corps humain [Phee 09], l'air ambiant [Bettahar 19] ou le vide [Cao 17]. En cas d'opération manuelle, si elle est possible, il introduit bien souvent une mauvaise reproductibilité et répétabilité, une faible précision et des heures de formations coûteuses [Nan 19]. C'est pourquoi des solutions robotisées sont recherchées [Nelson 08].

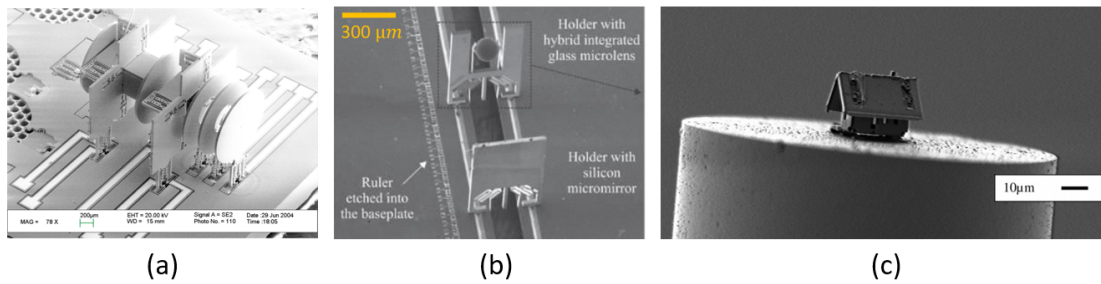


FIGURE I.2 – Réalisation d’assemblages et de positionnement à très petites échelles vus sous microscope électronique à balayage. (a) Microsystèmes Électro-Mécanique 3D [Hollis 06] (b) Micro banc optique [Clévy 14] (b) Micromaison pliée et assemblée au bout d’une fibre optique amincie à partir d’un film de silice. [Rauch 18]

L’étude de ces solutions fait partie d’un domaine de recherche à part entière plus large, appelé la microrobotique. Elle prend en compte les problématiques de robotique tout en intégrant les spécificités propres qui régissent l’échelle microscopique [Hodes 07]. Les robots utilisés ne seront pas forcément petits en tailles, mais ils pourront se positionner précisément ou encore interagir avec des objets du micromonde [Régner 08].

L’approche robotique est également très intéressante, originale et permet d’obtenir de meilleures performances [Clévy 15] pour répondre à la complexité croissante des technologies et des assemblages [Duque Tisnes 19], qui sont de plus en plus petits [Burisch 10]. À titre d’exemple, on pourra présenter des nanocapteurs intégrant des nanotubes de carbones [Yang 19] ou encore des Microsystèmes Opto-Électro-Mécanique (MOEMS) [Clévy 14]. La figure I.2 montre trois exemples d’assemblages obtenus par solution robotisée : un Microsystèmes Électro-Mécanique (MEMS) 3D [Hollis 06], un micro-banc optique [Clévy 14] et une micromaison (origami) en silice au bout d’une fibre optique amincie [Rauch 18]. Cependant, les micromanipulations et micro-assemblages nécessaires pour réaliser ces objets demandent un positionnement très précis de leurs constituants [Gauthier 15]. Pour donner un ordre de grandeur, les MOEMS requièrent des précisions de positionnement de 100 nm et $0,01^\circ$ [Bettahar 20].

Pour répondre à l’ensemble de ces besoins, la microrobotique propose deux approches complémentaires [Sitti 07]. La première consiste à concevoir des robots de petites tailles et mobiles, dans l’objectif d’être versatiles [Halder 19], déplacés sans contact avec un actionnement déporté, pouvant être utilisé dans des environnements confinés tels que le corps humain [Begey 20] (appelée « untethered » en anglais).

La seconde consiste à concevoir des robots dont la taille n’est pas forcément petite par rapport aux objets manipulés ou positionnés, mais qui présentent une précision (résolution, répétabilité, justesse) suffisante pour pouvoir interagir à ces échelles. En robotique industrielle, il est usuel d’avoir un robot métrique avec une précision au dixième de millimètre (soit un rapport de 10^4), alors qu’en micro-

robotique, l'objectif des robots les plus polyvalents est de fournir une précision nanométrique pour des tailles centimétriques (soit un rapport de 10^7). Le rapport entre la taille du robot et la précision attendue augmente donc avec la réduction d'échelle par manque de solution technique adaptée. De plus, une structure robotique de grandes dimensions peut impliquer de plus grandes incertitudes liées aux effets de levier, aux défauts d'assemblage, aux vibrations mécaniques, etc. À titre d'exemple, des variations de longueur de $1,2 \mu\text{m}$ peuvent subvenir pour des variations d'un degré Celsius sur une barre d'aluminium de 50 mm [Tan 15].

Une solution consiste à étudier des robots miniaturisables ou de petites tailles pouvant, alors, aller dans des endroits confinés comme le corps humain [Lescano 15] ou encore dans la chambre d'un microscope électronique à balayage (MEB) [Wang 18]. Ces applications ne sont pas marginales et les besoins sont importants [Shi 16]. Par exemple, les mesures sous MEB permettent d'avoir des images de micro-objets qui ne sont pas possible d'observer à l'œil nu ou par un système de microscopie optique, limité par la longueur d'onde de la lumière.

Cependant, la fabrication à petites échelles est complexe [Hussein 17]. Elle nécessite l'utilisation de machines spéciales dans des environnements contrôlés de type salle blanche et de processus unique pour chaque robot [Haouas 18b]. De plus, pour qu'il puisse proposer une précision de positionnement adéquate, la construction de ce robot peut nécessiter des assemblages très précis.

L'objectif de ce chapitre est de présenter de nouvelles possibilités pour répondre aux contraintes inhérentes de la microrobotique de positionnement. Pour cela, les défis et les enjeux auxquels on devra se confronter seront présentés, puis, les structures robotiques existantes seront introduites pour identifier une nouvelle voie potentielle. Cette dernière sera présentée plus en détail en s'appuyant sur des travaux émergents.

I.2 LES DÉFIS ET ENJEUX DE LA MICROROBOTIQUE DE POSITIONNEMENT

Une solution de microrobotique de positionnement devra viser certaines caractéristiques : être répétable ; pouvoir réaliser un positionnement absolu (grande justesse) ; être capable de fournir un espace de travail conséquent (pour être le plus polyvalent possible) ; être miniaturisable (pour pouvoir travailler au besoin dans des endroits confinés) ; et être robuste aux perturbations extérieures dont l'impact est démultiplié à l'échelle micrométrique. Chacun de ces enjeux présente un défi en terme de conception, de fabrication et de commande.

Avant de rentrer plus dans les détails, les notions derrière ces termes, qui ne sont pas forcément simples à cerner, doivent être définies [Conrad 00, Corbel 08, Deblaise 08, Niaritsiry 06].

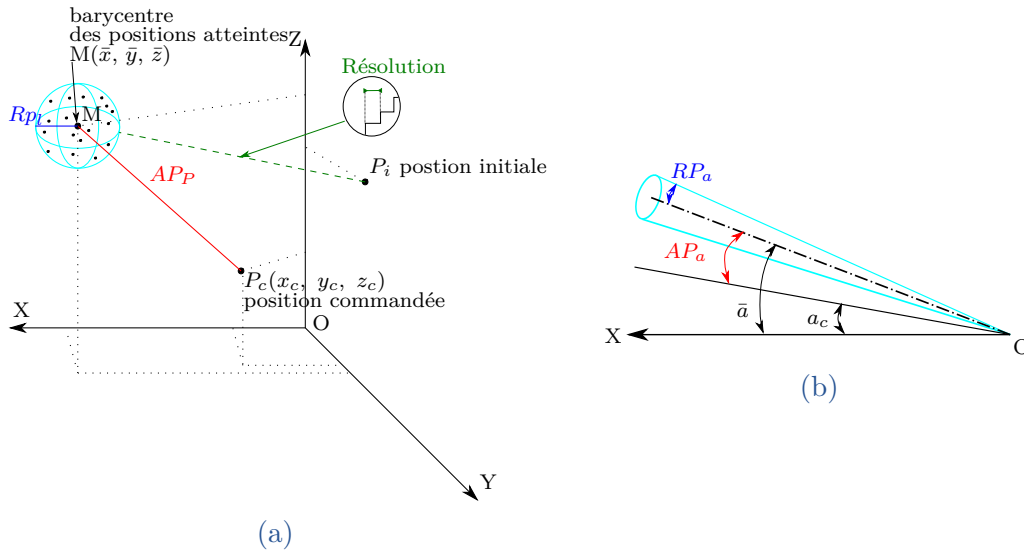


FIGURE I.3 – Définition schématique de la précision (résolution, répétabilité et justesse) en position (a) et en orientation (b) d'un robot

I.2.1 Résolution de positionnement

La résolution caractérise le plus petit incrément d'une grandeur physique. Bien que cette définition ne soit pas la plus complète, comme le présente Conrad dans sa thèse [Conrad 00], on considérera en robotique que la résolution est définie par le plus petit mouvement qu'un robot peut effectuer. Elle dépendra de la valeur de la résolution de l'actionneur utilisé, celle de son capteur et de la structure considérée [Ronchi 05]. Cette résolution d'actionneur est définie comme le plus petit mouvement que peut engendrer l'actionneur. On pourra noter qu'il est difficile de savoir si cette résolution correspond à la résolution du codeur associé à l'actionneur, à la résolution physique de ce dernier ou à celle mise en œuvre au niveau du contrôleur [Brethe 07]. À titre d'exemple, la fiche technique des actionneurs linéaires piézo-électriques P-602 de Physik Instrumente indique des valeurs de résolution différentes s'ils sont utilisés en boucle ouverte ou en boucle fermée avec leur capteur interne.

I.2.2 Répétabilité de positionnement

La répétabilité de positionnement en robotique est définie par la norme ISO 9283 :1999 [ISO9283 98] comme la dispersion des poses atteintes après un nombre donné de mouvements répétés selon une même direction pour une même commande. Elle exprime donc la capacité de revenir toujours à la même pose cartésienne depuis une configuration articulaire donnée.

Elle peut être divisée en deux : la répétabilité en position RP_l et la répétabilité en orientation RP_a dont les définitions sont les suivantes :

$$RP_l = \bar{l} + 3\sigma_l \quad (\text{I.1})$$

$$RP_a = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n - 1}} \quad (\text{I.2})$$

Avec

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (\text{I.3})$$

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j \quad (\text{I.4})$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (\text{I.5})$$

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n n(l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (\text{I.6})$$

n est le nombre de répétitions effectuées, l_j est la distance de la position j à la position moyenne (point M), \bar{l} et σ_l sont respectivement la moyenne et l'écart type des distances à la moyenne en position, a_j correspond aux différentes orientations du robot suivant les trois directions et \bar{a} à leur moyenne. La figure I.3 illustre la répétabilité.

La répétabilité est une propriété intrinsèque de la structure robotique, elle dépendra essentiellement des choix de conception (dimensions, capteur et répétabilité de l'actionnement) et des jeux/flexibilités dans les articulations [Riemer 00]. Elle n'est pas forcément égale sur l'ensemble de son espace de travail [Kluz 14] et peut varier en fonction de la vitesse du robot [Mehrez 96]. On pourra noter qu'une bonne répétabilité ne sera obtenue que si les conditions expérimentales sont maintenues au maximum constantes lors de l'opération sinon la performance mesurée pourra en être affectée [Şirinterlikçi 09]. De manière générale, la répétabilité d'un robot est plus grande que sa résolution. Un robot non répétable ne pourra pas voir ses erreurs de positionnement compensées ou modélisées puisqu'elles seront par nature non répétables et non prédictibles. Ainsi, la répétabilité devra être considérée lors de la conception d'un robot de micro-positionnement en favorisant une structure intrinsèquement répétable.

I.2.3 Justesse de positionnement

La justesse de positionnement en robotique est également définie par la norme ISO 9283 :1999 [ISO9283 98]. Elle représente la distance en position et en orientation entre la pose commandée et la moyenne des poses atteintes lorsque l'on effectue plusieurs fois une même commande.

Elle est constituée de la justesse de position AP_p , définie comme la distance entre la position commandée (x_c, y_c, z_c) et le barycentre des positions mesurées $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, et de la justesse d'orientation AP_a , définie comme la distance entre l'orientation commandée a_c et la moyenne des orientations mesurées \bar{a} , suivant la direction X,Y ou Z. La figure I.3 illustre cette notion.

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (\text{I.7})$$

$$AP_a = \bar{a} - a_c \quad (\text{I.8})$$

La justesse décrit donc la capacité du modèle d'un robot à prédire son comportement réel. Les erreurs faites sur le modèle affectant la justesse peuvent être géométriques (paramètres géométriques erronés, mauvais zéro des actionneurs, etc.) et non-géométriques (température, frottements, etc.). De manière générale, du fait qu'il y ait plus de sources d'erreurs pouvant impacter la justesse que la répétabilité, un robot possédera une répétabilité plus petite que sa justesse [Zeng 16]. Les sources d'erreurs les plus importantes sont les sources géométriques [Wu 15] qui sont d'autant moins négligeables à l'échelle micrométrique. À titre d'exemple, une erreur de 50 μrad (0,008°) de positionnement sur un axe d'une longueur de 20 mm entraîne une erreur d'environ 1 μm , ce qui représente l'ordre de grandeur de certaines bactéries empêchant leur manipulation.

Les sources d'imprécision agissant sur la justesse sont nombreuses et font l'objet de nombreuses études pour pouvoir les identifier et les compenser. Pour pouvoir améliorer la justesse d'un robot, on pourra l'étalonner et/ou compenser directement ses erreurs [Hu 20]. L'étalonnage du robot permet d'améliorer la correspondance entre le modèle et son comportement de manière systématique et globale en identifiant les paramètres inclus dans son modèle. Klimchik *et al.* [Klimchik 14] ont effectué l'étalonnage d'un robot KUKA KR270 utilisé couramment en industrie. En compensant les sources géométriques et les déformations élastiques, ils ont réussi à améliorer sa justesse d'un facteur 10, atteignant ainsi 50 μm au centre de son espace de travail. La compensation peut être faite complémentaiement à l'étalonnage ou à la place de ce dernier, elle consiste à adapter la commande du robot pour atteindre les poses désirées. Par exemple, Jiang *et al.* [Jiang 20] ont montré qu'en utilisant un réseau de neurones, pouvant compenser les sources géométriques et non-géométriques, ils pouvaient améliorer la justesse moyenne d'un robot UR de 849,7 μm à 49 μm soit une erreur divisée par un facteur 17.

I.2.4 Mesure du positionnement

Obtenir des informations sur ce qui se passe dans le micromonde soulève de nombreux défis. C'est également le cas pour caractériser le comportement des robots. Pour connaître leur position avec précision, il faut un système de mesure présentant une résolution très importante (quelques nanomètres) et très peu d'incertitudes de mesure (dizaine de nanomètres).

Ces incertitudes sont très complexes à identifier et à compenser puisqu'elles peuvent aisément rejoindre l'ordre de grandeur que l'on veut mesurer. En effet, dû à la réduction d'échelle, des sources d'incertitudes négligeables à l'échelle macroscopique ne le sont plus à l'échelle micrométrique. Elles peuvent être à la fois numériques, provenant par exemple du traitement des données brutes (e.g. approximations), ou environnementales (humidité, température, vibrations mécaniques, etc.).

Un autre élément déterminant de la mesure réside dans le facteur d'échelle entre la plage de déplacement et la précision attendue. En robotique macroscopique, ce rapport correspond à environ 10^5 (déplacement de l'ordre du mètre, répétabilité au centième de millimètres) mais en microrobotique, ce facteur peut atteindre 10^7 (déplacement d'une dizaine de millimètres, répétabilité nanométrique). Cette problématique entraîne souvent un compromis entre grande résolution et plage de mesure [Guelpa 16] et fait toujours l'objet de recherches.

Le système de mesure doit également permettre d'obtenir la position du robot sans pour autant modifier son comportement et impacter son environnement. En effet les systèmes de mesures proposant de très grandes résolutions (comme les capteurs capacitifs ou les interféromètres lasers) [Fleming 13] sont généralement volumineux, ce qui les rend difficilement implémentables dans toutes les situations. De plus, ces systèmes sont généralement capables de mesurer suivant qu'une seule direction, rendant l'encombrement d'autant plus important si on doit en installer plusieurs.

I.2.5 Robustesse du positionnement

Un robot de positionnement à l'échelle micrométrique doit pouvoir se déplacer sans être trop perturbé et maintenir cette position même dans des environnements non contrôlés [Chalvet 13]. Pour cela, il doit présenter une certaine robustesse vis-à-vis des variations de ses paramètres et rejeter les perturbations extérieures pour pouvoir conserver ses performances. Cette robustesse peut être liée au matériau constituant le robot (rigide, faible dilatation thermique, etc.), mais également à sa structure (pas de forme de potence par exemple) et à sa commande. Dans l'idéal, cette dernière doit lui permettre de rejoindre la position voulue tout en compensant au maximum les erreurs de modélisation, les bruits de mesures, les perturbations extérieures et les problèmes d'hystérésis qui peuvent exister.

De manière générale, des précautions expérimentales et des études particulières sont menées en amont pour éviter au maximum les variations environnementales qui affectent aussi bien les performances du robot que le moyen de mesure. À titre d'exemple, Ning [Tan 13a] a montré pour une variation de température d'un degré Celsius des variations de $1,4 \mu\text{m}$ sur la mesure de poses par un système de vision classique et des variations supérieures à 200 nm sur la justesse d'un nanopositionneur.

Ainsi, nous avons défini les notions et les principales difficultés auxquelles nous serons confrontés. Dans la section suivante, différentes solutions robotiques existantes sont proposées de manière à identifier celle qui présente le plus de potentiels.

I.3 SOLUTIONS ROBOTIQUES POSSIBLES

Un robot est un système mécanique permettant le déplacement d'un solide, appelé organe terminal, par rapport à une base fixe, selon plusieurs Degrés de Liberté (DdL) qui peuvent être commandés [Merlet 96]. Le nombre de degrés de liberté d'un robot peut être défini comme étant le nombre de coordonnées indépendantes nécessaires pour définir une configuration [V.shil'ko 14]. L'organe terminal fait référence à l'interface pouvant interagir avec l'extérieur [Khalil 04].

Pour avoir une solution robotique adaptée aux contraintes du micromonde la plus performante possible, les étapes de conception et du choix de la structure sont clés

I.3.1 Architectures robotiques

Il existe trois grands types d'architectures possibles (figure I.4) : les robots sériels, parallèles et hybrides. Les robots sériels sont composés de chaînes cinématiques ouvertes, constituées d'éléments unitaires liés entre eux par des liaisons mécaniques, entre la base et l'organe terminal [Siciliano 16]. Les robots parallèles sont des mécanismes en chaînes cinématiques fermées reliant la base à l'organe terminal (généralement une plateforme) par plusieurs (au moins deux) chaînes cinématiques indépendantes [Merlet 06b]. Les structures hybrides sont une combinaison des architectures sérielles et parallèles.

Les structures sérielles et parallèles présentent des caractéristiques et des performances différentes [Metodij 14]. Le tableau I.1 présente les avantages et inconvénients de chacune d'elles. Ce tableau donne des propriétés d'ordre général qui ne peuvent pas être appliquées pour tous les robots.

La performance de la précision est soulevée par Briot et Bonnev dans l'article [Briot 08], où ils se questionnent pour savoir si les architectures parallèles sont réellement plus précises que les sérielles. Ils démontrent, en se basant sur une étude de sensibilité aux erreurs de positionnements des actionneurs (considérées comme sources principales d'imprécision [Merlet 06a]), qu'intrinsèquement les robots parallèles peuvent, en effet, être plus précis que les robots sériels. On peut également indiquer que certaines limitations inhérentes aux architectures parallèles telles que le faible espace de travail par rapport à l'encombrement [Badescu 02], les faibles orientations [Krut 03, Nabat 05], etc. ont fait l'objet de recherches qui ont abouti à des améliorations des structures existantes. D'après ces performances usuellement admises, des compromis sont exhibés entre les erreurs de positions et d'espace de travail qui semblent ne pas pouvoir aller de pair.

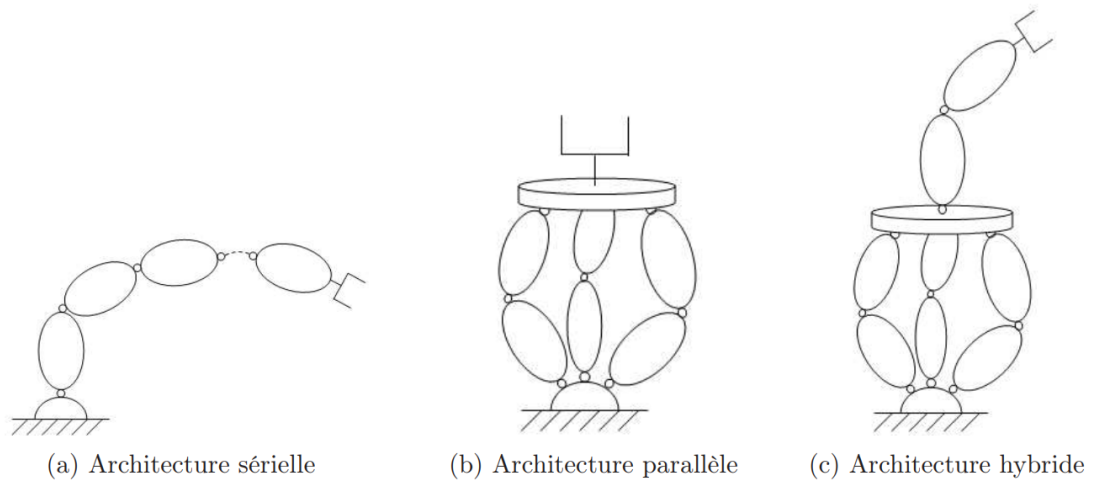


FIGURE I.4 – Architectures robotiques selon [Khalil 99]

Caractéristiques	Sériels	Parallèles
Espace de travail	grand	petit
Rapport espace de travail/encombrement	grand	petit
Modélisation	simple	complexe
Erreurs de positions	grandes	faibles
Erreurs de forces	faibles	grandes
Rigidité	faible	grande
Dynamique	faible	grande
Inertie	grande	faible
Rapport charge/poid	faible	grand

TABLE I.1 – Principales caractéristiques des structures sérielles et parallèles

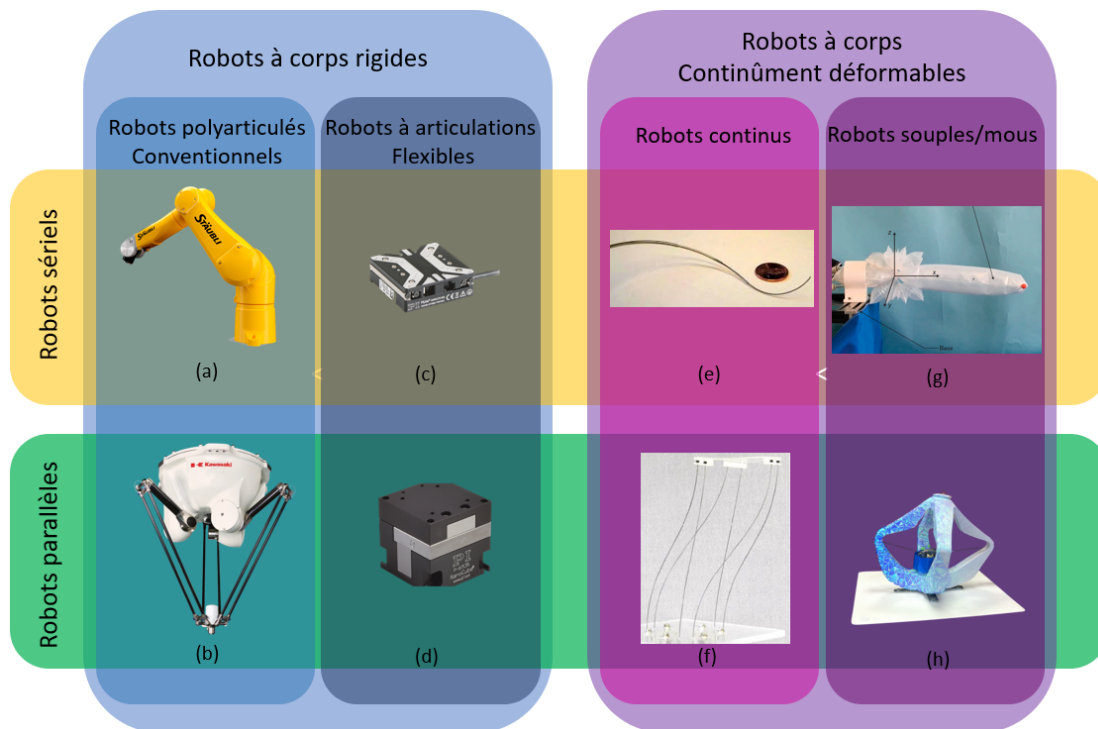


FIGURE I.5 – Proposition de classement des différentes typologies de solutions robotiques. (a) Robot sériel Staubli. (b) Robot parallèle Delta Yamasaki. (c) Platine de positionnement unidirectionnelle et (d) Nanocube de Physik Instrumente. (e) Robot à tubes concentriques [Webster 09]. (f) Robot parallèle continu inspiré de la plateforme de Stewart-Gough [Black 18]. (g) Robot souple sériel gonflable [Kim 18]. (h) Robot parallèle souple actionné par câbles [Duriez 13]

I.3.2 Typologies robotiques

Avant de rentrer plus dans les détails des différentes typologies, il faut indiquer que la littérature fait état de plusieurs classifications [Robinson 99, Chen 20, Trivedi 08, George Thuruthel 18]. Aucune d'entre elles ne fait pour l'instant consensus en raison de l'intrication de certains principes et des critères considérés. Dans la suite, nous proposons de les catégoriser et de les caractériser selon leurs structures mécaniques (figure I.5).

Tout d'abord, deux grands groupes peuvent être définis : les robots à corps rigides et les robots à corps continûment déformables. Le premier groupe représente les structures communément choisies dans le domaine industriel et dans le domaine des microtechnologies. Il peut être subdivisé en deux sous-groupes : les robots polyarticulés et les mécanismes à articulations flexibles [Henein 03].

Le second groupe représente les structures encore très ancrées dans la recherche même si certains robots commencent à être industrialisés notamment dans le domaine médical. Peyron présente, dans sa thèse [Peyron 19], un état de l'art complet des structures continues utilisées pour la chirurgie. Ces structures sont constituées d'éléments se déformant continûment. Ce groupe peut également être divisé en deux avec les robots continus et les robots souples/mous.

I.3.2.a Robots à corps rigides

Robots polyarticulés

Les robots polyarticulés sont ceux que l'on pourrait caractériser de « classiques ou conventionnels », ils représentent les robots les plus utilisés dans le secteur industriel [Maurine 13]. Ces structures ont été les premières à avoir été développées et étudiées. Elles sont donc les plus connues et servent généralement de références aux autres types de robots. La figure I.6 illustre deux robots typiquement utilisés en industrie.

Les robots polyarticulés sont généralement robustes aux perturbations extérieures et peuvent porter des masses importantes. Ils offrent également une modélisation fondée sur la mécanique des solides permettant d'avoir des modèles avec des solutions analytiques.

Pour répondre aux besoins des applications dans des environnements confinés, la miniaturisation de ces structures peut être envisagée. Cette réduction d'échelle augmente la difficulté de l'assemblage et de la fabrication de leurs composants qui induisent de nombreux défis technologiques [Gauthier 15].

Les robots polyarticulés présentent également des jeux et des frottements dans leurs articulations ce qui les rendent peu précis. Ce défaut est d'autant plus marqué pour les architectures sérielles où les erreurs des articulations et des moteurs sont additionnées et diminuent la justesse globale du robot.

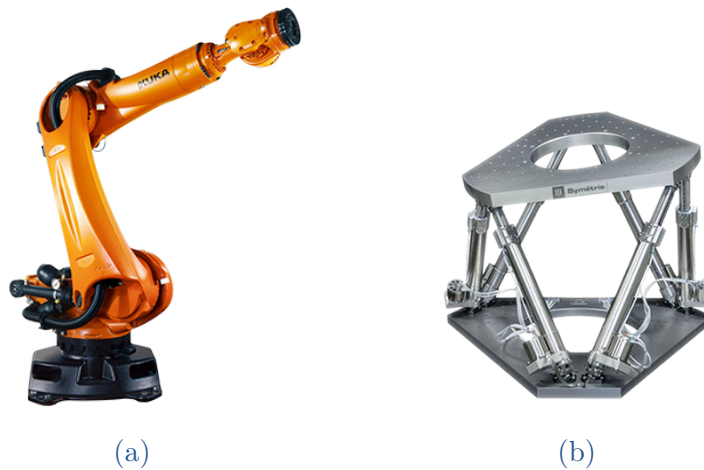


FIGURE I.6 – Exemple de robots polyarticulés utilisés en industrie (a) Kuka KR270 (b) Zonda de l’entreprise française Symétrie

Robots à articulations flexibles

Les robots à articulations flexibles, appelés en anglais « compliant robots », représentent la solution privilégiée pour répondre aux besoins de précision que requièrent des applications aux échelles micro- et nanométrique [Zeyi Wu 18].

Le principe de fonctionnement de ces structures repose en grande partie sur l’amplification de déplacements fournis par des actionneurs grandement résolus, leur permettant de proposer une très grande précision [Ouyang 08]. Les robots peuvent être monolithiques (par découpe, moulage, etc.) ou obtenus par assemblage, mais représentent toujours un défi de fabrication [Haouas 18a].

Les avantages de l’utilisation de ce type d’articulations sont : une absence de frottements secs, de lubrification, de jeux, une grande précision et leur taille pouvant être faible (intégrable dans des environnements confinés).

Cependant, ces structures présentent généralement un petit espace de travail dû aux faibles plages de déformations des éléments utilisés, qui atteignent rapidement leur limite mécanique à cause de la concentration de contraintes dans leurs articulations. Il faut donc considérer des compromis entre espace de travail et précision [Torralba 16]. En effet, les structures fournissant une précision nanométrique présenteront généralement des espaces de travail micrométriques et à l’inverse, celles qui proposeront des espaces de travail millimétrique auront des précisions micrométriques [Zeyi Wu 18].

La figure I.7 illustre deux robots à articulations flexibles parallèles. Le premier est une structure commerciale 6DdL de chez Physik Instrumente. Le deuxième est une structure de recherche développée par l’université d’Harvard, présentant une très grande dynamique, fondée sur des amincissement locaux et des poutres piézo-électriques se déformant en flexion.



FIGURE I.7 – Exemple de robots à articulations flexibles. (a) Plateforme parallèle 6 DdL de l'entreprise Physik Instrumente (b) MilliDelta de l'université d'Harvard [McClintock 18]

I.3.2.b Robots continûment déformables

Un robot continûment déformable est défini par Burgner-Kahrs *et al.* [Burgner-Kahrs 15] comme étant : *une structure actionnable dont la matière constitutive se déforme en suivant des courbes dont les vecteurs tangents évoluent de façon continue.*

Ces robots peuvent être constitués d'un large panel de matériaux, allant des matériaux très souples aux matériaux à mémoire de forme dont le module de Young est relativement élevé, mais qui permettent tout de même des déformations continues importantes.

Ils présentent généralement une différence au niveau de leur modélisation avec les robots polyarticulés. Les modèles de ces derniers sont issus d'un nombre fini de repères locaux fixés au niveau des articulations (e.g. Denavit-Hartenberg [Denavit 55]) alors que les structures continues privilégieront l'utilisation de repères locaux, dont le nombre peut être infini, de manière à modéliser au mieux la variation continue le long d'un élément déformable (virtuel ou réel). On pourra d'ailleurs noter que la modélisation et l'intégration de capteurs seront plus difficiles que dans le cas polyarticulés [Mahoney 18].

De manière intrinsèque, ces robots exhibent une meilleure flexibilité, plus de sécurité, un plus grand espace de travail et une faculté de miniaturisation que ne possèdent pas la plupart des structures polyarticulées.

Ce groupe de robots continûment déformables peut être divisé en deux selon les matériaux employés : les robots continus et les robots souples. Ils seront différenciables de part leur module d'Young [Coevoet 19]. Les robots souples seront des robots constitués de matériaux dont le module de Young est compris entre 10^4 et 10^9 Pa tels que du silicone [Duriez 13], des polymères ou des matériaux très innovants [Rossiter 20, Apsite 20]. Les robots continus seront ceux avec un module d'Young supérieur à 1 GPa. Dans la littérature, il existe d'autres subdivisions telles que rigide, discret, hyper-redondant et souple [Yeshmukhametov 18].

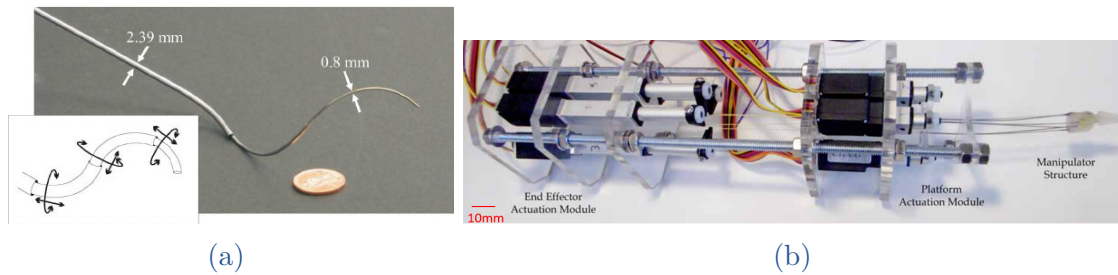


FIGURE I.8 – Exemple de robots continus (a) Robot à tubes concentriques [Webster 09] (b) Robot parallèle continu possédant une pince [Orekhov 16]

Robots continus

Un robot continu présente tous les avantages et caractéristiques d'un robot continûment déformable définis précédemment. La notion de robot parallèle continu (RPC), quant à elle, a été définie par Bryson *et al.* [Bryson 14] comme étant : plusieurs éléments flexibles arrangés en parallèle connectés à une plateforme devant être actionnés indépendamment. Il peut posséder ou pas des plateaux intermédiaires permettant de guider ou de fixer les éléments flexibles. Les RPC auront tendance à posséder une grande capacité de chargement, exercer plus de forces et une meilleure justesse/répétabilité que leurs homologues sériels [Black 17].

On pourra noter également que les différences de structures au sein même des robots continus sont également plus importantes que dans le cas des robots polyarticulés. Pour les RPC par exemple, on trouvera des structures proches des conventionnelles comme la plateforme de Stewart-Gough [Till 17b] ou des structures beaucoup plus singulières [Mahoney 18].

La figure I.8 présente deux types de robots continus différents. Le premier robot, appelé robot à tubes concentriques [Webster 09], est constitué d'un assemblage concentrique de tubes, généralement superélastiques et pouvant être précourbés sur certaines parties, actionnées le plus souvent à leur base. Le second est un RPC équipé d'une pince destinée à la chirurgie [Orekhov 16] dont les éléments continus sont actionnés en translation à leur base.

Robots souples

Le concept de robot souple n'est pas récent puisque le premier a été construit dans les années quatre-vingt-dix [Suzumori 91]. Cependant, les avancées en matière de puissance de calcul, de prototypage et de connaissance des matériaux ont engrangé un grand engouement pour le développement de ces structures, évoquant même une nouvelle façon de créer des robots [Paik 18].

Les matériaux souples et les grandes diversités de structures, telles que les structures bio-inspirées [Trivedi 08], apportent aux robots souples une grande capacité d'adaptation, une sensibilité ou une agilité que les autres structures ne présentent pas [Rus 15]. Cependant, les difficultés de modélisation et de commande sont très importantes [Runciman 19] réduisant leur précision [George Thuruthel 18].

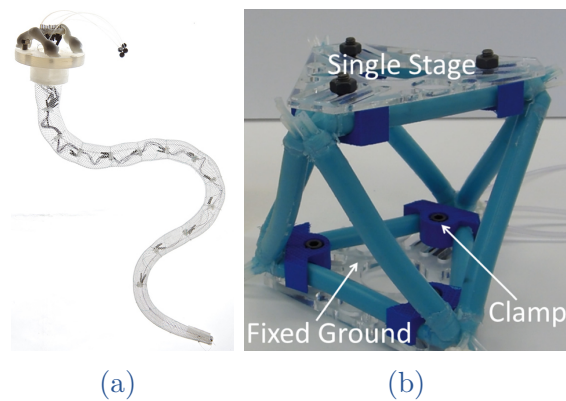


FIGURE I.9 – Exemples de robots souples (a) Robot sériel bio-inspiré [Laschi 12]
(b) Robot parallèle gonflable [Hopkins 15]

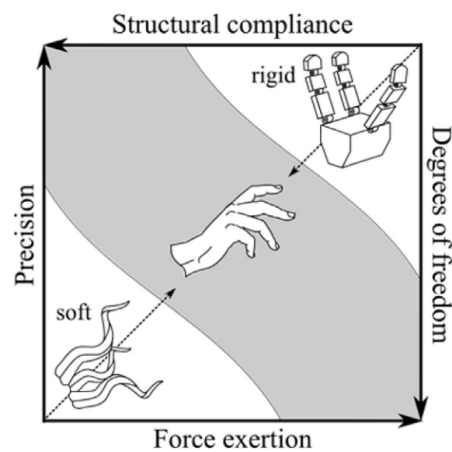


FIGURE I.10 – Compromis entre flexibilité, degrés de liberté, forces et répétabilité extrait de [Hughes 16]

La figure I.9 illustre deux structures souples. La première est un robot sériel inspiré d'un membre de poulpe, actionné longitudinalement par câbles et transversalement par des ressorts en matériaux à mémoire de forme [Laschi 12]. Le second est un robot parallèle actionné pneumatiquement à sa base [Hopkins 15].

I.3.3 Synthèse

L'objectif est d'identifier des architectures et typologies innovantes et intéressantes pour les applications micrométriques. Ce choix s'effectue en prenant en compte de nombreux compromis, comme Hughes *et al.* ont pu le présenter par la figure I.10 dans [Hughes 16], des critères et des caractéristiques des différentes structures présentées précédemment.

Les premiers critères considérés sont la répétabilité intrinsèque et la justesse. Les architectures parallèles sont les plus prometteuses puisqu'elles permettent d'éviter l'accumulation d'erreurs et de réduire les erreurs d'actionnement si la conception est bien faite [Briot 07]. Dû au manque de données chiffrées des struc-

tures continûment déformables et souples et à la grande dépendance de cette performance à la structure créée, ce critère ne semble pas suffisant pour déterminer une orientation à prendre en termes de typologies.

La seconde caractéristique qui peut être abordée est le potentiel de miniaturisation pour l'intégration dans des milieux confinés tels que la chambre d'un MEB ou le corps humain. Ce critère est une propriété inhérente des typologies continûment déformables. Dans le cas des structures à corps rigides, à la vue de la difficulté de fabrication et d'assemblage, seules les structures à articulations flexibles semblent satisfaire le critère.

La troisième caractéristique correspond à la versatilité de la solution. Pour qu'elle puisse répondre à un maximum de besoins, la structure doit pouvoir fournir un espace de travail conséquent. La limitation de ces espaces réside principalement dans la structure, les actionneurs et les matériaux utilisés. Grâce à leur capacité de grandes déformations, les structures continûment déformables présentent un plus grand potentiel.

Entre les deux dernières typologies, les robots souples n'ont pas été choisis au vu de la viscoélasticité des matériaux les constituant. Ce critère complexifie la modélisation avec de nombreux paramètres, qu'il faudrait pouvoir identifier précisément pour améliorer la justesse du robot dans l'objectif d'atteindre les niveaux requis pour les applications à l'échelle micrométrique.

Ainsi, dans la suite de ce mémoire, nous avons choisi de réaliser un état de l'art des robots parallèles continus dont les performances doivent encore être découvertes et étudiées [Campa 19, Black 18].

I.4 ÉTAT DE L'ART SUR LES ROBOTS PARALLÈLES CONTINUS (RPC)

I.4.1 Espace de travail et singularités des RPC

Un des avantages des RPC est de proposer un espace de travail conséquent grâce aux grandes déformations de ses éléments flexibles continus [Singh 17, Campa 19]. Par exemple, Yang et al., dans [Yang 18], proposent d'améliorer le robot Delta en changeant ses articulations rotoïdes par des articulations continues (figure I.11). En effet, les articulations continues proposées permettent des débattements angulaires de $\pm 90^\circ$ alors qu'ils ne sont que de $\pm 30^\circ$ et de $\pm 20^\circ$ pour les articulations rigides sphériques [Bouri 10] et cardans [Li 08] (rotules à doigt). Ses articulations sont en Nitinol (un alliage superélastique de Nickel Titane pouvant se déformer de 6 à 8 % [Nemat-Nasser 06]). Chaque bras ressemble à une structure à colonne vertébrale, cependant elle n'est pas actionnée par câbles ni par tendons, mais elle est poussée ou tirée par des actionneurs translatifs. L'espace de travail agrandi obtenu est d'environ $400 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$. Après avoir fait un étalonnage géométrique, une erreur de 1,25 % de la longueur de la jambe (soit 1,5 mm) entre le modèle et le robot semble subsister, ce qui reste important.

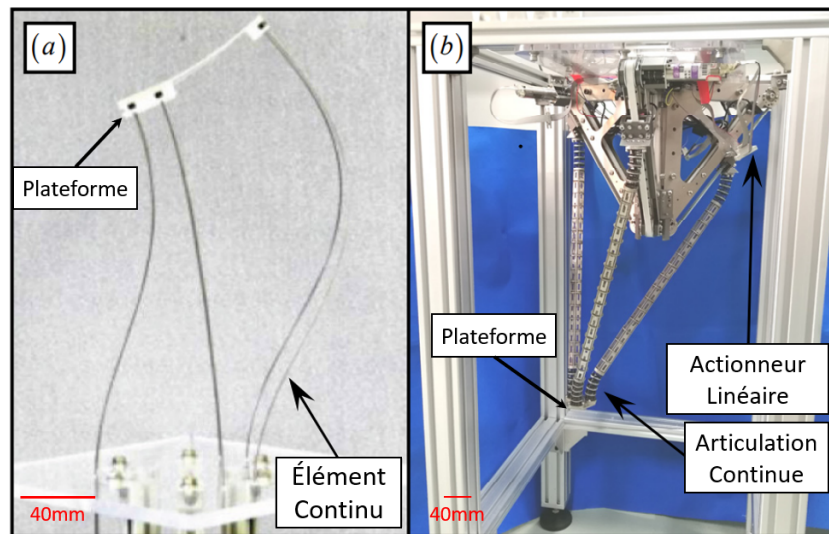


FIGURE I.11 – Prototype de la plateforme de Stewart-Gough continue [Black 18, Till 17b] et robot Delta utilisant des articulations continues [Yang 18]

Créer un RPC ne signifie pas forcément d’avoir des performances accrues en termes d’espace de travail, de manipulabilité et d’absence de singularité. Lilge *et al* ont comparé, dans [Lilge 20], les performances de deux RPC planaires avec la même structure et leur homologue polyarticulé. Ils ont montré qu’une des versions continues avait sensiblement les mêmes performances que le robot polyarticulé, tandis que la seconde était moins performante. Cependant, on pourra noter que la capacité de flexion passive de la structure continue n’avait pas été prise en compte dans la modélisation. La structure continue possède tout de même des avantages que la structure rigide ne possède pas tels que sa sécurité inhérente, sa faible raideur et sa capacité de miniaturisation.

Dans l’article [Orekhov 17], Orekhov *et al.* proposent d’étudier plusieurs structures en introduisant des paliers intermédiaires ou encore un ressort. Ils arrivent à montrer des différences entre les espaces de travail atteints pouvant aller du simple au double. On pourra noter qu’ils montrent une différence avec son modèle de 8 % de la longueur de son robot.

Agrandir l’espace de travail, ne veut pas dire que toutes les positions incluses dedans pourront être atteintes. En effet, les espaces de travail des structures rigides ne sont déjà pas faciles à calculer et cela l’est encore moins pour les structures continues. De plus, des singularités existent à l’intérieur de ces espaces de travail. Alors qu’elles ont été largement étudiées pour les structures polyarticulées, elles ne le sont que très peu pour les RPC dus à la difficulté de modélisation et l’absence de modèle analytique. Altuzarra *et al.* [Altuzarra 21] ont pu les étudier dans un cas particulier, grâce à leur formulation analytique, utilisant des intégrales elliptiques, mais cette modélisation, reposant sur des particularités de leur robot, n’est pas applicable pour le cas général. Ces singularités sont également plus complexes à

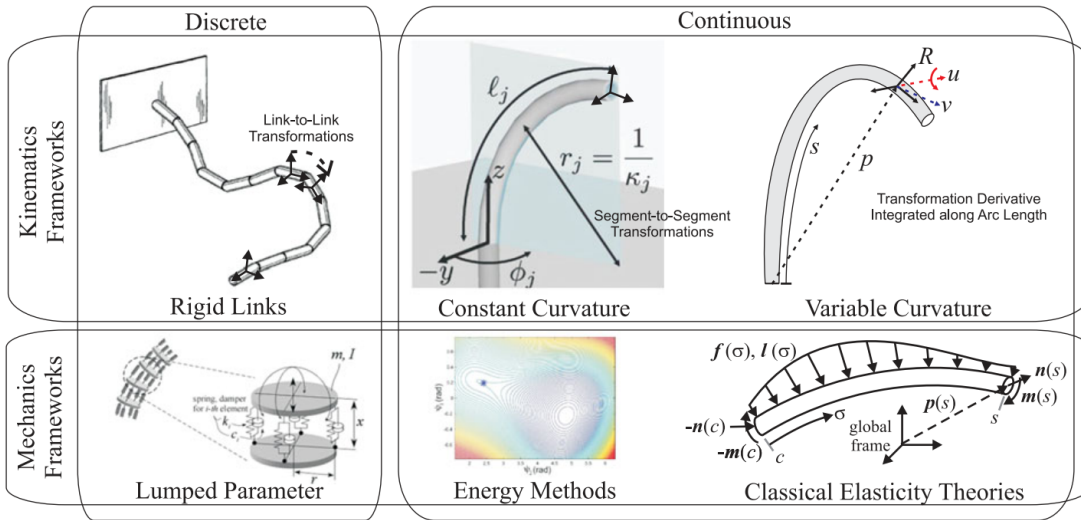


FIGURE I.12 – Différents types de modèles développés pour les robots continus utilisables pour les RPC, extrait de [Burgner-Kahrs 15]

cerner que dans le cas polyarticulé puisqu'elles peuvent provenir de la structure robotique, mais également de la géométrie et du matériau des éléments flexibles déformables (e.g. flambement), qui peuvent introduire des instabilités élastiques comme des sauts brusques d'une position à une autre [Peyron 18].

I.4.2 Modélisation des RPC

La modélisation des robots parallèles est un sujet complexe. Dans le cas continu, cette complexité est augmentée par la nécessité de modéliser les éléments continûment déformables qui sont couplés [Till 17b]. La modélisation des RPC repose sur leur géométrie, leurs coordonnées articulaires ainsi que les efforts qui leur sont appliqués. Cette modélisation géométrico-statique peut être vue en deux parties : une partie géométrique et une partie mécanique.

Pour faire la modélisation, il existe deux approches différentes : l'approche boîte-noire comme les réseaux de neurones [Yip 17], où les paramètres inclus dans le modèle ne présentent rien de physique, et l'approche fondée sur lois de la physique. Dans cette deuxième catégorie, de nombreux modèles sont utilisés et ont fait l'objet d'un état de l'art dans le cas des robots continus [Burgner-Kahrs 15]. La figure I.12 présente différents types de modèles avec leur partie géométrique et mécanique.

Ils peuvent être divisés en deux types, les modèles discrets et les modèles continus. Les modèles discrets sont basés sur une discrétisation par des transformations rigides (e.g. modélisation de Denavit-Hartenberg [Wang 20]), pour la partie géométrique, et par discrétisation utilisant des masses, des ressorts et des amortisseurs [Jung 14] pour la partie mécanique. Cette modélisation permet d'avoir des équations simples, mais elle est limitée par sa justesse.

La partie géométrique des modèles continus peut être séparée en deux : les modèles à courbures constantes qui reposent sur une décomposition en un ensemble de sections dont la fibre neutre est à courbure constante ; et les modèles à courbures variables, où les sections ne sont plus à courbures constantes, mais où la fibre neutre est paramétrée par une abscisse curviligne s et où un repère local attaché en tout point de la fibre neutre varie en fonction d'un taux de variation linéaire \mathbf{v} et d'orientation \mathbf{u} .

La partie mécanique des modèles continus peut être également séparée en deux : la première consiste en une approche énergétique (Euler-Lagrange), la seconde (Newton-Euler) consiste à écrire les sommes des forces et des moments en chaque point de la fibre neutre sous forme d'équations différentielles par rapport à son abscisse curviligne s comme le modèle de Kirchhoff [Takano 17] ou celui de Cosserat [Till 17a, Cosserat 09]. Ces modèles sont plus complets que les modèles discrets apportant une plus grande justesse aux RPC, mais leurs équations ne présentent pas pour un cas général de solution analytique.

Le choix de la modélisation peut se faire suivant plusieurs critères tels que le type d'actionnement, le matériau choisi, la prise en compte des interactions avec l'extérieur (e.g. gravité, frottement, etc.), le niveau de justesse voulu ou encore la vitesse de calcul [Till 19]. À titre d'exemple, sur des structures à colonnes vertébrales (qui présentent plus de travaux que les RPC), Campisano *et al.* [Campisano 20] comparent deux modélisations, une modélisation géométrique utilisant une approche de discrétisation par éléments rigides (en anglais *pseudo rigid body*) et une modélisation de Cosserat. Ils montrent que la modélisation de Cosserat est beaucoup plus précise. Chikhaoui *et al.* proposent une étude [Chikhaoui 19] montrant des erreurs faites par une modélisation utilisant une théorie de poutre d'Euler-Bernouilli et de Cosserat. Ils montrent que la modélisation est deux fois plus précise avec le deuxième type de modélisation. On notera cependant que les erreurs maximales enregistrées entre le modèle et le robot sont entre 4,73 % et 22,73 % de la longueur du robot en fonction du plan de déplacement choisi.

Le choix du modèle et les hypothèses formulées, telles que la prise en compte des forces distribuées extérieures [Aloi 18], les forces exercées par l'actionnement, etc., impactent la justesse du modèle du robot. Orekhov *et al.* [Orekhov 16], par exemple, présentent une amélioration de leur modèle de Cosserat en prenant en compte la tension dans les câbles (responsables de l'actionnement), réduisant ainsi de 50 % l'erreur maximale entre le modèle et l'expérience. Cependant, selon les auteurs, le gain de justesse ne justifie pas la perte de temps de calcul (critère important pour le temps réel).

Les modèles géométrico-statiques des RPC reposent sur des systèmes d'équations différentielles dont la résolution n'est pas triviale. En effet, pour un modèle de Cosserat (modèle le plus utilisé), il n'existe pas de solution analytique due au couplage des éléments continûment déformables [Till 17b, Black 17]. Pour résoudre ces systèmes d'équations, des méthodes numériques itératives sont utilisées pour générer les modèles directs et inverses. Un modèle d'élément continûment déformable complexe mettra plus de temps à se résoudre, présentant un réel défi

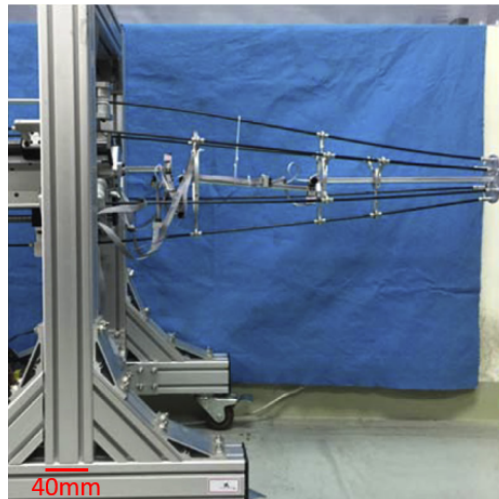


FIGURE I.13 – RPC multi-contraint d'une longueur de 0,781 m constitué de tubes en verres d'un diamètre de 5 mm et d'une plateforme de 40 mm de diamètre étalonné dans [Wu 19]

pour les applications en temps réel [Till 15]. On pourra noter que l'implémentation et l'utilisation des modèles ne sont également pas faciles avec de nombreuses inconnues géométriques et mécaniques [Black 18].

Dans le cas particulier d'un RPC planaire où chaque élément continûment déformable est compris entre deux articulations rotoïdes (une active et une passive), qualifié de 2-RFR (rotoïde flexible rotoïde), une solution analytique aux équations différentielles du modèle de Cosserat peut être trouvée en utilisant des intégrales elliptiques [Altuzarra 19a, Altuzarra 19b]. Cette solution analytique a permis de caractériser de manière rigoureuse l'ensemble des solutions géométriques que pouvait avoir une structure à 2 DdL [Altuzarra 19c].

Avoir un modèle le plus juste possible pouvant être paramétré le plus fidèlement possible est très important de manière à pouvoir identifier les sources d'erreurs et d'incertitudes qui peuvent apparaître plus facilement aux petites échelles.

I.4.3 Précision des RPC

Il n'existe pas d'étude de la précision à proprement parler (en termes de justesse et de répétabilité) que l'on peut attendre des RPCs, si on se réfère au classement de Trivedi [Trivedi 08], il serait possible d'avoir de bonnes performances avec un RPC ayant des éléments continus rigides, mais alors cela perdrait de l'intérêt en termes d'espace de travail.

Dans les études sur les robots continus et les RPC, des informations sont souvent données sur une différence entre le modèle et une position enregistrée du robot, mais cela n'est pas une quantification de la justesse de la structure. À notre connaissance, seules deux études sont relatives à la justesse des RPC. Celle de Wu et Shi, dans [Wu 19] qui présente une méthode d'étalonnage d'un RPC multi-

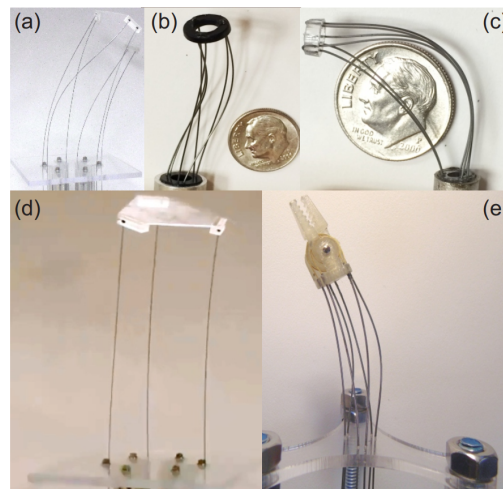


FIGURE I.14 – Exemple de RPC miniatures, extrait de [Black 17], avec en (a) une plateforme de Stewart-Gough de diamètre 87 mm. (b) 10 mm. (c) 5 mm. (d) RPC à trois éléments continus. Stewart-Gough avec une pince de 12 mm de diamètre [Orekhov 15]

contraint¹ (figure I.13). Grâce à elle, ils arrivent à atteindre une valeur d'erreur maximale de leur modèle de 13,9 mm (1,8 % de la taille des éléments continus). L'étude d'Orekhov [Orekhov 16] *et al.*, porte quant à elle sur l'analyse des erreurs de positionnement de son RPC avec pince pour 42 configurations. Ils observent, pour son modèle prenant en compte les efforts exercés par l'actionnement, une erreur maximale de 2,40 mm (5,67 % de la taille des éléments continus) et de 21,8°. On peut remarquer que les erreurs relatives finales sont importantes et ne montrent pas la capacité de précision des RPC pour des applications aux échelles micro- et nanométriques.

Bien qu'elle n'eût jamais fait l'objet d'une étude à proprement parler, la répétabilité est un peu plus souvent quantifiée. Orekhov *et al.* ont montré une répétabilité maximale de 1,36 mm (3,24 %) en position et 3,52 ° en orientation [Orekhov 16]. Du *et al.* ont montré une répétabilité maximale de 388 μm [Du 19]. Sun *et al.* ont proposé une étude de la répétabilité sur 10 positions sur un RPC contrôlé par une commande basée sur un correcteur proportionnel intégral dérivé. Ils ont pu montrer une répétabilité maximale de 3,26 mm et de 6,63 mm selon si les câbles d'actionnement sont bloqués ou pas [Sun 19].

I.4.4 Miniaturisation et micro-positionnement des RPC

La miniaturisation des RPC n'a été que très peu étudiée jusqu'ici. La plupart des réalisations font plusieurs dizaines ou centaines de millimètres. Les RPC les plus petits sont ceux destinés à la chirurgie d'Orekhov *et al.* [Orekhov 15]. La figure I.14 présente différentes tailles de RPC présentées dans la thèse de Black [Black 17].

1. La notion de multi-contraint désigne le fait de rajouter des contraintes intermédiaires dans l'objectif d'améliorer les performances du robot telles que l'espace de travail

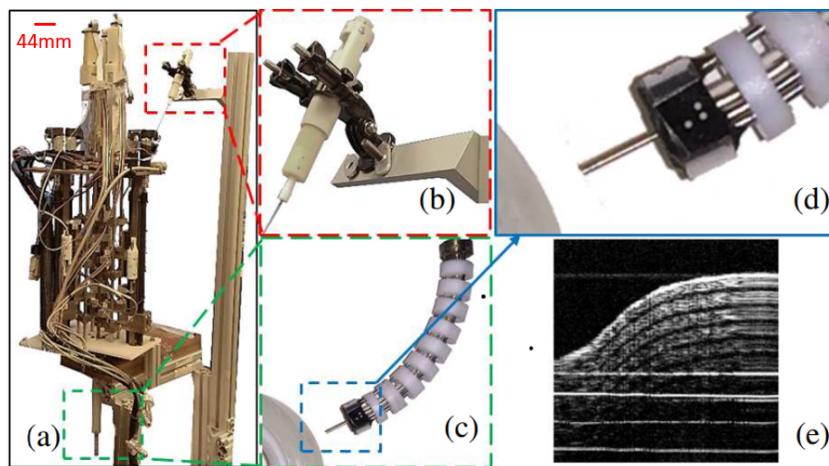


FIGURE I.15 – Robot continu avec sonde OCT. (a) Configuration expérimentale complète. (b) Unité d'actionnement de la sonde OCT. (c) Continuum robot de 44 mm de longueur (d) marqueur 3 points pour la vision et extrémité de la sonde OCT. (e) image OCT d'un rouleau de scotch

Il n'existe, à notre connaissance, aucun RPC identifié comme pouvant proposer une résolution micrométrique. Il existe cependant un exemple de robot continu à multiples colonnes vertébrales (figure I.15) proposé par Del Giudice *et al* [Del Giudice 17] qu'il semble pertinent de présenter puisqu'il propose des mouvements macro/micrométrique. Le principe est d'avoir deux colonnes imbriquées, la première est composée d'un matériau rigide et la seconde est composée de Nitinol. Des mouvements macrométriques sont réalisés en poussant et tirant sur la première colonne pour déformer l'ensemble du robot. Les mouvements micrométriques résultent d'un actionnement indirect puisque c'est le changement des contraintes au niveau des sections de la seconde colonne qui va produire le mouvement. Un étalonnage de la structure, basé sur un modèle simplifié de robot à multiples colonnes [Simaan 04], a été effectué par une approche énergétique pour un résultat de correspondance avec le modèle moyen de $4,76 \mu\text{m}$ [Wang 19], soit un rapport erreur sur longueur du robot de 10,8 %.

I.5 CONCLUSION

Avec le développement des micro- et nanotechnologies, les besoins des robots de positionnement mêlant grande précision (résolution, répétabilité et justesse), large espace de travail et compacité ont augmenté. De nouvelles structures plus versatiles, polyvalentes et précises ont besoin d'être développées pour pouvoir y répondre et faire face aux défis inhérents des échelles micro- et nanométriques.

Dans ce chapitre, les notions, les particularités des petites échelles et les attentes auxquelles devront répondre ces nouvelles solutions robotiques ont été détaillées. Pour pouvoir faire face à ces défis, différentes architectures et typologies de solu-

tions robotiques ont été présentées de manière à identifier celle présentant le plus de potentiel. En considérant de nombreux compromis, le choix ambitieux d'étudier la précision de positionnement que peuvent proposer les structures robotiques parallèles continues a été acté.

Afin de faire cette étude, nous avons présenté les différents types de modélisation pouvant être utilisés. Le choix entre ces différents modèles dépendra de la structure du RPC mais également des objectifs de précision visés. Il résultera d'un compromis entre justesse du modèle et implémentation (e.g. temps de calcul). Les grandes déformations permises par les éléments continus flexibles permettent d'obtenir un espace de travail supérieur ou égal à celui qui aurait pu être obtenu pour des structures polyarticulées classiques. Un manque d'information et d'études sur les performances des RPC en termes de répétabilité et de justesse a été exhibé. Le potentiel de miniaturisation des RPC a été observé grâce à des prototypes réalisés pour la chirurgie minimalement invasive. Pour finir, nous avons soulevé l'absence de structure présentant une résolution sub-micrométrique.

Dans cette thèse, le potentiel des RPC pour pouvoir répondre aux besoins de précision de positionnement à l'échelle micrométrique sera étudié. Pour répondre à ces enjeux, nous proposons dans le chapitre suivant une nouvelle architecture de RPC, nommée Triskèle-Bot.

Chapitre II

Triskèle-Bot : Nouveau concept de Robot Parallèle Continu Planaire

II.1	Introduction	28
II.2	Concept du Triskèle-Bot	28
II.3	Formulation des modèles du Triskèle-Bot	30
	II.3.1 Conditions aux extrémités des éléments flexibles conti- nus.....	35
	II.3.2 Conditions d'équilibre statique de la plateforme	36
II.4	Résolutions des modèles du Triskèle-Bot	36
II.5	Espace de travail du Triskèle-Bot	38
II.6	Conclusion	40

Les robots parallèles continus présentent du potentiel pour répondre aux besoins en positionnement à l'échelle micrométrique, et ainsi, remplacer les structures à articulations flexibles qui souffrent d'un compromis entre répétabilité et espace de travail. Ce chapitre est le début d'une étude cherchant à démontrer ce potentiel en quantifiant les performances que les RPC peuvent atteindre en termes d'espace de travail, de répétabilité et de justesse. Le concept de la structure, appelée Triskèle-Bot, avec laquelle cette étude sera effectuée est présenté. Ses modèles géométrico-statique direct (MGD) et inverse (MGI) permettent de simuler son comportement. L'espace de travail de la structure proposée est étudié grâce à eux.

II.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, les solutions robotisées pouvant être considérées pour répondre aux besoins des applications à petites échelles ont été présentées. Parmi ces structures, les robots parallèles continus (RPC) exhibent un intérêt au vu de leurs caractéristiques intrinsèques. Néanmoins, la méconnaissance de leurs performances de répétabilité et de justesse fait qu'elles ne sont pas des solutions privilégiées pour réaliser des tâches de positionnement précis malgré leur espace de travail conséquent.

L'objectif de ce chapitre est de simuler l'espace de travail que peut fournir un RPC destiné au positionnement à l'échelle micrométrique. Pour cela, dans un premier temps, le concept d'un nouveau RPC, dénommé Triskèle-Bot est présenté.

Sa modélisation repose sur un système d'équations différentielles, fondées sur un modèle de poutre de Kirchhoff, contraintes par des conditions limites. Ce système d'équations ne possède pas de solution analytique dans le cas général. Des méthodes de résolution numérique, adaptées au comportement non-linéaire du RPC, sont donc employées afin d'obtenir un modèle géométrico-statique direct (MGD) et inverse (MGI). L'implémentation de ces algorithmes de résolution est décrite et les modèles résultants sont utilisés, dans un dernier temps, pour calculer l'espace de travail que peut fournir le nouveau RPC proposé.

II.2 CONCEPT DU TRISKÈLE-BOT

Pour démontrer qu'un RPC peut permettre un espace de travail conséquent avec une grande répétabilité, une structure parallèle continue planaire est suffisante. En plus de valider l'objectif fixé, ce choix permet l'utilisation d'un système de mesure multidimensionnel à haute résolution (difficulté majeure de la microrobotique [Guelpa 17]) développé au sein du laboratoire.

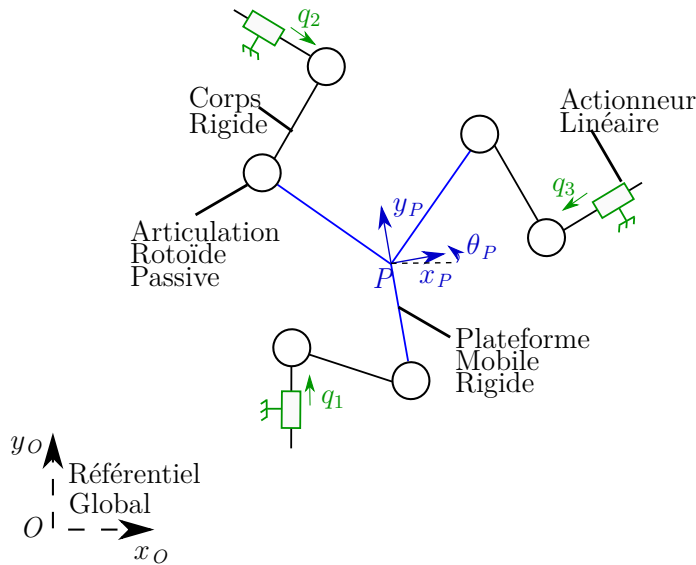



FIGURE II.1 – Structure planaire polyarticulée 3-PRR dont s’inspire le RPC proposé

Parmi les structures parallèles planaires possibles, il a été choisi de s’inspirer d’une structure polyarticulée conventionnelle, le 3-PRR (figure II.1), qui est une structure pleinement parallèle¹ à trois DdL, non-redondante, à chaînes cinématiques identiques. Ces dernières sont composées d’une articulation prismatique (P) active et deux articulations rotoïdes (R) passives. Cette structure est composée de 3 chaînes cinématiques liant une base (corps de référence) à une plateforme mobile, qui peut se mouvoir suivant trois DdL : deux translations x_P , y_P et une rotation θ_P autour de la normale à la base. Ces mouvements, effectués dans le plan $x_O y_O$, dépendent de trois coordonnées articulaires q_1 , q_2 , q_3 .

Cette structure polyarticulée peut être transformée en structure continue en remplaçant dans chaque chaîne les articulations passives et les corps les reliant par un unique élément flexible continu. La structure obtenue peut alors être qualifiée de 3-PF. Ces éléments flexibles ont pour objectif de transmettre les mouvements, les forces et les moments introduits par les actionneurs jusqu’à la plateforme. Cette dernière se déplacera alors, comme pour le 3-PRR, dans le plan en translations et en rotation. Cette nouvelle structure est schématisée en figure II.2.

Dans leur position initiale de référence, les trois chaînes cinématiques sont espacées angulairement d’un angle de 120 degrés, donnant une symétrie de rotation dans l’architecture du robot, rappelant le symbole du Triskèle .

Dans la suite de cette thèse, le RPC proposé sera dénommé Triskèle-Bot pour la contraction entre le mot Triskèle et le mot robot.

1. La notion de pleinement parallèle est utilisée lorsque le nombre de chaînes cinématiques est au moins égal au nombre de DdL de la plateforme, que chaque chaîne ne comporte qu’un seul actionneur et que chaque corps constituant une chaîne ne peut pas être relié à plus de deux corps [Gosselin 85, Dombre 88]

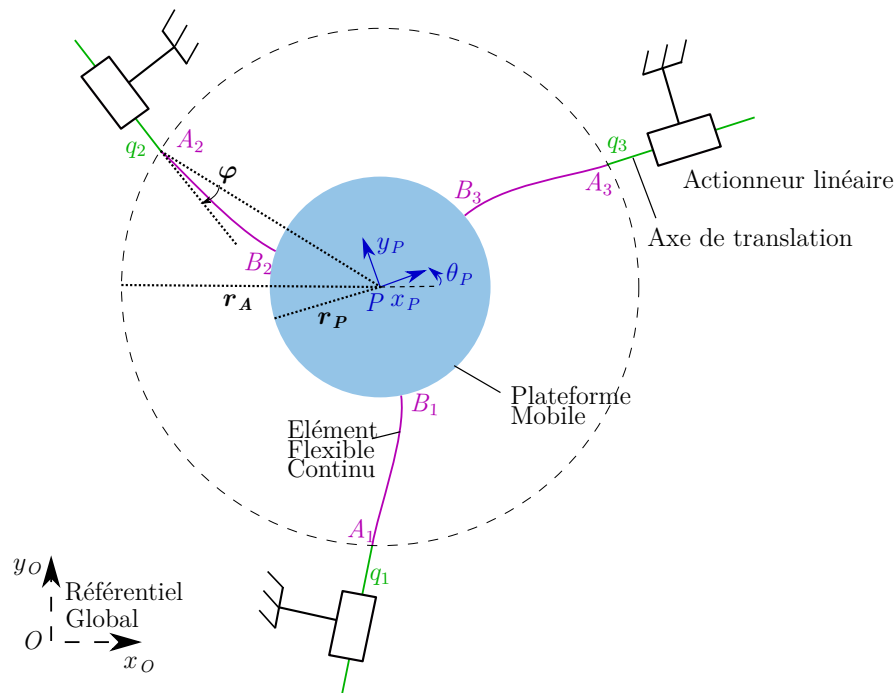


FIGURE II.2 – Schéma du Triskèle-Bot avec ses paramètres de construction

Sa géométrie peut être décrite par 4 paramètres de construction :

- l est la longueur à vide d'un élément flexible dans sa configuration libre de contraintes (i.e. élément droit, ne subissant pas de contrainte).
- r_P est le rayon d'un cercle virtuel défini entre le centre géométrique de la plateforme et les 3 extrémités distales B_1 , B_2 , B_3 des éléments flexibles qui sont fixés dessus (i.e. égale au rayon de la plateforme).
- r_A est défini par la position des actionneurs dans leur position de références (position initiale où les coordonnées articulaires sont nulles) et correspond, alors, au rayon d'un cercle virtuel défini par les 3 extrémités proximales A_1 , A_2 , A_3 des éléments flexibles fixés sur ces actionneurs.
- φ correspond à l'angle entre la direction d'actionnement de l'actionneur linéaire et la direction vers le centre du cercle (pour $\varphi = 0$, la direction d'actionnement passe par le centre du cercle ; pour $\varphi = \pi/2$, elle est tangente au cercle). Cette valeur est identique pour les trois chaînes.

II.3 FORMULATION DES MODÈLES DU TRISKÈLE-BOT

La synthèse d'un modèle est une étape importante dans l'étude d'une structure robotique. En effet, l'objectif du modèle est de simuler le comportement du robot de sorte à prévoir, corriger et/ou estimer théoriquement certaines de ses performances.

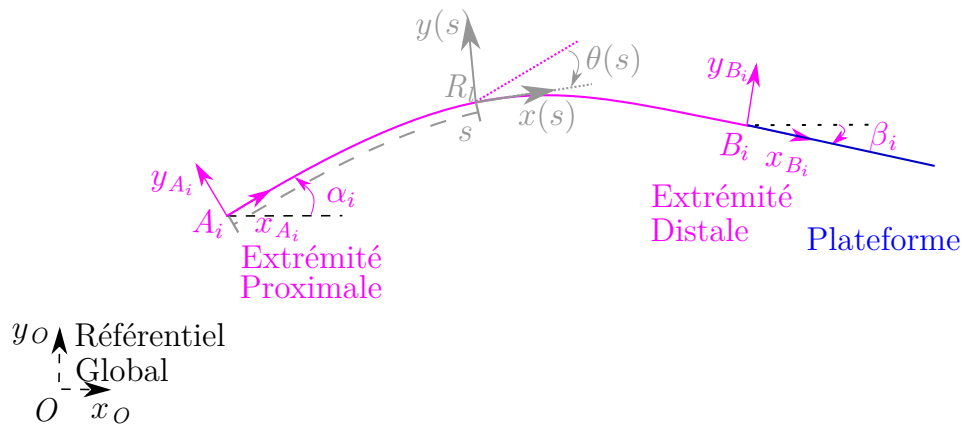


FIGURE II.3 – Schéma détaillé de la modélisation d'un élément flexible

Le modèle géométrique direct permet de connaître les coordonnées cartésiennes de la plateforme en fonction des coordonnées articulaires. Le modèle géométrique inverse permet, quant à lui, de déterminer les coordonnées articulaires correspondantes à une pose cartésienne donnée. Dans le cas de robots continus, ces deux modèles dépendent fortement des contraintes internes des éléments continus déformables, c'est pourquoi des modèles géométrico-statiques sont habituellement considérés. Dans la suite de cette thèse, comme seulement le cas statique sera considéré et comme cela est usuellement pratiqué en robotique continue, le terme « statique » sera omis lorsque l'on parlera des modèles puisque la modélisation, pour une configuration donnée, repose sur des hypothèses faites sur un état d'équilibre de forces.

La modélisation d'un robot parallèle continu repose grandement sur celle de ses éléments flexibles (propriétés, conditions aux extrémités, etc.) et de leur couplage. En effet, une des grandes difficultés de la modélisation d'une structure parallèle est l'interdépendance de chaque chaîne cinématique. Dans le cas des robots polyarticulés, cette interdépendance n'est pas simple, mais le caractère rigide des éléments constitutifs de chaque chaîne permet une mise en équation analytique qui a été grandement étudiée. Dans le cas continu, l'élasticité des éléments et leurs grandes déformations impliquent des équations fortement non-linéaires qui ne possèdent pas, dans le cas général, de solution analytique.

Comme il a été introduit dans le chapitre précédent, il existe de nombreux modèles avec des hypothèses différentes pour modéliser ces éléments flexibles. En fonction des hypothèses considérées, le modèle peut être plus ou moins complexe. Dans un cadre applicatif, il faut faire un compromis entre un modèle riche, dont les paramètres pourront être identifiés par un étalonnage, et sa difficulté d'implémentation et d'utilisation.

La modélisation d'un élément flexible continu, illustrée en figure II.3, se construit en considérant cet élément comme étant un objet à une dimension dont les variables d'état dépendent de l'abscisse curviligne le long de sa fibre neutre. Cette dernière désigne une ligne imaginaire passant par le centre de gravité des sections droites.

L'abscisse curviligne est paramétrée par une variable scalaire s qui varie entre 0 et la longueur de l'élément flexible l . On rattache un repère local R_l à l'intersection entre la fibre neutre et la section transversale de l'élément flexible à l'abscisse curviligne s . Ce repère est caractérisé par sa position $\mathbf{p}(s) = [x(s), y(s), z(s)]^T$ et son orientation $\theta(s)$ dans le repère associé à l'extrémité proximale. Cette position et orientation évoluent en fonction de la vitesse linéaire de l'origine du repère local $\mathbf{v}(s)$ (taux de variation linéaire) et du vecteur de courbures $\mathbf{u}(s)$ (taux de variation angulaire), tel que :

$$\begin{aligned}\mathbf{p}'(s) &= \mathbf{R}(s)\mathbf{v}(s) \\ \mathbf{R}'(s) &= \mathbf{R}(s)\mathbf{U}(s)\end{aligned}\quad (\text{II.1})$$

Où $(.)'$ définit la dérivée suivant s tel que $\mathbf{p}'(s) = \frac{d\mathbf{p}(s)}{ds}$, \mathbf{R} désigne la matrice de rotation entre le repère local et le repère de l'extrémité proximale, et $\mathbf{U}(s)$ définit la matrice antisymétrique associée au vecteur $\mathbf{u}(s) = [u_1, u_2, u_3]^T$ tel que :

$$\mathbf{U}(s) = \begin{bmatrix} 0 & -u_3 & u_2 \\ u_3 & 0 & -u_1 \\ -u_2 & u_1 & 0 \end{bmatrix}\quad (\text{II.2})$$

On définit les efforts tranchants et les moments fléchissants internes, $\mathbf{n}(s)$ et $\mathbf{m}(s)$, qu'exercent la matière en $\mathbf{p}(s + ds)$ sur $\mathbf{p}(s)$ pour une section ds infiniment petite dans le repère global (O, x_O, y_O, z_O) .

Les efforts tranchants et moments fléchissants internes peuvent être calculés grâce aux vecteurs de déformations géométriques $\mathbf{v}(s)$ et $\mathbf{u}(s)$ et à la loi constitutive du matériau de l'élément flexible. En utilisant une relation de constitution linéaire, ils peuvent être calculés tels que :

$$\begin{aligned}\mathbf{n}(s) &= \mathbf{R}(s)\mathbf{K}_{se}(\mathbf{v} - \mathbf{v}^*), \quad \mathbf{K}_{se} = \begin{bmatrix} AG & 0 & 0 \\ 0 & AG & 0 \\ 0 & 0 & AE \end{bmatrix} \\ \mathbf{m}(s) &= \mathbf{R}(s)\mathbf{K}_{bt}(\mathbf{u} - \mathbf{u}^*), \quad \mathbf{K}_{bt} = \begin{bmatrix} EI & 0 & 0 \\ 0 & EI & 0 \\ 0 & 0 & JG \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{II.3})$$

E et G désignent le module d'Young et le module de cisaillement du matériau, A est l'aire de la section de la poutre, I désigne le moment quadratique et J le moment quadratique polaire de la section de la poutre. Dans le cas où la poutre est initialement droite, les variables \mathbf{v}^* et \mathbf{u}^* sont égales à $[0 \ 0 \ 1]^T$ et $[0 \ 0 \ 0]^T$ respectivement.

Les taux de variations des efforts tranchants et des moments fléchissants internes suivent les équations non-linéaires classiques pour une poutre de Cosserat :

$$\begin{aligned}\mathbf{n}'(s) &= -\mathbf{f}(s) \\ \mathbf{m}'(s) &= -\mathbf{p}'(s) \times \mathbf{n}(s) - \mathbf{l}(s)\end{aligned}\quad (\text{II.4})$$

$\mathbf{f}(s)$ et $\mathbf{l}(s)$ désignent les forces et couples distribués appliqués par unité de longueur sur la poutre.

Ces équations forment avec les équations II.1 un système d'équations décrivant l'évolution des paramètres d'états en fonction de l'abscisse curviligne s . Ce système d'équations est général et valable pour n'importe quelle poutre se déformant dans l'espace. Dans le cas de la structure proposée, les éléments flexibles sont très élancés, i.e. la dimension caractéristique de leur section transversale est au moins cent fois plus petite que la longueur de l'élément. Dans ce cas, le modèle de Kirchhoff peut être utilisé en négligeant le cisaillement et l'élongation. À partir de cette hypothèse, le vecteur \mathbf{v} correspond au vecteur unitaire tangent à la déformation $[0 \ 0 \ 1]^T$.

On considère maintenant le plan $(x_{A_i} A_i y_{A_i})$. La matrice de rotation \mathbf{R} ne dépend plus que de l'angle $\theta(s)$ tel que :

$$\mathbf{R}(s) = \begin{bmatrix} \cos \theta(s) & -\sin \theta(s) & 0 \\ \sin \theta(s) & \cos \theta(s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

sa dérivée devient donc :

$$\mathbf{R}'(s) = \begin{bmatrix} -\sin \theta(s) & -\cos \theta(s) & 0 \\ \cos \theta(s) & -\sin \theta(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \theta'(s) \quad (\text{II.6})$$

Le taux de variation angulaire devient donc :

$$\mathbf{U}(s) = \mathbf{R}(s)^T \mathbf{R}'(s) = \begin{bmatrix} 0 & -\theta'(s) & 0 \\ \theta'(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -u_3(s) & 0 \\ u_3(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

À partir de la dernière équation, il peut être déduit que seule la troisième composante de \mathbf{u} n'est pas nulle, ce qui est parfaitement logique au vu de l'hypothèse effectuée.

En reprenant le système d'équations (équations II.1 et II.4) on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} x'(s) \\ y'(s) \\ \theta'(s) \\ n'_1(s) \\ n'_2(s) \\ m'_3(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta(s) \\ \sin \theta(s) \\ \frac{m_3(s)}{EI} + u_3^* \\ -f_1(s) \\ -f_2(s) \\ n_1(s) \sin \theta(s) - n_2(s) \cos \theta(s) - l_3(s) \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Où u_3^* est nul lorsque la poutre est droite à son état libre de contraintes, n_1 , n_2 et f_1 , f_2 sont respectivement les composantes en x et y des efforts tranchants et de la force distribuée, l_3 et m_3 représentent les composantes du moment fléchissant interne et du moment distribué suivant l'axe z .

En faisant l'hypothèse qu'aucune force ni moment distribués ne s'exercent sur les éléments flexibles, les vecteurs \mathbf{f} et \mathbf{l} sont nuls. Les trois dernières équations du système d'équations (équations II.8) peuvent donc se réécrire :

$$\begin{cases} n'_1(s) \\ n'_2(s) \\ m'_3(s) \end{cases} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ n_1(s) \sin \theta(s) - n_2(s) \cos \theta(s) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Les efforts tranchants \mathbf{n} sont donc constants.

Les équations seront discrétisées et intégrées de sorte à obtenir la forme de l'élément flexible avec ses contraintes internes. La solution obtenue dépendra des conditions aux extrémités. Les détails sur l'implémentation et la résolution seront expliqués plus tard dans ce chapitre.

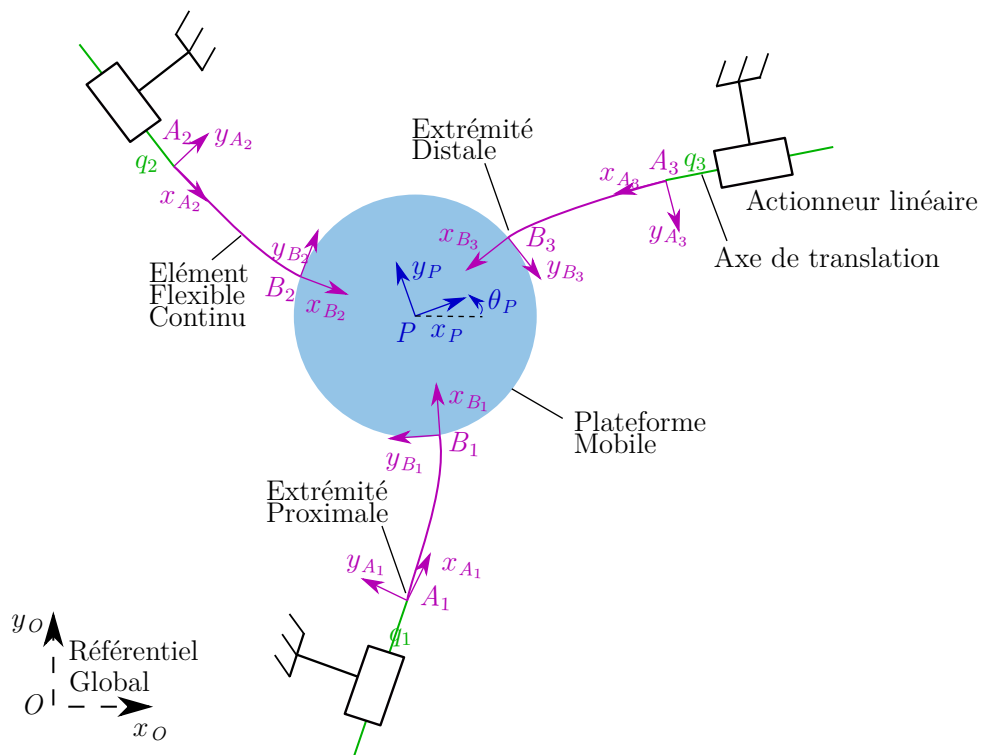


FIGURE II.4 – Schéma du Triskèle-Bot détaillant les extrémités des éléments flexibles

II.3.1 Conditions aux extrémités des éléments flexibles continus

Le modèle de poutre décrit précédemment seul ne suffit pas à connaître la disposition, la forme et les contraintes internes des éléments flexibles continus constituant le robot. En effet, comme ces derniers sont reliés entre eux par la plateforme, des interactions de couplage doivent être prises en compte. La figure II.4 schématise le Triskèle-Bot avec l'ensemble des repères associés aux extrémités des éléments flexibles.

II.3.1.a Conditions aux extrémités proximales

Les extrémités proximales des éléments flexibles du robot correspondent aux points d'encastrement A_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ avec la fixation vissée sur l'actionneur i . Au travers de cette fixation, chacun des éléments flexibles va pouvoir transmettre les mouvements, forces et moments fournis par les actionneurs. La position des points A_i dans le repère global R_O dépend donc directement de la coordonnée articulaire q_i , $i \in \{1, 2, 3\}$. Lorsque ces coordonnées articulaires sont nulles, le robot est dans sa configuration initiale de référence.

$${}^O\mathbf{T}_{A_i} = f(\mathbf{q}_i) \quad (\text{II.10})$$

II.3.1.b Conditions aux extrémités distales

Les extrémités distales correspondent aux points d'ancrage entre les éléments flexibles continus et la plateforme. Les points B_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ illustrent les positions de ces extrémités sur la figure II.4. Les éléments flexibles continus étant encastres dans des fixations directement collées sur une plateforme rigide, la position des points B_i dans le repère global R_O dépend donc directement de la position de cette dernière. En fonction du type de plateforme (rigide, souple, reconfigurable) et le type d'ancrage (liaison pivot, encastrement, etc.) les relations existantes entre ces extrémités distales peuvent être plus ou moins difficiles à modéliser. Ce couplage induit par cette connexion entre ces extrémités rend la modélisation des RPC particulièrement complexe. Il a été choisi d'encastrer les éléments flexibles à des fixations collées sur une plateforme rigide. Cette solution implique des conditions de corps rigides entre les différentes extrémités.

$${}^O\mathbf{T}_{B_i} = g(x_P, y_P, \theta_P) \quad (\text{II.11})$$

II.3.1.c Équation de fermeture

Les positions des extrémités des éléments flexibles peuvent donc être obtenues de deux manières différentes, soit par l'intégration des équations différentielles énoncées précédemment, soit en considérant les conditions aux extrémités et la position de la plateforme dans le repère globale. Les conditions rigides mises en jeu ici peuvent donc être traduites par l'équation de fermeture géométrique suivante :

$${}^{A_i}\mathbf{T}_{B_i} = {}^{A_i}\mathbf{T}_O \cdot {}^O\mathbf{T}_{B_i} \quad (\text{II.12})$$

II.3.2 Conditions d'équilibre statique de la plateforme

Ces conditions géométriques sont interdépendantes des conditions d'équilibre statique de la plateforme qui décrivent l'équilibre des forces et des moments exercés sur la plateforme exprimé dans le repère global. Les équations de cet équilibre mécanique sont les suivantes :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 [\mathbf{n}_i(l_i)] - \mathbf{f}_P = 0 \\ \sum_{i=1}^3 [\mathbf{p}_{B_i} \times \mathbf{n}_i(l_i) + m_i] - \mathbf{p}_P \times \mathbf{f}_P - m_P = 0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Où \mathbf{f}_P et m_P désignent les forces et les moments extérieurs s'exerçant sur le point P de la plateforme, \mathbf{p}_{B_i} et \mathbf{p}_P correspondent respectivement à la position de l'extrémité distale B_i et à la position du point P de la plateforme dans le repère global R_O .

II.4 RÉOLUTIONS DES MODÈLES DU TRISKÈLE-BOT

Le comportement du robot, que ce soient ses actionneurs, ses chaînes cinématiques ou sa plateforme, est décrit par le système des équations différentielles (équations II.8 et II.9) contraintes par les conditions aux limites (équations II.12 et II.13) énoncées précédemment. Dans le cas général des RPC, il n'existe pas de solution analytique pour ce problème.

Ce système d'équations peut être résolu numériquement en utilisant une méthode de tir pour gérer les conditions aux limites des extrémités proximales et distales (qu'on désignera respectivement par initiales et finales). Le principe de cette méthode de résolution numérique est le suivant. Les équations différentielles de chaque élément continu sont intégrées depuis leur extrémité proximale jusqu'à leur extrémité distale en ne considérant que les conditions limites initiales. L'état final (positions, efforts tranchants et moments fléchissants de chaque jambe à leur extrémité distale) obtenu est alors comparé avec celui désiré (conjecturé pour le MGD ou connu pour le MGI) aux conditions limites finales, formant ainsi un vecteur $\boldsymbol{\xi} = [\boldsymbol{\xi}_p \ \boldsymbol{\xi}_\theta \ \boldsymbol{\xi}_n \ \boldsymbol{\xi}_m]^T$ composé des différents termes suivants :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}_p &= \text{trans} ({}^{A_i}\mathbf{T}_{B_i} - {}^{A_i}\mathbf{T}_O \cdot {}^O\mathbf{T}_P \cdot {}^P\mathbf{T}_{B_i}) \\ \boldsymbol{\xi}_\theta &= \text{angle} ({}^{A_i}\mathbf{T}_{B_i} - {}^{A_i}\mathbf{T}_O \cdot {}^O\mathbf{T}_P \cdot {}^P\mathbf{T}_{B_i}) \\ \boldsymbol{\xi}_n &= \sum_{i=1}^3 [\mathbf{n}_i(l_i)] \\ \boldsymbol{\xi}_m &= \sum_{i=1}^3 [\mathbf{p}_{B_i} \times \mathbf{n}_i(l_i) + m_i] \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

L'état initial (positions, efforts tranchants et moments fléchissants de chaque jambe à leur extrémité proximale) est alors changé de sorte à obtenir un nouvel état final plus proche du désiré. Cette opération est répétée jusqu'à atteindre une

TABLE II.1 – Variables inconnues, entrées, sorties pour la résolution des deux modèles géométrico-statiques. Les variables physiques inconnues et les sorties sont conjecturées et modifiées itérativement par l’algorithme de tir. L’index $i \in \{1, 2, 3\}$ représente le numéro de la chaîne cinématique.

Modèle	Variables physiques inconnues	Entrées	Sorties
MGD	\mathbf{n}_i, m_i	q_i	\mathbf{p}_P, θ_P
MGI	\mathbf{n}_i, m_i	\mathbf{p}_P, θ_P	q_i

valeur de tolérance fixée. Ce raisonnement itératif est posé sous la forme d’un problème d’optimisation dont la fonction objectif est la somme des carrés des composantes du vecteur ξ . Les variables considérées en entrée et en sortie de ce problème d’optimisation dépendent du modèle considéré comme le montre le tableau II.1.

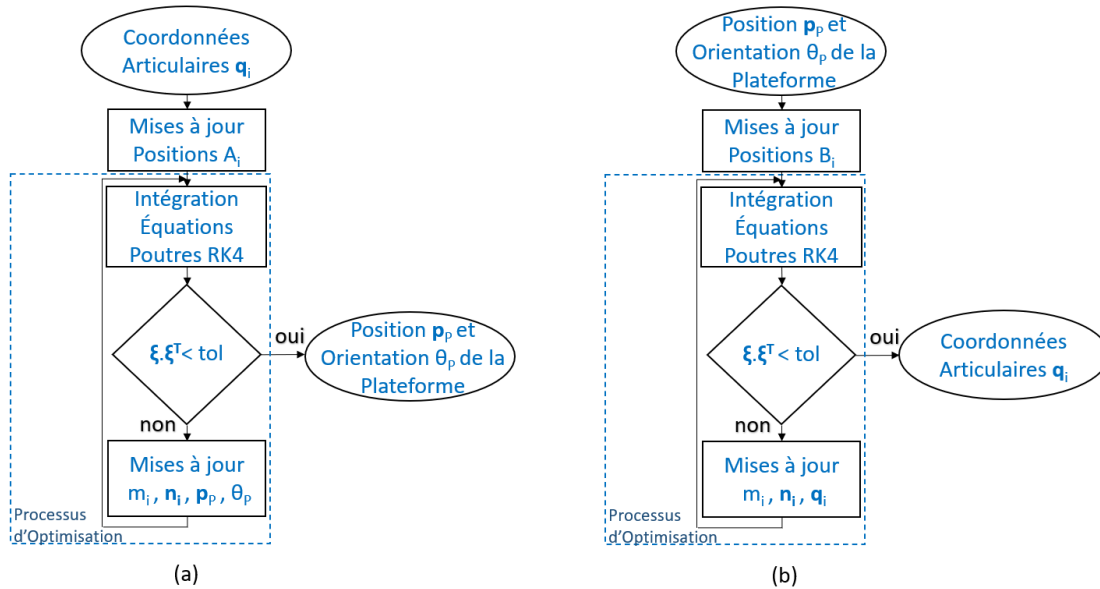


FIGURE II.5 – Logigrammes des méthodes de résolution du système des équations différentielles contraintes par les conditions aux limites (a) le Modèle Géométrique Direct (MGD) et (b) le Modèle Géométrique Inverse (MGI). Dans les deux cas, l’intégration spatiale des équations des poutres se fait en utilisant une méthode de Runge-Kutta d’ordre 4 (RK4). ξ est le résidu du processus d’optimisation dont le produit doit être inférieur à une valeur de tolérance « tol. »

L’implémentation de cette méthode de résolution pour obtenir le MGD et le MGI est illustrée par les deux logigrammes de la figure II.5. L’intégration des équations relatives aux éléments flexibles est effectuée grâce à un algorithme de Runge-Kutta d’ordre quatre. Dans le cas du MGD, les positions des extrémités proximales resteront des valeurs d’états fixes alors que les autres changeront. Dans

le cas du MGI, ce sont celles des extrémités distales. Dans les deux cas, les valeurs d'efforts tranchants et de moments fléchissants sont calculées et initialement inconnues. Le processus d'optimisation est réalisé en utilisant la fonction précompilée `lsqnonlin` du logiciel MatLab et la valeur de tolérance tol choisie de 10^{-16} . Cette valeur de tolérance correspond à une valeur d'erreurs en positions ξ_p inférieures au dixième de micromètre.

La valeur du résidu de l'optimisation permet de définir si une pose désirée peut être atteinte dans l'espace cartésien (utilisation du MGD) ou dans l'espace articulaire (utilisation du MGI). En effet, un résidu supérieur à la valeur de tolérance signifiera une non-faisabilité de la tâche. Il faut néanmoins faire attention aux valeurs initialement conjecturées, car les résultats des méthodes de tir en sont dépendants. Des valeurs initiales trop éloignées des valeurs vraies pourraient amener à de mauvaises conclusions (potentiel minima locaux). Ainsi, lors de l'utilisation des modèles, des valeurs d'entrées successives proches seront privilégiées.

On peut noter que la réciprocité entre le MGD et le MGI a été vérifiée en considérant en entrée de l'un, la sortie de l'autre. Une fois les deux modèles construits, l'espace de travail de la structure proposée peut être estimé.

II.5 ESPACE DE TRAVAIL DU TRISKÈLE-BOT

Dans le cas d'un robot continu où les articulations ne sont pas localisées, la connaissance de l'espace de travail est très importante. En effet, de mauvais positionnements peuvent induire de grandes contraintes internes dans les éléments flexibles. Ces contraintes peuvent alors provoquer la déformation permanente ou la rupture de ces derniers.

Décrire l'espace de travail d'un RPC n'est pas une chose facile d'autant plus que ses éléments flexibles ne peuvent pas être bloqués de sorte à en dessiner ses frontières. Réaliser l'ensemble des combinaisons des coordonnées articulaires demanderait beaucoup trop de temps, que ce soit en simulation ou expérimentalement, même avec une structure planaire.

Une méthode inspirée de celle proposée par Oetomo *et al.*, dans leur article [Oetomo 08], a donc été utilisée pour déterminer l'espace de travail du Triskèle-Bot. Elle consiste à fixer l'orientation de la plateforme et à faire varier sa position. Cette pose est considérée comme étant l'entrée du MGI et on regarde si une solution dans l'espace articulaire existe. Si cette solution existe (i.e. si la valeur de résidu inférieure est à la valeur de la tolérance), la position cartésienne est considérée comme étant dans l'espace de travail global. Une pose adjacente dans la même direction est alors considérée et le processus recommence. Si la solution n'existe pas, la dernière solution valide est définie comme étant la limite de l'espace de travail en position et une nouvelle direction de déplacement est considérée.

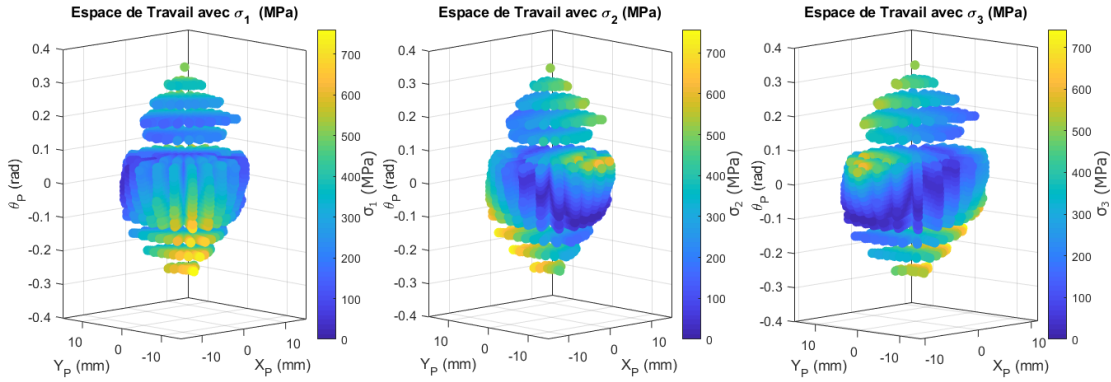


FIGURE II.6 – Espace de travail du 3-PF présentant les contraintes maximales σ_i dans chacun des trois bras. Chaque niveau correspond à l'espace de travail en position pour l'orientation donnée. Les différents niveaux correspondent à l'espace de travail en orientation.

Pour trouver les limites de cet espace de travail, l'espace cartésien est balayé en utilisant des trajectoires simulées en forme de spirale avec des positions successives proches. Les variations d'orientations ont été effectuées avec un pas de 125 mrad entre $\pm 0,1$ rad et un pas 0,1 rad entre $\pm 0,1$ rad et $\pm 0,4$ rad.

Cet espace atteignable a été calculé en utilisant les valeurs des paramètres du prototype dont la construction sera détaillée dans le chapitre suivant. L'élément flexible choisi présente un module d'Young de 69,22 GPa, un diamètre d de 125 μm et une longueur l de 30 mm de manière à respecter les conditions nécessaires aux hypothèses du modèle de poutre de Kirchhoff ($d \ll l$). Les autres paramètres présentent les valeurs suivantes $r_a=160$ mm, $r_p=101,6$ mm et $\varphi=10^\circ$.

Pour chaque configuration simulée, les valeurs maximales des contraintes internes au sein des trois éléments flexibles ont été enregistrées. La figure II.6 montre la répartition de ces valeurs maximales dans l'espace de travail pour chacun des éléments flexibles. La répartition de contraintes à une autre, il suffit de faire une rotation d'un angle égal à celui séparant les deux chaînes cinématiques, soit 120° .

À chaque orientation fixe (sauf au niveau de l'orientation nulle), les positions accessibles forment approximativement un triangle de Reuleaux² de tailles variables. L'espace de travail en position se réduit avec l'augmentation en valeur absolue de l'orientation. Cela paraît tout à fait logique puisque l'on contraint davantage les éléments flexibles. Une instabilité mécanique traduisant un changement de mode de déformations dans les éléments flexibles est visible à 0,1 rad. Proche de l'orientation nulle, ces derniers sont moins contraints, l'espace de travail en position est maximal. En effet, au niveau de l'orientation nulle ($\pm 0,05$ rad), les positions accessibles forment quasiment des cercles.

2. La caractéristique définissant un triangle de Reuleaux est la suivante : si on prend un de ses sommets et n'importe quel point du côté opposé (segment qui est appelé diamètre), alors cette distance est égale à la longueur des autres diamètres. On parle alors de courbe à largeur constante.

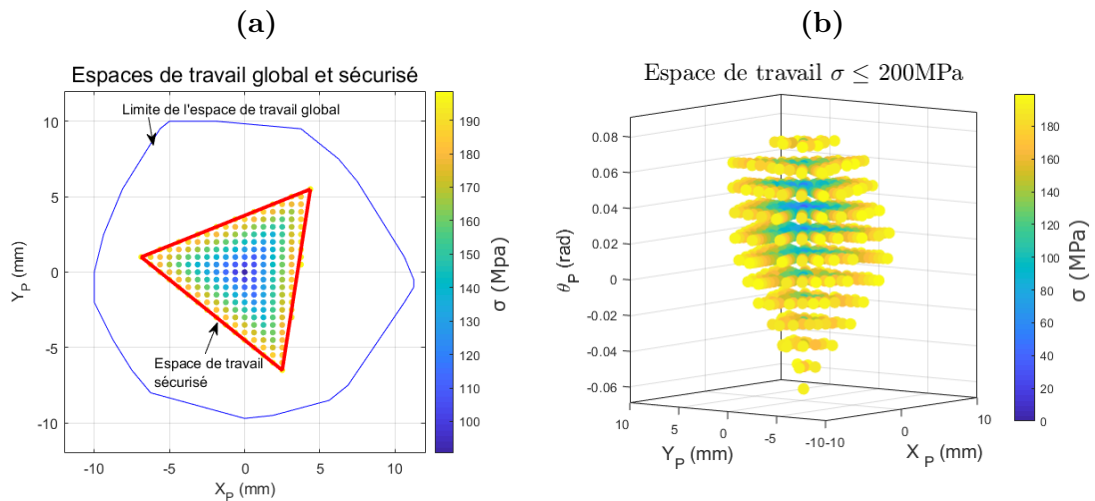


FIGURE II.7 – Espace de Travail du Triskèle-Bot en considérant la contrainte maximale dans les différents bras et un coefficient de sécurité pour une orientation nulle (a). Le tracé bleu correspond à l’enveloppe convexe de l’espace de travail non réduit. Le triangle rouge représente l’ensemble de travail sécurisé (i.e. l’ensemble des positions respectant la condition de contrainte maximale de 200 MPa dans les bras). (b) Montre l’espace de travail sécurisé avec les différentes orientations possibles.

Une fois l’espace de travail global simulé grâce au MGI, on définit un espace de travail, dit sécurisé, dans lequel la contrainte maximale admissible dans les éléments flexibles est inférieure à 200 MPa. Cette valeur dépend directement du matériau de l’élément flexible et de la solution utilisée pour réaliser les assemblages.

La figure II.7a montre l’espace de travail pour une orientation nulle avec la limite de l’espace de travail global et sécurisé. À cette orientation, l’espace de travail cartésien sécurisé est de $62,3 \text{ mm}^2$. La figure II.7b montre l’ensemble de travail sécurisé en fonction des différentes orientations accessibles ouvrant un débattement angulaire de $137,5 \text{ mrad}$ ($\approx 8^\circ$). Cette étude a également permis de déterminer l’espace de travail articulaire nécessaire pour pouvoir atteindre l’ensemble de ces poses. Ce dernier correspond à une étendue de 14 mm pour chacun des actionneurs.

II.6 CONCLUSION

Les RPC présentent de nombreux avantages (capacité de miniaturisation, adaptabilité, sécurité, etc.), mais leurs performances en ce qui concerne la répétabilité et la justesse n’ont que trop peu été démontrées. L’objectif de la thèse est de savoir si ces structures peuvent être des solutions intéressantes pour répondre aux besoins des applications de positionnement micrométrique planaire en proposant un espace de travail intéressant tout en étant répétables et justes.

Ce chapitre commençait cette étude en se questionnant sur l'espace de travail que pouvant fournir un RPC destiné à faire du positionnement de haute précision. Dans un premier temps, un nouveau concept de structure parallèle continue a été présenté. Ce nouveau RPC, appelé Triskèle-Bot au regard de sa forme, est issu d'une structure parallèle polyarticulée planaire conventionnelle, le 3-PRR, dont les articulations passives ont été remplacées par des éléments flexibles continus, devenant ainsi un 3-PF.

Après avoir décrit sa structure, sa modélisation a été présentée. Elle soulève de nombreuses difficultés à cause des éléments flexibles continus couplés. Ces derniers ont été modélisés grâce à la théorie des poutres de Kirchhoff. La mise en équation des conditions aux limites au niveau des extrémités (proximales et distales) des éléments flexibles continus, ainsi que l'équilibre de la plateforme ont permis de former un système d'équations non-linéaires contraintes par des conditions aux limites ne possédant pas de solution analytique. La résolution numérique de ces systèmes d'équations s'effectue grâce à une méthode de tir de manière à créer un modèle géométrico-statique directe et inverse dont l'implémentation a été détaillée. On pourra souligner que l'ensemble des outils et méthodes défini dans ce chapitre est directement transposable à d'autres RPC (e.g en considérant un actionnement rotatif plutôt que translatif).

Ces modèles ont été utilisés dans un dernier temps pour répondre au questionnement sur l'espace de travail du Triskèle-Bot. Ce dernier, bien que limité pour protéger le robot, exhibe une surface atteignable de $62,3 \text{ mm}^2$ et de $137,5 \text{ mrad}$ ($\approx 8^\circ$). Cet espace de travail millimétrique est particulièrement intéressant pour des applications de microrobotique. Dans le chapitre suivant, la conception d'un prototype sera étudiée.

Chapitre III

Conception du Triskèle-Bot

III.1	Introduction	44
III.2	Préétude de la conception du Triskèle-Bot	44
	III.2.1 Composition du Triskèle-Bot	44
	III.2.2 Objectifs de conception du Triskèle-Bot	46
III.3	Choix des composants du Triskèle-Bot	47
	III.3.1 Plateforme	47
	III.3.2 Bras.....	48
	III.3.3 Actionneurs	52
	III.3.4 Platines de prépositionnement	53
	III.3.5 Prototype du Triskèle-Bot	54
	III.3.6 Estimation de la répétabilité du Triskèle-Bot.....	55
III.4	Conclusion	58

Avant de concevoir un robot, les spécifications attendues doivent être identifiées. Des choix judicieux de conception auront pour objectif de favoriser certaines caractéristiques telles que l'espace de travail ou l'identifiabilité des paramètres inclus dans les modèles. Dans ce chapitre, une préétude et la sélection des différents composants du Triskèle-Bot sont détaillées. Un prototype est alors construit pour pouvoir étudier expérimentalement ses performances de répétabilité et de justesse.

III.1 INTRODUCTION

La conception, le dimensionnement et la fabrication de robots destinés aux micro-positionnement sont des problèmes complexes couplés entre eux. Les choix effectués visent à obtenir une structure ayant un espace de travail millimétrique (calculé dans le chapitre précédent) tout en garantissant une grande répétabilité intrinsèque.

Une préétude guidant la conception du Triskèle-Bot formera la première partie de ce chapitre. Elle permettra de donner un cadre et des objectifs à atteindre pour aboutir sur un RPC à 3DdL adapté aux positionnements à l'échelle micrométrique. Elles soulèveront également certaines difficultés liées au RPC proposé telles que la planéité.

La deuxième partie du chapitre présentera les choix de conception réalisés pour répondre aux objectifs visés. Elle aboutira à la création d'un prototype qui permettra de mesurer expérimentalement les performances du RPC proposé.

Pour finir, une étude statistique de la répétabilité sera menée pour valider par simulations la sélection des composants effectuée.

III.2 PRÉÉTUDE DE LA CONCEPTION DU TRISKÈLE-BOT

III.2.1 Composition du Triskèle-Bot

Le Triskèle-Bot est une structure parallèle continue planaire. Elle consiste, comme présentée dans le chapitre précédent, à considérer trois chaînes cinématiques identiques reliées à une plateforme mobile qui se déplace dans un plan. On propose de diviser sa composition en quatre parties.

La plateforme mobile, poussée et tirée par les trois chaînes cinématiques, se déplace selon les directions X-Y (translations) et θ (rotation) dans le plan parallèle à la base du robot.

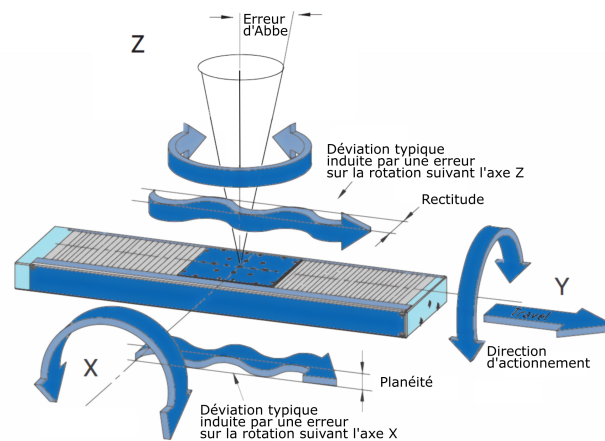


FIGURE III.1 – Mouvements imparfaits d'un actionneur translatif (figure adaptée du site internet de Physik Instrumente)

Les bras, constitués des éléments flexibles continus et de leurs fixations, assurent la transmission des forces, des moments et des déplacements depuis les actionneurs jusqu'à la plateforme. Ces éléments flexibles doivent être ni trop élancés, pour faciliter la mise dans un même plan des éléments, limiter les potentiels problèmes mécaniques (e.g. flambement) et l'influence de leur environnement (gravité, vibrations, etc.); ni trop courts, pour pouvoir garantir un espace de travail conséquent grâce à leur capacité de grandes déformations. Les fixations maintiennent les éléments flexibles en position par des encastrement suffisamment rigides pour permettre une bonne transmission de l'énergie mécanique. Ils doivent également faciliter la mesure des paramètres du modèle du robot tout en garantissant un bon positionnement et un bon maintien.

Les actionneurs fournissent les mouvements et forces pour que la plateforme puisse atteindre l'ensemble des configurations possibles dans son espace de travail. Les actionneurs doivent répondre au compromis entre grande étendue et précision. Contrairement à ceux très précis utilisés par les structures rigides à articulations flexibles, dont le rôle est d'amplifier leurs très petites courses (résultant généralement en de petits espaces de travail et une amplification des défauts des actionneurs), les actionneurs doivent posséder une course assez grande pour permettre de parcourir l'ensemble de l'espace de travail possible.

Des platines de prépositionnement permettent la mise et le maintien en position des différents éléments et faciliteront l'assemblage du prototype.

Dans l'objectif d'être utilisé pour des applications de positionnement à l'échelle micrométrique, le RPCP proposé et ses composants doivent répondre à différentes spécifications. Ces dernières sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

III.2.2 Objectifs de conception du Triskèle-Bot

Dans le but de répondre aux besoins des applications à l'échelle micrométriques, le Triskèle-Bot doit posséder intrinsèquement une bonne résolution et être le plus répétable possible. Au regard de l'état de l'art, l'objectif de répétabilité visé est de quelques dizaines de nanomètres [Zeyi Wu 18]. Pour atteindre ce but, le choix du système d'actionnement sera crucial puisqu'il est considéré comme source principale d'imprécision [Merlet 06a]. En effet, les actionneurs translatifs ne sont jamais parfaits, mais ils présentent des mouvements multidirectionnels résiduels comme le montre la figure III.1. C'est pourquoi les actionneurs choisis devront être les plus répétables possible (moins de 50 nm). Ils devront également fournir une résolution nanométrique avec des capteurs internes de haute qualité, permettant de connaître leur position avec une incertitude inférieure à 5 nm.

Les structures rigides à articulations flexibles présentant une bonne répétabilité, justesse et résolution souffrent d'un espace de travail qui est généralement de petite taille (quelques centaines de micromètres carrés). Pour montrer l'apport des éléments flexibles continus des RPC, l'espace de travail visé est typiquement de quelques dizaines de millimètres carrés et de plusieurs degrés de rotation. Ces valeurs correspondent à celles des structures rigides à articulations flexibles privilégiant un espace de travail conséquent par rapport à leur précision [Torralba 16]. D'après les résultats du chapitre précédent, la structure proposée semble plus avoir un comportement réducteur qu'amplificateur (contrairement à ce qui est généralement fait pour les robots de positionnement micro- ou nanométrique). Au vu de l'espace de travail visé, le système d'actionnement devra donc fournir des courses de déplacement de quelques dizaines de millimètres. De plus, de manière à faciliter la modélisation des bras, elles devront se rapprocher le plus possible d'un caractère purement élastique.

Pour mesurer la précision des RPC, le choix d'une structure planaire a été effectué. Cependant, cette planéité devra être garantie. D'une part, par un ajustement de la hauteur de l'ensemble des éléments constitutifs du robot pour que tout soit dans le même plan. D'autre part, en s'assurant que la plateforme se déplace de manière planaire. Cette mesure, reposant essentiellement sur les algorithmes et l'équipement utilisés, devra proposer une plage de mesure et une résolution adaptées aux objectifs visés.

De manière à améliorer la justesse du robot, un processus d'étalonnage du robot est envisagé. Pour qu'il soit le plus efficace et le plus facilement implémentable possible, sa préparation doit être faite dès la phase de conception [Lubrano 11]. Des choix de conceptions devront donc être effectués de manière à mesurer les paramètres présents dans le modèle.

Le critère de taille du prototype n'est pas un élément limitant. Néanmoins, au vu des différentes possibilités d'applications dont l'environnement est confiné tel que la chambre d'un MEB, les solutions techniques envisagées devront prendre en compte le potentiel de miniaturisation de la structure. Une attention particulière

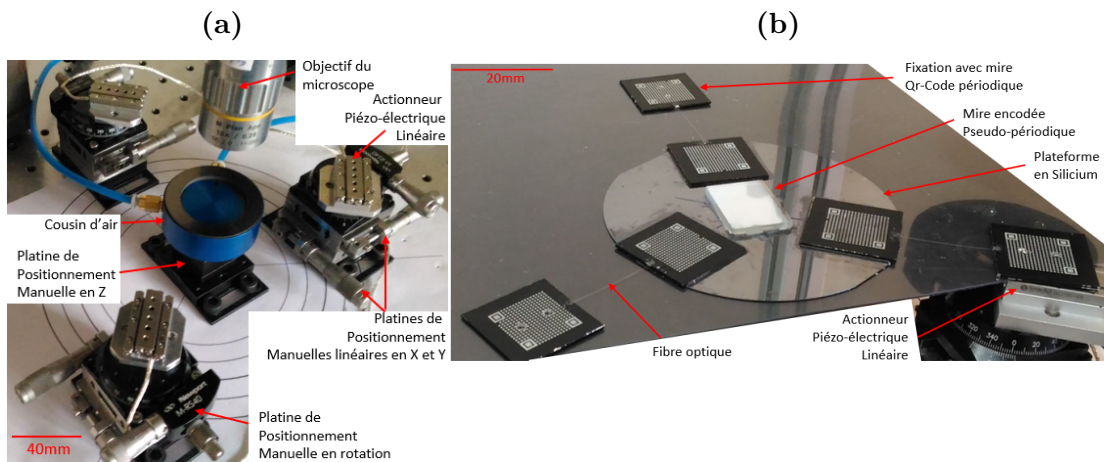


FIGURE III.2 – Composants avant assemblage : (a) Coussin d’air, actionneurs et les platines de prépositionnement. (b) Plateforme.

sera portée sur la taille projetée du robot de sorte qu’il soit relativement compact, limitant ainsi sa sensibilité aux perturbations extérieures et facilitant les mesures de paramètres.

Pour finir, pour pouvoir réaliser des positionnements de hautes précisions, le Triskèle-Bot devra être le plus robuste possible aux nombreuses sources d’incertitudes et de perturbations pouvant subvenir à l’échelle micrométrique.

III.3 CHOIX DES COMPOSANTS DU TRISKÈLE-BOT

Les choix de conceptions du Triskèle-bot doivent permettre de répondre à l’ensemble des spécifications rassemblées dans la section précédente. Ces derniers sont répartis en fonction des différents composants du prototype (la plateforme, les éléments flexibles continus, les fixations, les actionneurs et les platines de prépositionnement).

III.3.1 Plateforme

La plateforme représente l’organe terminal du robot. Poussée et tirée par les éléments flexibles continus, elle doit pouvoir réaliser des mouvements planaires. Pour répondre à la problématique de la suppression des mouvements hors plan sans créer de frottements (pouvant nuire à la répétabilité du robot), il a été choisi de faire léviter la plateforme avec un système de coussin d’air (IBS S205001), de 50 mm de diamètre. Ce dernier crée une surpression à sa périphérie et une dépression en son centre de manière à assurer une hauteur stable à $\pm 5 \mu\text{m}$. Une platine élévatrice de positionnement linéaire manuel (Newport M-DS25-Z) permet de régler la hauteur du système. La figure III.2a montre le coussin d’air et d’autres composants (décrits par la suite) fixés sur une table en nid d’abeilles avant l’assemblage avec la plateforme.

La plateforme, en elle-même, est un wafer en silicium de 4 pouces (101.6 mm) de diamètre dont la rectitude et la planéité sont excellentes. Sa rigidité est en adéquation avec les conditions de corps rigide présentes dans la modélisation. Ce choix est également motivé par diverses applications comme le positionnement de wafer et ouvre sur des perspectives directes d'usinage ou d'intégration de nouveaux capteurs, préhenseurs, etc.

Une mire pseudo-périodique encodée fabriquée en salle blanche est collée sur cette plateforme (figure III.2b). Elle va permettre de mesurer la pose cartésienne planaire du robot sur une large plage avec une grande résolution. Davantage d'informations sur le banc, le principe et le protocole de mesure seront développées dans le chapitre suivant.

III.3.2 Bras

III.3.2.a Éléments flexibles continus

Éléments clefs des RPC, les éléments flexibles continus doivent transmettre les forces, moments et déplacements des actionneurs jusqu'à la plateforme. Les choix de ses caractéristiques mécaniques (matériau et dimensions) ont un impact important sur le comportement du prototype. En supprimant les articulations rigides, nous comptons sur les déformations de chaque élément flexible continu pour obtenir une structure répétable proposant un espace de travail respectant nos spécifications.

Pour assurer une justesse de modélisation et une répétabilité intrinsèque, les matériaux présentant une caractéristique viscoélastique, tels que les plastiques, ou les composites, non uniformes, sont à proscrire. Les métaux présentant un faible potentiel de déformation élastique ne seront également pas considérés. Le nitinol (NiTi), très utilisé pour la conception de robots continus au vu de sa propriété d'hyperélasticité, et le verre (de silice) semblent convenir. En effet, à petite échelle, le verre possède une grande flexibilité due à l'absence de microfissure qui le fragilise habituellement, une grande uniformité et une viscosité quasiment nulle. Aux vues de ces propriétés (biocompatibilité, élasticité, faible viscosité, haut potentiel de déformation), le verre et plus particulièrement des fibres optiques ont été choisies pour constituer les éléments flexibles continus. Des travaux potentiels utilisant les propriétés optiques des fibres, autre motivation de ce choix, seront présentés dans la partie perspective de ce manuscrit.

Ainsi, l'élément flexible considéré est une fibre optique monomode dénudée de ses parties plastiques (figure III.3). En effet, une fibre optique monomode est généralement constituée de plusieurs couches :

- une gaine optique : cylindre en verre (généralement $125 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) dont le centre (diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$) est fonctionnalisé pour lui conférer des propriétés optiques différentes et guider la lumière.
- une gaine en plastique (acrylate) (diamètre d'environ $245 \mu\text{m}$)
- une gaine plastique plus résistante en PVC jaune généralement (diamètre de 0,9 ou 3 mm)

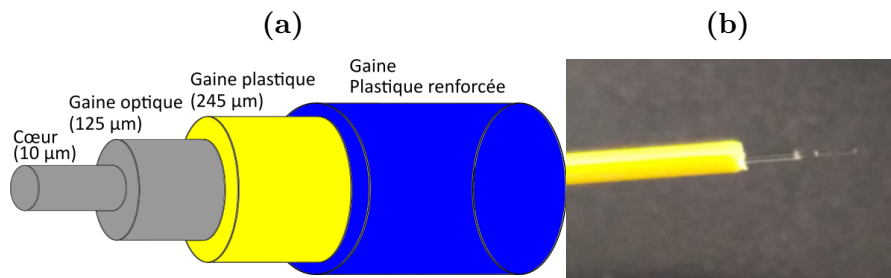


FIGURE III.3 – (a) Schéma de principe montrant les différentes couches d’une fibre optique dont la vue latérale est photographiée en(b).

Le fait de dénuder la fibre permet de ne garder que la gaine optique (verre) pour un diamètre final de $125\ \mu\text{m}$. Les trois fibres nécessaires pour faire les bras du prototype sont issues d’une même fibre de sorte à avoir les mêmes diamètres et propriétés mécaniques. Le module d’Young de ces fibres est de $69 \pm 0,4\ \text{GPa}$ d’après l’article d’Antunes *et al.* [Antunes 12].

Les longueurs de chaque fibre doivent respecter la condition permettant de garder les hypothèses relatives au modèle de Kirchhoff. C’est-à-dire une longueur très supérieure au diamètre de la fibre. Une longueur de $30\ \text{mm}$ a été choisie de sorte à respecter cette condition (rapport d’environ 200) et à faciliter l’assemblage du prototype.

III.3.2.b Fixations

Un des plus grands défis de la conception concerne les éléments de fixations des fibres reliant les actionneurs à la plateforme. En effet, comme nous l’avons vu dans le chapitre précédent, les conditions aux extrémités distales sont couplées au niveau de la plateforme et une condition de corps rigide les relie les unes aux autres. De plus, comme les éléments flexibles vont se déformer pour transmettre les mouvements des actionneurs à la plateforme, les encastremets seront des lieux de concentration de contraintes. Ils devront donc être rigides.

Dans le but d’avoir une structure intrinsèquement répétable et juste, les extrémités doivent être positionnées le plus précisément possible et ne doivent pas bouger pendant le déplacement du robot. Des défauts lors de la fabrication des pièces conduiraient à des jeux ou des encastremets non nominaux (i.e. élément flexible perpendiculaire à la surface d’encastrement et longueur connue). À l’inverse, une bonne connaissance des extrémités permet une modélisation précise et facilite l’utilisation des modèles. Pour effectuer cet encastrement et ce positionnement, plusieurs idées de solutions ont été envisagées.

La première, très utilisée en optique, était d’utiliser une rainure en forme de V (figure III.4a) dans laquelle la fibre vient se positionner avec deux appuis linéiques. Un dernier élément de type « chapeau » ou une colle maintient l’élément flexible dans la cavité. Cependant, cette solution présente tout de même quelques problèmes. Premièrement, le chapeau bloque la visualisation de l’élément flexible et

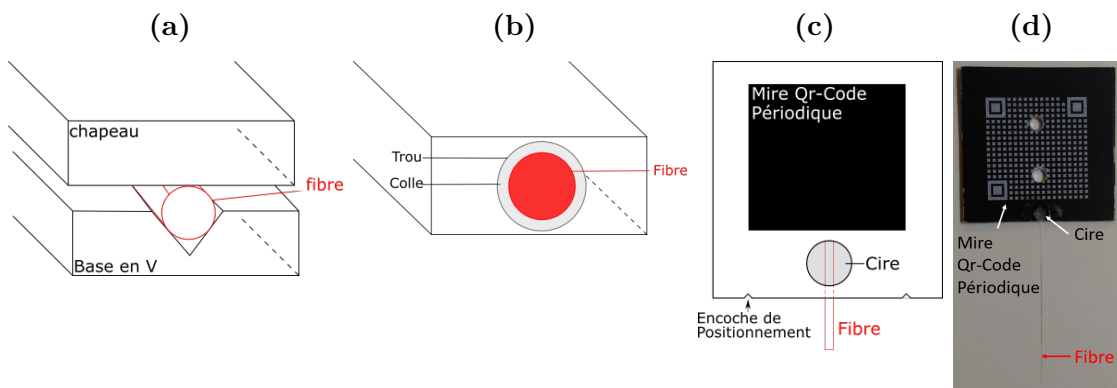


FIGURE III.4 – Propositions de solutions pour l'encastrement des fibres. (a) Montage en V avec chapeau (vue de face). (b) Alésage avec cire (vue de face). (c) Fixation (vue de dessus). (d) Fixation réalisée.

occulte ce qui se passe au niveau de l'encastrement, rendant donc sa modélisation difficile. Deuxièmement, la réalisation technique du V et du chapeau doit être « parfaite ». Le maintien ne doit pas engendrer de problème de positionnement ou de jeux qui pourrait provoquer un déplacement ou la sortie de la fibre lors des déplacements de la plateforme. Le troisième problème réside dans la définition précise de la longueur de la fibre lors de l'assemblage. En effet, cette solution rend difficile la création d'une butée pouvant entraîner une mauvaise définition de la longueur, et donc des erreurs de modélisation.

Une autre solution utilisant un alésage et de la cire (figures III.4b et III.4c) a été choisie. L'alésage, dont le diamètre est le plus proche possible de celui de l'élément flexible, réalise la mise en position. La longueur de l'élément flexible est assurée par la profondeur d'un second alésage normal au premier. La cire, déjà utilisée pour différents travaux microtechniques, maintient les deux éléments assemblés. Cette dernière a été choisie, car elle permettait facilement la miniaturisation du prototype contrairement à d'autres technologies comme des vis de pression. Un alésage a été effectué de sorte à faciliter la pose de la cire, qui une fois solidifiée, maintient la fibre sans qu'elle ne puisse bouger lors du déplacement du robot.

Ces fixations ont été créées à partir d'une plaque en aluminium de 5 mm d'épaisseur. Sur cette dernière, des carrés de 24 mm de côté avec des trous de 2,5 mm de diamètre ont été découpés au jet d'eau avec une incertitude de $\pm 0,04$ mm. La distance entre le bord de la pièce et le centre du cercle est de 3,5 mm. Chaque pièce a été placée dans une graveuse laser de sorte que le laser puisse usiner la tranche de la pièce proche de là où se situe le cercle. L'alésage débouchant accueillant l'élément flexible est réalisé en même temps que deux encoches de positionnement gravées à 10 mm de chaque côté de ce dernier (cf. figure III.4c). Chaque pièce est ensuite peinte avec une peinture noir mat et posée à plat sur la zone de gravure.

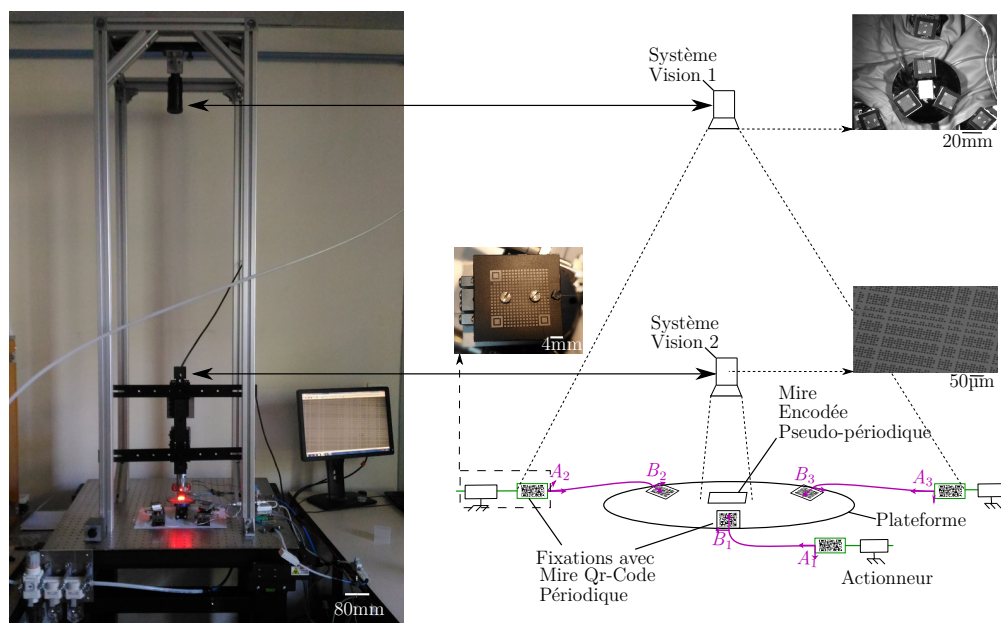


FIGURE III.5 – Systèmes de mesure par vision utilisés dans cette thèse.

Une mire combinant celle d'un Qr-Code et une mire périodique, que l'on appellera dans la suite Qr-Code, est alors gravée en se positionnant par rapport aux deux encoches. Cette relation aidera à l'identification de manière précise de la position de l'encastrement par rapport au centre de ce Qr-Code.

Ces Qr-Codes ont pour objectif de mesurer les paramètres du robot grâce à un système de vision situé à 1,5 m de la table d'expérience (système de vision 1). La figure III.5 illustre les moyens de mesures utilisés pour mesurer les paramètres avec les Qr-Codes et la position de la plateforme avec la mire pseudo-périodique encodée. Davantage d'informations sur ces mesures seront fournies dans les chapitres suivants.

Une fois les fixations fabriquées, les fibres sont insérées et collées avec de la cire. Les fixations fonctionnent par paire : l'une des fixations est percée de deux trous et est fixée sur un des actionneurs, l'autre est collée sur la plateforme mobile. La figure III.4d montre une fixation réalisée avec l'élément flexible prête à être fixée sur un actionneur.

On pourra noter que ce procédé de fabrication et de fixation des fibres sur leur support est répétable (i.e. facilement remplaçable en cas de rupture de l'élément flexible, etc.) et modulaire (e.g. changement de diamètre, etc.).

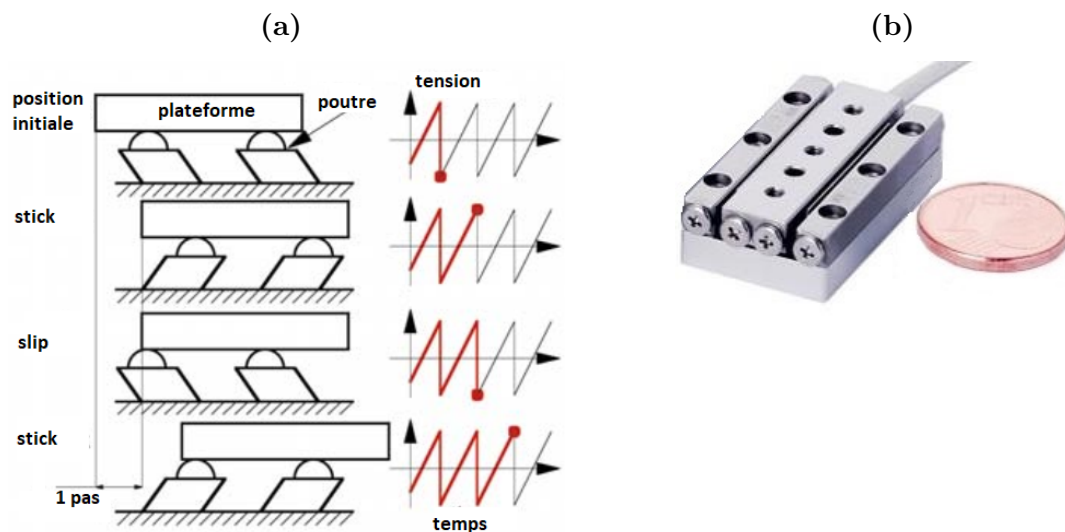


FIGURE III.6 – Actionneur « stick-slip ». (a) Schéma du principe d'actionnement [Mazerolle 03]. (b) Actionneur SmarAct choisi.

III.3.3 Actionneurs

Le choix de l'actionnement est crucial pour une architecture robotique. Il doit présenter des caractéristiques en adéquation avec l'objectif d'explorer le potentiel de positionnement planaire des RPC. Les systèmes d'actionnements privilégiés et disponibles sur le marché pour les systèmes micrométriques sont : les moteurs associés à des mécanismes de réduction, les moteurs linéaires électromagnétiques, les stick-slip, les stacks piézo-électriques.

En considérant la course requise, la facilité de commande et d'intégration, leurs caractéristiques de répétabilité et de justesse, et nos connaissances sur leur fonctionnement, nous avons donc opté pour trois actionneurs stick-slip piézo-électriques linéaires SmarAct SLC-1730.

Second plus petit actionneur de la gamme choisie, il propose une étendue de 21 mm avec une résolution en boucle ouverte inférieure à 1 nm tout en étant compact. Une règle optique, accorde une résolution en boucle fermée de 1 nm et une répétabilité suivant la direction d'actionnement de ± 30 nm sur l'ensemble de la course.

Le principe de fonctionnement du « stick-slip » est illustré par la figure III.6. Chaque pied constitutif de l'actionneur va se déformer lentement puis va brusquement revenir en arrière. Pendant la phase de déformation, la plateforme de l'actionneur va suivre le mouvement induit par les pieds à cause de la friction (stick). Ce mouvement est réalisé dans une direction privilégiée (translation ou rotation) grâce à un guidage mécanique (des rails dans le cas de la translation). Lors du retour rapide, dû à son inertie, la plateforme va rester sur place pendant que les pieds reviennent à leurs positions initiales (slip).

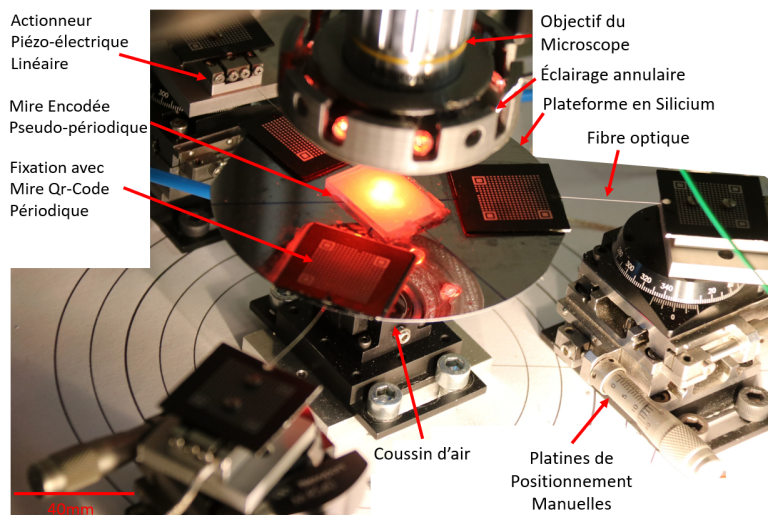


FIGURE III.7 – Prototype final du Triskèle-Bot

Ces actionneurs présentent des erreurs de positionnement qui proviennent en grande partie du parallélisme entre les rails des glissières à billes encadrant la plateforme mobile. On peut souligner que la performance de répétabilité présente dans la fiche technique nous informe uniquement sur la répétabilité dans la direction d'actionnement. En demandant aux constructeurs, il a été possible d'avoir accès à d'autres documents techniques. Ces derniers ont donné des renseignements sur les tests de caractérisation effectués ainsi que les incertitudes observées suivant les autres directions. À partir de ces documents, une valeur de répétabilité de 18,02 nm pour un déplacement de 100 μm a été définie et une analyse de propagation de distribution d'incertitudes des actionneurs, choisis sur la structure proposée, a été effectuée afin d'estimer la répétabilité du Triskèle-Bot.

III.3.4 Platines de prépositionnement

Ces éléments sont essentiellement destinés à l'assemblage et aux réglages avant la mise en fonctionnement du robot. Un premier élément permet la fixation du prototype avec une table en nid d'abeilles. Sur celui-ci, viennent se fixer deux platines de positionnement manuelles en translation (SDS-40) et une platine de positionnement en rotation (M-RS40) fabriquées par l'entreprise Newport. Chacune de ces platines possède une vis micrométrique permettant de prépositionner les actionneurs en position et en orientation. Ces derniers sont fixés sur la platine supérieure à l'aide d'une pièce intermédiaire. Ces platines facilitent l'assemblage du prototype. Elles permettent également d'augmenter ou de réduire la précontrainte dans les éléments flexibles lorsque le robot est totalement assemblé. Ce réglage ajuste la planéité entre les bras et la plateforme de sorte à avoir une meilleure transmission des mouvements, des forces et des moments.

Conception	Aire Projetée (mm×mm)	Espace de travail (mm×mm×mrad)	Ic
[Cai 16]	150 × 150	0,007 × 0,008 × 0,29	7.10 ⁻⁷
[Clark 16]	200 × 200	0,37 × 0,32 × 1,24	0,004
[Zhang 16a]	170 × 170	0,13 × 0,12 × 17	9.10 ⁻⁶
[Zhang 16b]	300 × 300	4 × 4 × 41,9	7,45
[Ding 17]	120 × 120	0,42 × 0,48 × 10,3	0,004
[Gan 17]	163 × 142	0,15 × 0,14 × 3,8	0,14
[Lum 17]	355 × 270	2,5 × 2,5 × 174,53	11,38
[Xiao 19]	106 × 106	0,2 × 0,2 × 8,27	0,029
[Al-Jodah 20]	300 × 300	4,8 × 5,2 × 82,4	13,01
Triskèle-Bot	225 × 225	62,3 × 137,5	155,11

TABLE III.1 – Comparaisons de l’aire projetée, de l’espace de travail et de l’indice de compacité Ic du Triskèle-Bot avec des structures à articulations flexibles $XY\theta$.

III.3.5 Prototype du Triskèle-Bot

À partir de l’ensemble de ces choix de conception, un prototype du Triskèle-Bot est créé (figure III.7). Il est composé d’un coussin d’air, d’une plateforme (de diamètre de 101,6 mm), de 6 fixations (de longueur 24 mm), de 3 fibres optiques (de diamètre de 125 μm et de longueur de 30 mm) et de 10 platines de prépositionnement manuelles, pour un volume total d’environ 225 mm × 225 mm × 70 mm. En considérant son espace de travail de 62,3 mm² et 137,5 mrad, son indice de compacité Ic peut être calculé. Ce dernier est défini par Al-Jodah *et al.* [Al-Jodah 20] comme étant :

$$Ic = \frac{\text{Espace de travail}}{\text{Surface projetée}} \times 1000 \quad (\text{III.1})$$

Un indice de compacité élevé indique une surface projetée faible pour un espace de travail donné. Pour le prototype construit, il est de 237,30. Cet indice peut également être calculé pour des structures $XY\theta$ à articulations flexibles généralement utilisée pour le micro-positionnement. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.1. On constate que le Triskèle-Bot possède un indice de compacité environ 12 fois supérieur à celui des autres robots. Cela peut s’expliquer par l’élasticité des fibres qui n’ont pas besoin d’avoir une grande dimension pour fournir de grandes déformations sur toute leur longueur. Les autres structures qui reposent sur des déformations localisés doivent augmenter leur taille pour pouvoir fournir un espace de travail équivalent.

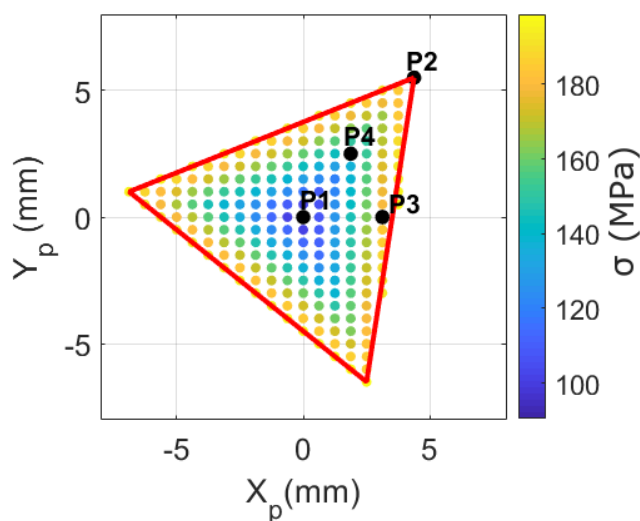


FIGURE III.8 – Espace de travail du Triskèle-Bot avec les différents points de mesure de répétabilité $P_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$

III.3.6 Estimation de la répétabilité du Triskèle-Bot

Cette estimation de la répétabilité du Triskèle-Bot prend en compte l'ensemble des paramètres et choix techniques présentés dans ce chapitre. Elle a pour objectif de valider le choix des actionneurs et de vérifier que la structure proposée n'amplifie pas les défauts d'actionnements.

La répétabilité du robot est quantifiée suivant deux protocoles :

- 30 allers-retours de 100 μm effectués par un des actionneurs à partir de quatre poses (P_1 , P_2 , P_3 et P_4) distinctes choisies.
- 30 allers-retours de 100 μm effectués par les 3 actionneurs à partir de la position initiale de référence P_1 .

La figure III.8 montre ces quatre poses, qui, suivant des symétries axiales et circulaires, couvrent l'ensemble de l'espace de travail.

Pour chacun de ces protocoles, la répétabilité de la structure est estimée en utilisant une méthode de Monte-Carlo. Cette dernière est une méthode statistique pour la propagation de distribution d'incertitudes, extraite du guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) [BIPM 08]. Elle consiste à répéter un nombre conséquent de fois une même expérience avec des entrées variantes dans des intervalles de valeurs liés aux incertitudes. Dans le cas présenté, on considère en entrée du MGD des coordonnées articulaires entachées par l'incertitude d'actionnement issue des documents du constructeur.

Ainsi pour chaque coordonnée articulaire q_i utilisée pour les différents protocoles de simulations, une valeur d'incertitude δq_i est additionnée. Cette dernière est extraite d'une distribution normale dont l'écart-type est au plus proche de la

valeur de répétabilité des actionneurs. Pour finir, la somme résultante $q_1 + \delta q_1$ est donnée en entrée du MGD du robot. Cette opération a été répétée trente fois pour que le résultat soit statistiquement représentatif.

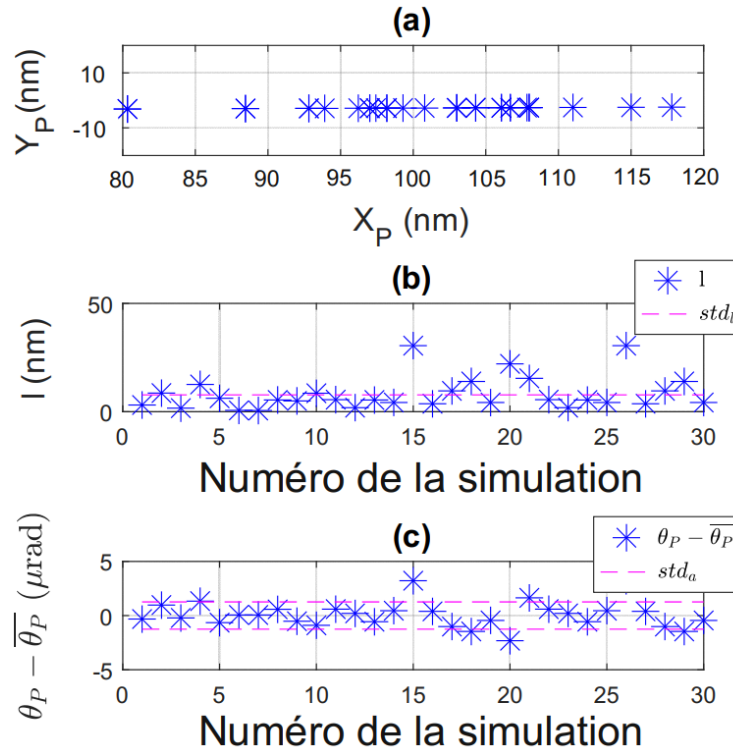


FIGURE III.9 – Résultats de simulations de la propagation d’incertitude d’un actionneur sur la position de la plateforme fondée sur une méthode de Monte-Carlo. Le protocole consiste à réaliser une translation de $100\ \mu\text{m}$ par le premier actionneur q_1 depuis la position initiale du robot P_1 . (a) montre les coordonnées de la plateforme dans le repère global. Les distances à la moyenne en position et en orientation sont illustrées en (b) et (c). Les courbes en pointillés représentent les écarts-types, et donc, les répétabilités simulées en position et en orientation de la structure proposée.

Les résultats de la simulation de propagation d’incertitudes pour un déplacement de $100\ \mu\text{m}$ à partir de la position initiale P_1 , effectué par l’actionneur 1 (à titre d’exemple), sont illustrés par la figure III.9. Le premier graphique de cette figure montre la position de la plateforme lors des commandes répétées $q_1 = 100 + \delta q_1$ (les autres coordonnées articulaires étant nulles). Les positions de la plateforme (x_P, y_P) dans le repère global forment comme une ligne. On retrouve donc l’incertitude linéaire des actionneurs. Dans le cas parfait (répétabilité des actionneurs nulle), un point unique est attendu.

TABLE III.2 – Répétabilité en position (1re colonne) et en orientation (2ème colonne) pour les différents cas considérés. Les trois premiers cas correspondent à des déplacements de 100 μm sur quatre points différents de l'espace de travail. Le dernier cas (P_1 - 3 act.) correspond à la répétabilité pour un déplacement de 100 μm des trois actionneurs à partir de la position initiale (P_1).

Cas	Position	Orientation
P_1	7,77 nm	1,26 μrad
P_2	16,73 nm	1,74 μrad
P_3	29,87 nm	1,89 μrad
P_4	12,56 nm	1,82 μrad
P_1 - 3 act.	9,5 nm	1,77 μrad

Le deuxième graphique de cette figure montre la distance à la moyenne des positions l atteintes. Le troisième graphique représente la différence entre l'angle et la moyenne des angles $\theta - \bar{\theta}$ atteints. Les écarts-types de ces distances de position et différences angulaires correspondent respectivement à la répétabilité en position std_l et en orientation std_a de la plateforme.

Les résultats de répétabilité pour tous les protocoles de simulations sont regroupés dans le tableau III.2. La répétabilité globale obtenue est inférieure à une trentaine de nanomètres. Elle est même inférieure à la dizaine de nanomètres lorsqu'elle est estimée à partir de la position P_1 . Ces résultats d'estimations répondent aux ordres de grandeur visés, validant par simulation le choix d'actionnement et la structure proposée.

La répétabilité de la structure proposée est meilleure que celle des actionneurs. Cela peut s'expliquer par le fait que la structure réduise les mouvements de l'actionneur. Cette propriété n'est pas unique au Triskèle-Bot, elle peut être retrouvée sur d'autres structures parallèles. Elle est à opposer à la plupart des structures rigides à articulations flexibles qui ont pour objectif d'amplifier les faibles courses de leurs actionneurs (et a fortiori également leurs défauts). Ce constat peut également être expliqué par une propriété intrinsèque des RPC, qui est l'absorption des mouvements des actionneurs par ses éléments continus (comme des ressorts).

La répétabilité dépend également de la position de la plateforme. En effet, le Triskèle-Bot a une meilleure répétabilité si sa plateforme est proche de la position centrale qu'autre part dans l'espace de travail. Cela peut sûrement s'expliquer par les faibles contraintes mécaniques au sein des différentes poutres à la position initiale P_1 . La position P_3 ou P_4 , quant à elles, sont plus contraintes ce qui doit introduire plus d'incertitudes sur le positionnement de la plateforme. On peut également distinguer que lorsque l'incertitude des trois actionneurs (P_1 -3act.) est considérée, leurs incertitudes s'additionnent et la répétabilité globale du robot s'en retrouve logiquement augmentée (la performance est donc réduite).

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la conception du Triskèle-Bot a été détaillée. Tout d'abord, une préétude a permis d'explicitier les problématiques à résoudre et les objectifs à atteindre.

Guidés par ces derniers, les différents composants du robot proposé ont été choisis. L'ensemble de ces sélections a été réalisé en considérant la volonté de faire une structure intrinsèquement répétable et robuste aux incertitudes et perturbations existantes aux petites échelles. La compacité du prototype a été quantifiée et semble très prometteuse au regard des structures à articulations flexibles.

Les actionneurs ont été choisis de manière à pouvoir atteindre l'espace de travail calculé au chapitre précédent sans introduire trop d'incertitude de positionnement. Source la plus importante d'imprécision selon Merlet [Merlet 06a], une étude basée sur la propagation de leur incertitude a été menée de sorte à estimer la répétabilité de la structure proposée.

La répétabilité estimée étant nanométrique, elle répond aux attentes de micro- et nanopositionnement validant les choix de conception effectués. Une fois le prototype du Triskèle-Bot construit, les performances en matière de répétabilité et de justesse peuvent être quantifiées expérimentalement. Elles feront l'objet des chapitres suivants.

Chapitre IV

Répétabilité du Triskèle-Bot

IV.1	Introduction	60
IV.2	Réalisation des mesures de poses du Triskèle-Bot	60
	IV.2.1 Moyens de mesures aux petites échelles	61
	IV.2.2 Banc de mesures	61
	IV.2.3 Principe de la mesure	62
IV.3	Étude des sources d'incertitudes de mesures de poses	65
	IV.3.1 Sources d'incertitudes	65
	IV.3.2 Protocole expérimental de mesures	70
	IV.3.3 Reproductibilité de la mesure.....	72
IV.4	Répétabilité expérimentale du Triskèle-Bot	74
	IV.4.1 Quantification du bruit statique.....	74
	IV.4.2 Quantification de la répétabilité expérimentale	76
IV.5	Conclusion	77

L'une des hypothèses sur lesquelles se base notre étude est qu'il est possible de faire un RPC intrinsèquement répétable. Dans le chapitre précédent, les choix de conception réalisés en considérant cette hypothèse ont été présentés. Dans ce chapitre, la performance de répétabilité est quantifiée expérimentalement. Pour cela, un système et un protocole de mesure sont développés pour obtenir les poses du Triskèle-Bot avec des incertitudes nanométriques.

IV.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, les objectifs visés par le Triskèle-Bot ont été détaillés. Ces derniers ont guidé les choix de conception vers la construction d'un prototype qui se veut intrinsèquement répétable.

L'objectif de ce chapitre est de quantifier expérimentalement la répétabilité, estimé précédemment pour répondre au questionnement : Est-ce qu'un RPC peut être assez répétable pour réaliser des applications de positionnement planaire à l'échelle micrométriques ?

Pour y répondre, la pose du robot proposé doit pouvoir être mesurée avec une résolution nanométrique sur une grande étendue. Nous allons présenter le banc de mesure, composé d'un système de vision et d'une mire encodée pseudo-périodique collée sur le robot, et son algorithme de traitement d'image permettant d'obtenir la position et l'orientation de la plateforme.

Dans un second temps, une étude des sources d'incertitudes impactant les mesures sera détaillée. Elle vise à s'assurer, au moyen d'un protocole de mesure, que le système de mesure permet d'obtenir les poses du robot avec des incertitudes de quelques nanomètres.

Pour finir, la répétabilité du Triskèle-Bot sera quantifiée expérimentalement sur quelques points répartis judicieusement dans son espace de travail.

IV.2 RÉALISATION DES MESURES DE POSES DU TRISKÈLE-BOT

La mesure de la pose cartésienne planaire (x, y, θ) de la plateforme du Triskèle-Bot doit permettre de quantifier des déplacements nanométriques. La mesure aux petites échelles n'a rien de trivial et elle est essentielle pour caractériser ce qui s'y passe. Comme l'écrivent Roth *et al.* [Roth 87], pour quantifier la justesse d'un robot, un modèle juste est inutile sans une procédure de mesure précise.

IV.2.1 Moyens de mesures aux petites échelles

Les problématiques sur les moyens de mesures aux petites échelles sont nombreuses et peuvent dépendre de l'application visée. D'après les simulations réalisées précédemment, il est nécessaire de chercher un moyen de mesure ayant une très grande résolution (nanomètre et microradian ou inférieur) sur de grandes étendues (plusieurs dizaines de millimètres et quelques radians) suivant les directions X, Y et la rotation θ . De plus, dans la perspective de miniaturiser le Triskèle-Bot, un système de mesure sans contact et présentant un faible encombrement doit être privilégié. Pour respecter les hypothèses quasi-statiques considérées lors de la modélisation, les déplacements du robot se feront également en quasi-statique. Le moyen de mesure peut donc avoir une faible bande passante. Ainsi, en considérant toutes ces caractéristiques, un système de mesure développé au laboratoire, présentant une résolution de 1 nm et de 1 μ rad sur une grande étendue [Andre 20], fondé sur un système de vision et une mire a été choisi¹.

Afin de réaliser des mesures de qualité, un banc de mesure et un protocole expérimental doivent être conçus.

IV.2.2 Banc de mesures

Le banc de mesure est constitué d'une mire pseudo-périodique encodée et d'un système de vision, typiquement utilisé en microrobotique. Il est composé d'une caméra CCD IDS UI-3880CP-HQ R2 avec un microscope optique et un objectif 10x Mitutoyo WD PLAN APO (Ouverture numérique de 0,28). La caméra (1024×768 pixels, 8 bits) est configurée de telle sorte que tous ses gains soient égaux à 1 (pour réduire le bruit du capteur), que son horloge interne soit à son minimum et que son temps d'exposition et son nombre d'images par secondes soient adéquats pour obtenir un bon contraste sur les images enregistrées (temps d'exposition de 140 ms et 7 images par seconde). Ce paramétrage vise à limiter les impacts des différentes sources d'incertitudes connues pour ce type de configurations expérimentales.

L'ensemble du système de vision est tenu par un bâti robuste constitué de profilés et de rails optiques en aluminium. La source d'éclairage choisie est un anneau de LED créé de sorte que la convergence des faisceaux lumineux se fasse approximativement en un point au niveau de la mire. L'ensemble de la configuration expérimentale repose sur une table anti-vibration qui limite les vibrations provenant du sol. Les images et leur horaire de capture sont enregistrés grâce à un programme en C++ qui s'exécute sous Windows 7 sur un PC : Intel Xeon CPU 51620v3 3,5GHz.

1. Davantage d'informations sur l'intérêt de cette méthode de mesure en microrobotique dans [Guelpa 17]

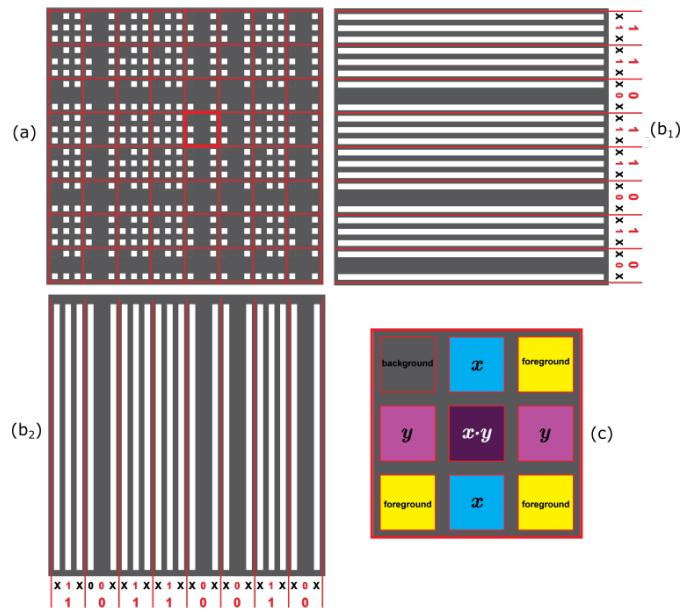


FIGURE IV.1 – Illustrations expliquant la création d’une mire pseudo-périodique codée. (a) Exemple de mire codée 2D. (b1) et (b2) décrivent respectivement des mires périodiques unidirectionnelles encodées suivant les directions X et Y correspondant à une séquence binaire LFSR. (c) montre un élément élémentaire constitué de 3×3 périodes. Le carré en haut à gauche a été supprimé pour lever l’ambiguïté de rotation au modulo $\frac{\pi}{2}$.

IV.2.3 Principe de la mesure

Le principe du moyen de mesure retenu repose sur la vision et l’utilisation d’une mire pseudo-périodique encodée. Il consiste à prendre une image de la mire, collée sur la plateforme du Triskèle-Bot, avec un système de vision et traiter cette image par un processus de décodage pour obtenir la pose cartésienne planaire (x, y, θ) du robot dans le repère de la caméra. Ce processus de décodage combine une méthode de mesure haute précision et une mesure absolue de la position. La conception de la mire avec son encodage et le processus de décodage seront détaillés dans les sous-sections suivantes.

IV.2.3.a Encodage de la mire pseudo-périodique

Un motif périodique unidirectionnel composé de bandes noires et blanches est considéré. Ce dernier est encodé avec une séquence codée binaire absolue basée sur un registre à décalage à rétroaction linéaire (LFSR). Pour chaque valeur codante, une bande blanche, de valeur binaire 1, est rajoutée à droite et à gauche pour garder une bonne périodicité globale de la mire, même lorsqu’il y a beaucoup de valeurs codantes 0 à la suite. Cette opération permettra d’effectuer un traitement d’image fondé sur une transformée de Fourier sans être impacté par le code binaire. La figure IV.1(b1) illustre l’encodage sur 4 bits d’une mire périodique

unidirectionnelle. La même opération est effectuée dans la direction perpendiculaire (figure IV.1(b2)). Les logiques binaires des séquences des deux directions sont ensuite fusionnées avec un produit logique et pour obtenir une mire encodée bidirectionnelle. L'encodage résultant peut être subdivisé en élément élémentaire constitué de 3×3 périodes (figure IV.1(c)). Le carré blanc, toujours présent, situé en haut à gauche est enlevé pour lever l'incertitude angulaire modulo $\frac{\pi}{2}$ (i.e. pour savoir dans quel cadran on se situe). Une mire codée pseudo-périodique bidimensionnelle fonctionnelle est ainsi créée et est illustrée en figure IV.1(a).

IV.2.3.b Méthode de décodage de la mire

Les images prises avec le système de vision ne correspondent qu'à une petite portion du code de la mire. Le but de la méthode de décodage est de trouver la position de la séquence binaire de cette zone dans l'entièreté de l'encodage. Cette position peut s'écrire suivant les équations suivantes :

$$\begin{cases} x &= (k_x + \frac{\phi_x}{2\pi})\lambda \\ y &= (k_y + \frac{\phi_y}{2\pi})\lambda \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Où λ est la période linéaire en micromètre du motif créé, ϕ_x , ϕ_y sont les phases planaires de leur direction respective et k_x , k_y sont les nombres de lignes/colonnes séparant la position de la zone acquise par l'image dans le repère de la mire totale. Ainsi, pour obtenir la pose du robot, les phases planaires ϕ_x , ϕ_y , et les coefficients k_x , k_y doivent être calculés.

La détermination des phases planaires s'effectue grâce au traitement d'image suivant. La première étape est de déterminer les phases relatives aux deux ensembles de lignes utilisés pour créer le motif (figure IV.1(b1-2)). Pour cela, un filtre passe-bande est appliqué sur la transformée de Fourier de l'image pour déterminer les fréquences maximales f_1 et f_2 (figure IV.2(b)), qui sont les fréquences représentatives de la période de la mire. Un filtre Hyper-Gaussien centré sur chacune d'elle est ensuite appliqué pour créer un masque contenant un lobe fréquentiel associé à chaque fréquence. Puis pour chaque lobe, une transformée de Fourier inverse est appliquée de sorte à obtenir leur représentation complexe. En considérant l'argument des représentations complexes respectives, une cartographie de la phase entourée associée à chaque fréquence maximale est créée.

Ces deux phases enroulées peuvent être déroulées pour obtenir deux plans de phases planaires² représentant directement l'orientation de la mire (figures IV.2(c1-2)). Ces derniers permettent d'obtenir la phase du pixel central de l'image grâce à une régression des moindres carrés. Cette phase est obtenue avec une haute résolution en position et en orientation. Comme ces plans de phases planaires représentent directement l'orientation de la mire, il suffit de prendre la tangente inverse entre chaque plan de phase pour obtenir l'orientation de la mire θ . Cette mesure d'angle est valable modulo $\frac{\pi}{2}$. Cette ambiguïté est levée grâce au carré manquant dans l'élément élémentaire (figure IV.2(d2)).

2. Plus de détails peuvent être trouvés dans [Galeano-Zea 10]

Pour déterminer les k_1 et k_2 des équations précédentes, un seuillage adaptatif pour déterminer les points présents et les points manquants doit être effectué. Ce seuillage fonctionne en déterminant pour chaque point de la mire, si le centre du point a une intensité similaire à l'arrière-plan de l'image (point absent) ou s'il a une intensité supérieure (point présent). Il permet de retrouver l'encodage présent sur l'image enregistrée (figure IV.2.(d1)). Finalement, un produit de convolution entre les séquences trouvées et les séquences du code global permet de déterminer les valeurs k_1 et k_2 . Ainsi, connaissant les phases planaires et ces coefficients, la position de l'image dans le motif globale peut être déterminée ainsi que la pose du robot dans le référentiel de la caméra.

Davantage d'informations sur ce moyen de mesure présentant une résolution de 1 nm et 1 μ rad peuvent être trouvées dans [Andre 20] et [Andre 21].

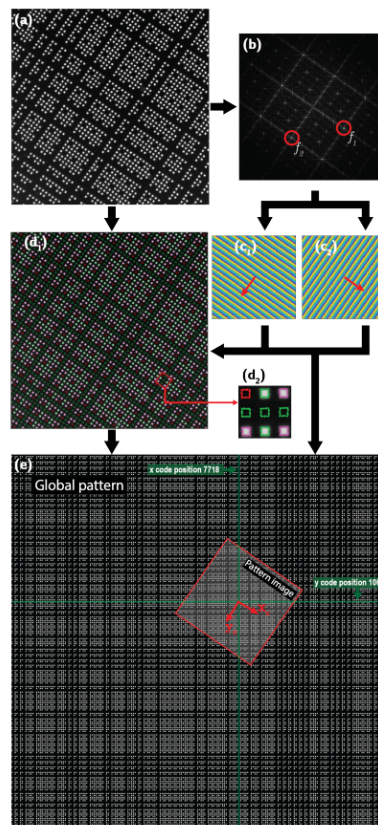


FIGURE IV.2 – Processus de décodage du motif. (a) Image enregistrée. (b) Module de la transformée de Fourier 2D. Les cercles entourent les deux pics fréquentiels relatifs aux deux directions x et y. (c1) et (c2) représentent les cartes de phases enroulées résultantes de l'application du filtre gaussien et de la transformée de Fourier inverse. Elles représentent respectivement la position de la ligne dans le repère image. (d1) montre le code binaire nécessaire pour identifier la position de l'image dans le codage global. (d2) illustre une cellule encodée unitaire constituant le codage de l'image. (e) exhibe le résultat du décodage en montrant la position absolue de l'image enregistrée dans le motif global.

IV.3 ÉTUDE DES SOURCES D'INCERTITUDES DE MESURES DE POSES

Tout système de mesure possède de la sensibilité et de la robustesse aux perturbations générées par son environnement, le matériel utilisé pour réaliser la mesure, le logiciel de traitement, etc. Cela est encore plus vrai aux petites échelles où l'ordre de grandeur de ces influences augmente. À titre d'exemple, on peut imaginer un opérateur s'appuyant sur la table à côté de l'endroit où se trouve un microscope. Ce geste anodin va faire vibrer l'image observée et fausser la mesure. À l'échelle macroscopique, ces vibrations seront la plupart du temps négligeables, alors qu'aux échelles micro- et nanométriques, elles seront du même ordre de grandeur que les objets observés ou manipulés et ne pourront donc plus être ignorées. Ainsi, une étude visant à identifier les sources potentielles d'incertitudes et de perturbations est menée et un protocole de mesure est créé pour limiter leurs impacts.

IV.3.1 Sources d'incertitudes

Les sources d'incertitudes ayant des impacts conséquents sur la mesure de poses par vision aux petites échelles dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en 5 catégories³ exposées grâce à un diagramme d'Ishikawa (figure IV.3) :

- Méthode,
- Matériau,
- Facteur humain,
- Environnement,
- Équipement et matériel utilisés pour construire le banc de mesure.

3. Ces 5 catégories correspondent à un modèle 5M : Method, Material, Man, Medium (environnement), Machine

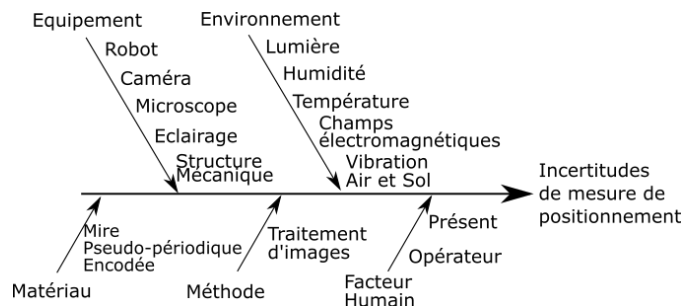


FIGURE IV.3 – Diagramme d'Ishikawa permettant d'identifier et de classer les sources d'incertitudes du moyen de mesure

IV.3.1.a Mire pseudo-périodique

La mire utilisée pour réaliser les expériences a été fabriquée en salle blanche dont l'environnement est contrôlé. Elle est fabriquée à partir d'un morceau de verre sur lequel a été déposée une couche de chrome de 3 μm . Les mires sont gravées directement par un laser (lithographie Heidelberg DWL200), puis découpées à la scie diamant. La périodicité entre deux éléments successifs de la mire est de 9 μm suivant les directions X et Y. La précision de gravure est garantie par une mise en position contrôlée en continu par trois interféromètres (calibrés régulièrement). Les défauts de fabrication sont donc imperceptibles.

IV.3.1.b Méthodes de traitement d'image

Les erreurs numériques de la méthode calculées par simulations sont approximativement de $5,10^{-8}$ μm [Andre 20]. Ainsi, les principaux obstacles sont les imprécisions de la configuration expérimentale et les perturbations environnementales. L'occultation, la luminosité et le défocus sont des facteurs importants qu'il faudra prendre en compte pour faire les mesures. Par exemple, une mauvaise luminosité peut introduire des erreurs pouvant aller jusqu'à une dizaine de nanomètres. La robustesse de la méthode vis-à-vis de ces facteurs a fait l'objet d'un article [Andre 21]. La méthode de mesure permet également de s'abstenir de l'étalonnage de la caméra, évitant ainsi, d'introduire des erreurs supplémentaires. Les incertitudes liées à la méthode de traitement d'image pourront donc être négligées si les conditions expérimentales sont contrôlées.

IV.3.1.c Facteur humain

La présence humaine pendant les expériences à très petites échelles est un vrai problème. Par exemple, une personne à proximité d'une plateforme expérimentale, de par sa chaleur corporelle, son souffle et sa parole peuvent entraîner des vibrations mécaniques de l'air et du sol, des variations de température et de potentiel mouvement inopportun. Ces sources d'erreurs augmentent avec le nombre de personnes présentes dans la pièce.

Le changement d'opérateur peut également avoir de l'influence. C'est pour cela qu'il est important d'écrire une procédure de mesure aussi détaillée que possible, de manière à réduire l'influence du facteur humain et à reproduire plusieurs expérimentations dans des conditions proches à défaut d'identiques. Un exemple est le serrage des vis qui doit être effectué dans le même ordre et avec le même couple.

En automatisant les mesures, préparées par un unique opérateur, et en réduisant l'accès de la salle de manipulation lors des mesures, les incertitudes introduites par le facteur humain ont été réduites au maximum et les mesures ont gagné en répétabilité.

IV.3.1.d Environnement

Température À l'échelle micrométrique, la variation de température est un facteur très influent. Par exemple, Tan *et al.* [Tan 13b] ont mis expérimentalement en évidence qu'une variation d'un degré Celsius peut engendrer une dérive de 1,4 μm en utilisant un système classique de vision. Ces variations, dont les sources peuvent être nombreuses (e.g. l'air, les opérateurs, l'électronique, l'éclairage ou la température interne des éléments du système expérimental), sont difficiles à modéliser puisqu'elles peuvent provenir de nombreuses sources [Muniz 14].

Pour limiter ces variations de température, la salle expérimentale doit être la mieux isolée possible. Dans cette étude d'incertitudes, l'ensemble des expériences et des résultats présentés ont été réalisés dans une salle régulée en température à $\pm 1^\circ\text{C}$.

Humidité L'humidité est connue pour être problématique pour ses effets sur la préhension et les frottements, surtout pour des cas d'assemblage microrobotiques [Chaillet 10]. Cependant, cette grandeur n'a pas été observée comme étant impactante sur la mesure par vision. Néanmoins par précautions, l'utilisation d'un moniteur d'humidité ou d'un déshumidificateur peut être judicieuse à considérer.

Électronique, Champs électromagnétiques et électrostatiques Meng et Zhuang, dans leur étude [Meng 07], ont alerté sur le fait que le bruit électronique (e.g gigue) peut devenir une des sources principales de bruits. Pour les expériences réalisées, les sources de champs électromagnétiques et électrostatiques n'ont pas été identifiées comme influentes. Néanmoins, des alimentations découplées ont tout de même été utilisées pour limiter d'éventuelles influences.

Vibration de l'air et du sol Toute structure mécanique est sujette aux vibrations, cela est d'autant plus vrai aux petites échelles où certaines structures sont à proscrire [de Faria 15]. Pour réduire toutes les vibrations provenant du sol, les plateformes expérimentales de microrobotiques sont installées sur des tables anti-vibrations. En plus d'utiliser une table antivibration, l'ensemble des connectiques a été fixé pour éviter les propagations des vibrations mécaniques. Le banc de mesure d'étude des incertitudes est protégé de la poussière et des mouvements d'air par des plaques en plexiglas.

Luminosité ambiante Lors de l'utilisation d'un système de vision, les fluctuations de la luminosité provenant du soleil ou de l'éclairage artificiel (néons incandescents par exemple) peuvent affecter les résultats de l'expérience. Lors de la réalisation des expériences, la fenêtre de la salle d'expérience est couverte et la lumière de la pièce est éteinte de sorte à limiter l'impact de ce facteur.

IV.3.1.e Équipement et Matériel du banc de mesure

Microscope Le choix d'utiliser un microscope avec un objectif $10 \times$ résulte d'un compromis entre la résolution et le champ de vue désiré [Skibicki 18]. Les lentilles des objectifs possédant une large ouverture optique améliorent la résolution optique, mais réduisent la profondeur de champ et la distance de travail. Lors des expériences, la mise au point est réalisée de sorte à voir suffisamment bien la mire tout en observant assez de périodes pour pouvoir effectuer son décodage.

L'ensemble caméra-microscope-lentille est positionné de sorte que son axe optique soit perpendiculaire à la mire. Ce positionnement permet de superposer le plan focal de la caméra avec le plan de la mire observée et d'éviter, ainsi, les flous et les aberrations optiques [Belhaoua 10]. Ce positionnement est rendu possible par la structure mécanique soutenant l'ensemble du système de vision.

Structure mécanique La structure mécanique servant de bâti au système de vision permet de réduire au maximum l'impact des perturbations mécaniques telles que les vibrations sur les mesures [Shirmohammadi 14]. En métrologie, ces bâtis sont généralement des structures en granit, très peu utilisées en microrobotique, on privilégiera une structure rigide telle que le portique proposé. Ce dernier est un bâti rigide carré constitué de profilés aluminium et de rails optiques en aluminium renforcé. Deux rails horizontaux et un rail vertical permettent une mise en position du système de vision. L'ensemble des composants du banc expérimental est installé dans la salle de manipulation au minimum 48 h avant le début des expériences pour limiter que les gradients de température introduisent des dérives de mesures.

Un temps d'attente doit être marqué entre le serrage des vis des éléments constituant la manipulation et le début des expériences. Identifiée à la suite de plusieurs expériences, cette relaxation mécanique peut introduire des dérives, de l'ordre de 278 nm, dont allure est illustrée sur la figure IV.4a.

Le système d'éclairage Avant de réaliser les acquisitions d'images, le système d'éclairage doit être précautionneusement réglé de sorte à avoir un bon contraste en limitant le plus possible les ombres. Ce réglage peut sembler à première vue trivial, mais obtenir une bonne illumination n'est pas simple. Une étude souligne l'impact de l'intensité lumineuse et du positionnement de l'éclairage sur une mesure [Zhao 18]. Pour réduire les gains électroniques de la caméra, une intensité plutôt élevée a été choisie tout en faisant attention à ne pas saturer la caméra ou à créer de fluctuations lumineuses (pouvant être dues à l'alimentation de l'éclairage). L'angle d'incidence de l'éclairage est réglé de sorte à améliorer le contraste entre les zones diffuses et réflexives.

Une source froide déportée a été choisie de sorte à éviter les effets de convection thermique. Ce phénomène peut s'illustrer par l'observation d'une sorte de voile sur l'image.

Une attention particulière a été portée au fait d'attendre que l'éclairage ait atteint son point de fonctionnement. En effet, si des images sont acquises directement après avoir allumé le système d'éclairage, des dérives telles que celles de la

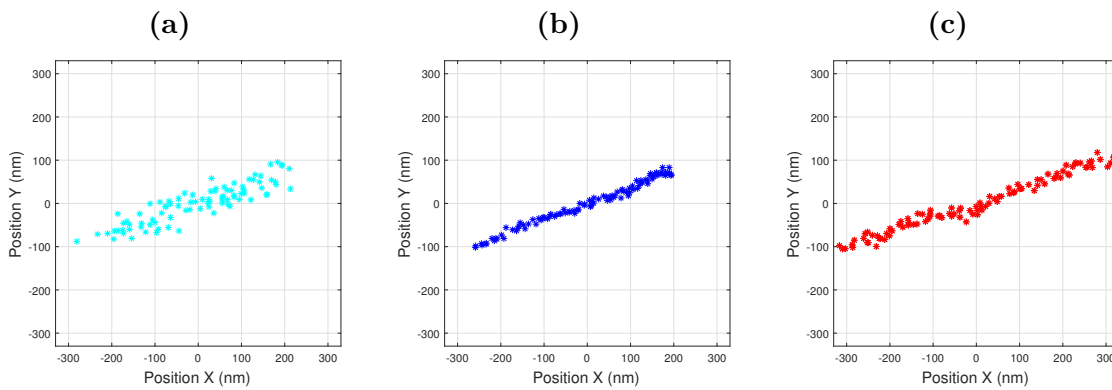


FIGURE IV.4 – Évolution de la position de la mire dans le repère de la caméra au cours du temps suivant différentes conditions expérimentales exhibant différentes sources d'incertitudes. Chacune de ces expériences a duré 90 s. (a) Positions obtenues juste après l'assemblage mécanique de la configuration expérimentale et après l'échauffement de l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 294 nm. (b) Positions obtenues après avoir attendu pour la relaxation mécanique et l'échauffement de l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 278 nm. (c) Positions obtenues après avoir attendu pour la relaxation mécanique, mais juste après avoir allumé l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 337 nm.

figure IV.4c peuvent apparaître. Ces dérives peuvent représenter une augmentation de la distance maximale à la moyenne de 337 nm. Elles illustrent l'impact des variations thermiques ou d'illuminations introduites par l'échauffement de l'éclairage, qui doit donc être pris en considération pour réaliser les mesures.

La caméra La caméra est un élément central du système de mesure par vision. La caméra utilisée pour réaliser les expériences est une caméra dont le type de capteur est du CCD global shutter⁴. Historiquement, les capteurs CCD étaient connus pour être moins bruités que les CMOS, grâce à leur architecture, mais ils pouvaient être impactés par un problème de gigue de pixel (« pixel jittering » en anglais) [Cappelleri 11]. Le global shooting permet d'obtenir l'image de la mire à un instant t réduisant très fortement le risque de décalages ou d'aberrations.

La caméra est choisie avec une résolution suffisante pour ni limiter ni impacter les mesures [Luo 01]. Elle a été configurée (gains des capteurs, temps d'exposition, corrections électroniques ou numériques des images) de manière à avoir des images de qualité [Pan 09]. Cette étape non triviale a une influence sur le contraste et le rapport signal sur bruit. Elle peut donc impacter la répétabilité et la justesse de la mesure [HO 83].

4. CCD signifie « Charge-Coupled Device » ou en français « dispositif à transfert de charges » et CMOS signifie « Complementary Metal Oxide Semi-Conducteur »

Une source d'incertitude très influente, identifiée à la suite de nombreuses expériences présentant toujours une dérive telle qu'illustré par la figure IV.4b, est l'échauffement de la caméra. Cette propriété désigne le fait de mettre la caméra en condition de fonctionnement (en mode acquisition avec les bons paramètres tels que les gains, le nombre d'images par secondes, etc.) pendant au moins une heure avant le début des acquisitions.

Ce résultat a fait l'objet d'une étude purement métrologique par Handel [Handel 07]. Dans son étude, il a analysé l'influence de l'échauffement d'une caméra sur l'acquisition d'images sur des échantillons à échelle métrique. Il a exhibé des dérives (0,08 et 0,04 pixel suivant la direction X et Y) similaires à celles observées dans les mesures effectuées (0,09 et 0,04 pixel suivant ces mêmes directions). Ces résultats confirment la source de la dérive observée, pouvant atteindre une distance à la moyenne de 278 nm, et dont l'origine physique est la dilatation thermique du capteur de la caméra.

IV.3.2 Protocole expérimental de mesures

Pour pouvoir réaliser l'étude d'incertitude et tester le protocole expérimental, une configuration équivalente à celle de l'étude proposée sur le Triskèle-Bot a été considérée et est illustrée par la figure IV.5.

Cette configuration expérimentale est constituée d'une caméra CCD IDS UI-2230SE-M-GL (réglé avec un temps d'exposition de 30 ms et 15 images par secondes), un microscope optique et un objectif 10x Mitutoyo WD PLAN APO (ouverture numérique de 0,28). La mise au point est faite de sorte à observer la mire présente sur un nanositionneur (NanoCube®P-611-3S de Physik Instrumente) au repos. Une source d'éclairage (Edmund optique MI-150) munie d'une fibre optique apporte la lumière au niveau de l'échantillon. Un support de fibre optique, fixé à une table anti-vibration par un système magnétique, permet d'orienter l'éclairage sur la zone d'intérêt.

Après avoir identifié les différentes sources d'incertitudes affectant la configuration expérimentale. Le protocole expérimental suivant a pu être élaboré :

- réguler la salle thermiquement.
- mettre l'ensemble des éléments de la configuration dans la pièce plusieurs jours à l'avance.
- fixer l'ensemble des éléments sans oublier les connectiques.
- attendre deux jours que la relaxation mécanique se fasse.
- allumer l'éclairage et attendre la stabilisation thermique.
- lancer la caméra dans sa configuration de fonctionnement pour faire son échauffement.
- lancer l'acquisition avec personne dans la salle de manipulation si c'est possible.

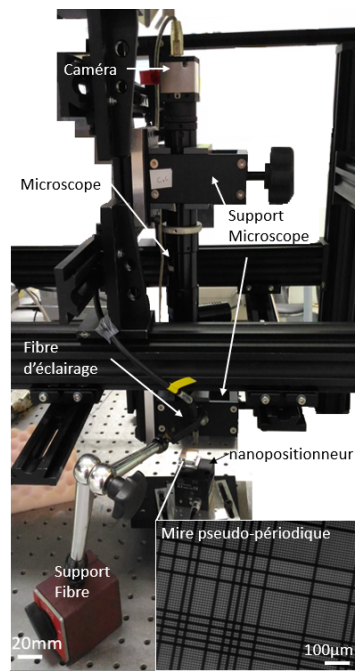


FIGURE IV.5 – Configuration expérimentale pour l'étude des incertitudes des mesures de pose.

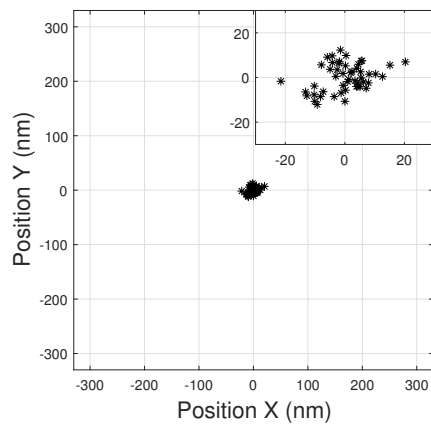


FIGURE IV.6 – Positions et orientations obtenues après avoir mis en place le protocole expérimental proposé. La valeur maximale des distances à la moyenne est de 22 nm et l'écart-type est de 5 nm pour une expérience de 90 s.

Le protocole décrit précédemment est mis en œuvre sur des expériences de 90 secondes (durée choisie correspondant à un compromis entre une expérience assez longue pour observer une potentielle stabilité et assez courte pour pouvoir obtenir des ensembles de mesures statistiquement représentatifs) dans une salle régulée en température à ± 1 ° C.

Les résultats expérimentaux ne présentent plus de dérive (figure IV.6). En effet, les positions sont regroupées autour de zéro formant quasiment une distribution gaussienne dont l'écart-type est de 5 nm. La distance maximale à la moyenne est alors réduite à 22 nm, soit une réduction de bruit supérieure à un facteur 10 par rapport aux mesures réalisées sans le protocole (figures IV.4a, IV.4b et IV.4c).

	Protocole			Résultats	
	Échauffement		Relaxation	Erreur Maximale	Écart Type
	Caméra	Éclairage	Mécanique		
Fig. IV.4a système #1		✓		294 nm	N.A.
Fig. IV.4c système #1		✓	✓	278 nm	N.A.
Fig. IV.4b système #1			✓	337 nm	N.A.
Fig. IV.6 système #1	✓	✓	✓	22 nm	5 nm
système #2	✓	✓	✓	24 nm	5 nm

TABLE IV.1 – Résumé de l'impact de différentes incertitudes sur les mesures réalisées montrant l'apport du protocole de mesure proposé pour des mesures par vision en microrobotique. Le système de vision #1 utilise une caméra de type CCD alors que le système #2 utilise une caméra CMOS. (N.A.= Non Applicable)

IV.3.3 Reproductibilité de la mesure

L'étude d'incertitude a permis d'élaborer un protocole expérimental pour réaliser des mesures sans dérive. Pour montrer que le protocole expérimental est répétable et généralisable pour d'autres systèmes de vision, deux expériences sont effectuées.

La première expérience consiste à prendre un autre système de vision classiquement utilisé en microrobotique et à refaire la même expérience en appliquant le protocole de mesure. Ce nouveau système de vision est composé : d'une caméra IDS UI-3880CP-C-HQ (dont la technologie de capteur est du CMOS) avec un tableau de pixels de 3088×2076 ; d'un autre tube de microscope de la marque Optem et de la même lentille d'objectif. Les résultats sont du même ordre de grandeur que pour le premier système de vision. En effet, l'écart-type de la distance

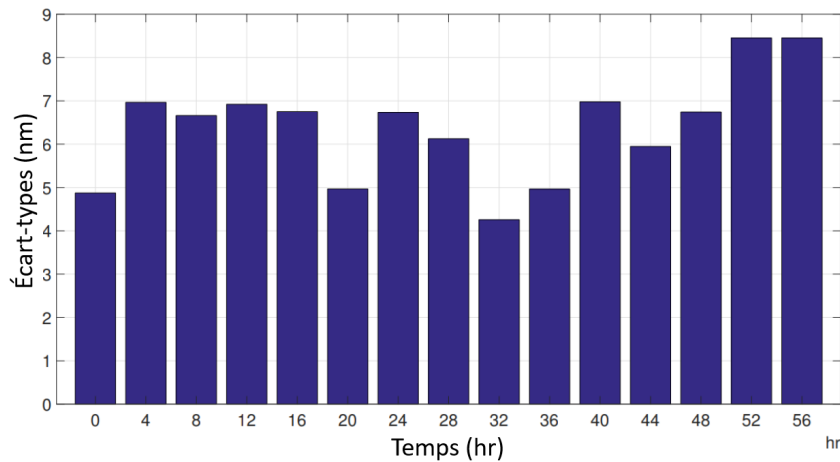


FIGURE IV.7 – Écarts-types des distances à la moyenne résultantes des différentes séries d’acquisitions effectuées toutes les 4 heures (hr) pour une durée totale de 56 heures.

à la moyenne obtenue est de 5 nm et la distance maximale à la moyenne est de 24 nm. Ce résultat indique que le protocole expérimental proposé est applicable pour d’autres systèmes de vision et qu’il peut donc être reproduit par d’autres personnes sur des configurations expérimentales différentes. À titre d’exemple, il a été repris pour réaliser des caractérisations sur des fibres naturelles [Placet 19]. L’ensemble des résultats expérimentaux présentés dans cette partie d’analyse des incertitudes sont rassemblés dans le tableau IV.1.

La deuxième expérience consiste à prendre des images pendant 90 secondes toutes les quatre heures sur 56 heures. Durant toute la durée de l’expérience, la salle de manipulation a été interdite d’accès. Cette expérience permet de montrer la répétabilité des mesures sur une longue période de temps. Les écarts-types des distances à la moyenne résultants des différentes séries d’acquisitions sont visibles sur la figure IV.7. Cette expérience s’est déroulée du vendredi après-midi au lundi midi. On peut voir qu’il n’y a pas de variation suivant la période de la journée prouvant une certaine robustesse (notamment vis-à-vis des variations lumineuses). L’ensemble de ces écarts-types sont du même ordre de grandeur. Leur valeur maximale ne dépasse pas 9 nm ce qui est acceptable pour pouvoir faire des mesures aux échelles considérées. L’écart-type de cette reproductibilité, défini comme étant la valeur quadratique des variances des erreurs, est de 4 nm. Ce résultat assure qu’en utilisant la configuration expérimentale développée et le protocole expérimental, des mesures stables sur plusieurs journées peuvent être réalisées.

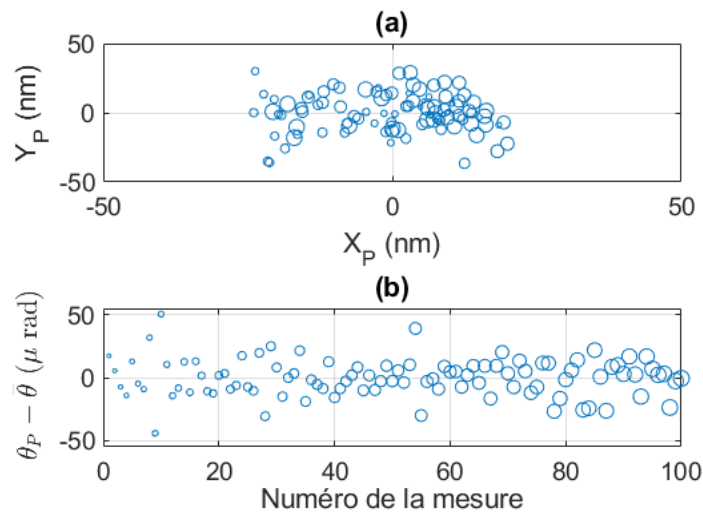


FIGURE IV.8 – Quantification du bruit statique en position (a) et en orientation (b) lorsque le robot tient une position en conditions de fonctionnement. La taille des points dépend du temps d’acquisition des images.

IV.4 RÉPÉTABILITÉ EXPÉRIMENTALE DU TRISKÈLE-BOT

Dans la section précédente, la capacité à mesurer une position de manière précise et répétable a été montrée. Déjà estimée statistiquement grâce au modèle dans le chapitre précédent, la répétabilité du Triskèle-Bot est quantifiée expérimentalement dans cette section. Pour pouvoir comparer ces deux résultats, le même protocole va être utilisé.

Avant de faire cette quantification, il est nécessaire d’étudier le bruit statique relatif aux équipements utilisés. Ce bruit statique est défini comme l’ensemble des mouvements perçus par le système de mesure lorsque le prototype en fonctionnement maintient une position. La connaissance de cette information permet de définir une limite inférieure en dessous de laquelle les données ne pourront pas véritablement être concluantes, car indifférenciables de ce bruit.

IV.4.1 Quantification du bruit statique

La configuration expérimentale est la même que celle expliquée dans la section IV.2.2. Cette étude quantifie l’influence des nouvelles conditions expérimentales comme la salle non régulée en température, l’air propulsé par le coussin d’air et les vibrations des actionneurs (introduites lorsque ces derniers maintiennent une position). Trois séries de mesures sont effectuées : une sans l’air et les actionneurs au repos, une avec l’air et les actionneurs aux repos et une dernière en conditions de fonctionnement nominales (présence d’air et actionneurs en maintien de position).

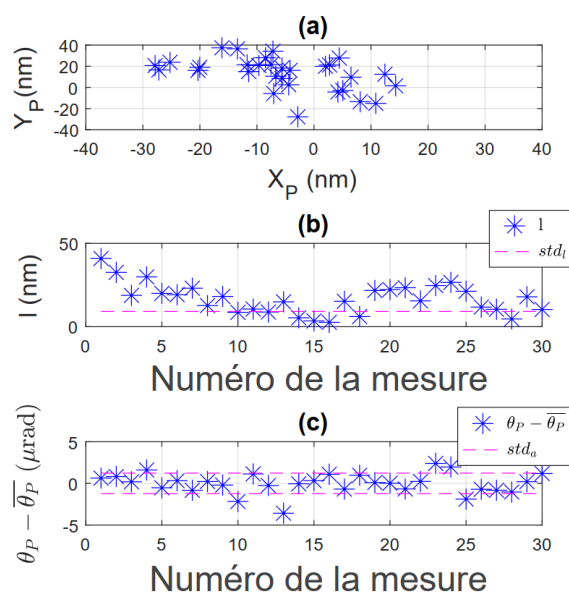


FIGURE IV.9 – Résultats expérimentaux de la quantification de la répétabilité lorsqu’une translation de $100\ \mu\text{m}$ est effectuée par le premier actionneur q_1 depuis la position P_I . (a) Positions de la plateforme (b) Distances à la moyenne des positions mesurées de la plateforme. (c) Différences entre les orientations mesurées et leur moyenne. Les écarts-types std_l et std_a correspondent respectivement à la répétabilité en position et en orientation.

L’ensemble de ces expériences a montré des résultats ayant toutes le même ordre de grandeur. Ces résultats vérifient que ni le coussin d’air ni les actionneurs ne venaient perturber les mesures. L’écart-type des distances à la moyenne en position et en orientation est de $8,2\ \text{nm}$ et de $2,6\ \mu\text{rad}$. La répétabilité en position est donc légèrement supérieure à celle relevée dans la section précédente. Cette augmentation peut-être expliquée par une accumulation de petits changements ou par le fait que la salle ne soit plus régulée en température.

Pour faire diminuer ce bruit statique, il est judicieux de répéter la mesure plusieurs fois (3) et de calculer des moyennes sur les poses de ces images acquises successivement. De cette manière, les écarts-types des distances à la moyenne du bruit statique sont réduits à $6,6\ \text{nm}$ pour la position et à $1,85\ \mu\text{rad}$ pour l’orientation. Ces résultats sont illustrés dans la figure IV.8. Les graphiques montrent respectivement la position de la plateforme et la différence entre ses orientations mesurées et leur moyenne. La répartition des points (dont la taille augmente en fonction du temps d’acquisition) en position et l’absence de tendance pour l’orientation montrent que la mesure ne présente pas de dérive.

TABLE IV.2 – Répétabilité en position et en orientation obtenues par la méthode de Monte-Carlo et expérimentalement pour les différents cas. Les quatre premiers cas correspondent aux allers-retours de 100 μm à partir des différents points de l'espace de travail. Le dernier cas correspond à des allers-retours de 100 μm réalisés par les trois actionneurs à partir de la position initiale (P_1).

	Répétabilité en Position		Répétabilité en Orientation	
	Estimée	Expérimentale	Estimée	Expérimentale
P_1	7,77 nm	9,13 nm	1,26 μrad	1,2 μrad
P_2	16,73 nm	12,7 nm	1,74 μrad	0,71 μrad
P_3	29,87 nm	19,95 nm	1,89 μrad	1,48 μrad
P_4	12,56 nm	12,18 nm	1,82 μrad	1,75 μrad
P_{1-3} act.	9,5 nm	12,86 nm	1,77 μrad	1,36 μrad

IV.4.2 Quantification de la répétabilité expérimentale

La répétabilité est une propriété intrinsèque d'un robot. Dans le chapitre précédent, elle avait été estimée au moyen d'une méthode de Monte-Carlo. Dans ce chapitre, la répétabilité est évaluée expérimentalement en utilisant le même protocole. Ce dernier est constitué de cinq séries d'expériences. Les quatre premières consistent à faire des allers-retours de 100 μm avec l'un des actionneurs en partant de quatre positions différentes. La dernière série consiste à faire des allers-retours de 100 μm avec les trois actionneurs en partant de la position initiale. Dans chacun des cas, ces déplacements entre deux positions sont répétés au minimum 30 fois pour être statistiquement représentatifs.

La configuration expérimentale est composée du prototype et du banc de mesure. La vitesse des actionneurs est fixée à 20 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette dernière, qui semble peu élevée, est suffisante pour la plupart des applications aux petites échelles. Le protocole de mesure proposé est utilisé en prenant trois images par configuration articulaire. Le traitement d'image, expliqué en section IV.2.3.b, fournit pour chaque image la pose cartésienne associée. La moyenne des poses des trois images est calculée pour déterminer la pose associée à une configuration articulaire.

La figure IV.9 montre les résultats expérimentaux obtenus pour le premier cas (i.e. déplacement de 100 μm de l'actionneur 1 à partir de la position initiale P_1). Les graphiques (b) et (c) illustrent respectivement les distances à la moyenne des positions atteintes durant l'expérience l et les différentes distances angulaires à la moyenne $\theta_P - \bar{\theta}_P$. Les distances maximales à la moyenne en position et orientation sont de 40,93 nm et 4,2 μrad . Les écarts-types de ces valeurs, représentant respectivement la répétabilité en position et en orientation, sont de 9,13 nm et de 1,2 μrad .

Le tableau IV.2 montre les différentes répétabilités obtenues théoriquement et expérimentalement pour les différents cas. On peut tout d’abord noter que la concordance entre les résultats expérimentaux et théoriques est plutôt bonne. Comme pour l’estimation par simulation, la répétabilité du Triskèle-Bot est globalement inférieure à l’incertitude des actionneurs qui est de 18,2 nm pour un déplacement de 100 μm . Les légères différences peuvent être expliquées, d’une part par des imprécisions du modèle (qui feront l’objet du chapitre suivant), d’autre part par la proximité des résultats avec le niveau de bruit statique. Néanmoins, elle reste comparable à celle obtenue par des systèmes à articulations flexibles $XY\theta$ spécialement construits pour être précis [Zeyi Wu 18], tout en proposant un espace de travail 10 fois plus important.

IV.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une étude sur la répétabilité expérimentale du Triskèle-Bot a été menée pour savoir si les RPC peuvent être assez répétables pour pouvoir effectuer des tâches de positionnement à l’échelle micrométrique.

Pour cela, un banc de mesure, constitué d’une mire et d’un système de vision, permettant d’obtenir la pose cartésienne du Triskèle-Bot a été présenté. Le principe de mesure de la mire pseudo-périodique encodée, collée sur la plateforme du robot, et l’algorithme de traitement d’images ont été expliqués. Une étude sur les sources d’incertitudes à petites échelles a abouti à l’élaboration d’un protocole de mesure permettant d’avoir un bruit de mesure statique inférieur à 10 nm.

Pour finir, en utilisant ce protocole, la répétabilité du Triskèle-Bot a été quantifiée sur plusieurs points répartis dans son espace de travail. Les résultats montrent une répétabilité maximale inférieure à 19.95 nm et 1,75 μm et une répétabilité minimale de 9.13 nm et 0,71 μrad . Les résultats sont du même ordre de grandeur que les estimations, résultant de la propagation des incertitudes des actionneurs (limitée à une seule direction), et les quantifications expérimentales montrent que les actionneurs sont en grandes parties responsables des imprécisions du Triskèle-Bot. Ainsi, la répétabilité obtenue pourrait sûrement être améliorée si des actionneurs plus répétables étaient intégrés.

Ces résultats sont comparables aux structures polyarticulées à articulations flexibles destinées à la haute précision [Zeyi Wu 18] tout en proposant un espace de travail 10 fois supérieur. Ce constat montre l’intérêt des RPCP pour les applications à l’échelle micrométrique et ont fait l’objet d’une publication dans le journal *Robotic and Automation Letters* [Mauzé 20] et d’une présentation à la conférence virtuelle RoboSoft2020.

Chapitre V

Contrôle et justesse du Triskèle-Bot

V.1	Introduction	80
V.2	Étude des sources d’erreurs	81
V.3	Principe de l’étalonnage	82
V.4	Mesures des paramètres intrinsèques du robot	84
	V.4.1 Moyen et principe de mesure	84
	V.4.2 Protocoles expérimentaux des mesures des paramètres... ..	85
	V.4.3 Analyse de sensibilité des paramètres du modèle du Triskèle- Bot	88
V.5	Mesures des poses du Triskèle-Bot	89
V.6	Identification des paramètres du modèle	91
	V.6.1 Principe de l’identification	91
	V.6.2 Stratégie d’identification.....	93
	V.6.3 Simulation de l’identification	93
	V.6.4 Validation expérimentale de l’identification	94
V.7	Contrôle et étude de la justesse du Triskèle-Bot	96
	V.7.1 Principe de la commande et de la quantification de la justesse du robot	96
	V.7.2 Étude de la justesse du Triskèle-Bot	96
V.8	Conclusion	98

Dans le but de réaliser des tâches de micro-positionnement automatisées requérant de la précision, la solution robotique choisie doit présenter une bonne justesse. Cette performance n'est que très rarement étudiée chez les RPCs, les excluant jusqu'ici des solutions envisagées. Dans ce chapitre, la commande et la justesse du Triskèle-Bot sont étudiées. Un processus d'étalonnage est détaillé et effectué de sorte à améliorer la cohérence entre le prototype et le modèle, précédemment développé. Pour finir, la justesse du robot est quantifiée sur les trajectoires réalisées.

V.1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons défini l'espace de travail et mesuré la répétabilité du Triskèle-Bot. Dans ce chapitre, la capacité du modèle (détaillé au chapitre 2) à prévoir le comportement du robot va être quantifiée. La justesse d'un robot est caractérisée par sa capacité à atteindre une position commandée. Cela dépend du modèle choisi issu d'un compromis entre richesse du modèle, son implémentation (e.g. temps de calcul) et l'application visée. En effet, un modèle présentant beaucoup d'hypothèses sera généralement facile à écrire et à résoudre, mais il ne pourra pas retranscrire assez fidèlement le comportement du robot. Une fois le modèle et les hypothèses choisis, ses paramètres doivent représenter au mieux la réalité. Cependant, trouver ces paramètres est un vrai défi au vu des nombreuses sources d'erreurs impactant les systèmes de micro-positionnement. Ces dernières seront présentées en début de chapitre.

Pour réduire l'influence des sources d'erreurs géométriques, considérées comme prédominantes [Wu 17], un étalonnage géométrique du Triskèle-Bot sera mis en place et sera détaillé tout au long de ce chapitre. Ce dernier sera effectué grâce au système de mesure par vision et à la mire pseudo-périodique encodée présentés dans le chapitre 4. Dans un premier temps, l'étape de modélisation sera abordée en détaillant la mesure des paramètres intrinsèques. Cette opération permet également de quantifier les incertitudes effectuées sur chaque paramètre afin de calculer leur influence sur le modèle.

Ensuite, nous détaillerons l'étape de préparation, de mesure et d'identification. Cette identification s'effectuera au moyen d'une stratégie originale permettant d'obtenir un nouvel ensemble de paramètres. L'apport de cette identification sera montré expérimentalement en calculant des coefficients d'erreur sur un ensemble d'identification et un ensemble de validation. Pour finir, nous mesurerons la justesse du robot commandé en position sur deux trajectoires différentes.

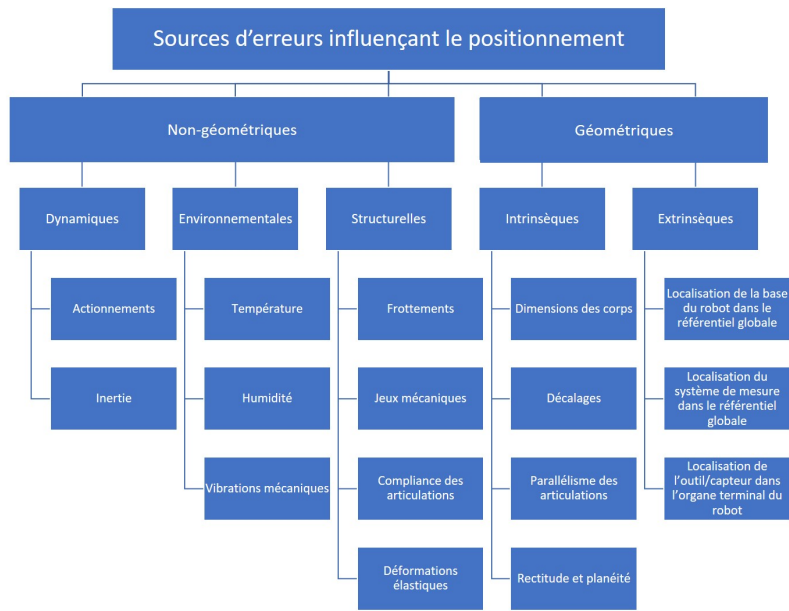


FIGURE V.1 – Sources d'erreurs géométriques et non-géométriques impactant le positionnement

V.2 ÉTUDE DES SOURCES D'ERREURS

Ces sources d'erreurs peuvent être réparties suivant leur provenance en deux catégories : les sources géométriques et celles non-géométriques. Les sources non-géométriques sont généralement plus compliquées à prendre en compte et à modéliser. Elles peuvent être des erreurs induites par la dynamique du robot (inertie, défaut du système d'actionnement, etc.), les erreurs relatives à la structure du robot (déformations élastiques des corps du robot [Rognant 10], compliance des articulations [Ecorchard 10], les jeux mécaniques dans les transmissions [Tsai 08], etc.) ou les erreurs relatives à l'environnement (variations de température [Tan 13b] ou d'humidité [Jaaskelainen 09] ou vibrations de l'air [Boudaoud 12] ou du sol [Shiakolas 02]).

Les sources d'erreurs géométriques peuvent être des erreurs intrinsèques ou extrinsèques au robot. Les erreurs géométriques intrinsèques sont généralement dues aux erreurs de fabrication, d'usure ou d'assemblage. Les erreurs d'assemblage se caractérisent par des défauts de parallélisme et de perpendicularité entre les corps, qui peuvent être importants en cas d'assemblage. Celles relatives à la fabrication ou à l'usure se traduisent par des différences entre valeurs théoriques (celles de la fiche technique) et les valeurs réelles des dimensions des corps composant le robot. Cette différence entre les valeurs des paramètres considérés dans le modèle et ceux en réalité va induire des erreurs de positionnements de l'organe terminal. Deux sources d'imprécisions, généralement négligées en robotique macroscopique sont la rectitude et la planéité des corps ou du système d'actionnement. Ce problème

avait été explicité dans le chapitre 3 lorsque nous avons présenté les défauts des actionneurs. En plus de présenter des mouvements parasites multidirectionnels, des erreurs de décalages peuvent exister entre les coordonnées articulaires renvoyées par les capteurs et les mouvements réellement effectués. Des erreurs spécifiques aux robots continus sont également à considérer comme les potentielles déformations plastiques des matériaux, qui peuvent modifier la forme des éléments continus de manière définitive.

Les erreurs géométriques extrinsèques sont liées aux localisations entre les repères liés au robot (base et organe terminal) à ce qui est ajouté dessus (outil, capteur), au moyen de mesure (s'il y a) et au référentiel global de la cellule robotique. On peut donc définir à minima trois transformations :

- la transformation entre le repère associé à la base du robot et le repère global,
- la transformation entre le repère associé à l'outil ou le capteur et celui associé à l'organe terminal,
- la transformation entre le système de mesure et le repère global.

L'ensemble de ces transformations relatives à l'étude présentée ici sera détaillé plus tard dans ce chapitre.

L'ensemble de ces sources d'erreurs (figure V.1) influe sur les valeurs des paramètres inclus dans le modèle avec des impacts différents, mais les paramètres géométriques semblent être les plus influents [Wu 17]. De plus, considérant le plus particulièrement le cas des RPC de positionnement, on peut remarquer que de nombreuses sources non-géométriques peuvent être négligées dû à leurs propriétés intrinsèques. C'est le cas des frottements au niveau des articulations par exemple. Dans le cas présenté ici, le respect des hypothèses quasi-statiques du modèle fait que les sources liées à la dynamique semblent pouvoir être négligées, et l'utilisation d'un coussin d'air permet de négliger la compliance due à la charge. Les sources extérieures, qui ont également un fort impact sur la mesure, obligeront à identifier les paramètres du modèle régulièrement. C'est pourquoi il a été choisi d'effectuer un étalonnage géométrique du Triskèle-Bot dont le principe sera présenté dans la section suivante.

V.3 PRINCIPE DE L'ÉTALONNAGE

Pour identifier et compenser ces sources d'erreurs qui altèrent le positionnement absolu du robot, un processus d'étalonnage est mis en place. Ce dernier permet d'améliorer la corrélation entre la modélisation et le comportement réel du robot. Il s'effectue en utilisant un moyen de mesure externe (étalonnage externe) ou des capteurs proprioceptifs du robot (auto-étalonnage).

Il peut se faire à trois niveaux :

- Niveau 1 : L'étalonnage articulaire qui consiste à identifier et compenser les erreurs liées à l'actionnement, de sorte à faire correspondre les valeurs délivrées par leurs capteurs internes aux déplacements réellement effectués.

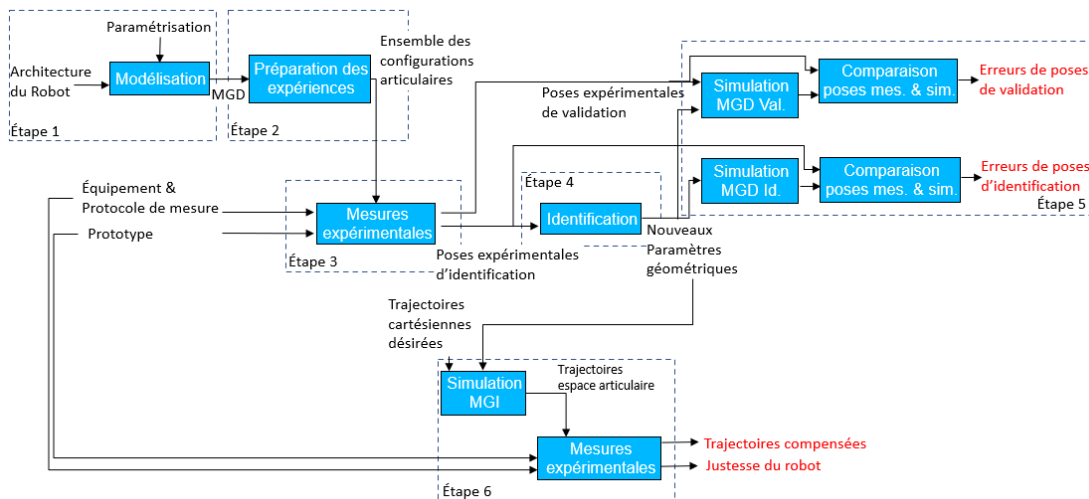


FIGURE V.2 – Processus d'étalonnage complet avec ses différentes étapes.

- Niveau 2 : L'étalonnage géométrique qui identifie en plus des paramètres précédents, les paramètres géométriques intrinsèques et extrinsèques au robot.
- Niveau 3 : L'étalonnage non-géométrique qui se caractérise par l'identification des paramètres des niveaux précédents et inclus d'autres paramètres permettant de modéliser les effets non-géométriques.

Indépendamment du niveau choisi, les méthodes d'étalonnages comportent plusieurs étapes, illustrées par le diagramme de la figure V.2. La première étape consiste à modéliser le robot le plus fidèlement possible. Un modèle doit donc être choisi et ses paramètres doivent être mesurés le plus fidèlement possible afin d'obtenir un MGD et un MGI représentatifs du robot physique.

La seconde étape consiste à préparer en amont les expériences effectuées. Cette étape n'est pas obligatoire pour un processus d'étalonnage, mais elle permet d'améliorer l'identification et ainsi, rendre l'étalonnage plus efficace. Par exemple, choisir un ensemble de poses spécifiques peut permettre d'améliorer la justesse sur l'ensemble de l'espace de travail [Wu 13] ou seulement sur une partie spécifique destinée à une application donnée [Wu 15]. Pour cela, il est possible d'utiliser des indices d'observabilités pouvant faciliter le processus. Dans sa thèse [Wu 14], Wu explique de manière détaillée l'apport de cette étape supplémentaire.

Durant la troisième étape, les configurations articulaires préparées précédemment sont utilisées et la mesure des poses cartésiennes correspondantes est effectuée. Le système de mesure doit présenter une résolution et enregistrer un bruit statique inférieur ou du même ordre de grandeur que la répétabilité du robot étudié. La mesure peut être complète (position et orientation de l'organe terminale) ou partielle (position).

La quatrième étape est celle de l'identification. Elle a pour objectif d'identifier les paramètres du modèle considéré. Elle consiste à changer les valeurs des paramètres itérativement de sorte à réduire la différence entre poses expérimentales et poses calculées par le MGD. Cette étape fait généralement l'objet d'un problème de minimisation, par rapport aux paramètres considérés, de la somme quadratique des écarts relevés lors de la mesure.

La cinquième étape a pour objectif de valider les nouveaux paramètres obtenus à l'issue de l'identification. Elle consiste à quantifier l'apport des nouveaux paramètres en calculant des coefficients d'erreur de poses sur des ensembles de configurations d'identification et de validation.

La dernière étape est celle de l'implémentation du modèle incluant les paramètres identifiés. Elle consiste à utiliser les nouvelles valeurs des paramètres dans le MGI de sorte à commander le robot pour réaliser des trajectoires désirées. Dans les sections suivantes, les différentes étapes de l'étalonnage seront présentées en commençant par la mesure de paramètres constituant le modèle du robot (étape de modélisation).

V.4 MESURES DES PARAMÈTRES INTRINSÈQUES DU ROBOT

V.4.1 Moyen et principe de mesure

Lors de la conception et de la fabrication du Triskèle-Bot, une attention particulière a été portée sur le fait de rendre mesurables les paramètres intrinsèques de son modèle. Cette réflexion nous a mené à considérer des fixations présentant un Qr-Code sur leur surface. Le système de mesure par vision permet de mesurer la pose planaire du centre de la mire dans le référentiel caméra.

Cette pose résulte d'un traitement d'image en deux étapes. La première consiste à utiliser les trois doubles carrés imbriqués (présent sur trois des quatre coins d'un Qr-Code) pour obtenir grossièrement la pose du centre de la mire. Connaissant cette dernière, l'image est réduite et centrée sur la mire. Une deuxième étape continue alors le traitement d'image, consistant en une étude de phase (similaire à celle de la mire pseudo-périodique) pour obtenir une pose plus précise.

Cependant, contrairement à la mire pseudo-périodique, dont la fabrication est contrôlée par interférométrie, le Qr-Code est réalisé par gravure laser avec une incertitude due au fait que l'échelle n'est pas calibrée. La mesure étant fondée sur la périodicité de la mire, nous avons étudié son incertitude de fabrication. Pour cela, des déplacements incrémentaux ascendants et descendants successifs ont été réalisés. En recalant les données en sorties de l'algorithme de vision avec celles renvoyées par les règles optiques des actionneurs (capteurs intégrés), la valeur de la période métrique de chaque mire montée sur ces derniers a pu être déterminée. Les résultats ont montré des différences de l'ordre de 6 % entre les différentes périodes gravées. Malgré cette incertitude, la connaissance de la pose des centres des Qr-Codes permet de mesurer les valeurs nominales des paramètres du modèle. Ces différents protocoles avec leur incertitude de mesure associée sont développés dans les sous-parties suivantes.

V.4.2 Protocoles expérimentaux des mesures des paramètres

V.4.2.a Paramètres des fibres

Le diamètre des fibres est mesuré grâce à un pied à coulisse. L'incertitude de mesure de ce paramètre est donc d'environ 20 μm . Le fait que les trois fibres aient été découpées depuis une seule même fibre optique assure une égalité des valeurs.

La longueur des fibres est mesurée de deux façons. La première est l'utilisation d'un pied à coulisse lorsque les fibres sont droites, libres de contraintes, dans leur fixation. La seconde façon est réalisée avec le système de vision. Lorsque le robot est en position initiale, on vient focaliser la caméra sur une fibre en entier. Une image est acquise et traitée avec un logiciel d'édition d'image. La longueur de la fibre est alors mesurée en pixels avec une incertitude maximale de 3 pixels ($\approx 126 \mu\text{m}$). Cette opération est répétée pour les trois fibres.

V.4.2.b Paramètres des transformations entre Qr-Codes et fibres

Par construction des fixations, la transformation entre le centre du Qr-Code et le point d'encastrement de la fibre est connue grâce aux encoches réalisées. L'orientation de la fibre définie par l'alésage est considérée colinéaire à la mire. L'incertitude sera donc considérée comme négligeable devant celle faite lors de la mesure de l'orientation de la mire. Les translations sont de $14 \text{ mm} \pm 840 \mu\text{m}$ et de $250 \mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$ dans les directions X et Y en considérant les incertitudes dues à la fabrication du Qr-Code.

Pour réduire cette incertitude, des images montrant seulement la zone d'encastrement avec le motif ont été enregistrées. En utilisant le même principe que pour la mesure de la longueur, l'incertitude dans la direction X a pu être réduite à environ 160 μm .

V.4.2.c Positions relatives des extrémités des fibres

Les positions des extrémités des fibres sont très importantes. En effet, les extrémités proximales servent de conditions initiales pour l'intégration des fibres, tandis que les extrémités distales doivent respecter les conditions de corps rigide de la plateforme. L'ensemble des relations entre les extrémités proximales et distales est obtenu avec une seule expérience. La caméra est fixée en haut du bâti de sorte que les 6 Qr-Codes soient visibles. Ces dernières sont différenciables par l'absence d'un petit carré dans leur motif localisé à six endroits différents. Ainsi, on va pouvoir déduire les relations entre les différentes extrémités distales et proximales. Ces nouvelles relations distales permettent de mettre à jour les conditions de corps rigides du modèle. Les nouvelles relations proximales permettent de redéfinir leurs positions initiales (actionneurs en position de référence).

L'incertitude avec laquelle ces relations sont trouvées est de 60 μm et 12,1 mrad.

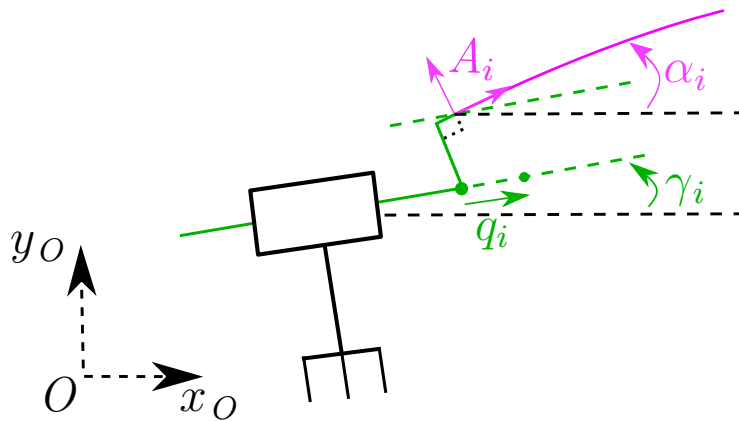


FIGURE V.3 – Schéma illustrant le désalignement entre l'orientation de l'axe de translation des actionneurs γ_i et celle du Qr-Code α_i par rapport au référentiel global.

Elles proviennent essentiellement des conditions d'éclairage non-uniforme sur toutes les Qr-Codes et des vibrations introduites par la hauteur de la fixation de la caméra.

V.4.2.d Orientations des axes de translation des actionneurs

Les actionneurs utilisés possèdent des encodeurs optiques résolus au nanomètre. On considère ici que les incertitudes d'actionnements sont inférieures à celles introduites lors de l'assemblage du prototype. En effet, lorsque les fixations des fibres sont fixées sur les actionneurs, les orientations des axes de translation des actionneurs dans le repère de référence γ_i peuvent être différentes de celles α_i renvoyées par les Qr-Codes. La figure V.3 illustre cette différence angulaire. Pour quantifier cette dernière et l'intégrer à notre modélisation, une expérience a été réalisée selon le protocole suivant. Le système de vision est positionné de manière à voir entièrement la fixation fixée sur l'actionneur i . Des déplacements de 1 mm positivement et négativement, par pas de 250 μm , sont effectués par ce dernier. À chaque pas, une image est acquise. Elle est ensuite traitée pour obtenir la pose cartésienne du centre du Qr-Code. À partir de l'ensemble des positions enregistrées, on réalise une régression linéaire pour déterminer l'axe de translation de l'actionneur i . À partir de la pente de cette direction, la mesure de l'orientation γ_i est réalisée. L'angle de désalignement peut donc être déduit des mesures d'orientation par vision. En effectuant plusieurs fois l'expérience, une incertitude de mesure de 5 mrad a pu être définie. Cette expérience est répétée pour les trois actionneurs.

Paramètres				Conséquence de l'incertitude de chaque paramètre				
	Valeurs nominales			Incertitudes	$ \sigma_{\hat{\sigma}_{max}} - \sigma_{max} $	$max(\hat{x} - x)$	$max(\hat{y} - y)$	$max(\hat{\theta} - \theta)$
d	125 μm			20 μm	10 MPa	6×10^{-9} μm	5×10^{-9} μm	2×10^{-9} mrad
E	69,22 μm			0,42 GPa	10 MPa	6×10^{-9} μm	5×10^{-9} μm	2×10^{-9} mrad
l_i	28,7 μm	29,4 μm	29,7 μm	0,126 μm	15 MPa	133 μm	122 μm	14 mrad
γ_i	2,46 rad	0,36 rad	-1,75 rad	2 mrad	1,5 MPa	4,8 μm	4,8 μm	2,3 mrad
α_i	2,45 rad	0,35 rad	-1,75 rad	2 mrad	50 MPa	12,1 μm	14 μm	4,2 mrad
β_i	2,58 mrad	0,50 rad	-1,59 rad	2 mrad	10 MPa	5,5 μm	5,5 μm	3,2 mrad
A_{x_i}	175,69 μm	41,69 μm	103,77 μm	500 μm	30 MPa	354 μm	242 μm	39 mrad
A_{y_i}	24,89 μm	19,14 μm	139,03 μm	500 μm	30 MPa	241 μm	242 μm	36 mrad
B_{x_i}	152,31 μm	68,81 μm	102,09 μm	500 μm	30 MPa	238 μm	152 μm	46 mrad
B_{y_i}	40,78 μm	31,89 μm	109,79 μm	500 μm	30 MPa	206 μm	329 μm	42 mrad

TABLE V.1 – Valeurs nominales des paramètres avec leurs incertitudes de mesure et leur impact sur le Triskèle-Bot. L'impact est quantifié par la différence entre les valeurs de contraintes et de poses simulées pour des valeurs de paramètres nominales ($\hat{\sigma}$, \hat{x} , \hat{y} , $\hat{\theta}$) et modifiées par les incertitudes (σ , x , y , θ)

V.4.3 Analyse de sensibilité des paramètres du modèle du Triskèle-Bot

Dans la section précédente, les différents protocoles de mesure permettant d'obtenir une valeur nominale des paramètres présents dans le MGD et MGI ont été présentés. En plus de ces valeurs, les incertitudes de mesure associées ont été déterminées. Ces dernières permettent de définir des intervalles de valeurs dans lesquels les véritables valeurs des paramètres sont incluses. Les valeurs nominales seront affinées grâce au processus d'identification. Le nombre de paramètres étant relativement important (26 paramètres), il est intéressant d'effectuer une étude de sensibilité, pour quantifier l'influence des différentes incertitudes sur la configuration de la plateforme obtenue par le MGD. Cette étude permet de déterminer les paramètres qui devront être identifiés en priorité lors de l'étape d'identification du processus d'étalonnage.

Le protocole de cette étude est le suivant. On considère un ensemble de configurations articulaires \mathbf{Q} . D'un côté, les poses cartésiennes planaires \hat{x} , \hat{y} , $\hat{\theta}$ sont calculées en utilisant le MGD avec les valeurs nominales des paramètres. Cet ensemble de poses est considéré comme étant celui de référence. D'un autre côté, la valeur maximale de l'intervalle d'incertitude de ce paramètre est ajoutée à sa valeur nominale pour calculer les poses cartésiennes x , y , θ correspondantes. On compare, ensuite, la contrainte maximale dans les fibres σ_{max} et les poses obtenues pour le cas nominal et non nominal. Cette même opération est effectuée avec la valeur minimale de l'intervalle d'incertitude des paramètres. Le tableau V.1 rassemble les résultats de cette étude.

Plusieurs choses peuvent être observées. La première est que le diamètre et le module d'Young n'ont pas d'influence sur la position et ne modifient que très peu la contrainte maximale des fibres. La seconde est la forte influence de l'angle α_i sur la contrainte maximale dans les fibres. Cette forte influence s'explique par le fait qu'on tend ou détend les fibres en modifiant ce paramètre (caractère amplifié lorsque les actionneurs bougent). Cette incertitude assez faible a cependant peu d'impact sur la pose de la plateforme. Ce paramètre ne sera donc pas priorisé. Pour finir, on constate que les paramètres les plus influents au niveau des différences de poses et de contraintes maximales sont les longueurs et les positions des extrémités des fibres. Cela peut être expliqué par le fait que ces paramètres influent grandement sur la résolution des équations du modèle de Kirchhoff et sur les conditions de corps rigide au niveau de la plateforme, réduisant ainsi la justesse du robot.

Le vecteur des paramètres géométriques intrinsèques au robot impactant la position de la plateforme peut donc s'écrire : $\pi_r = [l_i, \alpha_i, \gamma_i, \beta_i, A_{x_i}, A_{y_i}, B_{x_i}, B_{y_i}]^T$, $i \in 1, 2, 3$. Néanmoins, considérant l'ensemble des résultats, on peut en déduire que les paramètres à identifier en premier sont les longueurs et les extrémités des fibres.

L'influence du nombre d'éléments discrétisant les fibres a également été étudié, le but étant de choisir sa valeur telle que les équations soient résolues le plus rapidement possible, sans avoir de modification numérique des résultats. Ces derniers étant fondés sur une optimisation, réduire la durée d'une boucle fait gagner un temps de calcul considérable. Suite à un raisonnement itératif en considérant

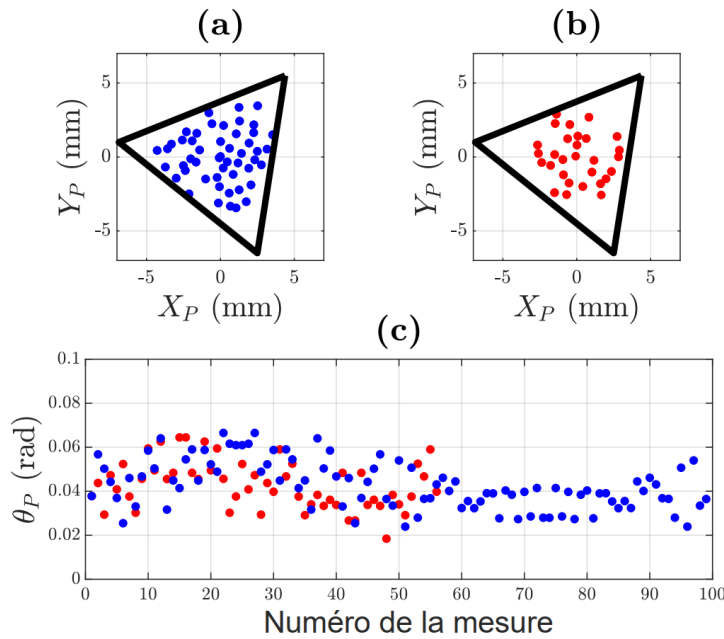


FIGURE V.4 – Positions (a,b) et orientations (c) de la plateforme considérant les ensembles de configurations articulaires destinés aux étapes d’identification (bleu) et de validation (rouge).

plusieurs valeurs, il a été déterminé que le temps minimal était atteint pour une discrétisation de 30 éléments, soit un élément tous les millimètres si on considère la longueur nominale des fibres (≈ 30 mm).

V.5 MESURES DES POSES DU TRISKÈLE-BOT

Dans l’objectif d’améliorer la justesse du robot sur l’ensemble de son espace de travail, les poses considérées pour l’étape de mesure ont besoin d’être judicieusement choisies. Pour cela, il est possible d’utiliser des indices d’observabilités pouvant faciliter le processus. Dans sa thèse [Wu 14], Wu explique de manière détaillée l’apport de cette étape supplémentaire. Dans le cas présent où les modèles reposent déjà sur une optimisation, introduire un indice sur l’étalonnage introduirait trois optimisations imbriquées (modèle, choix des poses, identification). Il a donc été décidé de seulement préparer deux ensembles de coordonnées articulaires bien répartis dans l’espace de travail. Le premier ensemble servira d’ensemble d’identification et le second servira de validation. L’ensemble d’identification doit comporter un nombre suffisant de configurations pour pouvoir faire l’identification. Pour s’assurer de la répartition dans l’espace de travail, ces derniers ont été créés grâce à un algorithme d’échantillonnage par disques de Poisson à trois dimensions. Le principe de cet algorithme est le suivant : l’espace de travail est discrétisé en un nombre fini de points. À chaque itération de l’algorithme, un point de l’échantillonnage dit « actif » est considéré. Un anneau s’étendant d’un rayon r à un rayon $2r$

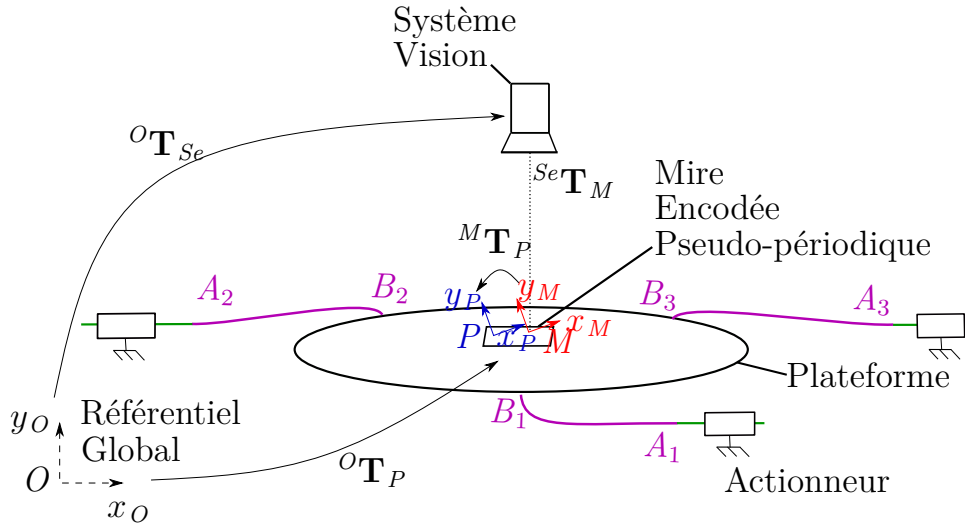


FIGURE V.5 – Mesure de poses et définition des paramètres géométriques externes inclus dans les différentes transformations

(r étant la distance minimale autorisée entre deux échantillons) est créé autour de ce point. Un nombre k d'échantillons candidats est ensuite considéré à l'intérieur de cet anneau. Les candidats situés dans un rayon r d'un échantillon existant sont rejetés. Dans le cas contraire, il devient un point actif. Si aucun des k candidats n'est situé dans un rayon r , le point actif considéré initialement pour l'anneau devient alors « inactif ». L'algorithme s'arrête lorsqu'il n'y a plus de points actifs.¹. Le résultat de cette répartition est illustré par la figure V.4.

Considérant ces deux ensembles de configurations articulaires, deux expériences sont menées pour obtenir les poses du robot (x, y, θ) . Ces dernières sont le résultat d'un produit entre trois transformations homogènes présentées en figure V.5 :

- ${}^{Se}\mathbf{T}_M$ correspond à la transformation entre le repère associé au centre de la mire et le repère de la caméra (résultats du traitement d'image).
- ${}^O\mathbf{T}_{Se}$ correspond à la transformation entre le repère global et le repère caméra.
- ${}^M\mathbf{T}_P$ traduit la transformation entre le repère associé au point calculé par le MGD et celui associé au centre de la mire.

Ainsi, la pose planaire expérimentale (x, y, θ) associée à chaque configuration articulaire correspond aux variables de la transformation ${}^O\mathbf{T}_P$ suivante :

$${}^O\mathbf{T}_P = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x \\ \sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^O\mathbf{T}_{Se} \cdot {}^{Se}\mathbf{T}_M \cdot {}^M\mathbf{T}_P \quad (\text{V.1})$$

1. plus d'information et des exemples vidéos sont présents sur la page suivante <https://bost.ocks.org/mike/algorithms/>

Où les transformations ${}^O\mathbf{T}_{Se}$ et ${}^M\mathbf{T}_P$ sont constantes et inconnues. Les paramètres constitutifs de ces dernières sont regroupés dans un vecteur de paramètres géométriques externes $\boldsymbol{\pi}_{\text{ext}}$. Comme ils ne peuvent pas être mesurés directement, ils devront être identifiés. La section suivante présente cette étape d'identification.

V.6 IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

V.6.1 Principe de l'identification

L'objectif de l'étape d'identification est d'obtenir un nouvel ensemble de paramètres géométriques $\boldsymbol{\pi} = [\pi_r, \pi_{\text{ext}}]^T$ regroupant les paramètres géométriques internes π_r et externes π_{ext} présentés précédemment. Le principe de ce processus est illustré par le schéma-bloc de la figure V.6.

L'ensemble des configurations articulaire d'identification $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^n]^T$ (n étant le nombre de configurations), préétabli lors de l'étape de préparation, est considéré. Pour chaque configuration articulaire $\mathbf{q}^i = (q_1^i, q_2^i, q_3^i)$ $i \in \{1, \dots, n\}$, on va comparer les poses planaires calculées par le MGD ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta}$) et celles obtenues expérimentalement (x, y, θ).

À partir de cette différence, un vecteur résidu $\mathfrak{F} = [\mathfrak{F}^1 \dots \mathfrak{F}^n]^T$ est créé tel que chaque \mathfrak{F}^j , $j \in \{1, \dots, n\}$, désigne :

$$\mathfrak{F}^j(\boldsymbol{\pi}, \mathbf{q}^j) = \left[\xi * (\hat{\theta}^j - \theta^j) \quad (\hat{x}^j - x^j) \quad (\hat{y}^j - y^j) \right] \quad (\text{V.2})$$

Dans cette équation, le coefficient ξ est une pondération choisie de telle sorte que les valeurs des résidus soient homogènes. Cette valeur de ξ , fixée à 5, permet d'harmoniser au besoin les unités des paramètres. Cette valeur a également été choisie pour réduire la valeur de conditionnement de la matrice jacobienne du vecteur résidu. Comme on peut le voir sur le schéma bloc de la figure V.6, les valeurs des paramètres sont mises à jour de sorte à faire tendre ce vecteur résidu \mathfrak{F} vers le vecteur nul.

Cette minimisation est réalisée au moyen du problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\pi}} \quad & \mathfrak{F}^T \mathfrak{F} \\ \text{avec } \boldsymbol{\pi} \in \quad & [\mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b] \end{aligned} \quad (\text{V.3})$$

Les vecteurs \mathbf{l}_b et \mathbf{u}_b sont respectivement les bornes inférieures et supérieures des paramètres à identifier. Ces bornes sont définies grâce aux incertitudes de mesures détaillées dans la section précédente.

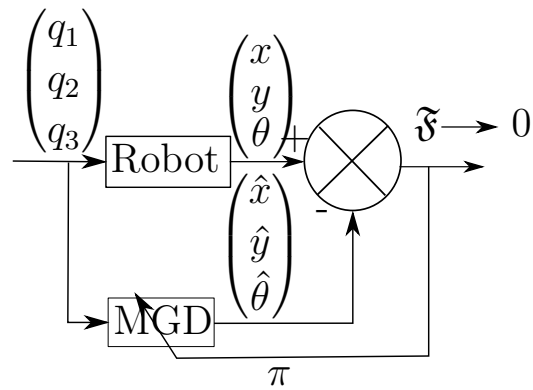


FIGURE V.6 – Principe de l'identification des paramètres. On considère un ensemble de coordonnées articulaires $\mathbf{q}=(q_1, q_2, q_3)$ pour créer et comparer les poses cartésiennes expérimentales (x, y, θ) et calculées par le MGD $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$. Les paramètres $\boldsymbol{\pi}$ de ce dernier sont changés itérativement pour réduire les valeurs du vecteur résidu $\tilde{\mathfrak{F}}$.

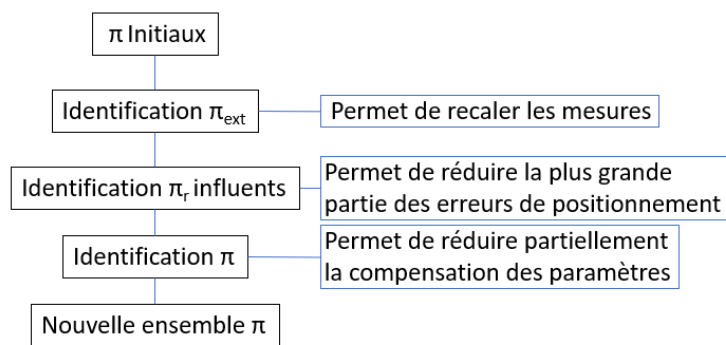


FIGURE V.7 – Stratégie d'identification des paramètres

V.6.2 Stratégie d'identification

Étalonner l'ensemble des paramètres en une seule fois présente un intérêt limité. En effet, les paramètres extrinsèques au robot π_{ext} ne peuvent pas être mesurés précisément et présentent des erreurs non négligeables par rapport à leurs valeurs vraies. De plus, cette manière de faire conduirait certainement à un ensemble de valeurs « fausses » se compensant pour minimiser la fonction objectif. Ce cas de figure est identifiable lors d'une étape de vérification dans laquelle on utilise le MGD en considérant un ensemble de configurations articulaires différentes de celui utilisé pour l'identification.

Pour éviter d'obtenir des solutions non pertinentes lors de l'optimisation, une stratégie d'identification a été mise au point (figure V.7). Elle consiste à commencer par identifier les paramètres extrinsèques au robot. Ces derniers ne sont pas mesurés et présentent donc des erreurs d'estimation pouvant être importantes (de l'ordre de la dizaine de millimètres et de plusieurs degrés).

Dans un second temps, on identifie les valeurs des paramètres ayant le plus d'impact sur le modèle, i.e. les longueurs et les positions (cf. sous-section V.4.3) des extrémités des fibres. Cependant, comme nous l'avons expliqué précédemment, il est possible que ces nouvelles valeurs de paramètres réduisent le résidu tout en compensant les erreurs faites lors de leur identification.

C'est pourquoi une troisième identification est effectuée avec l'ensemble des paramètres. Cette dernière identification a pour objectif de se rapprocher des valeurs vraies en partant de valeurs initiales plus proches que celles considérées initialement. L'ensemble de ces identifications a été effectué avec le même ensemble de poses expérimentales obtenu à partir d'un ensemble de configurations articulaires destiné à l'identification. Le nombre de configurations considéré doit être au moins trois fois supérieur au nombre de paramètres identifiés.

L'étape d'identification se termine par l'obtention d'un nouvel ensemble de paramètres. Son apport et son efficacité seront détaillés dans la sous-section suivante.

V.6.3 Simulation de l'identification

La simulation de l'identification a pour objectif de vérifier la convergence de l'optimisation vers les valeurs vraies des paramètres. Ces dernières, égales aux valeurs nominales des paramètres, sont prises en compte pour calculer les poses (x, y, θ) correspondant à l'ensemble d'identification. Dans un second temps, on introduit sur chaque paramètre une incertitude correspondant à la valeur des bornes maximales de leur intervalle d'incertitudes pour calculer les poses $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$. À partir de ces vecteurs de poses, un vecteur résidu est créé et le problème d'optimisation est résolu en suivant la stratégie d'identification proposée, qui consiste à identifier les paramètres extrinsèques, puis les paramètres les plus influents, pour finir par identifier tous les paramètres. À la fin de chaque identification, les poses $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$ sont recalculées à partir des nouvelles valeurs des paramètres et l'ensemble de paramètres considéré est changé pour le problème d'optimisation suivant. Chaque optimisation est résolue grâce à la fonction `lsqnonlin` de Matlab. Cette fonction

	e_P (μm)			e_θ ($mrad$)		
	max.	moy.	min.	max.	moy.	min.
Modèle nominal - identification	157,8	70,6	10,1	12,65	4,5	0,058
Modèle identifié - identification	15,26	7,19	0,66	5,61	1,7	0,004
Modèle identifié - validation	13,88	5,5	1,5	5,57	1,5	0,1

TABLE V.2 – Résultats expérimentaux de l'étalonnage

utilise un algorithme de région de confiance qui gère les problèmes d'optimisation non-linéaire avec des variables bornées. À chaque identification, le résidu est réduit et les paramètres sont rapprochés de leurs valeurs vraies.

L'identifiabilité des paramètres a été vérifiée en calculant le rang de la jacobienne de la matrice d'observation composée par les dérivées partielles de la fonction objectif par les paramètres considérés. Le rang plein de la matrice donne une indication sur l'identifiabilité de l'ensemble des paramètres [Dombre 88]. Cependant, bien que pour chaque identification, le résidu et la norme du vecteur entre paramètres vrais et biaisés diminuent, les valeurs des paramètres restent dans un intervalle d'incertitude du même ordre de grandeur que précédemment. Ce résultat peut être expliqué par la difficulté qu'il y a à créer un modèle complet (assez de paramètres pour modéliser tout ce qui se passe au niveau du robot), minimal (pas de paramètres redondants) et proportionnel (chaque variation soit la conséquence de la variation d'une valeur de paramètres). En effet, certains paramètres peuvent être trop sensibles aux erreurs de modélisations ou aux bruits pour être identifiés correctement, bien que la matrice d'observation soit de rang plein. Une autre possibilité, soulevée par Wu et Shi [Wu 19] est due à la résolution numérique du modèle qui ne permettrait pas de créer un problème d'optimisation correspondant à une fonction convexe, rendant plus compliquée l'identification précise des paramètres. Néanmoins, le fait d'avoir borné les paramètres dans des intervalles d'incertitudes assez faibles permet d'obtenir des valeurs relativement proches de la réalité.

V.6.4 Validation expérimentale de l'identification

Pour réaliser l'identification expérimentalement, les poses mesurées (x, y, θ) précédemment sont considérées. On calcule les poses $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$ à partir du MGD contenant les valeurs de paramètres mesurées dans l'étape un de l'étalonnage. La stratégie d'identification est effectuée de la même manière qu'en simulation, mais en considérant les poses mesurées pour construire le vecteur résidu.

Pour valider et quantifier l'efficacité de l'identification, des critères d'erreur en position e_P et en orientation e_θ sont définis :

$$\begin{aligned}
 e_P^j &= \sqrt{(\hat{x}^j - x^j)^2 + (\hat{y}^j - y^j)^2} \\
 e_\theta^j &= \sqrt{(\hat{\theta}^j - \theta^j)^2} = |\hat{\theta}^j - \theta^j| \quad , j \in \{1 \dots n\}
 \end{aligned}
 \tag{V.4}$$

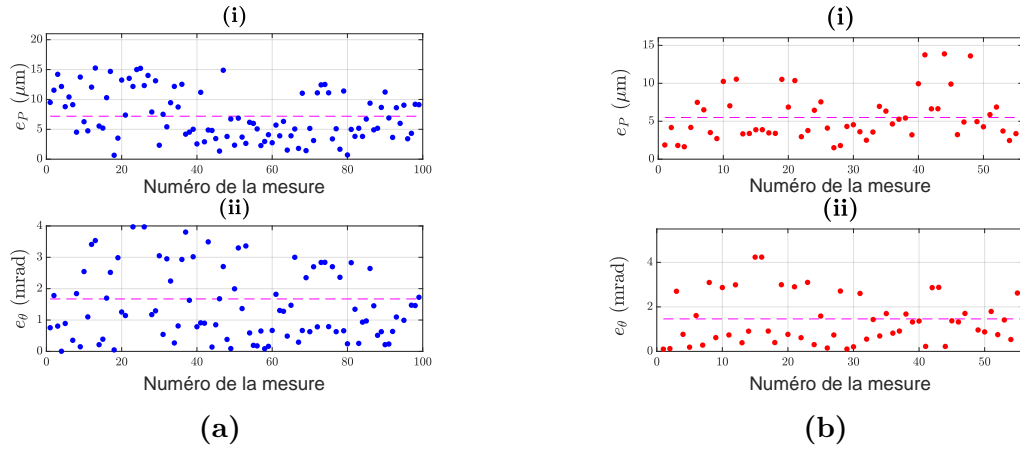


FIGURE V.8 – Erreurs en position (i) et en orientation (ii) pour les ensembles de configurations d’identification et de validation. Les pointillées correspondent aux valeurs moyennes des erreurs, respectivement $7,19 \mu\text{m}$ et $1,7 \text{ mrad}$ pour l’identification (a) et $5,5 \mu\text{m}$ et $1,5 \text{ mrad}$ pour la validation (b).

Ces critères sont calculés pour le modèle avant identification des paramètres intrinsèques du robot (mais après recalage des données par une première identification des paramètres extrinsèques), pour le modèle après identification pour les configurations articulaires d’identification. Ces résultats sont regroupés dans le tableau V.2. Avant l’identification, les erreurs sont comprises entre $10,1 \mu\text{m}$ et $157,8 \mu\text{m}$ et celles en orientation entre $58 \mu\text{rad}$ et $12,6 \text{ mrad}$. Après l’identification complète, les erreurs (figure V.8a) ont été réduites à des erreurs comprises entre $0,66 \mu\text{m}$ et $15,26 \mu\text{m}$ pour la position et entre $4 \mu\text{rad}$ et $5,61 \text{ mrad}$, soit des facteurs de réduction d’erreur de 10,3 et 2.2 respectivement. Cependant pour valider véritablement l’amélioration du modèle, ce dernier doit être vérifié sur un autre ensemble de configurations articulaires. Pour cela, les poses mesurées précédemment pour l’ensemble de validation sont comparées avec les poses calculées par le MGD avec les paramètres identifiés. On recalcule les données en identifiant une fois les paramètres extrinsèques (les valeurs sont très proches de celles identifiées). Les résultats obtenus sont illustrés en figure V.8b et présentés dans le tableau V.2. L’ordre de grandeur obtenu pour l’ensemble de validation est le même que celui obtenu pour l’ensemble d’identification. Les légères différences présentes peuvent être expliquées par les différentes positions considérées, par des conditions environnementales meilleures (visibles par la disparité de répartition de la courbe d’erreurs en position e_P de la figure V.8a.a. alors que les points sont répétés).

En rapportant la valeur maximale d’erreur en position obtenue, soit $15,26 \mu\text{m}$, à la longueur des fibres incluse dans notre structure, soit 30 mm , on obtient un pourcentage d’erreur de $0,05 \%$. Si on la compare à la taille du robot, ce rapport devient égale à $0,007 \%$. Considérant que le pourcentage d’erreur moyen des modélisations des RPC est d’environ 5% , le résultat présenté ici est environ 100 fois meilleur. Si on compare ce résultat à l’étude de Wu et Shi [Wu 19] (seul tra-

vail d'étalonnage complet de RPC), le résultat montré ici est 30 fois meilleur. Ces constats appuient l'apport et l'intérêt de l'identification sur la modélisation des RPC. Après avoir amélioré la corrélation entre le modèle et le comportement réel du robot, nous allons étudier sa justesse sur des trajectoires basiques.

V.7 CONTRÔLE ET ÉTUDE DE LA JUSTESSE DU TRISKÈLE-BOT

Dans la section précédente, le Triskèle-Bot était commandé dans l'espace articulaire. Les poses atteintes ont permis de réaliser un processus d'identification permettant d'obtenir un nouvel ensemble de paramètres. Dans cette section, le MGI est utilisé pour montrer que le robot est commandable dans l'espace cartésien en faisant des trajectoires sur lesquelles les justesses seront mesurées.

V.7.1 Principe de la commande et de la quantification de la justesse du robot

Le principe de la commande en position utilisée est illustré par la figure V.9. À partir d'une trajectoire désirée (x_c, y_c, θ_c) dans l'espace cartésien, on utilise le MGI (contenant les paramètres identifiés précédemment) de sorte à obtenir la trajectoire dans l'espace articulaire. Les configurations articulaires sont successivement envoyées au robot. Pour chaque configuration, on enregistre l'image correspondante qui est ensuite traitée pour obtenir la pose cartésienne réelle du robot (x, y, θ) . Les poses commandées et mesurées sont ensuite comparées et la justesse du robot est quantifiée en utilisant les formules de la norme ISO 9283 :1998 [ISO9283 98] définie dans le chapitre 1 (équations 1.7 et 1.8).

V.7.2 Étude de la justesse du Triskèle-Bot

Pour montrer la capacité du robot proposé à suivre des trajectoires dans l'espace cartésien, deux trajectoires sont considérées : un carré de 2 mm de côté et un cercle de 3 mm de diamètre avec à chaque fois une orientation nulle. Le MGI est utilisé pour déterminer les trajectoires dans l'espace articulaire. La vitesse du robot est fixée à $20 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ de sorte à aller assez vite pour faire les répétitions tout en

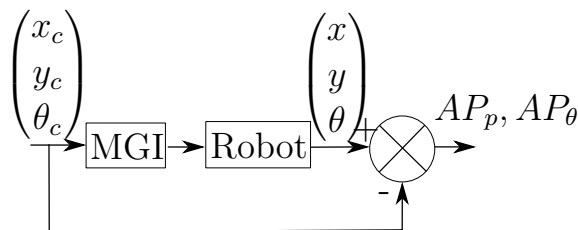


FIGURE V.9 – Principe de la commande en position et de la quantification de la justesse en position AP_p et en orientation AP_θ du Triskèle-Bot.

respectant les conditions quasi-statiques du modèle. On préchauffe les actionneurs en les faisant fonctionner au minimum 3 h pour que l'ensemble de la structure atteigne un régime permanent. Les trajectoires sont ensuite effectuées trente fois chacune de sorte à quantifier la justesse du robot.

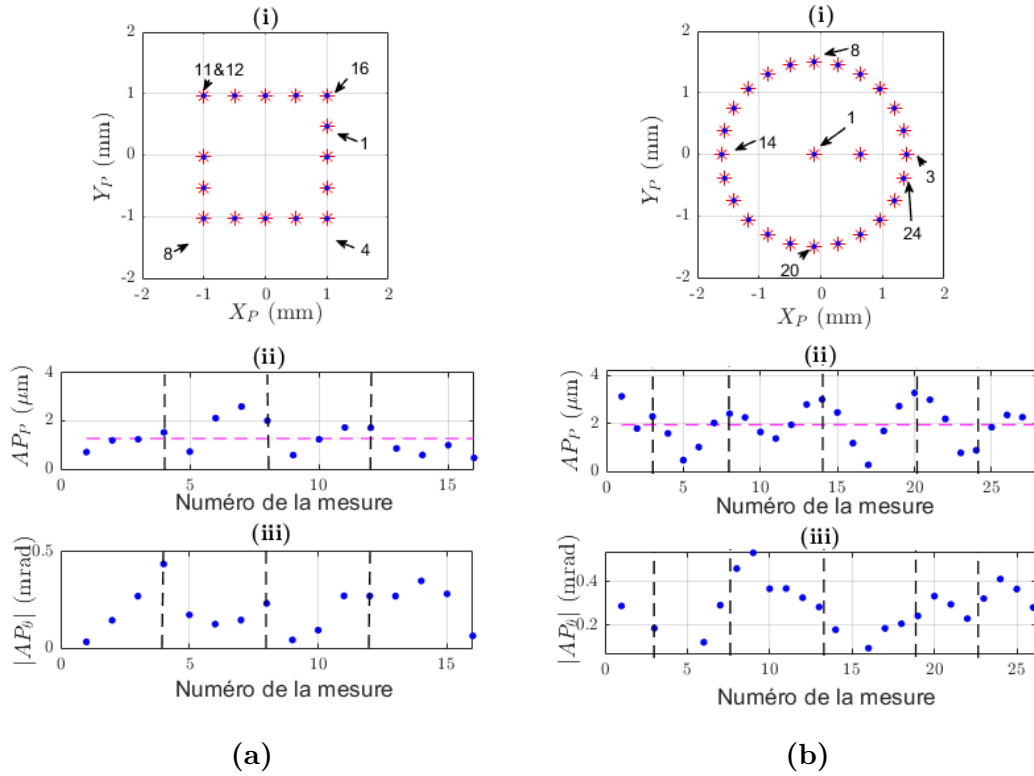


FIGURE V.10 – Résultats de la commande en position du Triskèle-Bot pour une trajectoire carrée (a) et circulaire (b). (1) montre les positions commandées (en rouge) et les positions expérimentales des barycentres obtenus à partir des 30 répétitions des trajectoires (en bleu). (2) et (3) exposent respectivement les justesses en position AP_p et en orientation AP_θ pour les différentes poses cartésiennes. Les lignes pointillées horizontales montrent les valeurs moyennes de justesse en position ($1.27 \mu\text{m}$ pour le carré et $1.95 \mu\text{m}$ pour le cercle). Les lignes pointillées verticales explicitent des points caractéristiques des trajectoires (sommets du carré ou quart de cercle). Ces mêmes points sont numérotés et correspondent à des changements de monotonies des valeurs de justesses en position et/ou en orientation.

Les figures V.10a et V.10b illustrent les résultats obtenus. Les graphiques (1) montrent (en bleu) les trajectoires atteintes expérimentalement qui ne peuvent pas être différenciées des trajectoires désirées (en rouge) dues à l'échelle des graphiques. L'ensemble des résultats sont reportés dans le tableau V.3. La justesse moyenne en position pour l'ensemble des deux trajectoires est inférieure à $2 \mu\text{m}$. La justesse maximale en position est de $2.60 \mu\text{m}$ pour la trajectoire carrée et de $3.28 \mu\text{m}$

	AP_P (μm)			$ AP_\theta $ (mrad)		
	max	moy.	min	max	moy.	min
Carré	2,60	1,27	0,47	0,437	0,20	0,032
Cercle	3,28	1,95	0,28	0,532	0,24	0,046

TABLE V.3 – Justesse de pose du robot pour la trajectoire circulaire et carrée

pour la trajectoire circulaire. Dans le cas de la justesse en orientation, les deux valeurs maximales sont inférieures à 0,5 mrad. Les résultats obtenus pour les deux trajectoires sont du même ordre de grandeur.

Une hypothèse selon laquelle la justesse dépend de l'endroit atteint dans l'espace de travail peut être soulevée. Elle est corroborée par les changements de monotonies pouvant être observés dans les justesses en position et en orientation (graphiques 2 et 3). Ces derniers sont repérés par des lignes pointillées verticales. Les points correspondant à ces changements sont numérotés (selon leurs positions) et sont reportés sur les trajectoires parcourues. On constate que ces points sont caractéristiques des trajectoires (i.e. sommets du carré ou quarts de cercle).

La performance en justesse peut être ramenée en pourcentage de la longueur des fibres et en pourcentage de la longueur du robot pour obtenir respectivement 0,01 % et 0,0015 %. Au regard de l'état de l'art des RPC, seules les études de Wu et shi [Wu 19] et Orekhov *et al.* [Orekhov 16] sont relatives à la justesse et montrent des erreurs maximales avec leurs modèles de 1,8 % et 5,67 % respectivement. Bien qu'ils aient étudié des RPC à 6 DdL, menant donc à une modélisation plus complexe, les résultats présentés ici sont tout de même environ 100 fois meilleurs.

V.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la commande et la justesse du Triskèle-Bot ont été étudiées. Pour pouvoir y répondre, le prototype a été étalonné. Ce processus, permettant de trouver des valeurs de paramètres de modèle plus proche de la réalité, a été décrit en explicitant toutes ses étapes. Parmi elles, une étape de mesure des paramètres, améliorée par l'utilisation des QR-Codes, qui permet d'améliorer la connaissance des valeurs des paramètres et de quantifier leurs incertitudes. Ces incertitudes sont ensuite utilisées dans une analyse de sensibilité pour déterminer quels sont les paramètres les plus influents.

Les paramètres sont identifiés en suivant une stratégie d'identification qui utilise les résultats de cette analyse ainsi que les incertitudes de mesures. Ces nouveaux paramètres sont utilisés pour caractériser les erreurs en position et en orientation faites avec le robot et le MGD lors de l'étalonnage. Les erreurs déterminées sont inférieures à 15.26 μm en position (0.05 % de la longueur des éléments continus) et inférieures à 5.61 mrad.

Les paramètres identifiés sont également utilisés dans le MGI pour réaliser des trajectoires. La commandabilité du Triskèle-Bot a été montrée en réalisant dans l'espace cartésien plusieurs trajectoires désirées. Sur une trajectoire carrée et circulaire de plusieurs millimètres carrés, les justesses en position et en orientation du Triskèle-Bot ont été quantifiées. Cette justesse est inférieure à 3.28 μm en position et à 532 μrad en orientation (0,0015 % de la longueur du robot).

Ces résultats montrent que les RPC peuvent proposer un positionnement absolu tout à fait approprié pour la réalisation de tâches de micro-positionnement. Ils ouvrent également des perspectives sur des travaux futurs qui seront présentés dans le chapitre suivant qui constituera la conclusion de ce manuscrit.

Conclusion et perspectives

Depuis une dizaine d'années, les microtechnologies se développent à une vitesse impressionnante dans de nombreux domaines tels que le spatial, le médical, les télécommunications, etc. Pour répondre à la variété de ces applications, des robots capables d'assurer un positionnement absolu répétable sur de grandes étendues doivent être développés. Cependant, les solutions actuelles souffrent de compromis entre espace de travail et précision. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans un ensemble d'études explorant de nouvelles alternatives pour le micro-positionnement.

Les enjeux et défis de ce domaine ont été identifiés et les solutions robotiques pouvant y répondre ont été présentées. Parmi elles, la littérature montre un intérêt grandissant pour une catégorie de robot que sont les Robots Parallèles Continus (RPC). Cet attrait est lié au fait qu'ils présentent des déformations continues réparties sur une grande partie de leur structure, permettant ainsi d'envisager de larges espaces de travail et une bonne répétabilité (contrairement aux robots utilisés jusqu'ici dont les déformations de leurs structures sont localisées). Cependant, leurs performances en matière de précision (répétabilité et justesse) n'avaient jamais été démontrées. L'objectif de cette thèse a été de répondre à la question : quelle précision peut-on espérer d'un RPC destiné au micro-positionnement planaire ?

Pour répondre à cette question, un nouveau concept de RPC a été élaboré. Ce dernier, nommé Triskèle-Bot, est constitué d'une plateforme mobile et de trois éléments flexibles continus actionnés en translation permettant de fournir des déplacements planaires à 3 degrés de liberté. La modélisation est obtenue par une résolution numérique d'un système d'équations aux dérivées partielles, fondées sur la théorie des poutres de Kirchhoff, contraintes aux limites. Les modèles géométriques direct et inverse du Triskèle-Bot résultant sont utilisés pour le commander en position, simuler son espace de travail millimétrique et pour analyser sa sensibilité par rapport aux incertitudes relatives à son actionnement et à ses paramètres.

Un prototype répondant aux objectifs définis par les enjeux du micro-positionnement a été développé. Les choix de conception ont été effectués dans le but d'obtenir un robot répétable et d'anticiper son étalonnage. Une attention particulière a été portée sur le choix des actionneurs considérés comme sources principales d'incertitudes dans la répétabilité de positionnement. La propagation de ces dernières sur la répétabilité du Triskèle-Bot a été simulée en plusieurs points de son espace de travail. Les résultats, très prometteurs, ont prédit une répétabilité nanométrique.

Pour quantifier expérimentalement les performances du robot proposé, un banc de mesure, constitué d'une mire pseudo-périodique encodée et d'un système de vision, a été conçu. Après avoir présenté le principe de la mesure de pose capable d'une résolution nanométrique sur une étendue centimétrique, un protocole de me-

sure réduisant les sources d'incertitudes identifiées à moins de 10 nm a été élaboré. En utilisant ce dernier, la répétabilité du Triskèle-Bot a été étudiée expérimentalement. Les mesures ont montré une répétabilité inférieure à 19,95 nm et 0,75 μ rad sur un espace de travail millimétrique. Le rapport entre la répétabilité et la taille de la fibre et celle du robot sont respectivement de 0,0001 % et de 0,00001 %. Par rapport aux RPC existants, aucun n'avait encore montré une performance de répétabilité et un ratio dimension/répétabilité aussi bons. Ces résultats valident la méthodologie de conception proposée dans cette thèse. En les comparant aux structures à articulations flexibles à 3DdL de la littérature [Zeyi Wu 18], le Triskèle-Bot propose une répétabilité équivalente aux meilleures structures tout en proposant un espace de travail 10 fois plus important.

Dans un dernier temps, les sources d'erreurs impactant le robot et le principe d'un étalonnage, visant à réduire leurs influences, ont été présentés. Les différentes phases de ce processus ont été développées. Une phase de mesure des paramètres a permis d'identifier des intervalles d'incertitudes et de quantifier leurs impacts sur les erreurs de position. Des mesures ont été préparées et effectuées de manière à construire un vecteur d'erreurs entre les poses mesurées et celles calculées grâce au modèle. Ce dernier est minimisé lors d'un processus d'identification pour obtenir un nouvel ensemble de paramètres. Ces paramètres identifiés ont été utilisés pour commander la position du robot. La justesse de pose, mesurée sur deux trajectoires millimétriques, montre des valeurs inférieures à 3,28 μ m et 532 μ rad. Cette performance valide la modélisation avec une erreur 0,0015 % de la taille du robot et 0,01 % de la longueur des fibres. En comparant ce résultat avec les erreurs de modèles des RPC à 6DdL actuels [Orekhov 16, Wu 19], la justesse montrée ici est environ 100 fois meilleure.

Les résultats de cette thèse, permettent d'affirmer que les robots parallèles continus sont des solutions prometteuses pour le micro-positionnement planaire, leur ouvrant de ce fait de nouveaux champs applicatifs.

PERSPECTIVES

Les RPC sont des structures relativement récentes dont le potentiel demande encore à être exploité. Trois voies de perspectives directes de ces travaux sont envisagées : l'approfondissement de l'étude de la structure du Triskèle-Bot, l'étude de la miniaturisation des RPC et le passage à une structure spatiale.

Approfondissement de l'étude de la structure du Triskèle-Bot

L'étude de cette thèse a été menée sur une structure dont les paramètres (longueur des fibres, disposition des actionneurs, etc.) ont été choisis de manière à faciliter la construction du prototype tout en permettant que la structure soit visible par la caméra située en hauteur, et à illustrer de potentielles applications telles que le positionnement de wafer. L'objectif était de quantifier la répétabilité et la justesse planaire que pouvait posséder un RPC.

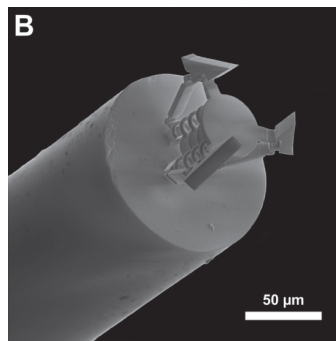


FIGURE V.11 – Pince\capteur de force au bout d’une fibre optique [Power 18]

Cependant, il serait intéressant d’analyser l’impact des différents choix de paramètres sur les performances de la structure afin de proposer une conception optimale suivant les performances recherchées. En effet, en modifiant ces paramètres, il serait possible : d’augmenter l’espace de travail, changer la répartition des contraintes sur l’espace de travail, changer la localisation des singularités, augmenter la raideur du robot, etc. À titre d’exemple, une valeur négative de l’angle φ (angle entre l’orientation de l’axe de translation de l’actionneur i et la direction vers le centre géométrique du robot dans sa position initiale) engendre une inversion de la répartition des contraintes au sein de l’espace de travail (i.e. qui était le plus contraint devient le moins contraint et inversement).

Comme il a été évoqué dans le chapitre 2, en plus de certaines singularités robotiques traditionnelles, les RPC présentent des instabilités dues aux éléments flexibles continus. En effet, certaines configurations des éléments continus peuvent introduire des instabilités mécaniques comme du flambement ou des changements de mode de déformation (e.g. apparition d’un point d’inflexion). Des analyses plus poussées de ces singularités et instabilités contribueraient à augmenter la connaissance de ces structures. Comme il a été évoqué dans le chapitre 1, deux études existent sur ce domaine. La première [Altuzarra 21] considère un cas particulier leur permettant de trouver une solution analytique aux systèmes d’équations non-linéaires. La seconde [Lilge 20] réduit la richesse de son modèle pour pouvoir les étudier. De nombreuses études peuvent donc être conduites sur l’analyse des instabilités et des singularités des RPC modélisés par des théories des poutres de Kirchoff ou de Cosserat dans un cas général.

Dans la continuité directe des travaux présentés, il pourrait également être intéressant d’étudier le comportement des RPC via la forme des éléments continus dans l’objectif de déterminer la position de sa plateforme, ou encore de l’étalonner (comme cela peut être fait pour des structures polyarticulées [Renaud 04]). La modification de cette forme telle qu’en introduisant des pré-courbures [Hussein 19], des structurations [Kim 19], des variations de diamètres, des lames, etc. pourrait mener à des structures aux comportements intéressants (comme n’obtenir que des rotations à partir de translations) ou une amélioration de la compacité.

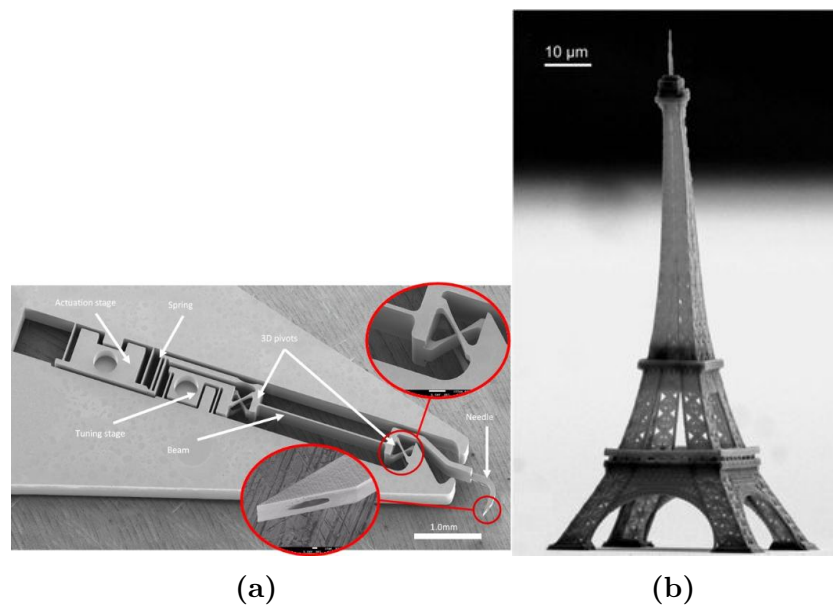


FIGURE V.12 – Réalisations d’une pince pour la chirurgie avec la Femto-Print (a) et d’une tour Eiffel avec la Nanoscribe (b). (images issues de leur site internet respectif)

Un autre axe de recherche serait de changer le matériau de ces éléments pour choisir des matériaux à mémoire de forme, des composites [Sedal 18] ou encore des polymères [Silva-López 05]. Les structures résultantes pourraient donc proposer plus d’adaptabilité, de l’actionnement intégré, etc. et ouvrir l’étude sur des structures plus souples.

Miniaturisation de la structure

Bien qu’elle ait guidé certains choix de conception du Triskèle-Bot, le potentiel de miniaturisation des RPC n’a pas été exploité durant cette thèse. Miniaturiser la structure permettrait de réduire sa masse et de s’abstenir du système de sustentation sur cousin d’air, le rendant directement utilisable dans des endroits confinés tels que la chambre d’un microscope électronique à balayage.

Les fibres optiques peuvent être amincies grâce à un processus maîtrisé. Néanmoins, la fabrication et l’assemblage d’un prototype constituent un vrai défi à résoudre pour avoir un robot performant. Une possible solution à ce problème est la fabrication de robots monolithiques en verre, grâce à une machine de gravure laser (comme la machine FemtoPrint qui possède une résolution inférieure à 1 μm) ou dans d’autres matériaux, grâce à l’impression 3D (comme la Nanoscribe qui présente une résolution de 500 nm), permettant, ainsi, d’obtenir de très petites structures (figure V.12). Ces RPC de petites dimensions pourront également aboutir à des structures robotiques mobiles (unthered) pouvant être actionnées à distance par différents moyens.

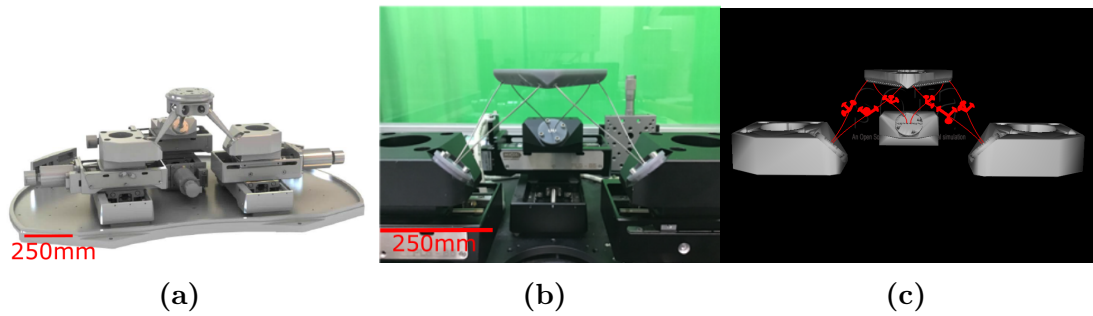


FIGURE V.13 – SpaceFAB SF-300BS de Physik Instrumente (a), sa version continue (b) et sa modélisation sous SOFA

L'utilisation des fibres optiques pour créer le Triskèle-Bot n'était pas anodine. Outre leurs propriétés mécaniques déjà exposées dans le chapitre 3, leurs propriétés optiques sont très intéressantes et ouvrent de nombreuses possibilités. Elles peuvent par exemple être utilisées pour l'estimation de l'état des contraintes internes [Galloway 19]. À titre d'illustration, les fibres à réseau de Bragg sont des fibres optiques dans lesquelles ont été ajoutés un miroir sélectif d'une longueur d'onde donnée. Cette dernière varie en fonction de la contrainte exercée sur la fibre permettant de fournir cette information. Ces informations apporteraient un vrai atout à la modélisation des RPC. En effet, la connaissance des contraintes internes aux fibres permettrait de vérifier les valeurs des forces et moments trouvés par la résolution numérique. Ces valeurs habituellement conjecturées seraient alors mesurables à une incertitude de mesure connue. Les modèles pourraient alors gagner en justesse et en rapidité, ce qui constitue des enjeux actuels de la modélisation des RPC. La connaissance de la position et de l'orientation en plus des contraintes permettrait d'ouvrir des possibilités sur le développement de méthodes d'auto-étalonnage (sans système de mesure externe). Cependant, l'utilisation des fibres optiques pour la mesure impose également des contraintes de conception avec un système de fixations des fibres à inventer. Enfin, apporter de la lumière jusqu'à la plateforme permettrait d'actionner des outils ou d'interroger des capteurs, comme la pince de Power *et. al* [Power 18].

Étude de la précision des RPC à 6 DdL

Les travaux de cette thèse ont permis de valider le potentiel des RPC pour des problématiques planaires, mais il serait intéressant de valider ce résultat pour des déplacements en trois dimensions. Cette spatialisation soulève de nombreux défis tels que la modélisation fidèle du comportement d'un RPC à 6 DdL, sa conception ainsi que la mesure de sa pose à l'échelle nanométrique. Cette dernière problématique fait l'objet actuellement d'une thèse sur l'utilisation d'une mire pseudo-périodique encodée avec un microscope holographique.

Les travaux concernant un RPC à 6 DdL ont fait l'objet d'un stage co-encadré au cours de cette thèse. L'objectif était la transformation d'un robot commercial polyarticulé (le SpaceFAB SF-300BS de Physik Instrumente) en une structure continue pour pouvoir comparer leurs performances. La figure V.13 montre ces deux structures. La conception a fait l'objet d'une réflexion sur la transformation des articulations traditionnelles en structures flexibles continues. Le robot continu a été réalisé grâce à des tubes en Nitinol avec des dimensions similaires à celles du robot rigide. Le comportement du robot a été simulé par éléments finis au moyen du logiciel SOFA et du plug-in softrobot développé par l'équipe Defrost de l'INRIA Lille. Les performances en termes d'espace de travail et répétabilité ont été quantifiées par simulation et par expérimentation. Les résultats montrent une meilleure répétabilité et un espace de travail au moins égal à celui de la structure polyarticulée. Ces résultats viennent corroborer ceux de cette thèse pour des RPC à 6 DdL. Seule la justesse du robot reste à être mesurée pour pouvoir répondre au potentiel de positionnement spatial des RPC. Ces résultats prometteurs sont un début de réponse au potentiel de positionnement spatial des RPC. La possibilité d'avoir un RPC à 6 DdL avec de meilleures performances que des structures polyarticulées ouvrent de nombreuses possibilités d'applications (cobots intrinsèquement sûrs, robots chirurgicaux, etc.).

Dans cette optique, deux projets ont été créés : le projet ANR JCJC MiniSoRo, porté à l'institut FEMTO-ST, vise à modéliser et développer des RPC miniatures à plateformes configurables pour la manipulation aux petites échelles ; et le projet ANR micro-SPIDER, issu d'une collaboration entre le laboratoire ROBERVAL et l'institut FEMTO-ST, a pour objectif de développer un RPC à 6 DdL miniature sur une surface électromagnétique de manière à obtenir un robot dextre avec une précision micrométrique sur de très grandes courses.

Liste des publications

REVUES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LECTURE

- B. Mauzé, R. Dahmouche, G. J. Laurent, A. N. André, P. Rougeot, P. Sandoz, C. Clévy, "**Nanometer Precision With a Planar Parallel Continuum Robot**," *IEEE Robotics and Automation Letters*, July 2020.
- A. N. André, P. Sandoz, B. Mauzé, M. Jacquot and G. J. Laurent, "**Sensing One Nanometer Over Ten Centimeters : A Microencoded Target for Visual In-Plane Position Measurement**," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, June 2020.
- A. N. André, P. Sandoz, B. Mauzé, M. Jacquot and G. J. Laurent, "**Robust Phase-Based Decoding for Absolute (X, Y, θ) Positioning by Vision**," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.

CONFÉRENCE INTERNATIONALE AVEC COMITÉ DE LECTURE ET ÉDITION DES ACTES

- B. Mauzé, R. Dahmouche, C. Clévy, P. Sandoz, F. Hennebelle, G. J. Laurent, "**Visual Measurements at Small Scales : Guidelines to Reduce Uncertainties down to a few Nanometers**," *IEEE-Ras International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, 2020, accepté en cours de publication.

COMMUNICATION INTERNATIONAL

- B. Mauzé, R. Dahmouche, G. J. Laurent, A. N. André, P. Rougeot, P. Sandoz, C. Clévy, "**Nanometer Precision With a Planar Parallel Continuum Robot**," *RoboSoft, IEEE-Ras International coference on Soft Robotics*, July 2020.

COMMUNICATION NATIONALE

- B. Mauzé, R. Catry, Q. Peyron, "**Le Robot, l'Aiguille et la Botte de Foin**", *Les Rendez-vous de l'âge*, Parc des expositions de Besançon, 2019.

Bibliographie

- [Al-Jodah 20] A. Al-Jodah, B. Shirinzadeh, M. Ghafarian, T. K. Das, Y. Tian, D. Zhang & F. Wang. Development and Control of a Large Range XY Θ Micropositioning Stage. *Mechatronics*, vol. 66, page 102343, April 2020.
- [Aloi 18] V. Aloi, C. Black & C. Rucker. Stiffness Control of Parallel Continuum Robots. In *Dynamic Systems and Control Conference*, page V001T04A012, Atlanta, Georgia, USA, September 2018. American Society of Mechanical Engineers.
- [Altuzarra 19a] O. Altuzarra, D. Caballero, F. J. Campa & C. Pinto. Position Analysis in Planar Parallel Continuum Mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 132, pages 13–29, February 2019.
- [Altuzarra 19b] O. Altuzarra, D. Caballero, Q. Zhang & F. J. Campa. Kinematic Characteristics of Parallel Continuum Mechanisms. In *Advances in Robot Kinematics*, volume 8, pages 293–301. Springer International Publishing, 2019.
- [Altuzarra 19c] O. Altuzarra & J.-P. Merlet. Certified Kinematics Solution of 2-DOF Planar Parallel Continuum Mechanisms. *Advances in Mechanism and Machine Science*, vol. 73, pages 197–203, 2019.
- [Altuzarra 21] O. Altuzarra & F. J. Campa. On Singularity and Instability in a Planar Parallel Continuum Mechanism. In J. Lenarčič & B. Siciliano, editeurs, *Advances in Robot Kinematics 2020*, volume 15, pages 327–334. Springer International Publishing, Cham, 2021. Series Title : Springer Proceedings in Advanced Robotics.
- [Andre 20] A. N. Andre, P. Sandoz, B. Mauze, M. Jacquot & G. J. Laurent. Sensing One Nanometer over Ten Centimeters : A Micro-Encoded Target for Visual In-Plane Position Measurement. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pages 1193–1201, 2020.
- [Andre 21] A. N. Andre, P. Sandoz, B. Mauze, M. Jacquot & G. J. Laurent. Robust Phase-Based Decoding for Absolute (X,Y, Θ) Positioning by Vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pages 1–12, 2021.

- [Antunes 12] P. Antunes, F. Domingues, M. Granada & P. Andr. Mechanical Properties of Optical Fibers. In M. Yasin, editeur, Selected Topics on Optical Fiber Technology. InTech, February 2012.
- [Apsite 20] I. Apsite, A. Biswas, Y. Li & L. Ionov. Microfabrication Using Shape-Transforming Soft Materials. Adv. Funct. Mater., page 1908028, January 2020.
- [Badescu 02] M. Badescu, J. Morman & C. Mavroidis. Workspace optimization of 3-UPU parallel platforms with joint constraints. In International Conference on Robotics and Automation, volume 4, pages 3678–3683, Washington, DC, USA, 2002. IEEE.
- [Begey 20] J. Begey, M. Etievant, J. E. Quispe, A. Bolopion, M. Vedrines, J. Abadie, S. Regnier, N. Andreff & P. Renaud. A Manipulability Criterion for Magnetic Actuation of Miniature Swimmers With Flexible Flagellum. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 3, pages 4891–4898, July 2020.
- [Belhaoua 10] A. Belhaoua, S. Kohler & E. Hirsch. Error Evaluation in a Stereovision-Based 3D Reconstruction System. EURASIP Journal on Image and Video Processing, vol. 2010, pages 1–12, 2010.
- [Bettahar 19] H. Bettahar. High accurate 3-D photo-robotic nano-positioning for hybrid integrated optics. PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, besançon, 2019.
- [Bettahar 20] H. Bettahar, O. Lehmann, C. Clévy, N. Courjal & P. Lutz. 6-DoF Full Robotic Calibration Based on 1-D Interferometric Measurements for Microscale and Nanoscale Applications. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, pages 1–12, 2020.
- [BIPM 08] BIPM. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) 101 :2008, Supplement to the Guide to the expression of Uncertainty in Measurement(GUM), 2008.
- [Black 17] C. B. Black. Modeling, Analysis, Force Sensing and Control of Continuum Robots for Minimally Invasive Surgery. PhD thesis, university of tennessee, Knoxville, 2017.
- [Black 18] C. B. Black, J. Till & D. C. Rucker. Parallel Continuum Robots : Modeling, Analysis, and Actuation-Based Force Sensing. IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 1, pages 29–47, February 2018.

-
- [Boudaoud 12] M. Boudaoud, Y. Haddab, Y. Le Gorrec & P. Lutz. Study of thermal and acoustic noise interferences in low stiffness atomic force microscope cantilevers and characterization of their dynamic properties. *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 1, page 013704, January 2012.
- [Bouri 10] M. Bouri & R. Clavel. The Linear Delta : Developments and Applications. In *41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, page 9, Berlin, 2010. IEEE.
- [Brethe 07] J.-F. Brethe & D. Lefebvre. Granular Space Structure on a Micrometric Scale for Industrial Robots. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 4931–4936, Rome, Italy, April 2007. IEEE. ISSN : 1050-4729.
- [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, December 2007.
- [Briot 08] S. Briot & I. A. Bonev. Accuracy analysis of 3-DOF planar parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 4, pages 445–458, April 2008.
- [Bryson 14] C. E. Bryson & D. C. Rucker. Toward Parallel Continuum Manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 778–785, May 2014.
- [Burgner-Kahrs 15] J. Burgner-Kahrs, D. C. Rucker & H. Choset. Continuum Robots for Medical Applications : A Survey. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pages 1261–1280, December 2015.
- [Burisch 10] A. Burisch, A. Raatz & J. Hesselbach. Challenges of Precision Assembly with a Miniaturized Robot. In S. Ratchev, editeur, *Precision Assembly Technologies and Systems*, volume 315, pages 227–234. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. Series Title : IFIP Advances in Information and Communication Technology.
- [Cai 16] K. Cai, Y. Tian, F. Wang, D. Zhang & B. Shirinzadeh. Development of a Piezo-Driven 3-DOF Stage with T-Shape Flexible Hinge Mechanism. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 37, pages 125–138, February 2016.
- [Campa 19] F. J. Campa, M. Diez, D. Diaz-Caneja & O. Altuzarra. A 2 Dof Continuum Parallel Robot for Pick & Place Collaborative Tasks. In T. Uhl, editeur, *Advances in Mechanism and Machine Science*, volume 73, pages 1979–1988. Springer International Publishing, Cham, 2019.
-

- [Campisano 20] F. Campisano, A. A. Ramirez, S. Calo, J. H. Chandler, K. L. Obstein, R. J. Webster & P. Valdastri. Online Disturbance Estimation for Improving Kinematic Accuracy in Continuum Manipulators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pages 2642–2649, April 2020.
- [Cao 17] N. Cao, S. Xie, Z. Wu, M. Liu, H. Li, H. Pu, J. Luo & Z. Gong. Interactive Micromanipulation of Picking and Placement of Nonconductive Microsphere in Scanning Electron Microscope. *Micromachines*, vol. 8, no. 8, page 257, August 2017.
- [Cappelleri 11] D. J. Cappelleri, G. Piazza & Vijay Kumar. A Two Dimensional Vision-Based Force Sensor for Microrobotic Applications. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 171, no. 2, pages 340–351, november 2011.
- [Chaillet 10] N. Chaillet & S. Régnier, éditeurs. *Microrobotics for micromanipulation*. ISTE, London, 2010. OCLC : 699766956.
- [Chalvet 13] V. Chalvet, Y. Haddab & P. Lutz. A Microfabricated Planar Digital Microrobot for Precise Positioning Based on Bistable Modules. *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, no. 3, pages 641–649, June 2013.
- [Chen 20] G. Chen, Z. Zhang, L. Kong & H. Wang. Analysis and Validation of a Flexible Planar Two Degrees of Freedom Parallel Manipulator With Structural Passive Compliance. *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 12, no. 1, page 011011, February 2020.
- [Chikhaoui 19] M. T. Chikhaoui, S. Lilge, S. Kleinschmidt & J. Burgner-Kahrs. Comparison of Modeling Approaches for a Tendon Actuated Continuum Robot With Three Extensible Segments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pages 989–996, April 2019.
- [Clark 16] L. Clark, B. Shirinzadeh, Y. Zhong, Y. Tian & D. Zhang. Design and analysis of a compact flexure-based precision pure rotation stage without actuator redundancy. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 105, pages 129–144, November 2016.
- [Clévy 14] C. Clévy, I. Lungu, K. Rabenorosoana & P. Lutz. Positioning accuracy characterization of assembled microscale components for micro-optical benches. *Assembly Automation*, vol. 34, no. 1, pages 69–77, January 2014.

- [Clévy 15] C. Clévy. Microrobotique et Micromécatronique pour la Réalisation de Tâches de Micro-Assemblage Complexes et Précises. Habilitation à diriger la recherche, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2015.
- [Coevoet 19] E. Coevoet, A. Escande & C. Duriez. Optimization-Based Inverse Model of Soft Robots With Contact Handling. PhD thesis, Université de Lille, Lille, 2019.
- [Conrad 00] K. L. Conrad. Robotic calibration issues : Accuracy, Repeatability and Calibration. Proc. 8th Mediterranean Conference on Control & Automation, page 6, 2000.
- [Corbel 08] D. Corbel. Contribution à l'amélioration de la précision des robots parallèles. PhD thesis, université de Montpellier II, 2008.
- [Cosserrat 09] E. Cosserat & F. Cosserat. Theorie des corps déformables. A. Hermann et fils, 1909.
- [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 Chip, vol. 20, no. 20, pages 3665–3689, 2020.
- [de Faria 15] M. G. de Faria, Y. Haddab, Y. Le Gorrec & P. Lutz. Influence of Mechanical Noise inside a Scanning Electron Microscope. Review of Scientific Instruments, vol. 86, no. 4, page 045105, april 2015.
- [Deblaise 08] D. Deblaise. Contribution à la modélisation et à l'étalonnage élasto-géométriques des manipulateurs à structure parallèle. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2008.
- [Del Giudice 17] G. Del Giudice, L. Wang, J.-H. Shen, K. Joos & N. Simaan. Continuum Robots for Multi-Scale Motion : Micro-Scale Motion through Equilibrium Modulation. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 2537–2542, Vancouver, September 2017. IEEE.
- [Denavit 55] J. Denavit & R. S. Hartenberg. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. Journal of Applied Mechanics, vol. 22, pages 215–221, June 1955.
- [Ding 17] B. Ding, Y. Li, X. Xiao, Y. Tang & B. Li. Design and Analysis of a 3-DOF Planar Micromanipulation Stage with Large Rotational Displacement for Micromanipulation System. Mechanical Sciences, vol. 8, no. 1, pages 117–126, May 2017.

- [Dombre 88] E. Dombre & W. Khalil. Modélisation et commande des robots. Traité des nouvelles technologies Série robotique. Hermès, Paris, 1988. OCLC : 246572103.
- [Du 19] C. Du, G. Chen, Z. Zhang, L. Tang & H. Wang. Design and Experimental Analysis of a Planar Compliant Parallel Manipulator. In H. Yu, J. Liu, L. Liu, Z. Ju, Y. Liu & D. Zhou, éditeurs, *Intelligent Robotics and Applications*, volume 11744, pages 637–647. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [Duque Tisnes 19] S. Duque Tisnes, Z. Shi, L. Petit, C. Prella & F. Lamarque. Characterization of a micro-fabricated digital actuator array as a micro-factory conveyor device. In *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 382–387, Hong Kong, China, July 2019. IEEE.
- [Duriez 13] C. Duriez. Control of elastic soft robots based on real-time finite element method. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3982–3987, Karlsruhe, Germany, May 2013. IEEE.
- [Ecorchard 10] G. Ecorchard, R. Neugebauer & P. Maurine. Elasto-geometrical modeling and calibration of redundantly actuated PKMs. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 5, pages 795–810, May 2010.
- [Fang 17] F. Fang, X. Zhang, W. Gao, Y. Guo, G. Byrne & H. Hansen. Nanomanufacturing—Perspective and Applications. *CIRP Annals*, vol. 66, no. 2, pages 683–705, 2017.
- [Fleming 13] A. J. Fleming. A review of nanometer resolution position sensors : Operation and performance. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 190, pages 106–126, February 2013.
- [Galeano-Zea 10] J.-A. Galeano-Zea, P. Sandoz, E. Gaiffe, J.-L. Prétet & C. Mougin. Pseudo-Periodic Encryption of Extended 2-D Surfaces for High Accurate Recovery of Any Random Zone by Vision. *International Journal of Optomechatronics*, vol. 4, pages 65–82, march 2010.
- [Galloway 19] K. C. Galloway, Y. Chen, E. Templeton, B. Rife, I. S. Godage & E. J. Barth. Fiber Optic Shape Sensing for Soft Robotics. *Soft Robotics*, vol. 6, no. 5, pages 671–684, October 2019.
- [Gan 17] J. Gan, X. Zhang, H. Li & H. Wu. Full closed-loop controls of micro/nano positioning system with nonlinear hysteresis using micro-vision system. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 257, pages 125–133, April 2017.

-
- [Gauthier 15] M. Gauthier, C. Clévy, D. Hériban & P. Kallio. Industrial Tools for Micromanipulation. In Y. Sun & X. Liu, éditeurs, Advanced Micro and Nanosystems, pages 369–392. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, November 2015.
- [George Thuruthel 18] T. George Thuruthel, Y. Ansari, E. Falotico & C. Laschi. Control Strategies for Soft Robotic Manipulators : A Survey. Soft Robotics, vol. 5, no. 2, pages 149–163, April 2018.
- [Gosselin 85] C. Gosselin. Kinematic Analysis, Optimization and programming of Parallel Robotic Manipulators. PhD thesis, McGill University, Montréal, 1985.
- [Guelpa 16] V. Guelpa, P. Sandoz, M. A. Vergara, C. Clévy, N. Le Fort-Piat & G. J. Laurent. 2D Visual Micro-Position Measurement Based on Intertwined Twin-Scale Patterns. Sensors and Actuators A : Physical, vol. 248, pages 272–280, September 2016.
- [Guelpa 17] V. Guelpa. Mesure visuelle de position pour la microrobotique à l’aide de mires périodiques. PhD thesis, université de franche-comté, 2017.
- [Halder 19] A. Halder & Y. Sun. Biocompatible Propulsion for Biomedical Micro/Nano Robotics. Biosensors and Bioelectronics, vol. 139, page 111334, August 2019.
- [Handel 07] H. Handel. Analyzing the Influences of Camera Warm-Up Effects on Image Acquisition. Asian Conference on Computer Vision, vol. 4844, page 11, 2007.
- [Haouas 18a] W. Haouas. Étude et développement de robots parallèles à plateformes configurables pour la micromanipulation dextre. PhD thesis, université de 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, April 2018.
- [Henein 03] S. Henein. Conception des guidages flexibles. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003. OCLC : 990051696.
- [HO 83] C.-S. HO. Precision of Digital Vision Systems. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, page 9, 1983.
-

- [Hodes 07] G. Hodes. When Small Is Different : Some Recent Advances in Concepts and Applications of Nanoscale Phenomena. *Advanced Materials*, vol. 19, no. 5, pages 639–655, March 2007.
- [Hollis 06] R. L. Hollis, D. O’Halloran, G. Fedder & N. Sarkar. Vision Guided Pick and Place in a Minifactory Environment. *Proc. 5th Int’l. Symp. on Microfactories*, Besançon, France, page 5, 2006.
- [Hopkins 15] J. B. Hopkins, J. Rivera, C. Kim & G. Krishnan. Synthesis and Analysis of Soft Parallel Robots Comprised of Active Constraints. *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 7, no. 1, page 011002, February 2015.
- [Hu 20] J. Hu, F. Hua & W. Tian. Robot Positioning Error Compensation Method Based on Deep Neural Network. *J. Phys. : Conf. Ser.*, vol. 1487, page 012045, March 2020.
- [Hughes 16] J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo & F. Iida. Soft Manipulators and Grippers : A Review. *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, November 2016.
- [Hussein 17] H. Hussein, G. Bourbon, P. Le Moal, Y. Haddab & P. Lutz. Mechanical stop mechanism for overcoming MEMS fabrication tolerances. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 1, page 017001, January 2017.
- [Hussein 19] H. Hussein. On the design of a preshaped curved beam bistable mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, page 14, 2019.
- [Şirinterlikçi 09] A. Şirinterlikçi, M. Tiryakioğlu, A. Bird, A. Harris & K. Kweder. RobotRepeatability. *Technology Interface Journal*, 2009.
- [ISO9283 98] ISO9283. Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, april 1998.
- [Jaaskelainen 09] M. Jaaskelainen, V. Sariola & Q. Zhou. Environmental effects on droplet self-alignment assisted hybrid microassembly. In *International Symposium on Assembly and Manufacturing*, pages 177–182, Suwon, November 2009. IEEE.
- [Jiang 20] Y. Jiang, L. Yu, H. Jia, H. Zhao & H. Xia. Absolute Positioning Accuracy Improvement in an Industrial Robot. *Sensors*, vol. 20, no. 16, page 4354, August 2020.

-
- [Jung 14] J. Jung, R. S. Penning & M. R. Zinn. A modeling approach for robotic catheters : effects of nonlinear internal device friction. *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 8, pages 557–572, April 2014.
- [Khalil 99] W. Khalil & E. Dombre. *Modélisation identification et commande des robots*. Hermès, Paris, 1999. OCLC : 41084058.
- [Khalil 04] W. Khalil & E. Dombre. *Modeling, identification & control of robots*. Kogan Page Science paper edition. Kogan Page Science, London ; Sterling, VA, 2004. OCLC : ocm56760376.
- [Kim 18] H.-J. Kim, A. Kawamura, Y. Nishioka & S. Kawamura. Mechanical Design and Control of Inflatable Robotic Arms for High Positioning Accuracy. *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 2, pages 89–104, January 2018.
- [Kim 19] J. Kim, W.-Y. Choi, S. Kang, C. Kim & K.-J. Cho. Continuously Variable Stiffness Mechanism Using Nonuniform Patterns on Coaxial Tubes for Continuum Microsurgical Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 35, no. 6, pages 1475–1487, December 2019.
- [Klimchik 14] A. Klimchik, Y. Wu, S. Caro, B. Furet & A. Pashkevich. Geometric and elastostatic calibration of robotic manipulator using partial pose measurements. *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 21, pages 1419–1429, November 2014.
- [Kluz 14] R. Kluz & T. Trzpieciński. The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm. *Assembly Automation*, vol. 34, no. 3, pages 285–295, July 2014.
- [Krut 03] S. Krut. Contribution à l'étude des robots parallèles légers, 3T-1R et 3T-2R, à forts débattements angulaires. PhD thesis, université de Montpellier II, 2003.
- [Laschi 12] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador & P. Dario. Soft Robot Arm Inspired by the Octopus. *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 7, pages 709–727, January 2012.
- [Lescano 15] S. Lescano, D. Zlatanov, M. Rakotondrabe & N. Andreff. Kinematic Analysis of a Meso-Scale Parallel Robot for Laser Phonomicrosurgery. In A. Kecskeméthy & F. Geu Flores, editeurs, *Interdisciplinary Applications of Kinematics*, volume 26, pages 127–135. Springer International Publishing, Cham, 2015. Series Title : Mechanisms and Machine Science.
-

- [Li 08] Y. Li & Q. Xu. Stiffness analysis for a 3-PUU parallel kinematic machine. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 2, pages 186–200, February 2008.
- [Lilge 20] S. Lilge, K. Nülle, G. Böttcher, S. Spindeldreier & J. Burgner-Kahrs. Tendon Actuated Continuous Structures in Planar Parallel Robots : A Kinematic Analysis. *Journal of Mechanisms and Robotics*, pages 1–34, November 2020.
- [Lubrano 11] E. Lubrano, M. Bouri & R. Clavel. Ultra-High-Precision Industrial Robots Calibration. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 228–233. IEEE, May 2011.
- [Lum 17] G. Z. Lum, M. T. Pham, T. J. Teo, G. Yang, S. H. Yeo & M. Sitti. An XY Θz Flexure Mechanism with Optimal Stiffness Properties. In *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1103–1110, Munich, Germany, July 2017. IEEE.
- [Luo 01] G. Luo, O. Chutatape & H. Fang. Experimental study on nonuniformity of line jitter in CCD images. *Applied Optics*, vol. 40, no. 26, pages 4716–4720, 2001.
- [Mahoney 18] A. W. Mahoney, T. L. Bruns, R. Alterovitz & R. J. Webster III. Design, Sensing, and Planning : Fundamentally Coupled Problems for Continuum Robots. In A. Bicchi & W. Burgard, editeurs, *Robotics Research*, volume 2, pages 267–282. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [Maurine 13] P. Maurine, J.-F. Quinet & P. Poignet. L'étalonnage des robots manipulateurs industriels : une innovation permanente. Lavoisier, 2013. OCLC : 1076208762.
- [Mauzé 20] B. Mauzé, R. Dahmouche, G. J. Laurent, A. N. André, P. Rougeot, P. Sandoz & C. Clévy. Nanometer Precision with a Planar Parallel Continuum Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pages 3806–3813, 2020.
- [Mazerolle 03] S. Mazerolle, R. Rabe & T. Varidel. Positioning, Handling and Measuring inside a Scanning Electron Microscope. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.
- [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, page eaar3018, January 2018.

- [Mehrez 96] A. Mehrez, M. Hu & O. Offodile. Multivariate economic analysis of robot performance repeatability and accuracy. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 15, no. 4, pages 215–225, January 1996.
- [Meng 07] Y. Meng & H. Zhuang. Autonomous Robot Calibration Using Vision Technology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, no. 4, pages 436–446, august 2007.
- [Merlet 96] J.-P. Merlet. Direct Kinematics of Planar Parallel Manipulators. In *International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3744–3749. IEEE, 1996.
- [Merlet 06a] J.-P. Merlet. computing the worst case accuracy of a pkm. In *Conference : 5th Chemnitzer Parallelkinematik Seminar*, page 15, Chemnitz, 2006.
- [Merlet 06b] J.-P. Merlet. *Parallel Robots*, volume 128 of Solid Mechanics and Its Applications. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, springer edition, 2006.
- [Metodij 14] S. K. I. Metodij. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. In *ACTA TEHNICA CORVI-NIENSIS – Bulletin of Engineering*, volume 7, page 18. University POLITEHNICA Timisoara, Macedonia, 2014.
- [Muniz 14] P. R. Muniz, R. de Araújo Kalid, S. P. N. Cani & R. da Silva Magalhães. Handy Method to Estimate Uncertainty of Temperature Measurement by Infrared Thermography. *Optical Engineering*, vol. 53, no. 7, page 074101, july 2014.
- [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 *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 553–558, Edmonton, Alta., Canada, 2005. IEEE.
- [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.
- [Nelson 08] B. J. Nelson, L. Dong & F. Arai. Micro/Nanorobots. In B. Siciliano & O. Khatib, editeurs, *Springer Handbook of Robotics*, pages 411–450. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Nemat-Nasser 06] S. Nemat-Nasser & W.-G. Guo. Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures. *Mechanics of Materials*, vol. 38, no. 5-6, pages 463–474, May 2006.

- [Niaritsiry 06] T. Niaritsiry. Optimisation de la conception du robot parallèle Delta cube de très haute précision. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006. Publisher : Lausanne, EPFL.
- [Oetomo 08] D. Oetomo, D. Daney, B. Shirinzadeh & J.-P. Merlet. Certified Workspace Analysis of 3RRR Planar Parallel Flexure Mechanism. In International Conference on Robotics and Automation, pages 3838–3843, Pasadena, USA, May 2008. IEEE.
- [Orekhov 15] A. L. Orekhov, C. E. Bryson, J. Till, S. Chung & D. C. Rucker. A Surgical Parallel Continuum Manipulator with a Cable-Driven Grasper. In 37th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, pages 5264–5267, Milan, August 2015. IEEE.
- [Orekhov 16] A. L. Orekhov, C. B. Black, J. Till, S. Chung & D. C. Rucker. Analysis and Validation of a Teleoperated Surgical Parallel Continuum Manipulator. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 1, no. 2, pages 828–835, July 2016.
- [Orekhov 17] A. L. Orekhov, V. A. Aloï & D. C. Rucker. Modeling Parallel Continuum Robots with General Intermediate Constraints. In International Conference on Robotics and Automation, pages 6142–6149, Singapore, Singapore, May 2017. IEEE.
- [Ouyang 08] P. R. Ouyang, R. C. Tjiptoprodjo, W. J. Zhang & G. S. Yang. Micro-Motion Devices Technology : The State of Arts Review. Int J Adv Manuf Technol, page 17, 2008.
- [Paik 18] J. Paik. Soft Robot Design Methodology for ‘Push-Button’ Manufacturing. Nature Reviews Materials, vol. 3, no. 6, pages 81–83, June 2018.
- [Pan 09] B. Pan, K. Qian, H. Xie & A. Asundi. Two-Dimensional Digital Image Correlation for in-Plane Displacement and Strain Measurement : A Review. Measurement Science and Technology, vol. 20, no. 6, page 062001, june 2009.
- [Peyron 18] Q. Peyron, Q. Boehler, K. Rabenorosoa, B. J. Nelson, P. Renaud & N. Andreff. Kinematic Analysis of Magnetic Continuum Robots Using Continuation Method and Bifurcation Analysis. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 4, pages 3646–3653, October 2018.
- [Peyron 19] Q. Peyron. Concept de tube concentrique magnétique introduction et analyse. PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, 2019.

-
- [Phee 09] S. Phee, S. Low, V. Huynh, A. Kencana, Z. Sun & K. Yang. Master and slave transluminal endoscopic robot (MASTER) for natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES). In Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, pages 1192–1195, Minneapolis, MN, September 2009. IEEE.
- [Placet 19] V. Placet, M. Blot, T. Weemaes, H. Bernollin, G. Laurent, F. Amiot, C. Clévy & J. Beaugrand. Transverse compressive properties of natural fibres determined using micro mechatronics systems and 2D full field measurements. In 4th International Conference on Natural Fibers - Smart Sustainable Solutions, page 2, July 2019.
- [Power 18] M. Power, A. J. Thompson, S. Anastasova & G.-Z. Yang. A Monolithic Force-Sensitive 3D Microgripper Fabricated on the Tip of an Optical Fiber Using 2-Photon Polymerization. *Small*, vol. 14, no. 16, page 1703964, April 2018.
- [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 μ Robotex nanofactory. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 36, no. 4, page 041601, July 2018.
- [Renaud 04] P. Renaud, N. Andreff, S. Krut & G. Gogu. Kinematic Calibration of Linear-Actuated Parallel Mechanisms from Leg Observation. *ISR : International Symposium on Robotics*, page 7, 2004.
- [Régnier 08] S. Régnier & N. Chaillet. *La microrobotique : applications à la micromanipulation*. Hermès : Lavoisier, Paris, 2008. OCLC : 695545512.
- [Riemer 00] R. Riemer & Y. Edan. Evaluation of influence of target location on robot repeatability. *Robotica*, vol. 18, no. 4, pages 443–449, July 2000.
- [Robinson 99] G. Robinson & J. Davies. Continuum robots - a state of the art. In *International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 2849–2854, Detroit, MI, USA, 1999. IEEE.
- [Rognant 10] M. Rognant, E. Courteille & M. Patrick. A Systematic Procedure for the Elastodynamic Modeling and Identification of Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, page 10, 2010.
-

- [Ronchi 05] s. Ronchi. Etude conception et réalisation d'un mécanisme de déplacement plan rapide et de très grande résolution de positionnement. PhD thesis, université de Montpellier II, 2005.
- [Rossiter 20] J. Rossiter. Lighting up Soft Robotics. Nature Materials, vol. 19, no. 2, pages 134–135, February 2020.
- [Roth 87] Z. Roth, B. Mooring & B. Ravani. An Overview of Robot Calibration. IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 3, no. 5, pages 377–385, October 1987.
- [Runciman 19] M. Runciman, A. Darzi & G. P. Mylonas. Soft Robotics in Minimally Invasive Surgery. Soft Robotics, March 2019.
- [Rus 15] D. Rus & M. T. Tolley. Design, Fabrication and Control of Soft Robots. Nature, vol. 521, no. 7553, pages 467–475, May 2015.
- [Sedal 18] A. Sedal, D. Bruder, J. Bishop-Moser, R. Vasudevan & S. Kota. A Continuum Model for Fiber-Reinforced Soft Robot Actuators. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 10, no. 2, page 024501, February 2018.
- [Shi 16] C. Shi, D. K. Luu, Q. Yang, J. Liu, J. Chen, C. Ru, S. Xie, J. Luo, J. Ge & Y. Sun. Recent Advances in Nanorobotic Manipulation inside Scanning Electron Microscopes. Microsystems & Nanoengineering, vol. 2, no. 1, December 2016.
- [Shiakolas 02] P. S. Shiakolas, K. L. Conrad & T. C. Yih. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. International Journal of Modelling and Simulation, page 10, 2002.
- [Shirmohammadi 14] S. Shirmohammadi & A. Ferrero. Camera as the Instrument : The Rising Trend of Vision Based Measurement. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 17, no. 3, pages 41–47, june 2014.
- [Siciliano 16] B. Siciliano & O. Khatib, éditeurs. Springer Handbook of Robotics. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [Silva-López 05] M. Silva-López, A. Fender, W. N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. Jones, D. Zhao, H. Dobb, D. J. Webb, L. Zhang & I. Bennion. Strain and Temperature Sensitivity of a Single-Mode Polymer Optical Fiber. Optics Letters, vol. 30, no. 23, page 3129, December 2005.
- [Simaan 04] N. Simaan, R. Taylor & P. Flint. A dexterous system for laryngeal surgery. In International Conference on Robotics and Automation, pages 351–357 Vol.1, New Orleans, LA, USA, 2004. IEEE.

- [Singh 17] I. Singh, M. Singh, P. M. Pathak & R. Merzouki. Optimal Work Space of Parallel Continuum Manipulator Consisting of Compact Bionic Handling Arms. In *International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 258–263, Macau, December 2017. IEEE.
- [Sitti 07] M. Sitti. Microscale and Nanoscale Robotics Systems. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, page 8, 2007.
- [Skibicki 18] J. D. Skibicki & S. Judek. Influence of Vision Measurement System Spatial Configuration on Measurement Uncertainty, Based on the Example of Electric Traction Application. *Measurement*, vol. 116, pages 281–298, february 2018.
- [Sun 19] C. Sun, L. Chen, J. Liu, J. S. Dai & R. Kang. A Hybrid Continuum Robot Based on Pneumatic Muscles with Embedded Elastic Rods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, pages 318–328, January 2019.
- [Suzumori 91] K. Suzumori, S. Iikura & H. Tanaka. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1622–1627, Sacramento, CA, USA, 1991. IEEE Comput. Soc. Press.
- [Takano 17] R. Takano, H. Mochiyama & N. Takesue. Real-Time Shape Estimation of Kirchhoff Elastic Rod Based on Force/Torque Sensor. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2508–2515, Singapore, Singapore, May 2017. IEEE.
- [Tan 13a] N. Tan. Calibration of micro and nanorobotic systems : Contribution of influential parameters to the geometric accuracy. PhD thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2013.
- [Tan 13b] N. Tan, C. Clévy & N. Chaillet. Calibration of Single-Axis Nanopositioning Cell Subjected to Thermal Disturbance. In *IEEE International Conference On Robotics and Automation*, pages 3660–3665, 2013.
- [Tan 15] N. Tan, C. Clévy & N. Chaillet. Calibration of Nanopositioning Stages. *Micromachines*, vol. 6, no. 12, pages 1856–1875, december 2015.
- [Till 15] J. Till, C. E. Bryson, S. Chung, A. Orekhov & D. C. Rucker. Efficient Computation of Multiple Coupled Cosserat Rod Models for Real-Time Simulation and Control of

- Parallel Continuum Manipulators. In International Conference on Robotics and Automation, pages 5067–5074, Seattle, WA, USA, May 2015. IEEE.
- [Till 17a] J. Till & D. C. Rucker. Elastic Rod Dynamics : Validation of a Real-Time Implicit Approach. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 3013–3019, Vancouver, BC, September 2017. IEEE.
- [Till 17b] J. Till & D. C. Rucker. Elastic Stability of Cosserat Rods and Parallel Continuum Robots. IEEE Transactions on Robotics, vol. 33, no. 3, pages 718–733, June 2017.
- [Till 19] J. Till, V. Aloï & 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, May 2019.
- [Torralba 16] M. Torralba, M. Valenzuela, J. Yagüe-Fabra, J. Albajez & J. Aguilar. Large range nanopositioning stage design : A three-layer and two-stage platform. Measurement, vol. 89, pages 55–71, July 2016.
- [Trivedi 08] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier & I. D. Walker. Soft Robotics : Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research. Applied Bionics and Biomechanics, vol. 5, no. 3, pages 99–117, December 2008.
- [Tsai 08] M.-J. Tsai & T.-H. Lai. Accuracy analysis of a multi-loop linkage with joint clearances. Mechanism and Machine Theory, vol. 43, no. 9, pages 1141–1157, September 2008.
- [V.shil’ko 14] S. V.shil’ko. Terminology for the mechanism and machine. Rapport technique, International federation for the promotion of mechanism and machine science (IFTToMM), Russia, 2014.
- [Wang 18] M. Wang, Y. Wang, Z. Yang, T. Chen, L. Sun & T. Fukuda. Detection and Compensation of Motion Error for Nanomanipulation Platform in Scanning Electron Microscope. In 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), pages 98–102, Singapore, Singapore, November 2018. IEEE.
- [Wang 19] L. Wang, G. Del Giudice & N. Simaan. Simplified Kinematics of Continuum Robot Equilibrium Modulation via Moment Coupling Effects and Model Calibration. Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 11, no. 5, page 051013, October 2019.

- [Wang 20] H. Wang, X. Wang, W. Yang & Z. Du. Design and Kinematic Modeling of a Notch Continuum Manipulator for Laryngeal Surgery. *International Journal of Control, Automation, and System*, May 2020.
- [Webster 09] R. J. Webster, J. M. Romano & N. J. Cowan. Mechanics of Precurved-Tube Continuum Robots. *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, no. 1, pages 67–78, February 2009.
- [Wu 13] Y. Wu, A. Klimchik, A. Pashkevich, S. Caro & B. Furet. Efficiency Improvement of Measurement Pose Selection Techniques in Robot Calibration. *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, vol. 46, no. 9, pages 802–807, 2013.
- [Wu 14] Y. Wu. Optimal Pose Selection for the Identification of Geometric and Elastostatic Parameters of Machining Robots. PhD Thesis, Ecole des Mines de Nantes, 2014.
- [Wu 15] Y. Wu, A. Klimchik, S. Caro, B. Furet & A. Pashkevich. Geometric Calibration of Industrial Robots Using Enhanced Partial Pose Measurements and Design of Experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 35, pages 151–168, October 2015.
- [Wu 17] G. Wu, G. Shi & Y. Shi. Modeling and Analysis of a Parallel Continuum Robot Using Artificial Neural Network. In *International Conference on Mechatronics*, pages 153–158, Churchill, VIC, February 2017. IEEE.
- [Wu 19] G. Wu & G. Shi. Experimental Statics Calibration of a Multi-Constraint Parallel Continuum Robot. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 136, pages 72–85, June 2019.
- [Xiao 19] R. Xiao, S. Shao, M. Xu & Z. Jing. Design and Analysis of a Novel Piezo-Actuated $XY\theta_z$ Micropositioning Mechanism with Large Travel and Kinematic Decoupling. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, pages 1–15, July 2019.
- [Yang 18] Z. Yang, X. Zhu & K. Xu. Continuum Delta Robot : A Novel Translational Parallel Robot with Continuum Joints. In *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 748–755, Auckland, July 2018. IEEE.
- [Yang 19] Z. Yang, B. Zhao, L. Bo, X. Zhu & K. Xu. CurviPicker : A Continuum Robot for Pick-and-Place Tasks. *Assembly Automation*, June 2019.

- [Yeshmukhametov 18] A. Yeshmukhametov, K. Koganezawa & Y. Yamamoto. Design and Kinematics of Cable-Driven Continuum Robot Arm with Universal Joint Backbone. In International Conference on Robotics and Biomimetics, pages 2444–2449, Kuala Lumpur, Malaysia, December 2018. IEEE.
- [Yip 17] M. C. Yip, J. A. Sganga & D. B. Camarillo. Autonomous Control of Continuum Robot Manipulators for Complex Cardiac Ablation Tasks. Journal of Medical Robotics Research, vol. 02, no. 01, page 1750002, March 2017.
- [Zeng 16] Y. Zeng, W. Tian & W. Liao. Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 42, pages 113–120, December 2016.
- [Zeyi Wu 18] Zeyi Wu & Qingsong Xu. Survey on Recent Designs of Compliant Micro-/Nano-Positioning Stages. Actuators, vol. 7, no. 1, page 5, February 2018.
- [Zhang 16a] L. Zhang & P. Yan. Design of a Parallel $XY\theta$ Micro-Manipulating System with Large Stroke. In Chinese Control and Decision Conference, pages 4775–4780. IEEE, May 2016.
- [Zhang 16b] L. Zhang & P. Yan. Design of a Parallel $XY\theta$ Micro-Manipulating System with Large Stroke. In Chinese Control and Decision Conference, pages 4775–4780. IEEE, May 2016.
- [Zhao 18] C. Zhao, C. F. Cheung & M. Liu. Nanoscale Measurement with Pattern Recognition of an Ultra-Precision Diamond Machined Polar Microstructure. Precision Engineering, november 2018.

Liste des Figures

I.1	Les différentes échelles et les objets que l'on peut y retrouver.....	4
I.2	Réalisation d'assemblages et de positionnement à très petites échelles vus sous microscope électronique à balayage. (a) Microsystèmes Électro-Mécanique 3D [Hollis 06] (b) Micro banc optique [Clévy 14] (b) Micromaison pliée et assemblée au bout d'une fibre optique amincie à partir d'un film de silice. [Rauch 18].....	5
I.3	Définition schématique de la précision (résolution, répétabilité et justesse) en position (a) et en orientation (b) d'un robot	7
I.4	Architectures robotiques selon [Khalil 99]	12
I.5	Proposition de classement des différentes typologies de solutions robotiques. (a) Robot sériel Staübli. (b) Robot parallèle Delta Yama-saki. (c) Platine de positionnement unidirectionnelle et (d) Nano-cube de Physik Instrumente. (e) Robot à tubes concentriques [Webster 09]. (f) Robot parallèle continu inspiré de la plateforme de Stewart-Gough [Black 18]. (g) Robot souple sériel gonflable [Kim 18]. (h) Robot parallèle souple actionné par câbles [Duriez 13].....	13
I.6	Exemple de robots polyarticulés utilisés en industrie (a) Kuka KR270 (b) Zonda de l'entreprise française Symétrie.....	15
I.7	Exemple de robots à articulations flexibles. (a) Plateforme parallèle 6 DdL de l'entreprise Physik Instrumente (b) MilliDelta de l'université d'Harvard [McClintock 18].....	16
I.8	Exemple de robots continus (a) Robot à tubes concentriques [Webster 09] (b) Robot parallèle continu possédant une pince [Orehhov 16].....	17
I.9	Exemples de robots souples (a) Robot sériel bio-inspiré [Laschi 12] (b) Robot parallèle gonflable [Hopkins 15]	18
I.10	Compromis entre flexibilité, degrés de liberté, forces et répétabilité extrait de [Hughes 16]	18
I.11	Protoype de la plateforme de Stewart-Gough continue [Black 18, Till 17b] et robot Delta utilisant des articulations continues [Yang 18] 20	
I.12	Différents types de modèles développés pour les robots continus utilisables pour les RPC, extrait de [Burgner-Kahrs 15]	21

I.13	RPC multi-contraint d'une longueur de 0,781 m constitué de tubes en verres d'un diamètre de 5 mm et d'une plateforme de 40 mm de diamètre étalonné dans [Wu 19].....	23
I.14	Exemple de RPC miniatures, extrait de [Black 17], avec en (a) une plateforme de Stewart-Gough de diamètre 87 mm. (b) 10 mm. (c) 5 mm. (d) RPC à trois éléments continus. Stewart-Gough avec une pince de 12 mm de diamètre [Orekhov 15].....	24
I.15	Robot continu avec sonde OCT. (a) Configuration expérimentale complète. (b) Unité d'actionnement de la sonde OCT. (c) Continuum robot de 44 mm de longueur (d) marqueur 3 points pour la vision et extrémité de la sonde OCT. (e) image OCT d'un rouleau de scotch	25
II.1	Structure planaire polyarticulée 3-PRR dont s'inspire le RPC proposé	29
II.2	Schéma du Triskèle-Bot avec ses paramètres de construction	30
II.3	Schéma détaillé de la modélisation d'un élément flexible	31
II.4	Schéma du Triskèle-Bot détaillant les extrémités des éléments flexibles 34	
II.5	Logigrammes des méthodes de résolution du système des équations différentielles contraintes par les conditions aux limites (a) le Modèle Géométrique Direct (MGD) et (b) le Modèle Géométrique Inverse (MGI). Dans les deux cas, l'intégration spatiale des équations des poutres se fait en utilisant une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4). ξ est le résidu du processus d'optimisation dont le produit doit être inférieur à une valeur de tolérance « tol. »	37
II.6	Espace de travail du 3-PF présentant les contraintes maximales σ_i dans chacun des trois bras. Chaque niveau correspond à l'espace de travail en position pour l'orientation donnée. Les différents niveaux correspondent à l'espace de travail en orientation.	39
II.7	Espace de Travail du Triskèle-Bot en considérant la contrainte maximale dans les différents bras et un coefficient de sécurité pour une orientation nulle (a). Le tracé bleu correspond à l'enveloppe convexe de l'espace de travail non réduit. Le triangle rouge représente l'ensemble de travail sécurisé (i.e. l'ensemble des positions respectant la condition de contrainte maximale de 200 MPa dans les bras). (b) Montre l'espace de travail sécurisé avec les différentes orientations possibles.	40
III.1	Mouvements imparfaits d'un actionneur translatif (figure adaptée du site internet de Physik Instrumente).....	45

III.2	Composants avant assemblage : (a) Coussin d'air, actionneurs et les platines de prépositionnement. (b) Plateforme.	47
III.3	(a) Schéma de principe montrant les différentes couches d'un fibre optique dont la vue latérale est photographiée en(b).....	49
III.4	Propositions de solutions pour l'encastrement des fibres. (a) Montage en V avec chapeau (vue de face). (b) Alésage avec cire (vue de face). (c) Fixation (vue de dessus). (d) Fixation réalisée.	50
III.5	Systèmes de mesure par vision utilisés dans cette thèse.	51
III.6	Actionneur « stick-slip ». (a) Schéma du principe d'actionnement [Mazerolle 03]. (b) Actionneur SmarAct choisi.	52
III.7	Prototype final du Triskèle-Bot	53
III.8	Espace de travail du Triskèle-Bot avec les différents points de mesure de répétabilité $P_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$	55
III.9	Résultats de simulations de la propagation d'incertitude d'un actionneur sur la position de la plateforme fondée sur une méthode de Monte-Carlo. Le protocole consiste à réaliser une translation de 100 μm par le premier actionneur q_1 depuis la position initiale du robot P_1 . (a) montre les coordonnées de la plateforme dans le repère global. Les distances à la moyenne en position et en orientation sont illustrées en (b) et (c). Les courbes en pointillés représentent les écarts-types, et donc, les répétabilités simulées en position et en orientation de la structure proposée.....	56
IV.1	Illustrations expliquant la création d'une mire pseudo-périodique codée. (a) Exemple de mire codée 2D. (b1) et (b2) décrivent respectivement des mires périodiques unidirectionnelles encodées suivant les directions X et Y correspondant à une séquence binaire LFSR. (c) montre un élément élémentaire constitué de 3×3 périodes. Le carré en haut à gauche a été supprimé pour lever l'ambiguïté de rotation au modulo $\frac{\pi}{2}$	62
IV.2	Processus de décodage du motif. (a) Image enregistrée. (b) Module de la transformée de Fourier 2D. Les cercles entourent les deux pics fréquentiels relatifs aux deux directions x et y. (c1) et (c2) représentent les cartes de phases enroulées résultantes de l'application du filtre gaussien et de la transformée de Fourier inverse. Elles représentent respectivement la position de la ligne dans le repère image. (d1) montre le code binaire nécessaire pour identifier la position de l'image dans le codage global. (d2) illustre une cellule encodée unitaire constituant le codage de l'image. (e) exhibe le résultat du décodage en montrant la position absolue de l'image enregistrée dans le motif global.....	64

IV.3	Diagramme d'Ishikawa permettant d'identifier et de classifier les sources d'incertitudes du moyen de mesure.....	65
IV.4	Évolution de la position de la mire dans le repère de la caméra au cours du temps suivant différentes conditions expérimentales exhibant différentes sources d'incertitudes. Chacune de ces expériences a duré 90 s. (a) Positions obtenues juste après l'assemblage mécanique de la configuration expérimentale et après l'échauffement de l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 294 nm. (b) Positions obtenues après avoir attendu pour la relaxation mécanique et l'échauffement de l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 278 nm. (c) Positions obtenues après avoir attendu pour la relaxation mécanique, mais juste après avoir allumé l'éclairage. La distance à la moyenne maximale est de 337 nm.	69
IV.5	Configuration expérimentale pour l'étude des incertitudes des mesures de pose.	71
IV.6	Positions et orientations obtenues après avoir mis en place le protocole expérimental proposé. La valeur maximale des distances à la moyenne est de 22 nm et l'écart-type est de 5 nm pour une expérience de 90 s.....	71
IV.7	Écarts-types des distances à la moyenne résultantes des différentes séries d'acquisitions effectuées toutes les 4 heures (hr) pour une durée totale de 56 heures.....	73
IV.8	Quantification du bruit statique en position (a) et en orientation (b) lorsque le robot tient une position en conditions de fonctionnement. La taille des points dépend du temps d'acquisition des images.	74
IV.9	Résultats expérimentaux de la quantification de la répétabilité lorsqu'une translation de 100 μm est effectuée par le premier actionneur q_1 depuis la position P_1 . (a) Positions de la plateforme (b) Distances à la moyenne des positions mesurées de la plateforme. (c) Différences entre les orientations mesurées et leur moyenne. Les écarts-types std_l et std_a correspondent respectivement à la répétabilité en position et en orientation.	75
V.1	Sources d'erreurs géométriques et non-géométriques impactant le positionnement.....	81
V.2	Processus d'étalonnage complet avec ses différentes étapes.	83
V.3	Schéma illustrant le désalignement entre l'orientation de l'axe de translation des actionneurs γ_i et celle du Qr-Code α_i par rapport au référentiel global.....	86

V.4	Positions (a,b) et orientations (c) de la plateforme considérant les ensembles de configurations articulaires destinés aux étapes d'identification (bleu) et de validation (rouge).....	89
V.5	Mesure de poses et définition des paramètres géométriques externes inclus dans les différentes transformations.....	90
V.6	Principe de l'identification des paramètres. On considère un ensemble de coordonnées articulaires $\mathbf{q}=(q_1, q_2, q_3)$ pour créer et comparer les poses cartésiennes expérimentales (x, y, θ) et calculées par le MGD $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta})$. Les paramètres $\boldsymbol{\pi}$ de ce dernier sont changés itérativement pour réduire les valeurs du vecteur résidu \mathfrak{F}	92
V.7	Stratégie d'identification des paramètres.....	92
V.8	Erreurs en position (i) et en orientation (ii) pour les ensembles de configurations d'identification et de validation. Les pointillées correspondent aux valeurs moyennes des erreurs, respectivement 7,19 μm et 1,7 mrad pour l'identification (a) et 5,5 μm et 1.5 mrad pour la validation (b).....	95
V.9	Principe de la commande en position et de la quantification de la justesse en position AP_p et en orientation AP_θ du Triskèle-Bot.	96
V.10	Résultats de la commande en position du Triskèle-Bot pour une trajectoire carrée (a) et circulaire (b). (1) montre les positions commandées (en rouge) et les positions expérimentales des barycentres obtenus à partir des 30 répétitions des trajectoires (en bleu). (2) et (3) exposent respectivement les justesses en position Ap_p et en orientation Ap_θ pour les différentes poses cartésiennes. Les lignes pointillées horizontales montrent les valeurs moyennes de justesse en position (1.27 μm pour le carré et 1.95 μm pour le cercle). Les lignes pointillées verticales explicitent des points caractéristiques des trajectoires (sommets du carré ou quart de cercle). Ces mêmes points sont numérotés et correspondent à des changements de monotonies des valeurs de justesses en position et/ou en orientation.	97
V.11	Pince\capteur de force au bout d'une fibre optique [Power 18]	103
V.12	Réalisations d'une pince pour la chirurgie avec la Femto-Print (a) et d'une tour Eiffel avec la Nanoscribe (b). (images issues de leur site internet respectif)	104
V.13	SpaceFAB SF-300BS de Physik Instrumente (a), sa version continue (b) et sa modélisation sous SOFA	105

Liste des Tables

I.1	Principales caractéristiques des structures sérielles et parallèles.	12
II.1	Variables inconnues, entrées, sorties pour la résolution des deux modèles géométrico-statiques. Les variables physiques inconnues et les sorties sont conjecturées et modifiées itérativement par l'algorithme de tir. L'index $i \in \{1, 2, 3\}$ représente le numéro de la chaîne cinématique.	37
III.1	Comparaisons de l'aire projetée, de l'espace de travail et de l'indice de compacité I_c du Triskèle-Bot avec des structures à articulations flexibles $XY\theta$	54
III.2	Répétabilité en position (1re colonne) et en orientation (2ème colonne) pour les différents cas considérés. Les trois premiers cas correspondent à des déplacements de 100 μm sur quatre points différents de l'espace de travail. Le dernier cas (P_1 - 3 act.) correspond à la répétabilité pour un déplacement de 100 μm des trois actionneurs à partir de la position initiale (P_1).	57
IV.1	Résumé de l'impact de différentes incertitudes sur les mesures réalisées montrant l'apport du protocole de mesure proposé pour des mesures par vision en microrobotique. Le système de vision #1 utilise une caméra de type CCD alors que le système #2 utilise une caméra CMOS.(N.A.= Non Applicable)	72
IV.2	Répétabilité en position et en orientation obtenues par la méthode de Monte-Carlo et expérimentalement pour les différents cas. Les quatre premiers cas correspondent aux allers-retours de 100 μm à partir des différents points de l'espace de travail. Le dernier cas correspond à des allers-retours de 100 μm réalisés par les trois actionneurs à partir de la position initiale (P_1).	76
V.1	Valeurs nominales des paramètres avec leurs incertitudes de mesure et leur impact sur le Triskèle-Bot. L'impact est quantifié par la différence entre les valeurs de contraintes et de poses simulées pour des valeurs de paramètres nominales ($\hat{\sigma}$, \hat{x} , \hat{y} , $\hat{\theta}$) et modifiées par les incertitudes (σ , x , y , θ)	87
V.2	Résultats expérimentaux de l'étalonnage.	94

V.3 Justesse de pose du robot pour la trajectoire circulaire et carrée. 98

Titre : Triskèle-Bot : Étude et développement d'un robot parallèle continu pour le micro-positionnement

Mots clefs: robots parallèles continus, microrobotique, micro-positionnement, étalonnage robotique

Résumé : Les robots parallèles continus (RPC) sont de nouvelles structures qui présentent un grand intérêt en termes de souplesse, d'espace de travail ou encore de miniaturisation, mais qui ne sont pas connus pour leur précision. Cette thèse étudie le potentiel des RPC pour le positionnement à haute précision demandant un espace de travail conséquent. Pour cela, un nouveau concept de RPC planaire à 3 degrés de liberté, nommé Triskèle-Bot, constitué d'une plateforme et de trois bras flexibles continuellement déformables actionnés en translations, est proposé. Pour étudier son comportement, un modèle géométrique directe et inverse sont établis à partir d'une résolution numérique d'un système d'équations aux dérivées partielles non-linéaires, fondées sur une modélisation de poutre de Kirchhoff, contraintes aux conditions limites. Un prototype est développé de manière à va-

lider ces modèles tout en offrant une répétabilité intrinsèque et une manière innovante de mesurer les paramètres intrinsèques et extrinsèques au robot. Un protocole de mesure par vision est proposé pour réduire les nombreuses sources d'incertitudes inhérentes à l'échelle microscopique et obtenir, ainsi, des mesures de poses avec un bruit de mesure inférieur à la dizaine de nanomètres. Il est utilisé pour mesurer expérimentalement la répétabilité du Triskèle-Bot qui atteint 9,13 nanomètres en position et 0,71 microradian en orientation. Une étude de la justesse de pose, faisant suite à une stratégie originale d'étalonnage, est réalisée sur plusieurs trajectoires montrant des valeurs inférieures à 4 micromètres et 0,6 milliradian. L'ensemble de ces résultats démontre le potentiel des RPC pour des applications de micro-positionnement.

Title : Triskèle-Bot : Study and Development of a Parallel Continuum Robot for micropositioning

Keywords : parallel continuum robots, microrobotics, micropositioning, robot calibration

Abstract : Parallel Continuum Robots (PCR) are new structures that present great interest in terms of workspace or miniaturization, but they are not known for their precision. This thesis studies the potential of RPCs for high precision positioning requiring a consequent workspace. For this purpose, a new concept of planar RPC with 3 degrees of freedom called Triskèle-Bot, composed of a mobile platform and three flexible continuously deformable limbs driven by linear actuators, is proposed. To study its behavior, direct and inverse geometric models are created by a numerical resolution of a system of non-linear partial derivative equations (based on a Kirchhoff beam model) constrained to boundary conditions. A prototype is built to validate these models

while offering intrinsic repeatability and an innovative way to measure the intrinsic and extrinsic parameters of the robot. A vision measurement protocol is proposed to minimize the numerous sources of uncertainty inherent to the microscopic scale, and thus obtain measurements of poses with less than ten nanometers of uncertainties. This protocol is used to experimentally measure the repeatability of the Triskele-Bot which reaches 9.13 nanometers in position and 0.71 microradian in orientation. A study of the robot's accuracy, resulting from an original strategy of calibration, is performed on several trajectories exhibiting values lower than 4 micrometers and 0.6 milliradian. All these results demonstrate the potential of PCR for micropositioning applications.