

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Conception, réalisation et
commande d'un microrobot
numérique, planaire, non-redondant
et en technologie MEMS

■ Vincent CHALVET

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

THÈSE présentée par

Vincent CHALVET

pour obtenir le

Grade de Docteur de
l'Université de Franche-Comté

Spécialité : **Automatique**

Conception, réalisation et commande d'un
microrobot numérique, planaire, non-redondant
et en technologie MEMS

Unité de Recherche :
FEMTO-ST, UMR CNRS 6174

Soutenue le 08 Mars 2013 devant le Jury :

Hervé Tanneguy REDARCE	Président	Professeur, INSA, Lyon
Skandar BASROUR	Rapporteur	Professeur, UJF, Grenoble
Philippe POIGNET	Rapporteur	Professeur, Université Montpellier 2
Reymond CLAVEL	Examinateur	Professeur, EPFL, Lausanne
Patrice LE MOAL	Examinateur	Chargé de Recherche CNRS, UFC, Besançon
Rose-Marie SAUVAGE	Examinateur	Responsable, DGA, Bagneux
Yassine HADDAB	Directeur de thèse	Maître de Conférences HDR, ENSMM, Besançon
Philippe LUTZ	Directeur de thèse	Professeur, UFC, Besançon

À mes parents

Remerciements

Les résultats obtenus au cours de cette thèse n'auraient vu le jour sans le soutien et l'aide de nombreuses personnes que je tenais à remercier.

Ayant effectué cette thèse au sein du département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M) de l'institut FEMTO-ST, je remercie les directeurs successifs du département : Nicolas Chaillet, Noureddine Zerhouni et Michaël Gauthier pour l'accueil et les conditions de travail agréables qu'ils m'ont fournis.

J'exprime toute ma gratitude à mes directeurs de thèse Yassine Haddab et Philippe Lutz qui m'ont fait confiance et donné l'opportunité d'effectuer ce travail de thèse riche et très formateur. Je leur suis reconnaissant pour leur support, leur gentillesse, leur patience et leurs encouragements tout au long de ces trois années de thèse. Leur encadrement m'a toujours permis d'avancer, même dans les moments difficiles, et a permis de fournir un travail de qualité.

J'adresse ensuite mes remerciements à chacun des membres du jury : à M. Skandar Basrour et M. Philippe Poignet qui m'ont fait l'honneur de rapporter sur mes travaux de thèse, ainsi qu'à M. Hervé Tanneguy Redarce, M. Reymond Clavel, M. Patrice Le Moal et Mme Rose-Marie Sauvage pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Les remarques pertinentes qu'il ont apporté furent très constructives.

La phase de microfabrication a été une étape difficile lors de laquelle j'ai sollicité l'aide de nombreuses personnes. Je remercie tout d'abord Artur Zarzycki qui m'a expliqué le fonctionnement de la salle blanche et m'a aidé à y faire mes premiers pas. Je remercie également tout le staff de la salle blanche MIMENTO et en particulier Valérie Petrini pour ses conseils. J'ai également souvent sollicité l'aide de Joël Agnus pour des questions techniques liées à des problèmes de microfabrication en salle blanche ou liées au matériel électronique, il a toujours répondu présent en fournissant des explications claires et fort enrichissantes qui m'ont beaucoup aidées.

Je tiens également à remercier Patrice Le Moal et Gilles Bourbon pour leur aide concernant la fabrication et la caractérisation mécanique de certains éléments alors que je rencontrais de nombreux problèmes lors de la réalisation d'un premier prototype.

Je terminerai par remercier tous les membres du département AS2M pour la bonne humeur au quotidien, et en particulier les personnes avec qui j'ai partagé mes bureaux successifs : Stéphane Oster, Sofiane Khadraoui, Xin Xu, puis David Rostoucher, Alexandru Ivan, et finalement Hector Ramirez et Didace Habineza.

Vincent

Table des matières

Introduction	1
1 La robotique dans / pour le micromonde	5
1.1 Introduction	5
1.2 Microrobots mobiles	6
1.2.1 Actionnement robotique	7
1.2.2 Robots autonomes	9
1.2.3 Robots non liés	13
1.2.4 Convoyeurs	15
1.2.5 Utilisation	16
1.3 Microrobotique de manipulation	17
1.3.1 Préhenseurs	18
1.3.2 Micropositionneurs	18
1.3.3 Application envisagée d'un microrobot de micropositionnement . .	23
1.4 Objectif de cette thèse	24
1.5 Conclusion	25
2 Le numérique en robotique	27
2.1 Introduction et concept	28
2.1.1 Actionnement robotique	28
2.1.2 Actionneurs binaires	28
2.1.3 Association de plusieurs actionneurs	29
2.2 Différents types d'actionnement numérique	32
2.2.1 Notion de stabilité	32
2.2.2 Maintien des actionneurs binaires	33
2.3 Robots numériques existants	35
2.3.1 VGT	35
2.3.2 BRAID	38
2.3.3 Main articulée	39
2.4 Actionneurs binaires à l'échelle micro	40

2.4.1	Différents types d'actionnement	40
2.4.2	Différents types de maintien	46
2.4.3	Microsystèmes numériques	47
2.5	Choix d'un actionneur binaire pour un microrobot numérique	50
2.6	Conclusion	50
3	DiMiBot : le microrobot numérique	53
3.1	Introduction	53
3.2	Cinématique du microrobot numérique	54
3.2.1	Cahier des charges	54
3.2.2	Cas d'une structure serielle	55
3.2.3	Proposition d'une cinématique de microrobot numérique	56
3.3	Modèle géométrique direct	57
3.3.1	Structure élémentaire	58
3.3.2	Structure en escalier	59
3.3.3	Organe terminal	61
3.3.4	Modèle géométrique direct	61
3.4	Espace de travail	63
3.4.1	Espace de travail du VGT (macro)	63
3.4.2	Visualisation de l'espace de travail du DiMiBot	63
3.4.3	Description de l'espace de travail du DiMiBot	64
3.4.4	Influence de la géométrie du DiMiBot sur son espace de travail	66
3.5	Modèle géométrique inverse	69
3.6	Conclusion	71
4	Dimensionnement du DiMiBot	73
4.1	Introduction	73
4.2	Articulations au sein de la structure flexible	74
4.2.1	Articulations flexibles	74
4.2.2	Articulations circulaires	75
4.3	Dimensionnement des modules bistables	77
4.3.1	Structure bistable	77
4.3.2	Stop-blocks	79
4.4	Architecture robotique flexible	79
4.4.1	Validation du modèle géométrique	81
4.4.2	Choix des paramètres	83
4.4.3	Dimensionnement des articulations flexibles	84
4.4.4	Dimensionnement des poutres pseudo-rigides	87
4.5	Force de maintien du DiMiBot	89
4.6	Analyse modale	92
4.7	Conclusion	93

5 Microfabrication et caractérisation	95
5.1 Microfabrication en salle blanche	96
5.1.1 Procédés de microfabrication utilisés	96
5.1.2 Principaux défauts de microfabrication	97
5.2 Le DiMiBot au sein du wafer	97
5.3 Flowchart du DiMiBot	100
5.3.1 Masque A : connexions électriques	101
5.3.2 Masque B : gravure des parties mobiles	101
5.3.3 Masque C : libération des microrobots	102
5.4 Prototype opérationnel	104
5.4.1 Observation au MEB	104
5.5 Caractérisation	105
5.5.1 Modules bistables	105
5.5.2 Caractérisation robotique	109
5.5.3 Force de maintien	110
5.6 Utilisation du DiMiBot	111
5.6.1 Au sein d'un MEB	111
5.6.2 Première micromanipulation	111
5.7 Conclusion	114
6 Planification de trajectoire	115
6.1 Trajectoire pour les robots numériques macroscopiques	115
6.2 Application au DiMiBot	117
6.2.1 Particularités du DiMiBot	117
6.2.2 Utilisation de la théorie des graphes	120
6.2.3 Calcul de trajectoire	123
6.2.4 Introduction des obstacles	124
6.3 Graphe hyper-cubique	127
6.3.1 Introduction à l'algorithme A*	127
6.3.2 Application au DiMiBot	129
6.3.3 Le graphe hyper-cubique	129
6.3.4 Utilisation de l'algorithme A* pour le DiMiBot	131
6.4 Application à la micromanipulation	133
6.5 Conclusion	133
Conclusion et perspectives	137
Bilan des travaux	137
Perspectives	138
Utilisation du DiMiBot	139
Microrobot numérique tridimensionnel	139
A Détail des simulations effectuées en éléments finis	149
A.1 Analyse statique	149
A.2 Analyse modale	151

B	Masques de microfabrication	153
B.1	Les 3 masques associés à la microfabrication	153
B.2	Détail du process de microfabrication	155
C	Mesures effectuées sur MEMS Analyser	159
C.1	Actionnement du DiMiBot	159
C.2	Fonctionnement du MEMS Analyser	159
C.3	Mesures	159
	Publications personnelles	163

Table des figures

1.1	Différentes utilisations du principe électrostatique.	8
1.2	Minirobots à roues Alice [13] travaillant en coopération pour pousser un objet vers une cible [4].	9
1.3	Détail d'un cycle de fonctionnement des robots de type inchworm (a) et marcheur (b).	10
1.4	Exemples de microrobots marcheurs.	12
1.5	Exemples de microrobots de type inchworm, microfabriqués de manière monolithique.	12
1.6	Contrôle du glissement par vibration et par stick-slip.	13
1.7	Microrobots non liés.	14
1.8	Convoyeurs micrométriques.	16
1.9	Exemples de microsystèmes assemblés.	17
1.10	Station de micromanipulation PRONOMIA.	19
1.11	Microrobots commercialisés inspirés de la miniaturisation des robots traditionnels.	20
1.12	Plateforme de micropositionnement 2 ddl.	21
1.13	Plateformes 3 ddl.	22
1.14	Positionneurs tridimensionnels.	23
1.15	Version grande échelle d'un microrobot adapté à une utilisation en TEM. .	24
2.1	Représentation schématique d'actionneurs binaires de type prismatique à gauche et rotoïde à droite dans les états 0 et 1.	29
2.2	Concept de robot numérique non redondant par association en cascade d'actionneurs binaires prismatiques.	31
2.3	Exemple de concept de robots numériques complexes travaillant dans un espace en trois dimensions (robot sériel à gauche et parallèle à droite). .	31
2.4	Classification de différents types d'actionneurs binaires.	32
2.5	Représentation schématique de la notion de stabilité d'un système. . . .	33
2.6	Différence entre position à maintien actif et une position à maintien passif. .	34
2.7	Concept d'actionneur à maintien actif.	34

2.8	Différence entre un actionneur à maintien passif général (<i>a</i>) et un actionneur bistable (<i>b</i>).	35
2.9	Les 8 configurations possibles d'un module élémentaire constituant le VGT [19].	36
2.10	Structure globalement serielle du VGT possédant 5 modules, dans deux configurations différentes.	37
2.11	Espace de travail atteignable par un manipulateur VGT possédant 5 modules (soit 15 actionneurs binaires).	37
2.12	Module élémentaire à 3 bit à gauche, et manipulateur BRAID constitué de 5 modules à droite.	38
2.13	Prototype de robot sauteur possédant un actionneur binaire permettant de charger un ressort de puissance pour exploration planétaire [81].	39
2.14	Architecture robotique parallèle utilisant des actionneurs bistables pour pratiquer des biopsies et traitements de cancer en IRM [31].	39
2.15	Comparaison d'un usage traditionnel de fils d'AMF et d'une utilisation numérique [21].	40
2.16	Organisation des modules thermiques sur les 10 fils d'AMF (à gauche) et bibliothèque de 14 configurations possible de la main artificielle (à droite) [21].	41
2.17	Valve électromagnétique bistable [73] générant une rotation entre les deux positions stables.	42
2.18	Microsystèmes binaires à actionnement électrostatique par peignes interdigités.	43
2.19	Bit de mémoire mécanique à écriture électrostatique et lecture de capacité [14].	43
2.20	Concept d'actionneur thermique de type V-beam.	44
2.21	Microrelais électrique constitué d'une structure mécanique bistable actionnée thermiquement [45].	44
2.22	Microsystème binaire alliant actionneurs en alliage à mémoire de forme et aimants permanents [5].	45
2.23	Microrelais électrique utilisant une structure mécanique bistable et des actionneurs thermiques [82].	45
2.24	Microrelais optique à actionnement thermique utilisant un actionneur secondaire de verrouillage [24].	47
2.25	Principe de maintien par actionneur dédié développé dans [24].	47
2.26	CNA à 4 bit permettant le positionnement d'un micromiroir au sein d'un MEMS [103].	48
2.27	CNA inspiré du CNA électrique R-2R [95].	48
2.28	Le MEMDAC bimorphe à actionnement thermique [68] utilisé comme miroir orientable.	49
2.29	DAC de torsion [111] à actionnement électrostatique.	49
2.30	Module bistable.	51

3.1	Premiers prototypes de microrobots numériques sériels utilisant des modules bistables.	56
3.2	Schéma cinématique de la structure robotique.	57
3.3	Schéma cinématique de la structure élémentaire (a), et de la structure finale (b) constituant le microrobot numérique.	58
3.4	Schéma cinématique de la structure en escalier de la partie gauche.	60
3.5	Espace de travail atteignable par un microrobot numérique contenant 6 modules bistables, chacun générant un déplacement $\Delta = 10 \mu\text{m}$	65
3.6	Schéma cinématique de la structure robotique avec 8 modules.	67
3.7	Comparaison des espaces de travail générés par un robot à 6 modules et un robot à 8 modules.	67
3.8	Espace de travail d'un DiMiBot à 7 modules ($N_L = 3$ et $N_R = 4$).	68
3.9	Numérotation des points de l'espace de travail.	70
3.10	Résultat du modèle géométrique inverse.	72
4.1	Différents types d'articulations flexibles : rectangulaire, circulaire et ovale.	75
4.2	Exemples de plateformes de micropositionnement planaire utilisant des actionneurs piézoélectriques et une structure flexible constituée d'articulations circulaires, fabriquées par usinage traditionnel [106, 107].	76
4.3	Visualisation CAO d'un DiMiBot à 6 modules bistables.	76
4.4	Image MEB d'un module bistable.	77
4.5	Dimensions de la structure mécanique bistable d'un module bistable.	78
4.6	Relation force/déplacement de la structure bistable, et positionnement des stop-blocks pour obtenir un déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$ et des forces de blocage de 1 mN.	78
4.7	Image MEB du stop-block 1 avant et après activation.	80
4.8	Position du shuttle par rapport au stop-block 1 ((a) et (b)) et par rapport au stop-block 0 ((c) et (d)).	80
4.9	Image de simulation de la structure flexible du DiMiBot à 6 modules sous Ansys.	81
4.10	Comparaison entre l'espace de travail obtenu par modélisation et celui obtenu par simulation pour un robot de 6 modules générant chacun un déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$	82
4.11	Force maximale appliquée par la structure mécanique flexibles sur l'ensemble des modules bistables lorsqu'ils sont à l'état 0 (en trait plein) et à l'état 1 (en pointillés).	85
4.12	Contrainte mécanique maximale appliquée au sein de la structure flexible en fonction des articulations flexibles.	87
4.13	Résultat des simulations effectuées concernant le dimensionnement des poutres pseudo-rigides, contraintes internes à gauche et force appliquée sur les modules à droite.	88
4.14	Répartition d'une force extérieure \mathbf{F}_e sur les deux côtés de la structure flexible en fonction de sa direction.	90

4.15	Force maximale appliquée sur les modules bistables en fonction de la force extérieur appliquée sur l'organe terminal.	90
4.16	Déplacement maximal de l'organe terminal lors de l'application d'une force extérieure sur celui-ci.	92
4.17	Modes de résonance de la structure flexible du DiMiBot à 4 modules.	93
5.1	Profil de gravure DRIE classique.	98
5.2	Arrangement des DiMiBots au sein du wafer.	99
5.3	Positionnement des connexions électriques pour l'alimentation d'un module bistable.	100
5.4	Flowchart lié au masque A, permettant la réalisation des connexions électriques.	101
5.5	Flowchart lié au masque B, permettant la fabrication des structures mobiles.	102
5.6	Flowchart lié au masque C, libération des structures.	103
5.7	Photo d'un DiMiBot à 4 modules collé sur son PCB avant wirebonding.	104
5.8	Dimensions mesurées d'une articulation circulaire flexible et d'une poutre.	105
5.9	Photo de l'activation manuelle d'un module bistable du microrobot.	106
5.10	Énergie nécessaire pour le basculement des modules en fonction de la tension appliquée aux bornes des actionneurs thermiques.	107
5.11	MEMS Analyzer MSA-500 de la société Polytec.	108
5.12	Espace de travail mesuré par le MEMS Analyzer.	109
5.13	Capteur de force positionné en face de l'organe terminal du microrobot.	111
5.14	DiMiBot connecté à l'intérieur d'un MEB.	112
5.15	Déplacement d'une microbille de 150 μm de diamètre.	113
6.1	Trajectoires complexes effectuées par un manipulateur VGT possédant 10 modules (30 actionneurs binaires)[62].	117
6.2	Schéma cinématique de la structure robotique.	118
6.3	Exemple de trajectoire au sein de l'espace de travail d'un DiMiBot à 8 modules, générant 256 positions atteignables.	119
6.4	Graphe d'un DiMiBot symétrique possédant 4 modules bistables.	121
6.5	Application de l'algorithme de Dijkstra dans un espace de travail de 1024 points dans des situations sans obstacle et avec plusieurs obstacles.	126
6.6	Graphe hyper-cubique d'un DiMiBot à 2 modules.	129
6.7	Graphe hyper-cubique d'un DiMiBot à 4 modules.	130
6.8	Comparaison des différents algorithmes de planification de trajectoire.	132
6.9	Différentes étapes de micro-assemblage de micro-objets par planification de trajectoire avec obstacles virtuels.	134
7.1	Visualisation CAO de deux exemples de microrobots numériques tridimensionnels.	140
A.1	Élément Ansys PLANE2.	150
A.2	Détail du maillage de différents éléments de la structure flexible.	150
B.1	Masque A : connexions électriques.	153

B.2	Masque B : gravure des parties mobiles.	154
B.3	Masque C : libération des microrobots.	154
B.4	Détail des trois masques sur une zone regroupant un module ainsi que la poutre horizontale et la poutre verticale qui y sont connectées.	155
C.1	Résultats fournis par le MEMS Analyser.	160
C.2	Résultats fournis par le MEMS Analyser.	161
C.3	Résultats du MEMS Analyser lors de la mesure de l'espace de travail complet atteignable.	161

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des différents actionneurs binaires développés à l'échelle micrométrique.	52
4.1	Distribution des forces (mN) sur les différents modules bistables, dans le cas de microrobots possédants des nombres différents de modules bistables.	86
4.2	Dimensions choisies pour le microrobot à fabriquer.	94
5.1	Déplacement généré par chaque module.	108
5.2	Déplacement généré par chaque module et sa répercussion sur le déplacement de l'organe terminal.	110
5.3	Synthèse des caractéristiques techniques du DiMiBot.	112
6.1	Matrice d'adjacence pondérée d'un DiMiBot symétrique à 4 modules.	122
6.2	Comparaison des temps de calcul nécessaires aux calculs de planification de trajectoire avec différents algorithmes.	132
A.1	Erreur maximale mesurée entre la position de l'organe terminal calculée par le modèle géométrique direct et celle simulée par éléments finis, pour différents éléments de maillage.	151
A.2	Fréquence des quatre premiers modes de vibration de la structure robotique obtenus par simulation avec différents éléments de maillage.	151

Liste des Algorithmes

1	Algorithme de Dijkstra(n_0, n_{but})	124
2	Algorithme de suppression des arêtes non triviales en présence d'obstacles.	125
3	Algorithme A* (n_0, n_{but})	128

Introduction

Le terme *micro* est aujourd’hui omniprésent : il fait référence aux objets de taille micrométrique, c'est à dire compris entre 1 µm et 1 mm. Cette gamme de dimension est très vaste et comprend certains objets invisibles à l’œil nu (sous les 50 µm). Les microsystèmes — couramment appelés MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems* ou microsystème électromécaniques) — font désormais partie intégrante de notre quotidien. Ils sont, en effet, utilisés au sein d’objets tels que les véhicules, les téléphones portables, etc. Ils ont conquis un grand nombre de marchés et représentent aujourd’hui la clé de voûte des nouvelles technologies. Le marché des MEMS représentait 8 milliards de dollars en 2012, et poursuit sa croissance grâce à sa forte contribution au sein du domaine de la communication sans fil¹.

Jusqu’à présent, ces microsystèmes alliaient uniquement des éléments mécaniques et électroniques, et pouvaient être fabriqués de manière monolithique sur un seul et même substrat (souvent en silicium). Cependant, de nouveaux microsystèmes font aujourd’hui leur apparition, faisant appel à de nouveaux éléments et matériaux afin de réaliser des fonctions de plus en plus complexes. On parle par exemple des MOEMS intégrant des éléments optiques. Des microsystèmes intégrant des éléments microfluidiques voient également le jour. Afin de répondre à ce besoin croissant de miniaturisation, de nouveaux outils capables de manipuler ces éléments de très petite taille avec la précision et la délicatesse qu’ils requièrent sont nécessaires.

Le rôle essentiel de la microrobotique est de s’immerger dans le micromonde (monde des micro-objets) afin de pouvoir effectuer les tâches de micromanipulation et de micro-assemblage requises par ces nouveaux microsystèmes. De nombreux types de microrobots ont été développés depuis les débuts de la microrobotique, il y a une vingtaine d’années, utilisant des matériaux actifs en guise d’actionneurs et capables de générer des déplacements de très grande résolution, jusqu’au nanomètre.

Le département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) de l’institut FEMTO-ST concentre, depuis de nombreuses années, un grand nombre de ses recherches sur la conception de systèmes robotisés adaptés à la micromanipulation et au micro-

1. Source : iSuppli MEMS Market Tracker 2012.

assemblage. Ceux-ci permettent de réaliser de façon automatisée et semi-automatisée les tâches d'assemblage de micro-objets, tels que les composants de montres mécaniques, qui sont aujourd'hui encore réalisées de manière manuelle, et nécessitent un savoir-faire d'exception. Dans ce domaine, une start-up "Percipio Robotics"[3] a émergé du département de recherche.

Ce travail de thèse s'intègre aux recherches effectuées dans ce département en proposant une nouvelle voie pour la conception des microrobots de micromanipulation. Les microrobots habituellement développés reposent sur un actionnement fondé sur l'utilisation de matériaux actifs. Ceux-ci nécessitent la mise en place de lois de commande adaptées, permettant de prendre en compte les fortes non-linéarités de ces actionneurs. Ces lois de commande complexes sont fortement consommatrices en ressources (énergie, temps de calcul, ...) et nécessitent l'utilisation de nombreux capteurs onéreux et encombrants à l'échelle micrométrique. Les microrobots actuellement commercialisés font par ailleurs usage de structures robotiques inspirées des robots traditionnels, nécessitant une phase d'assemblage fastidieuse, et intégrant des articulations non adaptées aux tâches de micropositionnement précises à cause de la présence de jeu mécanique.

Notre contribution consiste à proposer une alternative mécanique à l'utilisation de ces lois de commandes complexes. Elle fait suite à des travaux introduisant le concept de microrobot numérique et ayant conduit à la conception d'un module bistable, alliant stabilité, robustesse et commande binaire. Nous présentons une architecture robotique originale intégrant ces modules bistables et permettant de générer un déplacement précis de son organe terminal sans utilisation de capteur, ni de loi de commande complexe. L'architecture parallèle symétrique assure la génération d'un espace de travail carré équi-réparti pouvant atteindre des résolutions sub-micrométriques. La structure flexible entièrement monolithique (incluant les modules bistables) est caractérisée par de bonnes performances de stabilité, de précision et de robustesse de positionnement et cela, avec une commande en boucle ouverte. La modélisation de ce microrobot permet d'en effectuer une commande aisée, nécessitant très peu de ressource de calcul, et une consommation énergétique relativement faible grâce à l'utilisation de structures mécaniquement bistables. Ce microrobot possède de nombreux avantages pour l'application de tâches de micromanipulation. Sa faible consommation énergétique et sa commande "binaire", nécessitant très peu de calculs, permet d'utiliser une instrumentation simple. Sa faible épaisseur, associée à sa commande en boucle ouverte, permet son utilisation en milieu confiné aujourd'hui inaccessible aux autres microrobots.

Ce mémoire se compose de six chapitres. Dans le premier, nous présentons le domaine de la microrobotique, et nous énumérons les différents types de microrobots existants ainsi que leur utilisation présente et à venir. Une attention toute particulière est attribuée au domaine de la robotique de micromanipulation.

Le CHAPITRE 2 concerne la description d'une catégorie particulière de robot, les robots numériques. C'est à partir de ce paradigme de robotique particulier qu'est née l'idée du microrobot numérique appliquée aux tâches de micromanipulation précises sans capteur.

Nous présentons dans le CHAPITRE 3 la conception du microrobot numérique, qui représente le cœur de la contribution de ce travail de thèse. La cinématique d'une architecture originale intégrant plusieurs actionneurs binaires est détaillée dans ce chapitre, ainsi que les modélisations géométriques directe et inverse de ce microrobot.

Le CHAPITRE 4 s'intéresse au dimensionnement du microrobot numérique. Nous détaillons les caractéristiques attendues d'un tel microrobot en termes de force générée, de résolution, d'espace atteignable, etc. Nous simulons le comportement de cette architecture robotique par une analyse en éléments finis afin de trouver un dimensionnement optimal des différents éléments du microrobot, en cohérence avec les performances attendues.

Le CHAPITRE 5 présente la fabrication du premier prototype de microrobot numérique réalisé par des procédés de microfabrication en salle blanche. La caractérisation expérimentale de ce microrobot est ensuite effectuée et comparée aux résultats théoriques escomptés. Des première applications de ce microrobot pour effectuer des tâches de micromanipulation sont ensuite effectuée.

Le CHAPITRE 6 propose finalement une première approche de la planification de trajectoire pour un tel microrobot discret. Différents algorithmes d'optimisation combinatoire sont testés et comparés. Une nouvelle représentation graphique est élaborée et optimisée pour ce microrobot numérique.

Enfin, nous concluons et proposons quelques perspectives à cette première conception d'un microrobot numérique.

Chapitre 1

La robotique dans / pour le micromonde

La microrobotique est un domaine jeune dont les débuts remontent à une vingtaine d'années, mais qui avance à grand pas. Évoluant dans le micromonde, ces robots d'un nouveau genre font apparaître des difficultés jusqu'alors inconnues, nécessitant de repenser les bases de la robotique.

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Microrobots mobiles	6
1.2.1	Actionnement robotique	7
1.2.2	Robots autonomes	9
1.2.3	Robots non liés	13
1.2.4	Convoyeurs	15
1.2.5	Utilisation	16
1.3	Microrobotique de manipulation	17
1.3.1	Préhenseurs	18
1.3.2	Micropositionneurs	18
1.3.3	Application envisagée d'un microrobot de micropositionnement	23
1.4	Objectif de cette thèse	24
1.5	Conclusion	25

1.1 Introduction

La microrobotique est un domaine encore méconnu du grand public, pour qui elle reste liée à la science fiction. Elle est souvent représentée par des dizaines de robots de très petite taille, ressemblant parfois à des insectes mécaniques, travaillent en coopération pour effectuer des tâches particulières (dans le domaine biomédical, pour des tâches d'exploration, de réparation mécanique, ...). La vision des chercheurs en microrobotique n'est cependant pas si éloignée de cette image. Takeda montre en effet dans [93] le

potentiel de ces microrobots pour différents types d'applications, dont l'objectif est de nous simplifier la vie au quotidien. La très petite taille de ces *micromachines* (comme aiment les japonais à appeler les microsystèmes et microrobots) est une caractéristique importante, qui leur permet dans certains cas de se déplacer dans des environnements inaccessibles à l'homme, ou dans d'autres cas d'exécuter leurs tâches sans perturber les hommes et animaux environnants. Pour Takeda, la majorité de ces microrobots serait utilisée pour des tâches d'observation. Ils pourraient s'introduire dans des endroits inaccessibles à d'autres systèmes (canalisations, ...) afin de détecter d'éventuels défauts au sein d'infrastructures ou d'équipements. Des robots pouvant réparer certains de ces défauts s'avèreraient également d'une grande utilité (par exemple au sein de réacteurs d'avion). Des microrobots ainsi insérés au sein de structures mécaniques lors de leur construction permettraient la réalisation d'une nouvelle génération de systèmes auto-réparants. D'autres types d'applications envisageant le largage à grande échelle d'une grande quantité de microrobots volants dans l'atmosphère permettraient la détection de pollutions dans l'air ou bien l'observation des fluctuations météorologiques. Des micro-robots de type biomédicaux pourraient quant à eux être fixés sur des animaux de ferme afin d'effectuer une surveillance continue de leurs conditions de santé.

Ces exemples de microrobots ne sont à l'heure actuelle qu'une vue de l'esprit, mais pourraient bientôt voir le jour. Les microrobots actuels ne sont en effet pas encore capables d'effectuer des tâches aussi complexes, mais les domaines auxquels ils sont attachés sont cependant déjà très vastes.

Définition

Une définition de la microrobotique peut être trouvée dans [85].
D'une manière générale, un microrobot est un robot qui effectue ses tâches dans le micromonde. Ainsi un microrobot peut :

- manipuler des micro-objets (robot *pour* le micromonde), dans ce cas il possède des outils adaptés à ce type de tâches qui permettent de générer des déplacements de très petite amplitude ;
- être lui-même de taille micrométrique afin de se déplacer dans des environnement confinés (robot *dans* le micromonde).

Les microrobots déjà existants peuvent être classés suivant un critère principal qui concerne leur mobilité. Nous distinguons alors les microrobots mobiles des microrobots fixes.

1.2 Microrobots mobiles

Les premières tentatives de miniaturisation robotique avaient pour objectif la création de micro-organismes artificiels ayant un grand champs d'action. Ceci ouvrit la voie des microrobots mobiles, capables de se mouvoir sur de grande distances dans l'objectif

d'effectuer une tâche principale (manipulation, observation, ...) à l'aide d'un outil dédié. Plusieurs aspects sont à prendre en compte lors de la conception des microrobots mobiles. Mis à part l'outil qu'il transporte (associé à la tâche qui lui a été assignnée), il doit nécessairement inclure d'autres éléments technologiques comprenant entre autre un module de locomotion, un module d'énergie intégré et un module de communication. Ces différents aspects ont fait l'objet de recherches [6], mais un de ces éléments est tout particulièrement étudié par les chercheurs. Nous ne nous intéresserons ici qu'à cette partie essentiellement mécanique d'un microrobot liée à sa locomotion. Cette partie nécessite des actionneurs dédiés ayant pour objectif de déplacer le microrobot suivant un ou plusieurs degrés de liberté.

1.2.1 Actionnement robotique

L'actionnement représente le cœur d'un robot. Il assure la transformation d'une source d'énergie (souvent électrique) en énergie mécanique, permettant le mouvement des parties mobiles du robot.

La microrobotique nécessite l'utilisation d'actionneurs capables de générer des déplacements de petite amplitude avec de grandes dynamiques. Ces actionneurs utilisés en microrobotique font usage de matériaux dits *actifs*, qui sont des matériaux capables de se déformer sous l'effet d'une source d'énergie. Nous pouvons par exemple citer les matériaux piézoélectriques, les alliages à mémoire de forme, mais aussi des actionneurs fondés sur des principes électrostatiques ou thermiques, ...

Nous présentons ici un rapide aperçu des principes d'actionnement utilisés en microrobotique.

Actionneurs piézoélectriques

La dénomination "actionneur piézoélectrique" fait généralement référence aux actionneurs piézocéramiques qui sont des matériaux possédant une structure cristalline spécifique capables de développer une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique (effet piézoélectrique direct). Ces matériaux permettent également de développer une contrainte mécanique lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (effet piézoélectrique inverse). Le groupe de piézocéramiques le plus utilisé en microrobotique est le PZT (Plomb, Zirconium, Titanate).

La réversibilité du principe de piézoélectricité permet d'utiliser ces matériaux pour de multiples applications, à la fois en tant que capteurs (effet direct), et en tant qu'actionneurs (effet inverse). Ces actionneurs piézoélectriques permettent de générer des déplacements rapides et de faible amplitude, ce qui est très appréciables à l'échelle micrométrique.

Actionneurs électrostatiques

L'actionnement électrostatique fait référence au déplacements générés entre deux plaques planes parallèles (dans un plan XY) lorsqu'une différence de potentiel est ap-

pliquée entre elles. Une force électrostatique d'attraction suivant la direction perpendiculaire au plan (Z) est alors générée (FIGURE 1.1a), et lorsque les deux plaques sont partiellement décalées dans une direction du plan (par exemple X) une force d'alignement suivant cette direction est également générée (FIGURE 1.1b). Les actionneurs électrostatiques sont alors conçus pour exploiter l'une ou l'autre de ces forces (perpendiculaire ou latérale). Afin d'augmenter les efforts d'actionnement, les actionneurs électrostatiques utilisent généralement un grand nombre de ces éléments (couple de plan de potentiel différent) en parallèle conduisant à des peignes interdigités¹. Ce principe est également réversible, et trouve donc de nombreuses applications en tant que capteur et en tant qu'actionneur à l'échelle du micromonde.

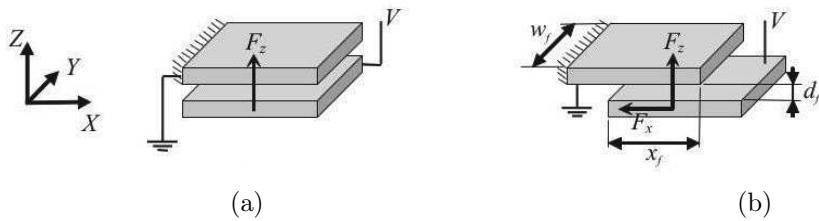


FIGURE 1.1 – Différentes utilisations du principe électrostatique.

Actionneurs en alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des alliages qui ont mémorisé la forme dans laquelle ils ont été forgés. Ils ont la capacité de retourner à cette forme mémorisée lorsqu'ils sont soumis à une source de chaleur. En pratique cela est souvent réalisé en faisant parcourir un courant dans un fil d'AMF qui chauffe de par sa résistance électrique.

Actionneurs thermiques

De nombreux autres types d'actionneurs sont également très répandus à l'échelle micrométrique, parmi lesquels les actionneurs thermiques occupent une grande place. Ils utilisent la dilatation thermique des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une source de chaleur pour générer un mouvement mécanique. Ceci peut être réalisé avec un grand nombre de matériaux qui présentent des coefficients de dilatation thermique plus ou moins avantageux pour ce type d'application.

Tous ces actionneurs sont fortement utilisés à l'échelle micrométrique grâce à leur capacité à générer des déplacements de résolution submicrométrique sans frottement. Le comportement de tels actionneurs est cependant parfois difficile à appréhender à cause des nombreuses non linéarités des principes physiques utilisés.

1. Dénommés *comb-drive* dans la littérature anglaise.

1.2.2 Robots autonomes

Robots à roues

Les premières tentatives de miniaturisation robotique étant inspirées des robots traditionnels, elles se sont focalisées sur une approche de robots mobiles à roues. Le plus représentatif de ces minirobots à roues est probablement le robot Alice développé à l'EPFL² [13] (FIGURE 1.2). La version 99 de ce robot occupe un espace de $21 \times 21 \times 21 \text{ mm}^3$, consommant 10 mW ($\sim 10 \text{ h}$ d'autonomie). Il possède des capteurs de proximité et peut communiquer par moyens infra-rouge et radio. Ce type de minirobot est souvent utilisé dans le domaine de la recherche sur la coopération robotique, permettant d'élaborer des techniques de planification de tâches adéquates à un groupe de robots travaillant en coopération. Comme par exemple joindre leurs forces pour déplacer ensemble un objet vers une cible (FIGURE 1.2).

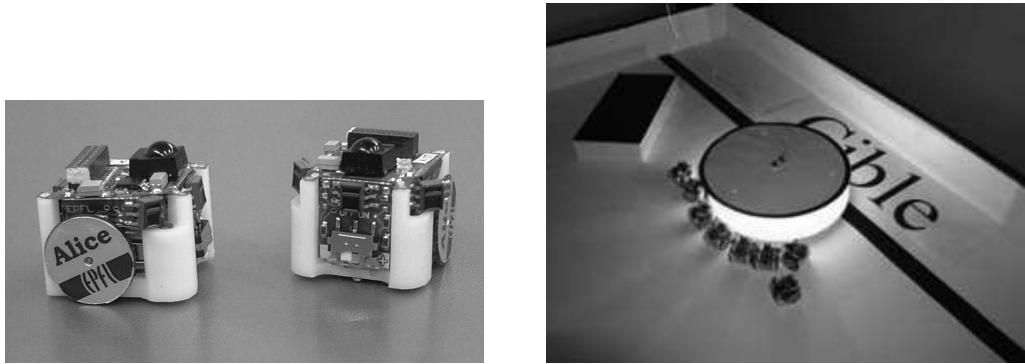


FIGURE 1.2 – Minirobots à roues Alice [13] travaillant en coopération pour pousser un objet vers une cible [4].

Cette miniaturisation robotique a favorisé le développement de micromoteurs rotatifs adaptés au micromonde. Les moteurs électromagnétiques présentant des rendements très faibles à ces échelle, de nouvelles approches sont employées. Des micromoteurs ultrasynchrones ont vu le jour ([75, 23, 52]) utilisant souvent un actionnement de type piézoélectrique.

La constante miniaturisation robotique s'est cependant détourné de ces micromoteurs, pour leur préférer l'utilisation d'autres moyens de locomotion.

Robots sans glissement

De nombreux procédés de locomotion sont développés pour les microrobots. Les principes de locomotion les plus utilisés sont souvent inspirés du domaine biologique et plus particulièrement des insectes. Ils s'inspirent des insectes marcheurs, rampants, ..., utilisant des pattes plutôt que des roues. Les déplacements générés sont souvent discrets, de

2. École Polytechnique Fédérale de Lausanne

type pas à pas, avec des dynamiques et des amplitudes plus ou moins grandes en fonction du principe de fonctionnement et du type d'actionneur utilisé.

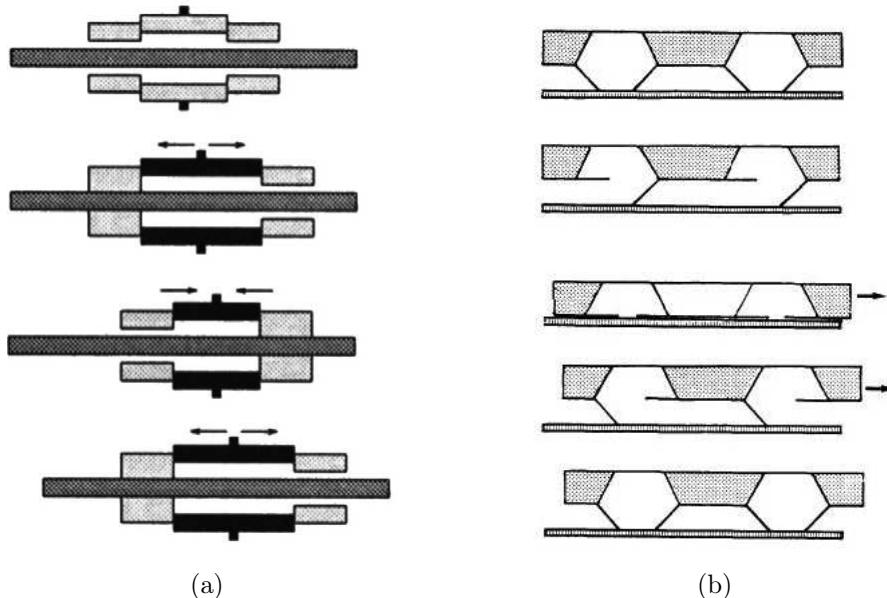


FIGURE 1.3 – Détail d'un cycle de fonctionnement des robots de type inchworm (a) et marcheur (b).

Un principe de locomotion assez intuitif (car également utilisé à l'échelle macrométrique) regroupe les robots marcheurs qui utilisent l'adhérence des pattes sur la surface en contact pour générer le déplacement du microrobot. Un autre principe utilise également l'adhérence pour créer des robots de type inchworm, très utilisés pour la locomotion en milieux confinés de forme cylindrique. Ces deux principes de locomotion génèrent un mouvement linéaire discret de type pas à pas. Les différentes étapes de ces deux principes de locomotions sont détaillés dans la FIGURE 1.3. Ils assurent leur déplacement en générant des différences d'efforts sur la surface de contact, utilisant le poids du robot dans le cas des robots marcheurs, mais nécessitant des actionneurs dédiés pour les robots de type inchworm. Ces deux principes de locomotion possèdent 4 étapes dans chaque cycle (FIGURE 1.3) permettant le déplacement du robot d'un pas.

Les robots de types marcheurs ne nécessitent que deux entrées de consigne, chacune permettant d'actionner un groupe de plusieurs pattes simultanément. Leur utilisation est dédiée à des déplacements sur des surfaces planes. Ce principe de locomotion est utilisé dans plusieurs microrobots, dont un grand nombre utilise des actionneurs thermiques [37, 56, 10, 17]. Six actionneurs piézoélectriques sont utilisés par Simu *et al.* [90] dans le cas d'un robot pouvant utiliser différents principes de déplacement, dont la marche, le stick-slip, Un principe similaire fut également utilisé par Bexell *et al.* pour créer un micromoteur rotatif [7]. Ruffieux utilise quant à lui des actionneurs piézoélectriques pour réaliser ce genre de déplacement [86]. Un autre type de robot marcheur directement

inspiré des insectes utilise des actionneurs surprenants pour une utilisation dans le micromonde, il s'agit d'actionneurs pneumatiques pour la conception d'un robot criquet [9]. Ce type de robot envisage des applications de reconnaissance, où ce type d'actionneurs lui permettraient de marcher mais également d'effectuer des bonds.

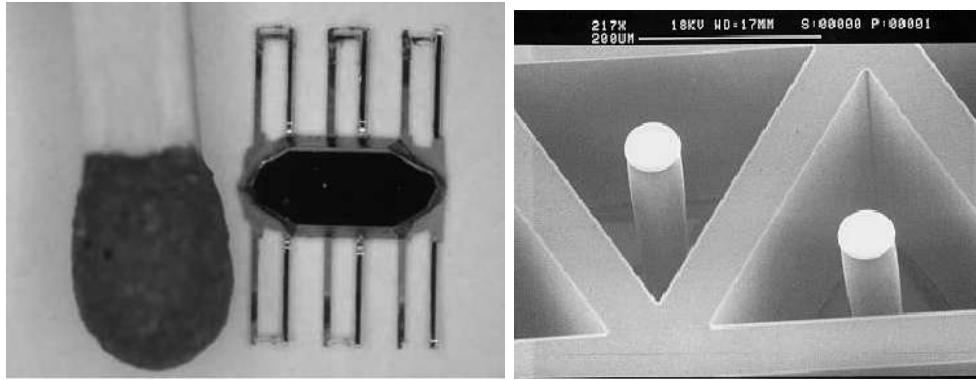
Dans le cas de robots de type inchworm (FIGURE 1.3), la différence de force de contact est générée par des actionneurs dédiés permettant de fixer temporairement un élément du robot à une partie du milieu dans lequel il doit se déplacer. Pour se déplacer les robots de type inchworm nécessitent trois entrées de consigne, afin de commander les trois actionneurs. Les deux actionneurs permettant la fixation sont généralement placés aux deux extrémités du microrobot, se fixant à la paroi l'un après l'autre. Un troisième actionneur est alors utilisé pour allonger le corps du microrobot lorsque l'actionneur de queue est fixé, et pour le rétrécir lorsque l'actionneur de tête est fixé. Les microrobots de type inchworm présentent de bonnes performances pour le déplacement en environnement confiné de forme cylindrique (tuyaux, intestins, ...). Ceci conduit à la génération d'un déplacement suivant une seule direction à la manière d'une chenille (d'où la nomination anglaise de ce type de robot). Les robots de type inchworm déjà réalisés dans le micromonde utilisent majoritairement des actionneurs de type électrostatiques [55, 27, 41] et sont microfabriqués dans une structure monolithique.

Les principes de locomotion de marche et de type inchworm sont des principes particuliers fondés sur l'adhérence des pattes du robot sur la surface en contact. Mais de nombreux autres principes de locomotion sont utilisés dans le micromonde qui eux sont essentiellement basés sur le contrôle du glissement d'une patte sur la surface en contact.

Contrôle du glissement

Certains de ces robots utilisent la vibration des pattes pour générer un déplacement. Les microrobots présentés par Edqvist *et al.* [40] possèdent trois pattes utilisées dans leur mode propre de vibration (FIGURE 1.6a). L'angle que fait la patte en vibration avec la surface sur laquelle le robot est posé permet de déplacer le robot à chaque impact de la patte. Ainsi, l'actionnement des pattes avant permet de générer un déplacement vers l'avant et la patte arrière génère un déplacement arrière, tandis que l'actionnement d'une seule patte avant permet d'effectuer des rotations.

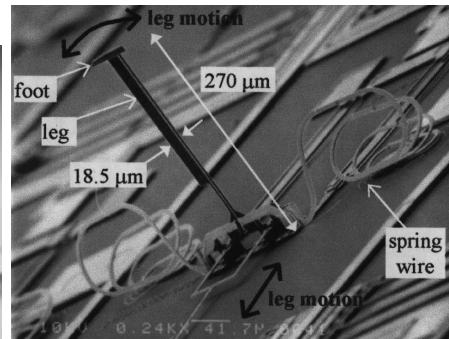
Le déplacement de microrobot par contrôle du glissement est très répandu et fait intervenir différents principes. L'un des plus connu est le déplacement par stick-slip, qui est un principe d'actionnement inertiel fortement utilisé à l'échelle micrométrique pour générer des déplacements de microrobots. Il s'agit d'un actionnement asymétrique temporel. Un actionnement lent des pattes permet de générer un déplacement du robot, tandis qu'un actionnement rapide de ces mêmes pattes provoque leur glissement sur la surface. Il est utilisé dans différents types de microsystèmes robotiques. Le déplacement de deux doigts de pince est par exemple réalisé par ce principe dans [84], permettant une translation et une rotation des doigts pour des tâches de micromanipulation. Le MINIMAN [88, 42] est l'un des microrobots les plus complets qui utilise des actionneurs piézoélectriques avec le principe d'actionnement stick-slip. Ils sont à la fois utilisés pour générer le déplacement du robot, et pour orienter l'organe terminal de ce robot, constitué



(a) utilisant des bilames thermique [10]. (b) pattes actionnées piézoélectrique-ment [86].



(c) à actionnement thermique [36].



(d) patte actionnée thermiquement [56].

FIGURE 1.4 – Exemples de microrobots marcheurs.

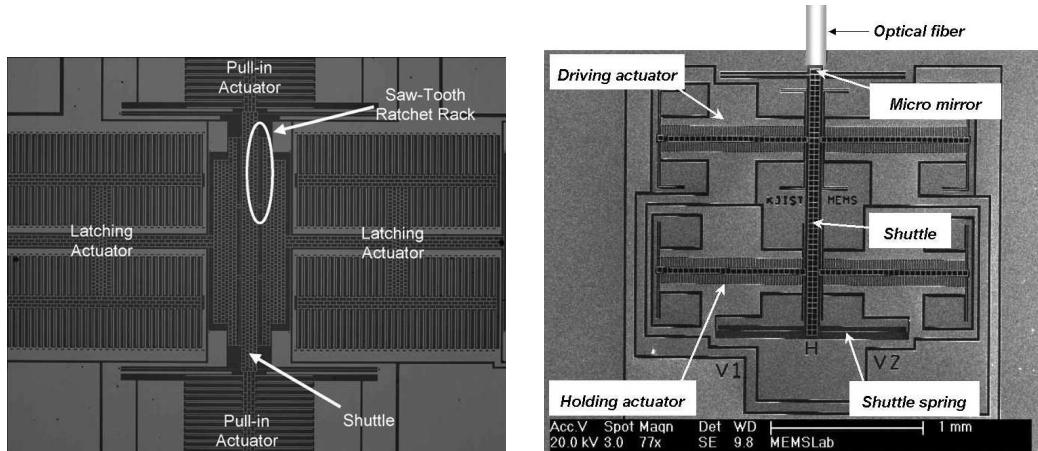


FIGURE 1.5 – Exemples de microrobots de type inchworm, microfabriqués de manière monolithique.

d'une tige fixée sur une boule (FIGURE 1.6b). Cette boule peut être orientée grâce à trois actionneurs piézoélectriques utilisant également le principe stick-slip.

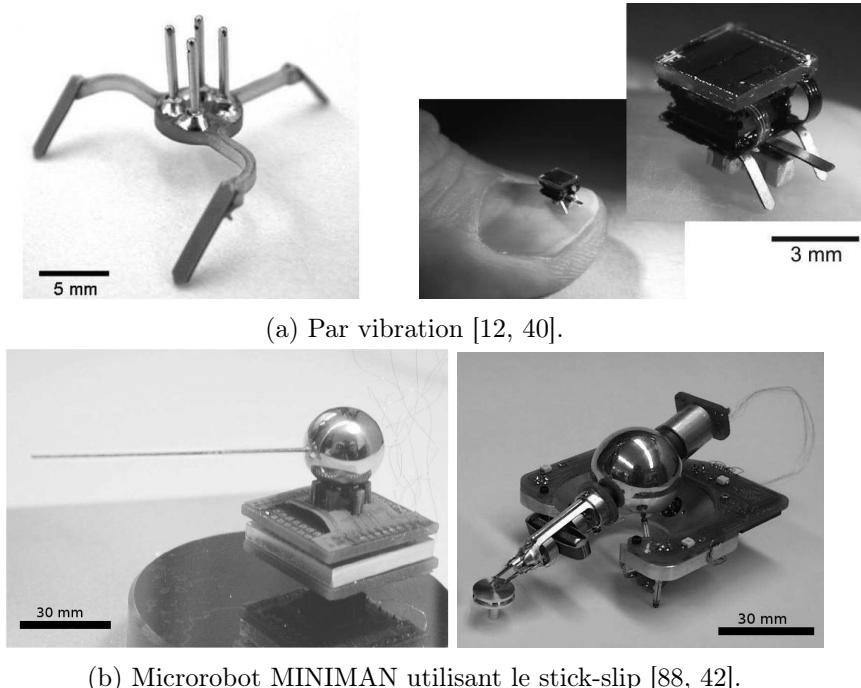


FIGURE 1.6 – Contrôle du glissement par vibration et par stick-slip.

1.2.3 Robots non liés

Un grand nombre des microrobots de très petite taille (taille globale de quelques centaines de micromètres) développés à l'heure actuelle sont des microrobots dits non liés³. Ces microrobots n'embarquent aucun module de fonctionnement supplémentaire, autre que celui générant la locomotion du microrobot.

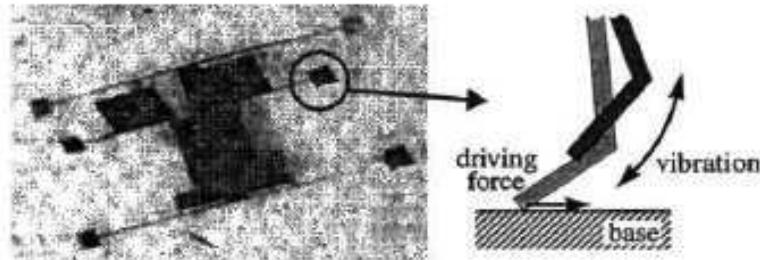
La plupart de ces microrobots utilisent un substrat spécifiques (ou plutôt une enceinte spécifique) pour se déplacer. La commande et l'actionnement de ces microrobots se fait par l'intermédiaire de ce substrat, ils ne nécessitent donc pas d'embarquer des éléments tels que des modules d'énergie ou des module de communication. Ces types de microrobots n'intègrent pas d'organe terminal dédié à la micromanipulation, et sont souvent utilisés pour pousser les micro-objets dans la configuration désirée.

Celui qui est considéré comme le premier microrobot fonctionnel, développé par Yasuda *et al.* en 1994 [102], est un robot non lié (FIGURE 1.7a). Ne nécessitant aucune connectique, ce microrobot n'est utilisable que sur un substrat spécifique, une plaque vibrante qui permet de mettre en résonance l'une des deux pattes active du microrobot

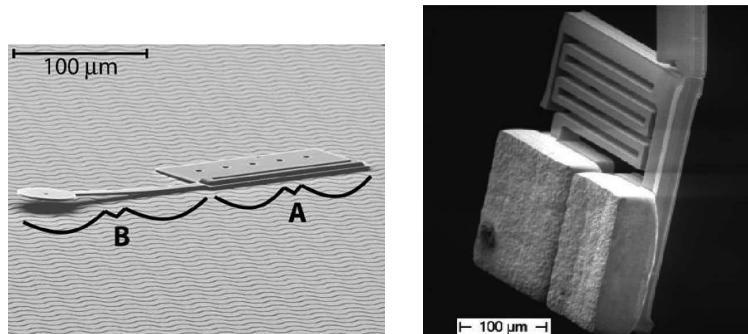
3. *Untethered* en anglais.

(les 4 autres pattes étant passives). Lorsqu'elle est mise en résonance, la patte du microrobot vient frapper la surface du substrat, ce qui permet de générer un déplacement du robot. Chacune de ces deux pattes ayant une fréquence de résonance différente, le contrôle de la vibration de la plaque permet au microrobot d'effectuer des déplacements en ligne droite (en actionnant les 2 pattes simultanément) ainsi que des virages (1 seule patte actionnée).

D'autres types d'actionnement sont directement liés au glissement des pattes qui sont constamment en contact avec le substrat. Le microrobot développé par Donald *et al.* [33] (FIGURE 1.7b) utilise également l'angle que forment les pattes avec le substrat pour permettre le déplacement dans une seule direction. Il s'agit d'un microrobot de très petite dimension ($250 \times 60 \times 10 \mu\text{m}$) qui se déplace en rampant sur une surface grâce à un actionnement électrostatique de type scratch drive. Il possède par ailleurs un bras (partie B du robot) pouvant s'accrocher à la surface afin de créer un point d'encrage fixe permettant de générer un mouvement de rotation du robot. Des tensions différentes permettent d'agir séparément sur l'actionneur de déplacement et sur le bras assurant la rotation.



(a) Sur plaque vibrante [102].



(b) Actionnement de type scratch-drive [33].

(c) Magnétique à impact [44].

FIGURE 1.7 – Microrobots non liés.

Ces microrobots non liés utilisent divers principes de locomotion associés à différents types d'actionneurs. Nombreux sont les microrobots utilisant un type d'actionnement magnétique, permettant un contrôle relativement aisé à distance. Le MagMites [44] est un microrobot à impact utilisant la résonance magnétique (FIGURE 1.7c). Une masse

fixée à un ressort est mise en vibration et vient frapper une autre masse solidaire du robot qui le fait avancer. Le MagPieR [51] est un microrobot qui associe au champ magnétique (permettant de déplacer le robot) un actionnement électrostatique utilisé pour faire vibrer le robot sur la surface en contact, assurant alors une libération du robot face aux forces de friction. Pawashe *et al.* [78] présentent un microrobot magnétique utilisant le principe de déplacement stick-slip. Ce microrobot est constitué d'un bloc solide qui peut se lever sur la surface lorsqu'il est soumis au champ magnétique (qui crée un couple de torsion) permettant alors de réduire la force de friction.

Une des grandes difficultés dans l'utilisation de microrobots non liés concerne le contrôle simultané de plusieurs microrobots à travers le même substrat. Étant dépendant des mêmes types d'actionnement, deux microrobots soumis au même champ de commande (électrostatique, magnétique, ...) générera les mêmes déplacements. Deux types de solutions peuvent être proposées : ajouter un principe de commande supplémentaire ou créer des robots différents réagissant chacun de manière différente aux consignes de commande.

Pawashe *et al.* [79] utilisent la première solution en créant un ancrage électrostatique des microrobots que l'on ne souhaite pas bouger lors de l'actionnement magnétiques des autres robots. Dans le cas des microrobots à actionnement de type scratch drive de Donald *et al.* [34], plusieurs robots sont fabriqués avec des propriétés géométriques différentes de la partie bras d'ancrage. Il est alors possible de contrôler le bras de chaque robot indépendamment. La consigne de l'actionneur scratch drive étant cependant le même pour tous les robots, il est nécessaire de trouver des trajectoires appropriées pour chaque robot afin d'atteindre la position finale en même temps.

Un dernier principe de microrobotique très original est développé par Hu *et al.* [50]. Le microrobot en question est en réalité une bulle d'air dans un liquide dont la position est contrôlée par un faisceau lumineux. Ce faisceau lumineux crée des lignes de convection dans le liquide qui permettent de déplacer le robot.

1.2.4 Convoyeurs

D'autres types de robots non mobiles utilisent des principes de fonctionnement similaires à certains robots mobiles autonomes, il s'agit des robots de type convoyeurs (FIGURE 1.8). Ils sont souvent utilisés comme des micromoteurs linéaires, permettant de déplacer une partie mobile en ligne droite. Un convoyeur peut en effet devenir un robot mobile simplement en le retournant, c'est alors lui qui se déplace sur une surface fixe.

Ils utilisent également des principes de déplacement particulier. Nous pouvons par exemple présenter le convoyeur à impacts développé par Daneman *et al.* (FIGURE 1.8a) [25] qui utilise quatre résonateurs électrostatique permettant de faire vibrer des bras d'impact par paire. Chaque paire de bras permet de déplacer le convoyeur dans un sens. Il a une résolution de déplacement de $0,3 \mu\text{m}$, et une vitesse de déplacement pouvant atteindre $1000 \mu\text{m s}^{-1}$. Un autre convoyeur utilise trois actionneurs thermiques [89] pour déplacer une partie mobile (posée sur ces actionneurs FIGURE 1.8b). L'actionnement se fait de manière asymétrique. Les trois actionneurs sont sollicités simultanément pour

déplacer la partie mobile, et chaque actionneur revient séparément à sa position initiale. La friction des deux actionneurs immobiles étant supérieure à la friction de l'actionneur en mouvement, cette action ne déplace pas la partie mobile. Une résolution de $0,7 \mu\text{m}$ et une vitesse de déplacement de $250 \mu\text{m s}^{-1}$ peuvent être atteintes.

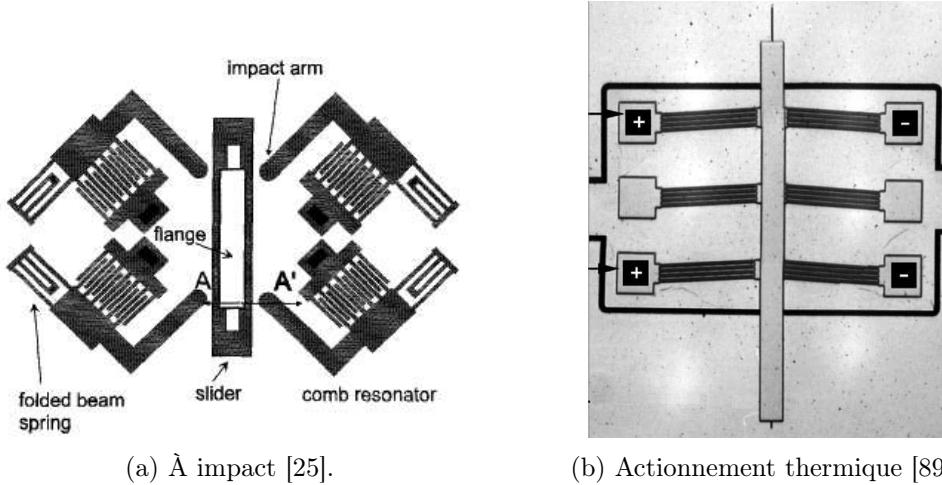


FIGURE 1.8 – Convoyeurs micrométriques.

1.2.5 Utilisation

La majorité des microrobots existants permettent de générer des déplacements planaires. Ils sont essentiellement utilisés pour des applications de micropositionnement de composants (souvent en les poussant). Des applications futures de ces microrobots concernent le domaine biomédical. Ces robots nécessitent parfois de pouvoir se mouvoir en trois dimensions. C'est par exemple le cas du microrobot magnétique développé par Yesin *et al.* [104], conçu pour des applications de microchirurgie intraoculaire, assurant un positionnement précis en trois dimensions.

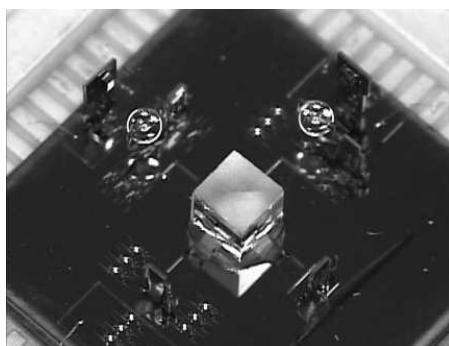
Les microrobots tridimensionnels sont encore, à l'heure actuelle, très faiblement représentés. Mais certaines techniques permettent de développer des robots miniatures inspirés des insectes ailés [99]. Ce type de microrobot peut être utilisé pour des applications de surveillance ou d'observation.

D'autres types de microrobots ont par la suite vu le jour dans le but de répondre à une application particulière. Il s'agit des microrobots manipulateur permettant d'effectuer des tâches de micromanipulation dans le but d'assembler des microsystèmes complexes. Bien que quelques microrobots mobiles soient également destinés à ce type de tâche, la majorité des microrobots manipulateurs sont fixes.

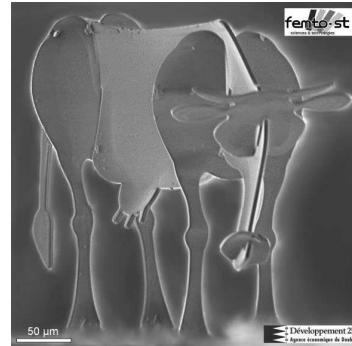
1.3 Microrobotique de manipulation

D'autres types de microrobots, essentiellement dédiés à des tâches de manipulation de micro-objets, sont réalisés avec pour objectif l'assemblage de microsystèmes complexes. À l'image des robots fixes utilisés dans l'industrie qui sont utilisés pour positionner un outil (préhenseur, poste de soudure, pistolet de peinture, découpeur plasma, ...) dans le but de fabriquer et assembler un certain produit, les microrobots de manipulation sont utilisés pour la fabrication et l'assemblage des microsystèmes. Ces micromanipulateurs doivent alors s'adapter aux micro-objets dont la taille peut varier entre 1 µm et 1 mm.

Avec l'évolution de ces microsystèmes, les micro-composants possèdent des formes et des propriétés physiques diverses, rendant difficile l'utilisation d'un unique type de préhenseur pour leur manipulation. Les microsystèmes sont, en effet, à l'heure actuelle constitués à la fois d'éléments électroniques et mécaniques, mais également optiques, acoustique et parfois même fluidiques. La FIGURE 1.9a présente un exemple de microspectromètre (microsystème optique) nécessitant des phases d'assemblages précis de ses différents éléments optiques (microlentille, micromiroirs, et cube beam-splitter), ainsi qu'une microvache assemblée démontrant les possibilités actuelles en matière de micro-assemblage.



(a) Microspectromètre assemblé [26].



(b) Microvache assemblée.

FIGURE 1.9 – Exemples de microsystèmes assemblés.

Deux éléments principaux sont à réaliser dans la conception des micromanipulateurs :

- un outil (souvent un préhenseur permettant d'attraper les micro-objets et de les déposer) ;
- un système de micropositionnement permettant de positionner l'outil au sein de la scène de micromanipulation.

Chacun de ces éléments possède des caractéristiques et contraintes propres, nécessitant une étude particulière.

1.3.1 Préhenseurs

À ces échelles, de nouvelles difficultés propres au micromonde apparaissent rendant difficile la manipulation précise des micro-objets. L'influence de l'environnement devient un facteur important des conditions de micromanipulation, et les effets d'échelle perturbent le comportement des micro-objets. Une des tâches les plus difficiles à réaliser à l'échelle du micromonde concerne la prise et la dépose des micro-objets. Ce type de tâche est rendu difficile par la prédominance à l'échelle micrométrique de certaines forces négligeables en manipulation traditionnelle. Ces difficultés sont généralement associées au terme "effet d'échelle" qui représente la prédominance des forces surfaciques (forces d'adhésion, ...) sur les forces volumiques (gravité, ...) pour les objets de petite taille. Ce phénomène se traduit souvent par des micro-objets qui collent aux outils de préhensions et qui sont difficiles à relâcher en raison de leur très faible poids. La conception des préhenseurs nécessite donc de prendre en compte ces perturbations et de tenter de réduire leurs effets. Différentes perspectives sont utilisées pour réaliser cela.

Les premières études reposent sur le choix de la forme du préhenseur. Étant souvent constitué d'une pince à deux doigts (utilisant souvent des actionneurs piézoélectriques, électrostatiques ou thermique [22, 48]), la forme de la surface des doigts en contact avec les micro-objets est optimisée. En réduisant la surface de contact entre le préhenseur et l'objet, les forces d'adhésion sont également réduites.

D'autres études consistent à changer les propriétés de l'environnement dans lequel se déroulent les tâches de micromanipulation, il est par exemple fréquent d'effectuer ce type de tâches en milieu liquide, éliminant l'effet de capillarité. Des études menées sur le traitement de surface des doigts de pince permettent une approche différente en tirant profit des forces d'adhésion. Un changement des propriétés du pH du liquide utilisé permettent alors de contrôler l'attraction et la répulsion entre le préhenseur et le micro-objet [30], facilitant les tâches de manipulation.

L'utilisation en milieu liquide fait également apparaître de nouveaux moyens de préhension. Un préhenseur à glace [70] utilisant un module Peltier permet par exemple d'emprisonner le micro-objet dans une bulle de glace pendant son déplacement entre deux positions. Un manipulateur à diélectrophorèse a également été développé pour manipuler des objets sans contact en milieu liquide [53].

De nombreuses recherches ont été menées dans le domaine de la micromanipulation afin de permettre une meilleure interaction entre les préhenseurs et les micro-objets. De nouveaux préhenseurs intègrent par ailleurs des capteurs de position et de force [54, 8] afin de faciliter ces tâches de manipulation. Cependant la conception de microrobots dédiés au positionnement de ces préhenseurs a suscité une attention moindre.

1.3.2 Micropositionneurs

Jusqu'à maintenant les tâches de manipulation des micro-objets étaient souvent réalisées dans des stations de micromanipulation. Elles consistent souvent en un assemblage de plusieurs actionneurs linéaires ou rotatifs commerciaux (capables de générer des dé-

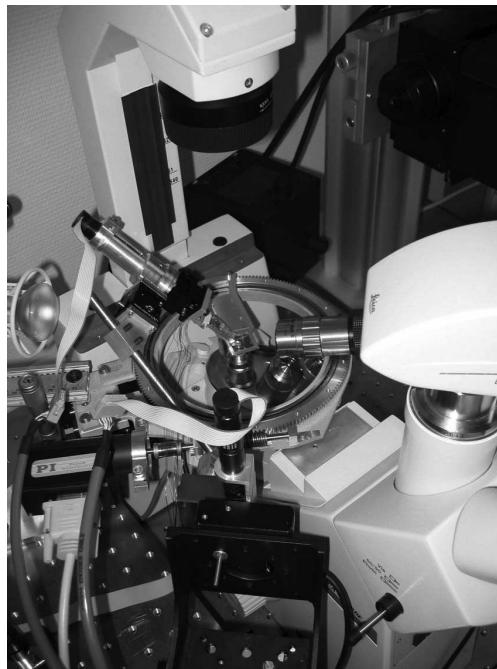
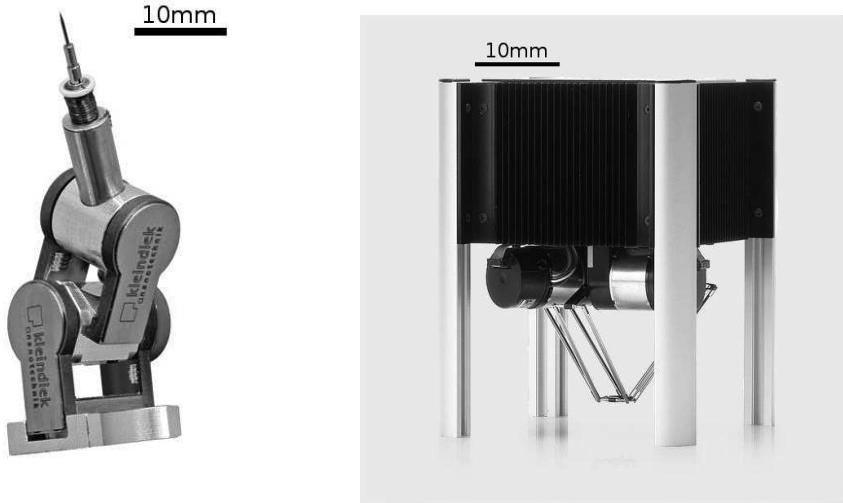


FIGURE 1.10 – Station de micromanipulation PRONOMIA.

placements micrométriques) assurant le positionnement précis de préhenseurs dédiés aux tâches de micromanipulation. La plateforme sur laquelle sont placés les micro-objets est parfois également motorisée. De multiples capteurs sont par ailleurs intégrés dans cette station, souvent des caméras possédant des objectifs à fort grossissement et permettant un retour optique sous plusieurs angles. Le tout étant intégré dans un espace d'environ 1 m³ est contrôlé par ordinateur. Ces stations sont souvent utilisées pour la manipulation de micro-objets de manière téléopérée, et parfois de manière automatique. Un exemple de station de micromanipulation est présenté sur la FIGURE 1.10, il s'agit de la station pronomia du département AS2M de l'institut Femto-st qui a servi à l'assemblage de la microvache de la FIGURE 1.9b.

Afin de répondre à ce besoin de micropositionnement, des robots complets permettant d'effectuer le positionnement d'un organe terminal avec de grandes précisions à l'échelle micrométrique ont été développés. La plupart des microrobots de positionnement commercialisés à l'heure actuelle sont inspirés de la miniaturisation des robots traditionnels. La société Kleindiek Nanotechnik a, par exemple, commercialisé le robot MM3A FIGURE 1.11a, inspiré des bras robotiques traditionnels. Ce microrobot possède trois degrés de liberté (deux axes de rotation et un axe de translation) utilisant le principe d'actionnement stick-slip des actionneurs piézoélectriques pour générer des déplacements à l'échelle micrométrique. Chacune des rotations a une course de 240° et la translation a une course de 12 mm. Il permet d'atteindre des résolutions nanométriques (0,5 nm pour la translations). Et peut supporter une force de 1 N. La société Asyri a, quant à elle,

commercialisé le pocket-delta FIGURE 1.11b, inspiré des robots delta du macromonde. Il s'agit d'un microrobot 3 ddl (3 translations) permettant de supporter des charges de 2,5 N et générant un espace de travail cylindrique de diamètre 100 mm pour une hauteur de 30 mm avec une répétabilité de $\pm 2,5 \mu\text{m}$.



(a) MM3A de ©Kleindiek Nano-technik [2].

(b) pocket-delta de ©Asyri [1].

FIGURE 1.11 – Microrobots commercialisés inspirés de la miniaturisation des robots traditionnels.

L'utilisation de matériaux actifs permet à ces robots de générer des déplacements à l'échelle micrométrique. L'utilisation de ce type de robots présente certains avantages puisqu'ils sont étudiés depuis longtemps. Leur contrôle, utilisation, performances et contraintes sont donc bien connus. Ils présentent cependant quelques inconvénients pour une utilisation à l'échelle micrométrique. Leur principal défaut étant l'utilisation d'articulations traditionnelles dans l'architecture robotique. Les liaisons pivot et glissières utilisées présentent en effet certains défauts bien connus. Le jeu mécanique, la friction et le besoin de lubrification sont des contraintes qui peuvent être négligées en robotique traditionnelle, mais deviennent sources de gros défauts de positionnement à l'échelle micrométrique où de grandes performances de précision de positionnement sont nécessaires.

Pour cette raison, les recherches menées sur les positionneurs dédiés au micropositionnement font intervenir de nouveaux types d'architectures. Ces architectures préfèrent l'utilisation de structures flexibles à l'utilisation d'articulations traditionnelles. L'utilisation de ces structures flexibles permettent d'éviter les problèmes de jeu mécanique et assurent alors des grandes précisions de positionnement de l'organe terminal du robot.

La majorité de ces manipulateurs sont à l'heure actuelle des plateformes de micro-positionnement souvent planaires. Elles permettent de générer un déplacement en 2 ddl

(deux translations). Deux types d'actionneurs sont essentiellement utilisés pour ce type d'application, les actionneurs piézoélectriques et les actionneurs électrostatiques de type comb-drive. Les micropositionneurs utilisant des actionneurs piézoélectriques présentent souvent une architecture flexible usinée de manière traditionnelle [65, 66, 94, 106]. Ils sont donc souvent de grande taille (quelques dizaines de centimètres) en comparaisons des déplacements qu'elles permettent de générer (FIGURE 1.12).

Les actionneurs électrostatiques de type comb-drive étant microfabriqués par des techniques de microfabrication en salle blanche, la structure complète du micropositionneur est fabriquée en même temps dans une structure monolithique ce qui permet d'éliminer la phase d'assemblage [35]. Ce type de micropositionneur est alors de petite taille (quelques millimètres), possédant certains composants invisibles à l'œil nu.

Les courses atteignables par ces micropositionneurs sont de quelques dizaines de micromètres (15 à 25 μm pour [35, 106], et 120 à 180 μm pour [65, 66, 94]).

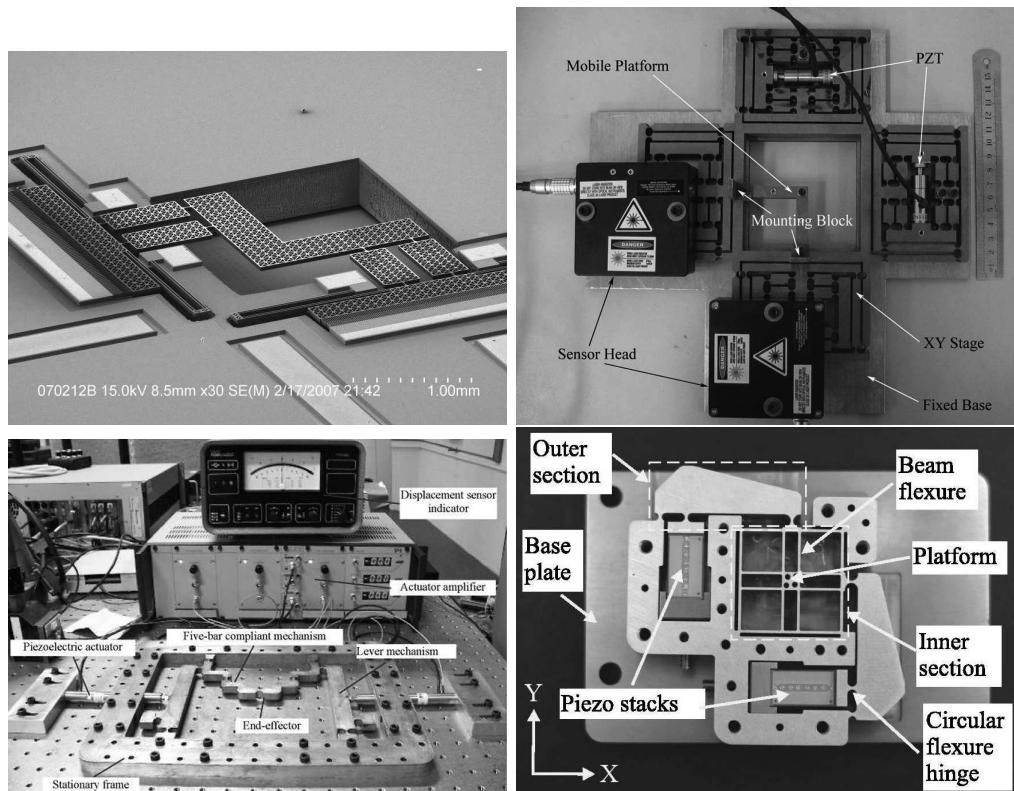


FIGURE 1.12 – Plateforme de micropositionnement 2 ddl.

D'autres types de plateformes également planaires permettent de générer des déplacements en 3 ddl (deux translations et une rotation). Elles sont inspirées de certains robots parallèles planaires à l'échelle macroscopique. On les retrouve sous de nombreuses formes telles que les 3-PRR [76, 28], 3-RPR [29], 3-RRR [105, 110, 107]. Ce sont des structures constituées d'une plateforme mobile en liaisons avec trois éléments d'actionnement similaires. Les lettres caractérisant le type de structure définissent les liaisons

présentes dans les éléments d'actionnement, R pour une liaison de révolution et P pour une liaison prismatique. Une seule de ces liaisons est active dans cet élément d'actionnement. On retrouve également les deux mêmes types d'actionneurs pour ces structures (électrostatiques et piézoélectrique). Les actionneurs électrostatiques sont utilisés pour les robots utilisant une liaison prismatique, tandis que les actionneurs piézoélectriques sont utilisés pour les robots de type 3-RRR. Les déplacements générés par ces micropositionneurs atteignent généralement une vingtaine de micromètres (avec une résolution nanométrique), et permettent de générer des rotations pouvant atteindre 2° d'amplitude. Nous pouvons faire les mêmes remarques que pour les positionneurs 2 ddl concernant la taille du positionneur en fonction du type d'actionnement utilisé.

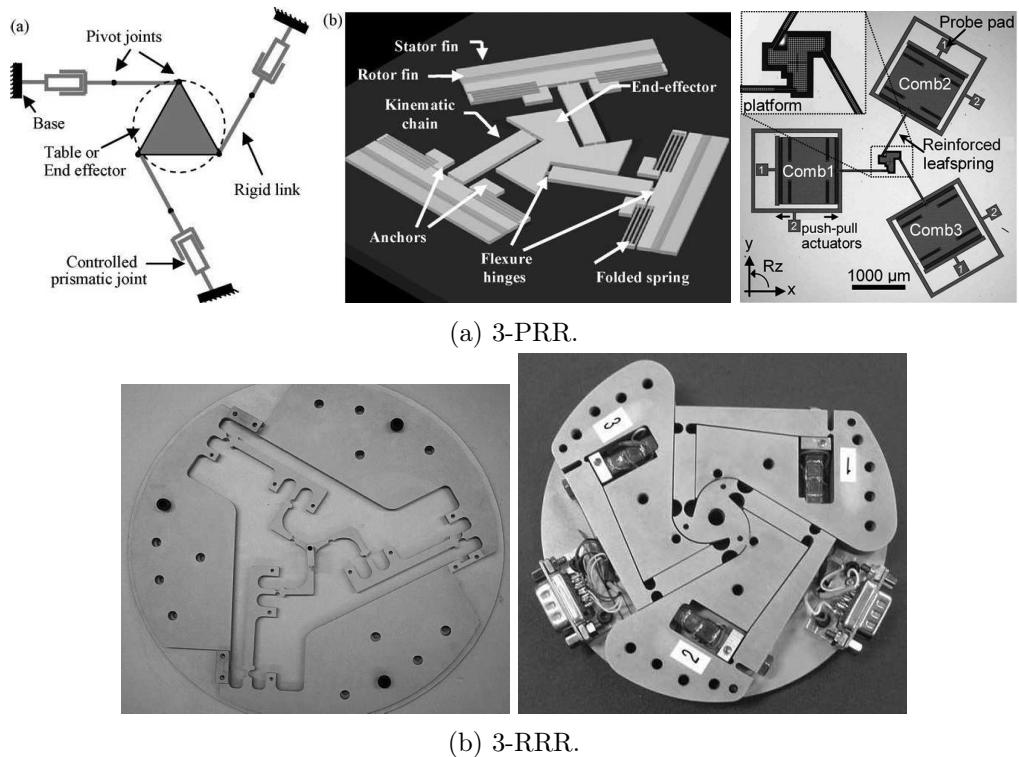


FIGURE 1.13 – Plateformes 3 ddl.

D'autres positionneurs sont également développés pour générer des déplacements tridimensionnels [57, 109]. Ces robots utilisent des actionneurs piézoélectriques et sont fabriqués de manière traditionnelle. Le cube de micropositionnement développé par Yue *et al.* [109] permet d'atteindre un espace de travail de $15 \times 15 \times 15 \mu\text{m}^3$.

Des manipulateurs sont également directement intégrés aux MEMS lors de leur fabrication. Dans le cas de Lee *et al.* [61], la plateforme de micropositionnement (positionnées à l'aide d'actionneurs thermiques) possède un masque de gravure, le déplacement du masque grâce à ce système lors du processus de gravure permet d'obtenir des profils de

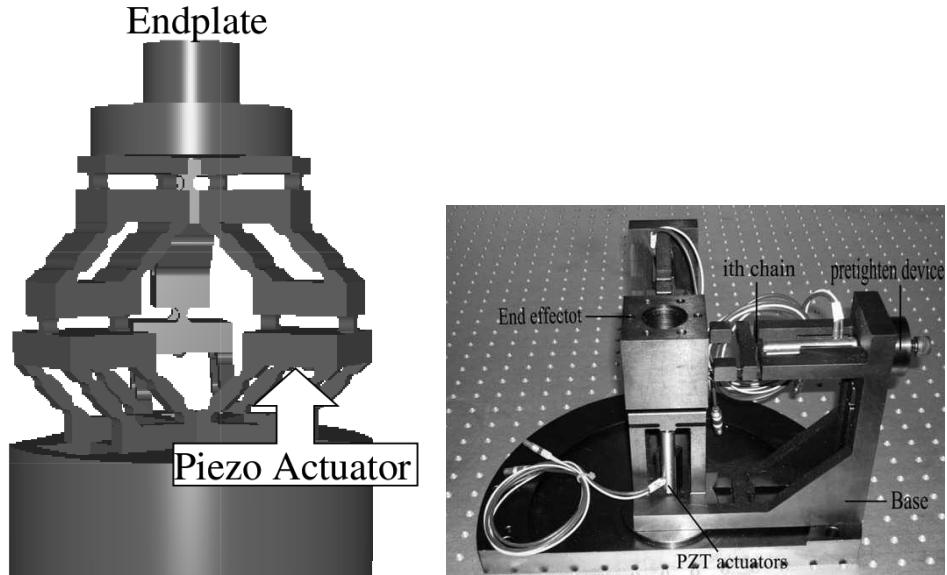


FIGURE 1.14 – Positionneurs tridimensionnels.

gravure intéressants. Il permet de générer des amplitudes de déplacements de $20 \times 20 \mu\text{m}^2$.

Des plateformes de micropositionnement particulières sont également imaginées. Dans le domaine de micromanipulation en milieu liquide, une plateforme de micropositionnement à bulles a été développé par Lenders *et al.* [64]. Une plateforme est positionnée sur 3 bulles d'air. Le volume de ces 3 bulles est contrôlé afin de permettre un positionnement en 3 ddl de la plateforme.

Un autre type de positionneur à bulle [59] utilise un contrôle magnétique. Un micro-robot immergé peut être contrôlé magnétiquement suivant les trois dimensions à l'aide de trois paires d'electroaimants. Une bulle attachée à ce microrobot joue le rôle de préhenseur permettant d'attraper et de relâcher des micro-objets. Cette tâche est réalisée de manière acoustique à l'aide d'un actionneur piézoélectrique placé au fond de l'enceinte contenant le liquide. Cet actionneur permet de faire osciller la bulle à sa fréquence de résonance, permettant d'emprisonner le micro-objet.

1.3.3 Application envisagée d'un microrobot de micropositionnement

L'une des applications futures des microrobots est la micromanipulation d'objets de plus en plus petit. Dans cet objectif, il est nécessaire d'avoir les moyens d'observation nécessaires. Pour cela la manipulation au sein de microscopes électroniques devient un sujet de plus en plus étudié. De nombreuses recherches ont déjà été faites dans ce domaine en intégrant des robots micromanipulateurs au sein de microscopes électroniques

à balayage (MEB⁴). C'est par exemple le cas du robot MM3A de la société Kleindiek Nanotechnik [2].

Des applications futures envisagent également l'utilisation de micromanipulateurs au sein de microscopes électroniques en transmission (TEM⁵). Ce type d'intégration est d'autant plus difficile que l'espace permettant de placer les échantillons au sein de tels microscopes est très fin (épaisseur de taille centimétrique). Certaines études ont cependant commencé à imaginer ce type d'intégration.

Brouwer *et al.* envisagent la fabrication d'un microrobot de grande précision pour une utilisation dans un TEM [11], faisant usage d'actionneurs électrostatiques de type comb-drive, permettant de générer une course suivant les trois dimensions de $20 \times 20 \times 20 \mu\text{m}^3$ avec une répétabilité de 10 nm. Cependant, seul un premier prototype à grande échelle ($540 \times 540 \times 58 \text{ mm}^3$) FIGURE 1.15 n'a été réalisé pour le moment (FIGURE 1.15).

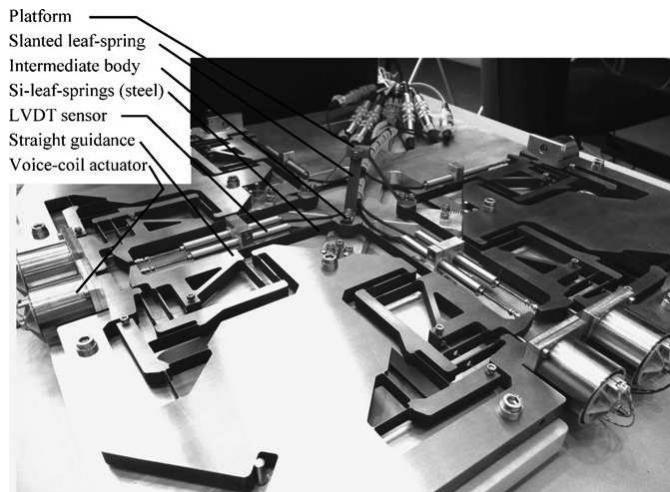


FIGURE 1.15 – Version grande échelle d'un microrobot adapté à une utilisation en TEM.

1.4 Objectif de cette thèse

L'encombrement de la scène de micromanipulation est une problématique récurrente à l'échelle du micromonde qui s'ajoute à la difficulté de générer des déplacements précis au niveau micrométrique et sub-micrométrique. Les micromanipulateurs nécessitent de nombreux capteurs, souvent encombrants et onéreux, afin d'effectuer de manière précise le positionnement et l'orientation des micro-objets. La plupart de ces capteurs ne fournissent par ailleurs qu'une information réduite (les interféromètres ne fournissent par exemple qu'une information de déplacement suivant une seule direction), obligeant à en utiliser un grand nombre. Il est souvent difficile d'intégrer tous ces capteurs autour de

4. Scanning Electron Microscope (SEM) en anglais.

5. D'après l'appellation anglaise *Transmission Electron Microscope*.

la scène de micromanipulation, particulièrement lorsqu'il est nécessaire de travailler en milieux confinés, comme par exemple au sein de microscopes électroniques.

Afin de réduire ce problème, il est souvent souhaitable de concevoir des microrobots de positionnement possédant de très bonnes performances de résolution et de répétabilité en utilisant une commande en boucle ouverte, permettant alors de se passer des nombreux capteurs généralement nécessaires. Certaines études sont menées à l'échelle du micromonde pour assurer un contrôle précis des actionneurs en boucle ouverte, dans le but de limiter ce nombre de capteurs nécessaire. Rakotondrabe *et al.* tentent dans [83] de contrôler les non linéarités des actionneurs piézoélectriques (hystérésis, dérive, ...), par une modélisation précise de ces actionneurs, permettant alors de les contrôler de manière précise sans nécessiter de retour d'information.

L'objectif de cette thèse consiste à développer un nouveau type de microrobot de positionnement permettant d'atteindre de grandes résolutions et répétabilités de positionnement au niveau submicrométrique avec une commande en boucle ouverte. Pour réaliser cela, le principe utilisé consiste à proposer une alternative mécanique aux contrôleurs traditionnel. C'est à dire que la précision de positionnement sera réalisée grâce à certaines propriétés mécaniques du microrobot ainsi conçu, et ne nécessitera alors aucun contrôleur, ni aucun capteur. Ceci fait référence à un domaine particulier de la robotique, la robotique numérique, que nous présenterons au CHAPITRE 2.

1.5 Conclusion

La course à la miniaturisation a fait apparaître le besoin de manipuler de manière précise des objets de taille micrométrique. Afin de répondre à ce besoin, la recherche dans le domaine de la microrobotique a fait des avancées considérables en permettant de générer des déplacements à l'échelle submicrométrique. De nombreux microrobots ont ainsi été développés avec différents types d'objectifs, allant du micro-assemblage de microsystèmes à la réalisation d'opérations microchirurgicales à l'intérieur du corps humain. La majorité de ces microrobots sont basés sur l'utilisation de matériaux dits actifs pour permettre ce type de déplacements. Bien que permettant d'atteindre de très hautes résolutions (nanométrique), ces matériaux actifs possèdent de nombreuses non-linéarités, et sont parfois même non stationnaires (présentant un phénomène de dérive) rendant difficile leur contrôle. Pour cela les scènes de micromanipulation sont armées de nombreux capteurs permettant d'améliorer la précision de la tâche micrométrique à effectuer.

Cependant la miniaturisation des robots de micropositionnement et leur utilisation dans des milieux confinés n'est pas compatibles avec l'utilisation de nombreux capteurs. Cette thèse propose une alternative à ce problème avec le développement d'un nouveau type de microrobot permettant d'atteindre de grandes précisions et stabilité de positionnement à l'échelle submicrométrique sans utilisation de capteurs.

Chapitre 2

Le numérique en robotique

Les comportements complexes des architectures robotiques développées pour le micromonde nécessitent des lois de commande de plus en plus difficiles à implémenter. Dans ce chapitre nous introduisons un nouveau paradigme pour la conception de microrobots de positionnement. Ces microrobots numériques ouvrent une nouvelle voie dans la conception microrobotique permettant une commande simplifiée et des architectures diverses.

Sommaire

2.1	Introduction et concept	28
2.1.1	Actionnement robotique	28
2.1.2	Actionneurs binaires	28
2.1.3	Association de plusieurs actionneurs	29
2.2	Différents types d'actionnement numérique	32
2.2.1	Notion de stabilité	32
2.2.2	Maintien des actionneurs binaires	33
2.3	Robots numériques existants	35
2.3.1	VGT	35
2.3.2	BRAID	38
2.3.3	Main articulée	39
2.4	Actionneurs binaires à l'échelle micro	40
2.4.1	Différents types d'actionnement	40
2.4.2	Différents types de maintien	46
2.4.3	Microsystèmes numériques	47
2.5	Choix d'un actionneur binaire pour un microrobot numérique	50
2.6	Conclusion	50

2.1 Introduction et concept

2.1.1 Actionnement robotique

Les robots manipulateurs doivent être capables d'interagir avec des objets, c'est à dire être capable de les attraper, les transporter, les positionner, les orienter et finalement de les relâcher. Pour cela, un robot est composé de deux éléments principaux, un outils et un porteur. L'outil est l'élément qui interagit avec l'objet à manipuler, on parle généralement de préhenseur lorsqu'il est utilisé pour attraper des objets. Cet outil est fixé sur l'organe terminal du robot porteur qui le positionne et l'oriente dans un espace de travail donné.

Afin de positionner et d'orienter l'organe terminal, un robot porteur est composé d'actionneurs organisés dans une architecture particulière. Les actionneurs sont les éléments actifs du robot, qui permettent de générer le déplacement. La structure robotique, quant à elle, est souvent constituée d'éléments rigides articulés entre eux, mais peut aussi parfois être constituée d'éléments flexibles. Son rôle est de transmettre les déplacements des actionneurs jusqu'à l'organe terminal du robot. C'est cette structure robotique qui définit le type de mouvement que peut effectuer le robot et l'espace de travail atteignable par son organe terminal.

Les actionneurs sont des éléments actifs générant un mouvement mécanique par le biais d'un phénomène physique en réponse à une commande. Les actionneurs utilisés en robotique traditionnelle sont souvent des moteurs électromagnétiques générant un mouvement de rotation, mais il peut aussi s'agir de pistons générant un mouvement de translation, ou d'autres types d'actionneurs. Nous qualifierons ce type d'actionneurs continus, c'est à dire que la partie mobile de l'actionneur peut théoriquement atteindre une infinité de positions entre ses bornes. À ce type d'actionneurs continus, nous opposons les actionneurs dits discrets, dont la partie mobile ne peut atteindre qu'un nombre fini de positions (tels que les moteurs pas à pas). Bien que générant un nombre fini de positions, ces actionneurs assurent une bonne répétabilité et une bonne stabilité des positions atteintes, rendant ainsi la commande de tels actionneurs plus simple.

2.1.2 Actionneurs binaires

Le type d'actionneurs auquel nous nous intéressons est un cas particulier d'actionneurs discrets, appelés actionneurs binaires qui ne permettent d'atteindre que deux positions distinctes. Ces deux positions atteignables sont prédéfinies à la fabrication de l'actionneur, et sont généralement symbolisées par deux états notés état 0 et état 1. Ce concept est inspiré de l'électronique numérique qui assure une grande stabilité de la rétention de données. La création de bascules simples possédant les états 0 ou 1 a facilité la génération de fonctions complexes à faible coût, et a contribué aux avancées technologiques que nous connaissons aujourd'hui.

Nous envisageons l'application de ce même principe au domaine de la robotique par l'intermédiaire d'actionneurs binaires afin de pouvoir générer des déplacements stables

et répétables avec une commande simple. La fabrication des actionneurs binaires à faible coût doit être simple et rapide. En effet, comme vu au CHAPITRE 1, les actionneurs généralement utilisés pour générer des déplacements à l'échelle micrométrique (actionneurs piézoélectriques, alliages à mémoire de forme, ...) ont des comportements complexes à modéliser, étant très souvent non linéaires et parfois même non stationnaires, rendant leur utilisation difficile et nécessitant l'intégration de lois de commande complexes. L'utilisation d'actionneurs binaires permettrait alors de générer des déplacements stables et précis sans avoir besoin d'effectuer de retour sur la position atteinte, ou d'utiliser de commande complexe. Ils pourraient dans ce cas être utilisés sans capteur.

Tout comme en robotique traditionnelle, nous pouvons être amenés à utiliser des actionneurs binaires de type prismatique (générant un mouvement de translation) et des actionneurs binaires de type rotatif (générant un mouvement de rotation). Nous pouvons représenter ces deux types d'actionneurs binaires sous la forme schématique donnée sur la FIGURE 2.1.

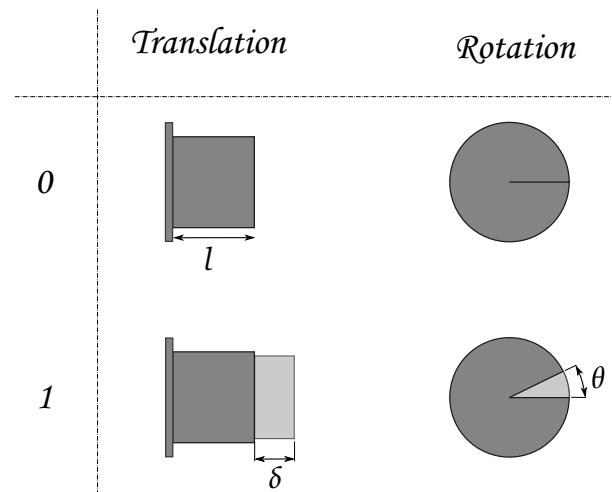


FIGURE 2.1 – Représentation schématique d'actionneurs binaires de type prismatique à gauche et rotatif à droite dans les états 0 et 1.

Un actionneur binaire prismatique peut être représenté sous la forme d'un élément de longueur l à l'état 0, pouvant s'allonger et atteindre une longueur totale $l + \delta$ à l'état 1. Ainsi, un actionneur binaire de translation génère un déplacement fixe δ entre ses deux positions atteignables. De la même manière, un actionneur binaire de rotation génère une rotation fixe θ entre ses deux états.

2.1.3 Association de plusieurs actionneurs

En générant un espace de travail atteignable ne contenant que deux positions, un actionneur binaire seul présente un intérêt limité pour des tâches de positionnement. Afin

de créer un robot de positionnement utilisable, il est nécessaire de combiner plusieurs actionneurs binaires, qui seront associés à l'aide d'une architecture robotique. Étant donné la nature binaire de ces actionneurs, le nombre d'états atteignables par un robot contenant un nombre N d'actionneurs binaires s'étend à 2^N . En robotique traditionnelle, afin de pouvoir positionner et orienter l'organe terminal dans l'espace suivant 6 degrés de liberté (ddl) (3 translations et 3 rotations), on est souvent amené à utiliser 6 actionneurs continus (rarement plus). Cependant en robotique numérique, l'utilisation de 6 actionneurs binaires produirait un espace de travail contenant $2^6 = 64$ états atteignables. Pour augmenter le nombre d'états atteignables, il faut augmenter le nombre d'actionneurs binaires. Il n'est donc pas surprenant d'imaginer des robots numériques possédant une trentaine (ou plus) d'actionneurs.

Le concept le plus simple d'association d'actionneurs binaires consiste à les positionner en cascade, c'est à dire que chaque actionneur est fixé sur la partie mobile de l'actionneur précédent. De cette manière le déplacement total de l'organe terminal correspond à la somme des déplacements générés par chacun des actionneurs binaires. La consigne de position fournie au robot se présente sous la forme d'un mot binaire, dont les N bit représentent les états (0 ou 1) de chacun des actionneurs binaires utilisés. Le mot binaire se présentant sous la forme $b_{N-1}b_{N-2} \dots b_2b_1b_0$, le déplacement D de l'organe terminal s'exprime sous la forme :

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} b_i \delta_i$$

où b_i est l'état (0 ou 1) dans lequel se trouve l'actionneur numéro i , et δ_i le déplacement entre les deux positions de cet actionneur i . Cependant si on utilise ce concept de robot numérique avec des actionneurs binaires générant tous le même déplacement entre leurs deux positions ($\delta_i = \delta, \forall i \in [0, N-1]$), nous obtiendrions un robot fortement redondant, c'est à dire que sur les 2^N consignes distinctes que l'on peut commander au robot, plusieurs d'entre elles généreront le même déplacement de l'organe terminal. Par exemple en utilisant un robot avec 4 actionneurs binaires, les consignes 1000, 0100, 0010 et 0001 généreront le déplacement de l'organe terminal vers la position $x = \delta$. Le nombre d'états atteignables étant déjà limité par la nature binaire des actionneurs utilisés, il n'est pas judicieux de diminuer encore l'espace de travail atteignable avec un robot redondant.

Une solution pour remédier à ce problème consiste à choisir de manière appropriée les déplacements générés par chacun des actionneurs binaires. La FIGURE 2.2 représente ce type de robot numérique (en cascade), pour lequel le déplacement généré par un actionneur est égal à deux fois le déplacement généré par l'actionneur précédent. Il en résulte alors un robot numérique non redondant générant un déplacement linéaire d'incrément δ . Le déplacement D de l'organe terminal, ainsi que sa course maximale C sont alors définis par les formules :

$$D = \sum_{i=0}^{N-1} b_i 2^i \delta \quad C = \sum_{i=0}^{N-1} 2^i \delta$$

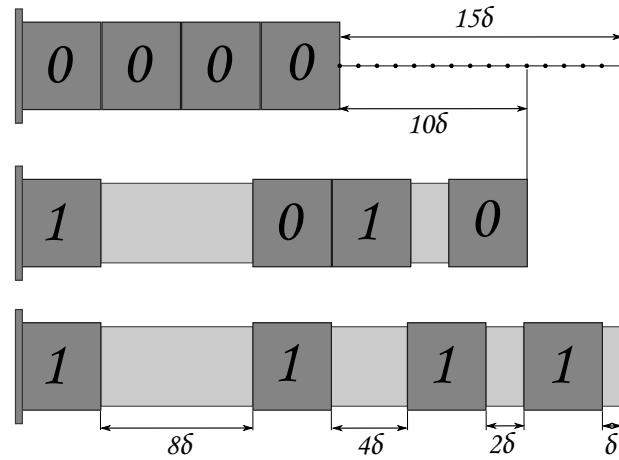


FIGURE 2.2 – Concept de robot numérique non redondant par association en cascade d'actionneurs binaires prismatiques.

Le même concept peut, bien entendu, être exploité pour des actionneurs binaires rotoïdes où on sommerait les angles et non plus les déplacements (remplaçant δ par θ). Il est par ailleurs tout à fait possible d'imaginer des robots numériques plus complexes, générant des déplacements non seulement dans une seule dimension, mais dans l'espace, et de combiner à la fois des actionneurs prismatiques et rotoïdes. Des exemples de robots numériques générant des espaces de travail tridimensionnels sont présentés sur la FIGURE 2.3.

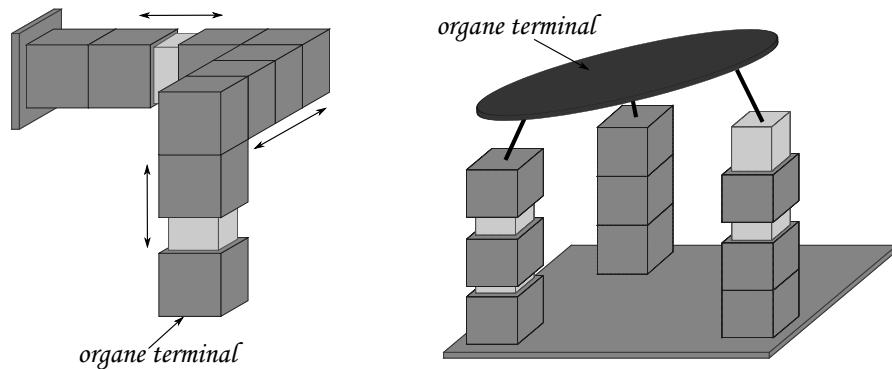


FIGURE 2.3 – Exemple de concept de robots numériques complexes travaillant dans un espace en trois dimensions (robot sériel à gauche et parallèle à droite).

2.2 Différents types d'actionnement numérique

Le concept d'actionnement numérique fait intervenir l'idée d'une commande simple basées sur des mots binaires. La commande d'entrée d'un actionneur binaire est donc représentée par un bit (soit 0, soit 1). Afin de générer un déplacement à partir de cette information binaire, différents types d'actionneurs binaires peuvent être imaginés. Nous classons ces types d'actionneurs binaires dans deux grandes catégories (voir FIGURE 2.4), les actionneurs à maintien actif et les actionneurs à maintien passif.

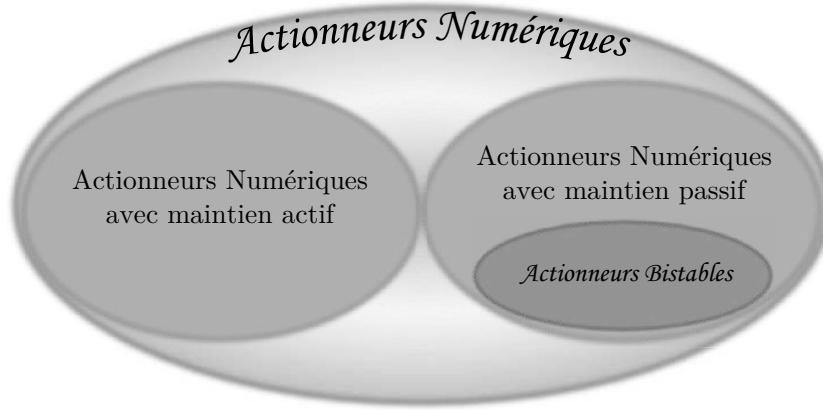


FIGURE 2.4 – Classification de différents types d'actionneurs binaires.

La grande différence entre ces deux types d'actionneurs binaires concerne l'apport énergétique nécessaire pour son actionnement. Les actionneurs à maintien passif ne nécessitent qu'un apport énergétique fini pour basculer d'un état à un autre, tandis que les actionneurs à maintien actif requièrent un flux énergétique continu pour maintenir leur position dans un état donné.

Pour identifier cette différence d'actionnement, nous allons introduire le concept de stabilité d'un système.

2.2.1 Notion de stabilité

Pour définir la notion de stabilité, imaginons un système à l'équilibre, c'est à dire qui ne change pas au cours du temps. Lorsqu'une petite perturbation est appliquée sur ce système, s'il quitte la position dans laquelle il était avant la perturbation alors cette position est dite instable. Si dans le cas contraire le système retourne de lui-même à cette position d'équilibre alors cette position est dite stable.

Ce critère de stabilité peut être représenté de manière schématique à l'aide d'un système composé d'une bille sur une surface, uniquement soumise à la gravité, tel que sur la FIGURE 2.5. Les minima locaux de l'énergie de la partie mobile représentent les points de stabilité, tandis que les maxima locaux représentent des points d'instabilité. L'énergie de la bille étant dans ce cas son énergie potentielle de pesanteur.

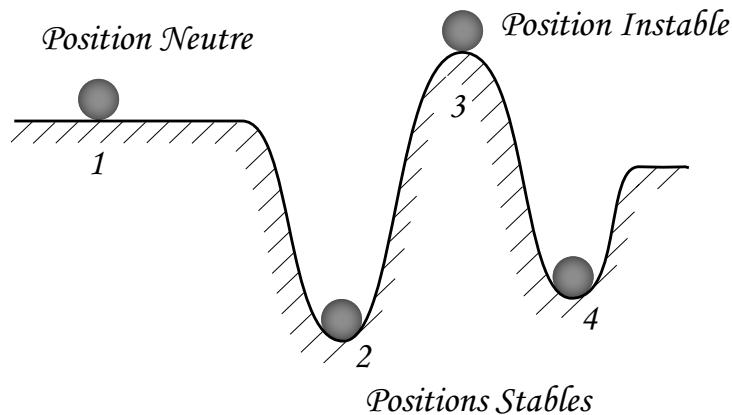


FIGURE 2.5 – Représentation schématique de la notion de stabilité d'un système.

Sur cette figure la position 3 est une position instable (maximum local d'énergie potentielle). Lors d'une petite perturbation extérieure, le système s'écartera de cette position et continuera de s'en éloigner jusqu'à ce qu'il atteigne une des deux positions stables qu'il peut joindre (position 2 ou position 4). La position 1 sera quant à elle qualifiée de position neutre. Dans ce dernier cas, lors d'une petite perturbation la bille ne retournera pas à la position initiale ni ne s'en éloignera indéfiniment, mais restera dans la nouvelle position.

2.2.2 Maintien des actionneurs binaires

Nous utilisons cette définition de stabilité pour classer les différents types d'actionneurs binaires (à maintien actif ou à maintien passif). Ainsi si l'une des deux positions discrètes de l'actionneur binaire coïncide avec un minimum énergétique local, il n'est pas nécessaire d'apporter de l'énergie à l'actionneur pour qu'il reste dans cette position, il s'agit donc d'une position à maintien passif. Dans le cas contraire, s'il est nécessaire d'apporter un flux énergétique continu à l'actionneur binaire pour qu'il reste dans la position discrète désirée, cette position sera qualifiée de position à maintien actif. Nous pouvons reprendre l'exemple de la bille pour représenter les différents types d'actionnement numérique. Dans le cas de la FIGURE 2.6, il est nécessaire d'apporter un flux énergétique continu à l'actionneur pour qu'il puisse pousser la partie mobile (ici la bille) dans la position discrète de droite, alors qu'il suffit de couper l'énergie pour que la partie mobile de l'actionneur se rende dans la position d'énergie minimale, c'est à dire la position stable de gauche (la bille tombe).

Maintien actif

Une grande partie des actionneurs utilisés de manière binaire sont des actionneurs à maintien actif. Nous pouvons par exemple citer des actionneurs du genre solénoïdes ou pistons hydrauliques qui sont des actionneurs plus souvent utilisés de manière continue,

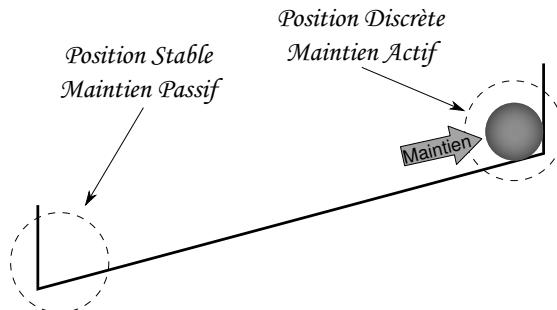


FIGURE 2.6 – Différence entre position à maintien actif et une position à maintien passif.

mais sont aussi parfois utilisés de manière numérique afin d'assurer une grande stabilité de leur position et pour générer des efforts importants. Le concept d'actionneur à maintien actif est représenté sur la FIGURE 2.7.

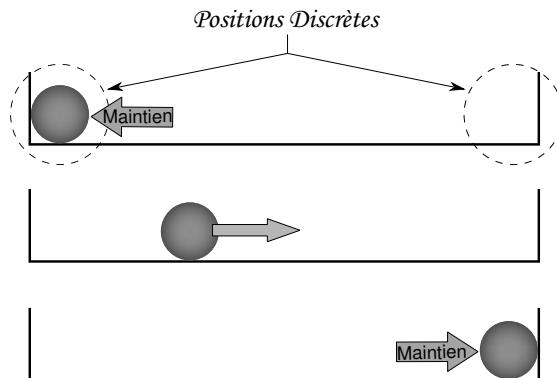


FIGURE 2.7 – Concept d'actionneur à maintien actif.

Lors du passage d'un état à l'autre, la partie mobile de cet actionneur passe par des états intermédiaires qui ne peuvent pas être conservés dans un fonctionnement numérique. Dans ce cas c'est la loi de commande qui assure la nature discrète de cet actionneur en poussant la partie mobile contre des butées mécaniques. Bien que chacune des deux positions discrètes peut être qualifiée de position neutre (voir FIGURE 2.5), il est nécessaire d'appliquer un flux énergétique continu à l'actionneur afin d'assurer la stabilité face à d'éventuelles perturbations extérieures.

Maintien passif

Dans le cas des actionneurs à maintien passif, ce n'est pas la loi de commande qui assure la stabilité de l'actionneur, mais les propriétés géométriques et mécaniques de celui-ci. Cependant, bien que la durée d'actionnement pour basculer dans une position discrète soit courte, il est nécessaire de fournir suffisamment d'énergie pour permettre à la partie mobile de se placer dans la *zone de stabilité* de la position désirée. En effet,

comme représenté sur le schéma de la FIGURE 2.8(a), si l'énergie fournie à l'actionnement est suffisamment élevée pour sortir de la zone de stabilité de gauche, mais pas suffisante pour atteindre la zone de stabilité de droite, la partie mobile de l'actionneur peut rester dans une position intermédiaire non stable (dans la *zone neutre*).

Il existe un type particulier d'actionneurs à maintien passif qui ne connaît pas ce genre de problème, il s'agit des actionneurs bistables (FIGURE 2.8(b)). Non seulement leurs deux positions sont à maintien passif, mais il leur est physiquement impossible de rester dans une position de transition (sans apport énergétique continu).

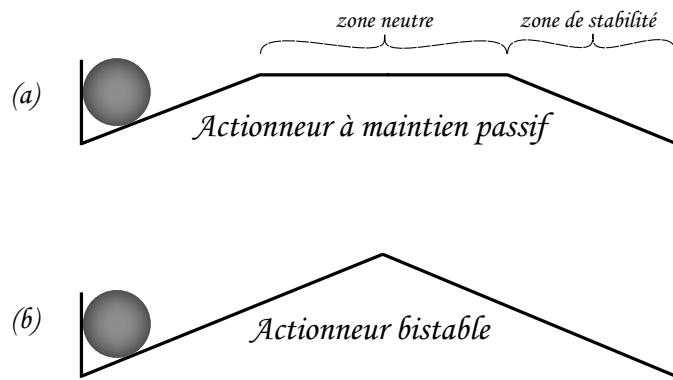


FIGURE 2.8 – Différence entre un actionneur à maintien passif général (a) et un actionneur bistable (b).

Un exemple de système bistable que nous utilisons fréquemment est l'interrupteur électrique. Il suffit de le pousser au delà de sa position instable (position d'énergie maximale) pour qu'il aille de lui-même dans la deuxième position stable.

2.3 Robots numériques existants

L'idée de concevoir des robots numériques a tout d'abord émergé avec Piepers en 1968 ([80]) qui imaginait un robot dont les articulations ne posséderaient qu'un nombre fini de configurations. L'intérêt d'utiliser un actionneur dont le nombre de positions atteignables est limité repose sur la facilité d'intégrer le processeur de commande (fournissant un signal de type numérique) au manipulateur *numérique* ainsi fabriqué.

2.3.1 VGT

Le premier véritable robot numérique utilisant des actionneurs binaires a cependant vu le jour en 1994 avec l'étude d'un nouveau paradigme pour la conception de manipulateurs articulés par Chirikjian ([19]). L'architecture utilisée pour ce type de manipulateur est inspirée des études de Miura [74] sur les treillis à géométrie variable (*Variable Geometry Trusses*, VGT). Le manipulateur de Chirikjian utilise des vérins pneumatiques, utilisés de manière numérique (avec maintien actif), pour déplacer l'organe terminal de

cette architecture. La structure robotique utilisée est qualifiée de globalement sérieelle, c'est à dire que d'un point de vue général, elle consiste en l'assemblage sériel de modules élémentaires. Chacun de ces modules est constitué de trois actionneurs binaires, et peut être considéré comme un actionneur discret pouvant générer 8 (2^3) configurations différentes. Ces 8 configurations distinctes d'un module élémentaire à 3 bit sont détaillées sur la FIGURE 2.9.

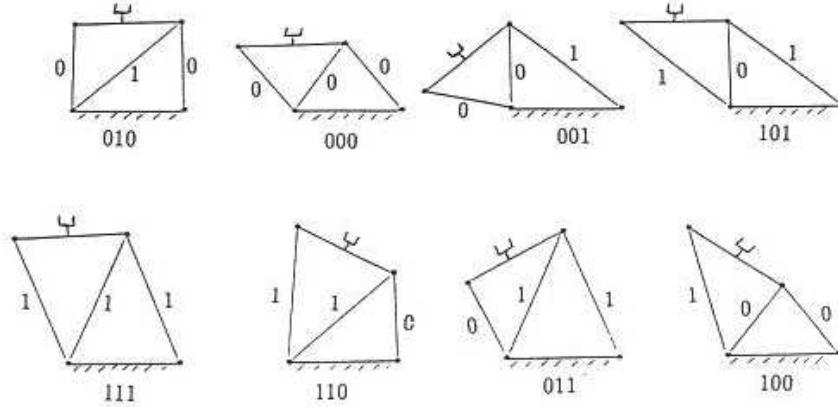


FIGURE 2.9 – Les 8 configurations possibles d'un module élémentaire constituant le VGT [19].

La mise en série de tels modules dans le plan (FIGURE 2.10) permet de concevoir un manipulateur de faible poids, mais cependant capable de supporter de lourdes charges, et cela à faible coût comparé aux manipulateurs traditionnels faisant intervenir des actionneurs continus. Ce type de manipulateur peut ainsi générer un espace de travail planaire discret hyper-redondant constitué de 2^N (N est le nombre d'actionneurs binaires utilisés) états atteignables (FIGURE 2.11). Le caractère hyper-redondant de cet espace de travail atteignable assure une certaine aisance de mouvement à ce manipulateur, et permet de faciliter la génération de trajectoires complexes nécessaires pour certaines tâches de manipulation.

De nombreuses études ont été menées depuis 1994 sur ce type de manipulateur. Étant donné la grande quantité d'états atteignables par ce manipulateur ($\sim 10^6$ pour 20 actionneurs), la modélisation du mouvement généré à l'organe terminal peut s'avérer difficile à calculer. C'est pour cela que plusieurs travaux concernant la définition de l'espace de travail atteignable ([38, 20, 60]) ainsi que les modélisations géométriques directe ([63]) et inverse ([39, 92]) de ce manipulateur ont été effectuées. Des études sur la planification de trajectoires ont également été menées [62, 18]. D'autres versions de ce type de manipulateur permettant de générer un espace de travail tridimensionnel ont également vu le jour par la suite ([92]).

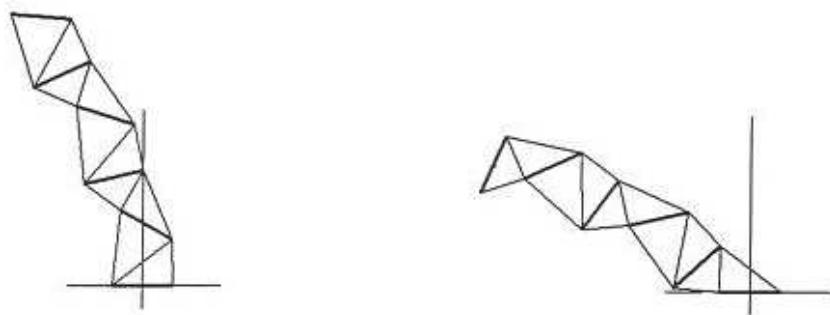


FIGURE 2.10 – Structure globalement serielle du VGT possédant 5 modules, dans deux configurations différentes.

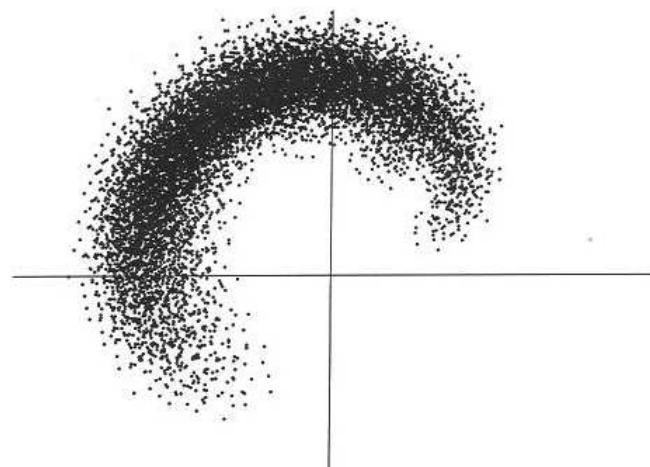


FIGURE 2.11 – Espace de travail atteignable par un manipulateur VGT possédant 5 modules (soit 15 actionneurs binaires).

2.3.2 BRAID

En 2001 Dubowsky présente une nouvelle architecture de robot numérique, proposant ainsi une application pratique des robots numériques dans le domaine de l'aérospatial. Il s'agit du BRAID (Binary Robotic Articulated Intelligent Device) [91, 67] qui est lui aussi constitué d'une architecture globalement sérielle dont les modules élémentaires possèdent 3 actionneurs binaires rotoides à maintien passif (FIGURE 2.12). Ces actionneurs binaires sont constitués d'articulations flexibles permettant d'effectuer une déformation en rotation, associés à des crans d'arrêt permettant d'assurer la stabilité des deux positions atteignables. Le déplacement d'un état à l'autre est assuré par des actionneurs en alliage à mémoire de forme. Ce manipulateur conduit à la génération d'un espace de travail tridimensionnel utilisable dans de nombreuses applications.

Plusieurs versions de ces actionneurs binaires se sont succédées dans lesquelles la principale différence concerne le type d'actionnement utilisé pour permettre le passage d'un état à un autre. Ainsi une version faisant intervenir des actionneurs électromagnétiques dans [46] permet de développer des forces élevées mais accroît considérablement la masse de chacun des modules, obligeant la conception de modules plus volumineux à la base de la structure qu'à l'extrémité du manipulateur. Une autre version avec des actionneurs en polymère diélectrique a été proposée dans [97, 98] pour éviter ce problème.

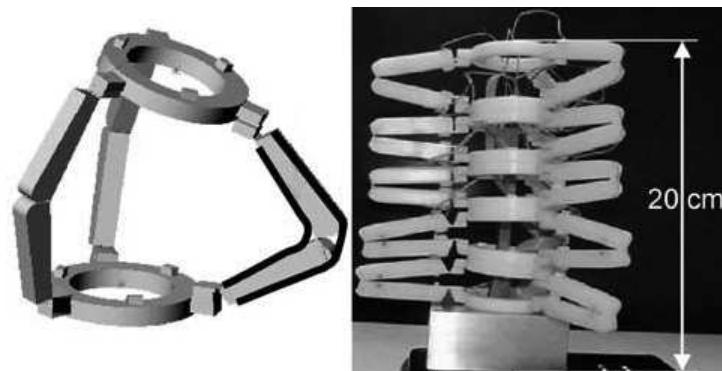


FIGURE 2.12 – Module élémentaire à 3 bit à gauche, et manipulateur BRAID constitué de 5 modules à droite.

Ces actionneurs binaires à base de polymères diélectriques ont eu diverses applications. Un autre robot original ne possédant qu'un seul actionneur binaire a également été développé pour des applications d'exploration planétaires (FIGURE 2.13). L'unique actionneur binaire permet de charger un ressort de puissance en effectuant plusieurs cycles de pompage (basculement d'un état à l'autre). En relâchant ce ressort ainsi comprimé, le robot peut effectuer des bonds de 60 cm en pesanteur terrestre. Ce type de robot pourrait être déployé en grande quantité sur une planète pour des tâches d'exploration et d'analyse du terrain.

Une autre application, dans le domaine médical, utilise ces actionneurs binaires à base de polymère diélectrique, pour effectuer le positionnement précis d'une aiguille

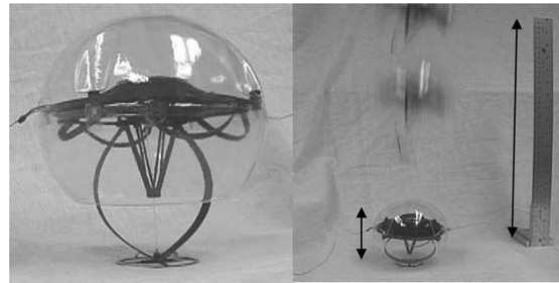


FIGURE 2.13 – Prototype de robot sauteur possédant un actionneur binaire permettant de charger un ressort de puissance pour exploration planétaire [81].

lors du traitement d'un patient en IRM. Six actionneurs binaires sont organisés dans une structure parallèle flexible (FIGURE 2.14) pour générer le déplacement précis d'une aiguille fixée entre deux trios d'actionneurs binaires. La nature des matériaux utilisés (polymère) et la possibilité d'un contrôle en boucle ouverte rend ce mécanisme très intéressant pour une application en IRM.

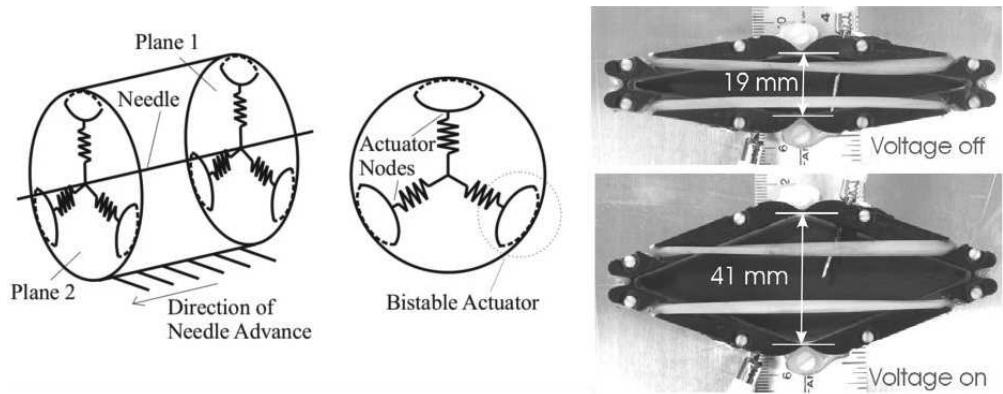


FIGURE 2.14 – Architecture robotique parallèle utilisant des actionneurs bistables pour pratiquer des biopsies et traitements de cancer en IRM [31].

2.3.3 Main articulée

Une dernière application de manipulateur numérique envisage une nouvelle approche pour la conception de muscles artificiels permettant d'articuler une main robotique [21]. Cette application utilise des actionneurs binaires à maintien à la fois actif et passif fondés sur l'utilisation d'alliages à mémoire de forme. Les utilisations traditionnelles d'alliage à mémoire de forme thermique consistent à chauffer un fil entier d'AMF à l'aide d'un courant électrique le parcourant. La valeur du courant appliquée génère une transformation de phase partielle du fil en austénite (réorganisation cristalline) créant

ainsi un déplacement continu de l'extrémité du fil (FIGURE 2.15). Le concept utilisé ici consiste à diviser ce même fil d'AMF en sections élémentaires et de les actionner indépendamment. La commande de chaque section se fait en tout ou rien, c'est à dire que la transformation se fait soit à 100% en martensite (aucun courant appliqué), soit à 100% en austénite (courant maximum appliqué), générant un déplacement fixe de chaque section entre ses deux états.

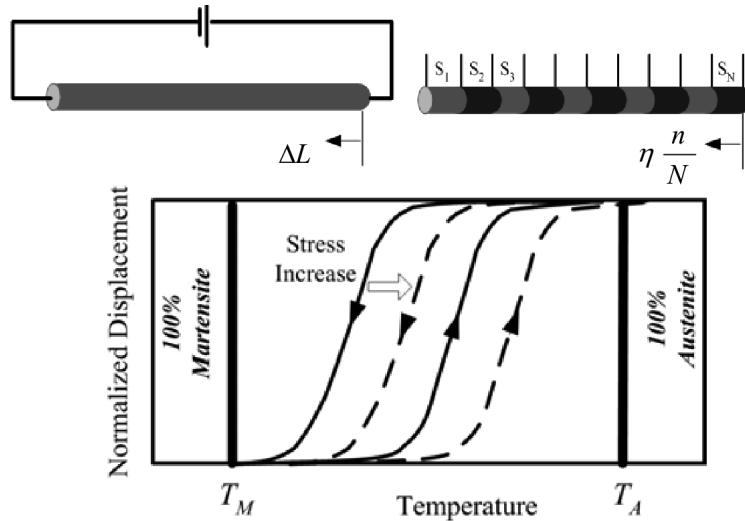


FIGURE 2.15 – Comparaison d'un usage traditionnel de fils d'AMF et d'une utilisation numérique [21].

Pour actionner les doigts d'une main artificielle, un réseau de 10 fils d'AMF sont associés à des modules thermiques permettant d'actionner certaines sections “numériques” de ces fils (FIGURE 2.16). Chaque combinaison binaire d'actionnement des modules thermiques permet de créer une bibliothèque de postures de la main.

2.4 Actionneurs binaires à l'échelle micro

À l'échelle du micromonde aucun robot numérique n'avait encore été développé. Il existe cependant de nombreux actionneurs binaires qui sont essentiellement utilisés comme relais électriques ou optiques. Ils sont souvent désignés comme “microsystèmes binaires”. Différentes méthodes sont utilisées pour réaliser les deux fonctions principales nécessaires à la génération des deux positions discrètes de ces microsystèmes. Ces deux fonctions sont l'actionnement et le maintien en position.

2.4.1 Différents types d'actionnement

L'actionnement du microsystème sert à déplacer la partie mobile vers ses positions discrètes, mais il arrive parfois que ces deux éléments (actionneur et partie mobile)

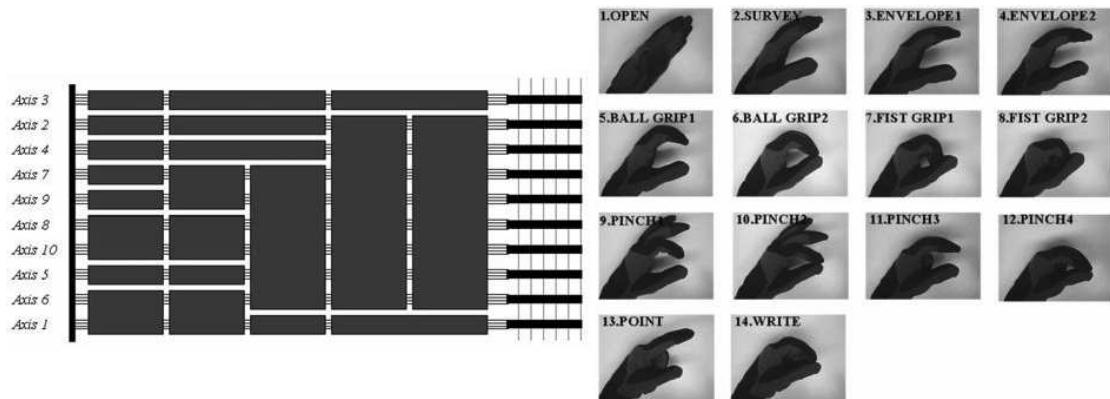


FIGURE 2.16 – Organisation des modules thermiques sur les 10 fils d’AMF (à gauche) et bibliothèque de 14 configurations possible de la main artificielle (à droite) [21].

soient confondus. Ces microsystèmes binaires font intervenir différents effets physiques afin de générer le déplacement de la partie mobile d’une position à une autre. Trois grands effets physiques sont utilisés, il s’agit essentiellement des mêmes effets que ceux utilisés pour les microrobots (comme vu au CHAPITRE 1), ce sont les effets magnétique, électrostatique et thermique. Cependant, contrairement aux micro-actionneurs continus, très peu d’actionneurs piézoélectriques sont utilisés dans la conception de microsystèmes numériques.

Actionnement magnétique

À l’échelle macroscopique, les relais électriques (première utilisation d’actionneurs binaires) font beaucoup usage d’actionneurs magnétiques (bobines électromagnétiques). Bien que ce type d’actionneurs électromagnétiques soit plutôt difficile à réaliser à l’échelle micrométrique ([100]), certains microsystèmes binaires utilisent tout de même cet effet.

À titre d’exemple, Luharuka *et al.* ([71, 72, 73]) utilisent des bobines électromagnétiques de taille millimétrique (externes au microsystème) pour basculer la partie mobile d’une microvalve bistable. La structure mécanique bistable (donc à maintien passif) génère un mouvement de rotation de 10° ou 20° (suivant la version) entre ses deux positions mécaniquement stables (FIGURE 2.17). Le champ magnétique créé sur quatre plots fixes permet d’attirer la partie mobile vers les positions stables. Le diamètre de ces valves microfabriquées est d’environ 3 mm et permet de positionner des orifices afin de permettre ou non (en fonction de l’état) de laisser passer un fluide circulant orthogonalement au plan de la structure.

Actionnement électrostatique

L’effet électrostatique est très utilisé à l’échelle micrométrique, à la fois en tant qu’actionneur, et en tant que capteur pour des microsystèmes. Nous retrouvons également ce

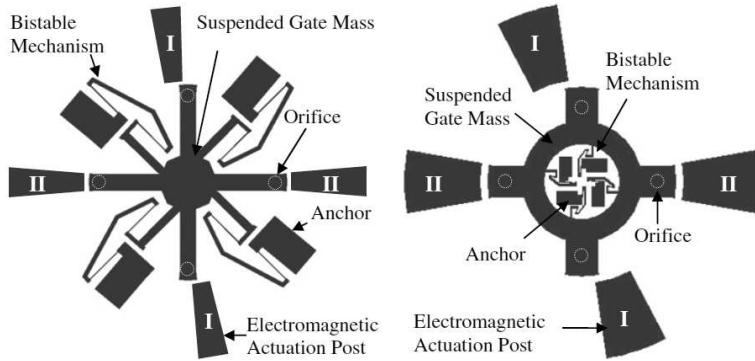


FIGURE 2.17 – Valve électromagnétique bistable [73] générant une rotation entre les deux positions stables.

type d'actionnement dans des microsystèmes binaires. Ils se présentent souvent sous la forme de peignes interdigités, permettant de déplacer la partie mobile (fixée à un peigne) vers l'une des deux positions atteignables.

La FIGURE 2.18 présente deux exemples de microsystèmes binaires utilisant ce type d'actionneurs avec des peignes interdigités ([58, 43]). Ces microsystèmes génèrent des déplacements de $64 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$ respectivement entre leurs deux positions atteignables. Les auteurs respectifs envisagent d'utiliser ces microsystèmes pour des applications de relais électriques ou optiques.

D'autres types d'actionneurs électrostatiques peuvent aussi prendre une forme plus simple en étant constitués de seulement deux surfaces en regard chargées électriquement, produisant ainsi une force électrostatique normale à ces surfaces. Pour illustrer ceci, nous nous intéressons au bit de mémoire mécanique réalisé par Charlot *et al.* [14] (FIGURE 2.19). Ce bit de mémoire est constitué d'une poutre mécanique bistable en flambage qui peut être basculée d'un état (0 ou 1) à l'aide de forces électrostatiques provenant de deux électrodes de part et d'autre de cette poutre. Cette phase de basculement correspond à la phase d'écriture de la mémoire sur ce bit qui restera stockée sans apport énergétique grâce à la nature bistable de cette structure. La particularité de ce module binaire est qu'il est également possible d'accéder à l'information enregistrée par lecture de ce bit mécanique. Cette phase de lecture est réalisée par mesure de capacité entre la poutre bistable et une des électrodes. Cette structure est de petite dimension comparée aux autres microsystèmes binaires. La poutre en flambage est un nanofil de 100 nm de largeur et une longueur pouvant atteindre $30 \mu\text{m}$, et le déplacement entre les deux positions stables est de l'ordre du micromètre.

Actionnement thermique

Le principe thermomécanique est bien adapté à l'actionnement des microsystèmes. Grâce aux petites dimensions de leurs structures mobiles, les besoins énergétiques pour

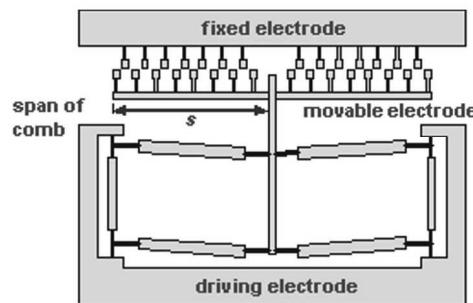
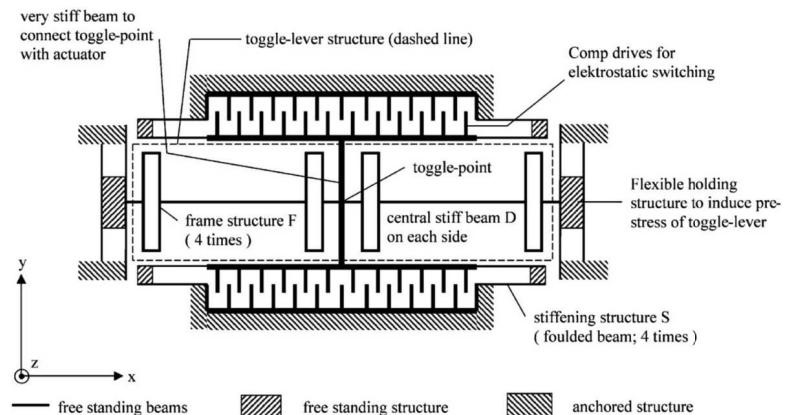


FIGURE 2.18 – Microsystèmes binaires à actionnement électrostatique par peignes interdigités.

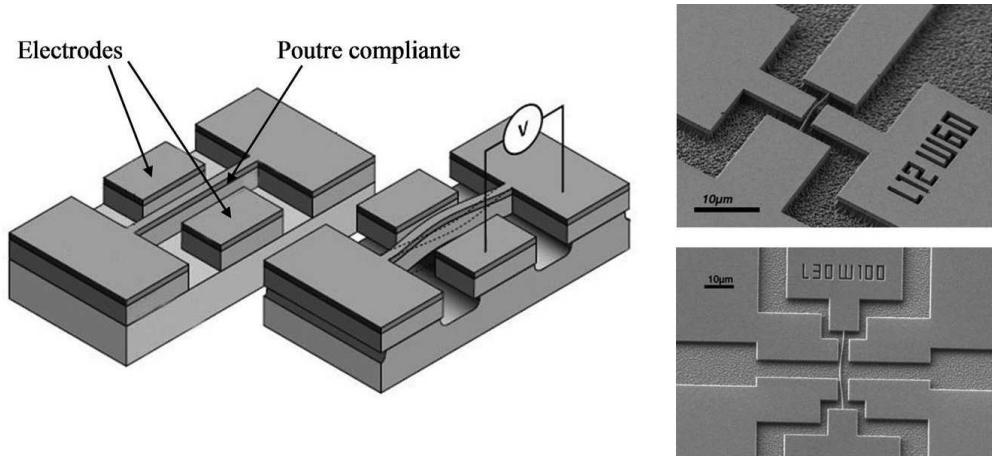


FIGURE 2.19 – Bit de mémoire mécanique à écriture électrostatique et lecture de capacité [14].

actionner ces microsystèmes sont relativement faibles, et les temps de chauffage et de refroidissement beaucoup plus courts que pour des structures macroscopiques. Différents principes sont utilisés pour l'actionnement thermique.

Un actionnement thermique très répandu dans la littérature est nommé V-beam. Il représente un cas particulier de systèmes binaires dans lequel la partie mobile et l'actionnement sont confondus. Il s'agit d'une poutre en forme de V, bi-encastrée. Lors du passage d'un courant électrique dans cette poutre, elle est chauffée par effet Joule et se déplace dans le sens de la pointe du V (FIGURE 2.20). Cette méthode est utilisée par

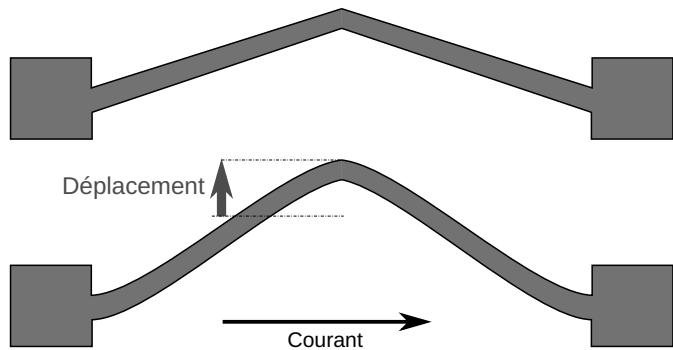


FIGURE 2.20 – Concept d'actionneur thermique de type V-beam.

Gomm ([45], FIGURE 2.21) pour pousser une structure mécanique bistable et réaliser un relais électrique.

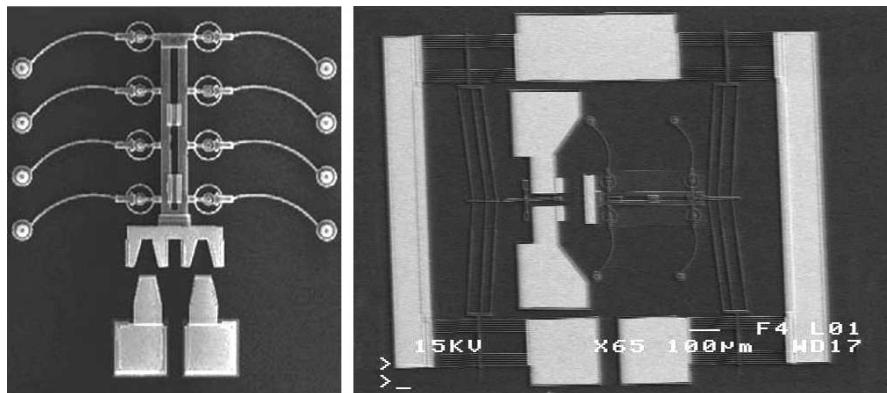


FIGURE 2.21 – Microrelais électrique constitué d'une structure mécanique bistable actionnée thermiquement [45].

Des alliages à mémoire de forme thermiques sont également utilisés à l'échelle micrométrique, non plus comme actionneurs binaires indépendants, mais pour pousser la partie mobile d'un microsystème binaire vers une position discrète ([5]). Les auteurs envisagent

d'utiliser ce type de microsystème binaire dans des applications de relais électrique ou optique, ou pour des valves.

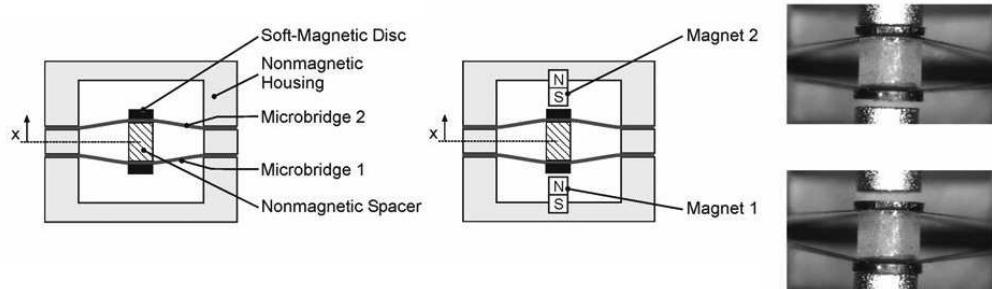


FIGURE 2.22 – Microsystème binaire alliant actionneurs en alliage à mémoire de forme et aimants permanents [5].

Les autres utilisations de l'effet thermique en guise d'actionnement font souvent intervenir un effet bimorphe. Cet effet génère un déplacement normal à l'allongement d'une poutre dû à son échauffement en l'associant à une autre poutre dont l'allongement est nul ou faible par rapport à la première. Cet effet est utilisé pour générer un déplacement planaire dans le cas du relais électrique bistable développé par Qiu *et al.* ([82], FIGURE 2.23). Chacun des deux actionneurs thermiques permettant de pousser la structure mécanique bistable dans chacune des deux positions stables. Ces actionneurs thermiques sont composés de deux poutres encastrées à une extrémité et reliées entre elles à l'autre extrémité. Elles ont des largeurs différentes (60 µm pour la poutre chaude et 80 µm pour la poutre froide) et sont séparées de 20 µm générant une différence de température de 220°C nécessaire pour assurer une force de 13 mN.

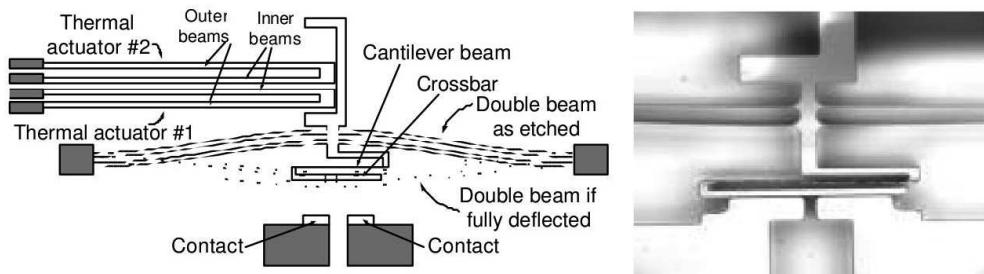


FIGURE 2.23 – Microrelais électrique utilisant une structure mécanique bistable et des actionneurs thermiques [82].

Un déplacement hors plan peut également être généré par actionnement thermique. Ceci est réalisé dans [68] en déposant une couche de métal sur une structure en silicium. La température des deux matériaux soumis à la même source de chaleur diffère, générant

ainsi un déplacement hors plan. Le fonctionnement et l'utilisation de ce système sera détaillé dans la suite.

2.4.2 Différents types de maintien

Comme vu précédemment, deux grands types de fonctions de maintien sont utilisés pour les microsystèmes binaires, le maintien actif et le maintien passif. Contrairement au maintien actif qui est réalisé par une force continue appliquée sur la partie mobile, le maintien passif est assuré indépendamment de la partie actionnement de ce microsystème binaire. Différents effets physiques sont également utilisés pour assurer cette fonction.

Maintien magnétique

Nous avons vu que Barth *et al.* [5] (FIGURE 2.22) utilisent des actionneurs en alliage à mémoire de forme thermique pour l'actionnement de la partie mobile. Afin d'assurer le maintien en position de la partie mobile du microsystème, des aimants permanents sont utilisés. La partie mobile de ce microsystème binaire est recouverte d'une couche de matériau magnétique lui permettant d'être attiré par ces aimants permanents placés de part et d'autre des deux positions stables atteignables. Les aimants jouent ici le rôle de stabilisateur en attirant la partie mobile dans un puits de potentiel et assurant une grande force de blocage de chacune des positions stables atteignables. Cette force de blocage atteint 33 mN, ce qui est grandement supérieur aux systèmes binaires généralement rencontrés à l'échelle micrométrique.

Poutres bistables

Certains microsystèmes utilisent la nature bistable des poutres bi-encastées en flamboage. De nombreux microsystèmes binaires présentés jusqu'à maintenant font intervenir ce type de structure mécanique pour générer deux états stables ([73, 58, 43, 14, 45, 82]), associés à différents types d'actionnement. Ce type de structure est très répandu à l'échelle micrométrique, et des systèmes complexes issus de l'association de plusieurs éléments de ce type ont même vu le jour. Cet usage n'est cependant pas uniquement réservé aux microstructures, ils sont également utilisés pour des systèmes de plus grande taille dans [87].

Maintien par utilisation d'un deuxième actionneur

Un dernier moyen de maintien de systèmes dans une position discrète est l'utilisation d'un autre actionneur permettant de verrouiller la partie mobile dans la position discrète atteinte. Ceci est réalisé dans le but de créer un système à maintien passif. Dans [24], des V-beam sont utilisés pour créer un microrelais optique de déplacement 130 µm (FIGURE 2.24). Ces V-beam nécessitent un apport énergétique continu afin de rester dans la deuxième position, c'est un système binaire de type passif-actif. Afin de créer un microsystème passif-passif, un deuxième actionneur est ajouté pour verrouiller ce V-beam

dans l'une ou l'autre de ses positions atteignables. Ce deuxième actionneur est associé à un ressort pour créer une position stable en maintien passif (FIGURE 2.25).

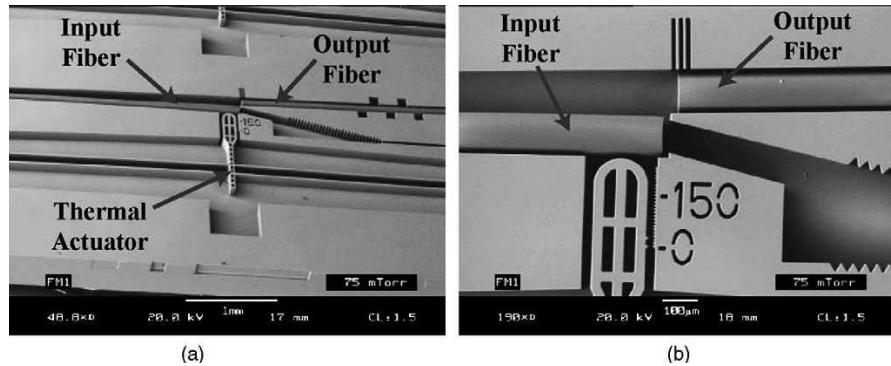
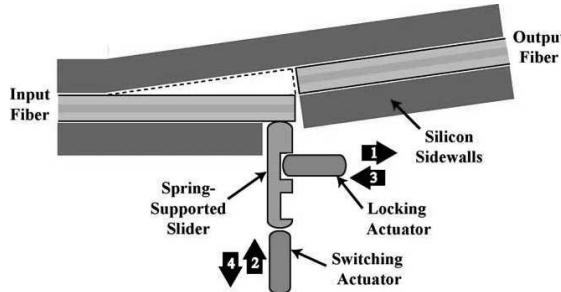


FIGURE 2.24 – Microrelais optique à actionnement thermique utilisant un actionneur secondaire de verrouillage [24].



2.4.3 Microsystèmes numériques

Bien qu'aucun robot numérique n'ait été réalisé à l'échelle micrométrique, il existe cependant quelques microsystèmes associant plusieurs actionneurs binaires capables de générer un mouvement dans une direction donnée. Ce type de microsystèmes est généralement appelé convertisseur numérique analogique dans la littérature (Digital to Analog Converter - DAC). Ils peuvent être considérés comme des manipulateurs numériques à un degré de liberté.

Le premier de ces convertisseurs fut développé en 1999 par Yeh *et al.* [103] (FIGURE 2.26). Les actionneurs binaires utilisés sont des rangées d'actionneurs thermiques (en maintien actif). Chaque actionneur génère le même déplacement de $6 \mu\text{m}$ entre ses deux positions discrètes, et est connecté à une architecture en escalier permettant de transmettre ce déplacement jusqu'à l'organe terminal. Un DAC à 4 bit a été microfabri-

qué et intégré au sein d'un MEMS afin de permettre le positionnement d'un micromiroir.

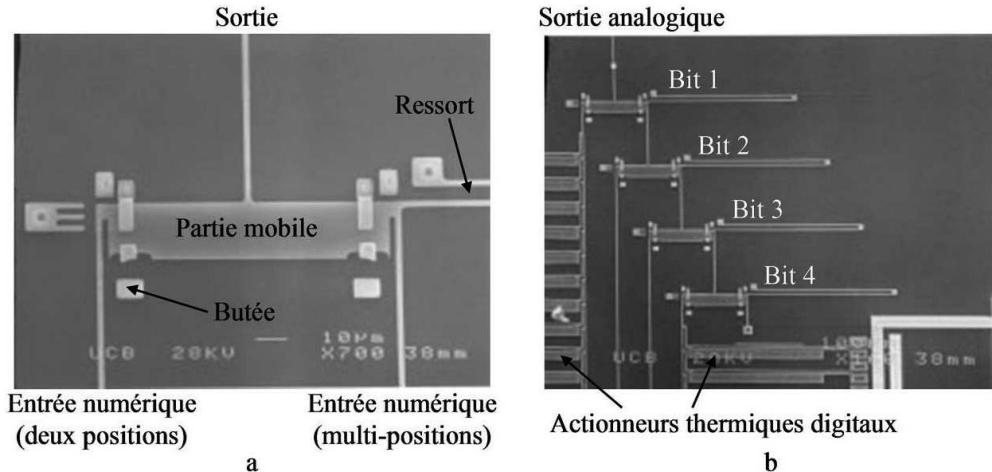


FIGURE 2.26 – CNA à 4 bit permettant le positionnement d'un micromiroir au sein d'un MEMS [103].

En 2000 Toshiyoshi *et al.* [95] développent le *MEMDAC* (Micro Electro Mechanical DAC), inspiré du convertisseur numérique analogique électronique R-2R. Il utilise des actionneurs binaires à maintien actif avec des actionneurs électrostatiques et des butées mécaniques. Chaque actionneur génère un déplacement de $6\text{ }\mu\text{m}$ qui est transmis par des poutres compliantes jusqu'à l'organe terminal. Un MEMDAC à 4 bit a été microfabriqué et peut générer un déplacement total de $5,8\text{ }\mu\text{m}$ de l'organe terminal avec une résolution de $0,38\text{ }\mu\text{m}$.

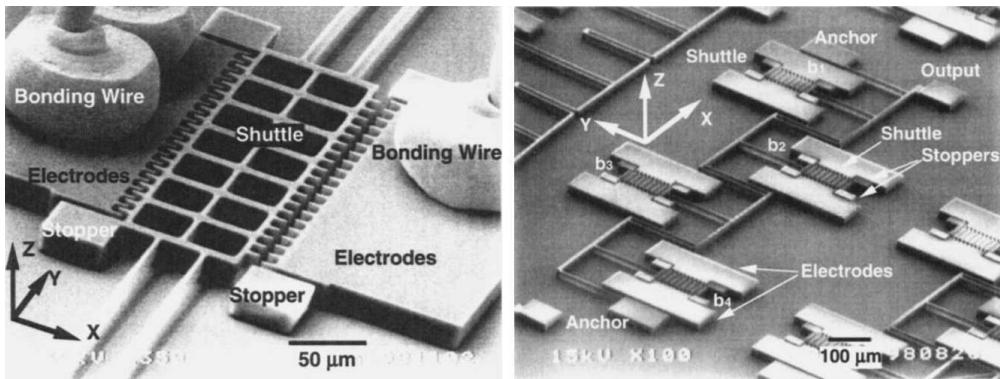


FIGURE 2.27 – CNA inspiré du CNA électrique R-2R [95].

Liu *et al.* ont développés en 2002 le *bimorph MEMDAC* ([68], FIGURE 2.28) qui utilise des actionneurs thermiques à déplacement hors plan (comme cité précédemment). Chaque actionneur binaire constituant ce DAC ont des largeurs différentes, afin que chaque bit génère un déplacement différent. Ce convertisseur est constitué de 4 bit, et est recouvert d'une couche réfléchissante permettant de l'utiliser comme miroir orientable. L'incrément d'orientation générée par ce microsystème est de 0,01 rad et permet de générer une course totale de 0,228 rad.

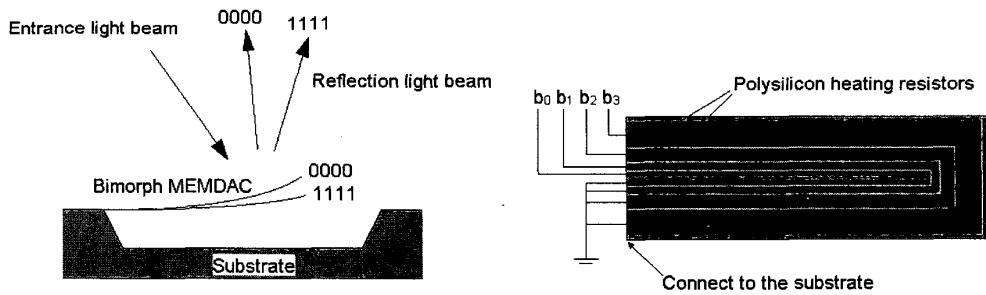


FIGURE 2.28 – Le MEMDAC bimorphe à actionnement thermique [68] utilisé comme miroir orientable.

Le *MTDAC* (Micromechanical Torsional DAC) développé par Zhou *et al.* en 2004 [111] génère un mouvement de rotation grâce à des actionneurs électrostatiques (FIGURE 2.29). Les ailettes sont attirées par des surfaces chargées électriquement placées au dessus et en dessous de la structure, jusqu'au contact avec cette surface. Chaque actionneur binaire génère le même déplacement entre les deux butées (surfaces chargées). Un prototype possédant 2 actionneurs binaires a été microfabriqué et permet de générer un déplacement total de $1,92^\circ$ avec une résolution de $0,64^\circ$. Il permet d'orienter un micromiroir fixé sur l'organe terminal de ce système.

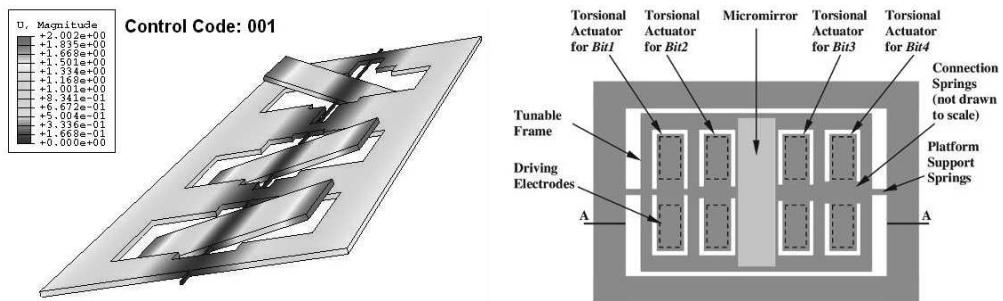


FIGURE 2.29 – DAC de torsion [111] à actionnement électrostatique.

Nous constatons que parmi ces 4 exemples de microsystèmes numériques, aucun ne fait intervenir de combinaison sérielle d'actionneurs binaires (tel que représenté sur la FIGURE 2.2). Chacun des actionneurs binaires possède une base fixée sur le même bâti, et transmet son déplacement à l'organe terminal par le biais d'une architecture particulière.

2.5 Choix d'un actionneur binaire pour un microrobot numérique

Dans l'optique de réaliser un microrobot numérique, à l'image des robots numériques à l'échelle macroscopique (VGT, BRAID, ...), il est nécessaire de choisir un actionneur binaire qui possède de bonnes propriétés de précision, répétabilité et robustesse de positionnement. Parmi les actionneurs numériques développés à l'échelle micrométrique, beaucoup d'entre eux sont utilisés comme relais électriques ou optiques, et ne se focalisent que sur la précision de positionnement d'une seule des deux positions atteignables (celle permettant de faire le contact électrique ou optique).

Dans le cas des actionneurs binaires dont les deux positions atteignables sont précises certains ne permettent pas la génération de positions robustes. L'absence de robustesse de position et la forte sensibilité aux perturbations extérieures des ces actionneurs empêchent leur utilisation en tant qu'actionneurs d'un microrobot.

L'intérêt de développer un nouvel actionneur binaire pour la génération d'un micro-robot numérique est donc présent. Chen *et al.* ont développé un *module bistable* (FIGURE 2.30) dont l'objectif final est son utilisation au sein d'une structure robotique permettant le positionnement et la manipulation de micro-objets. Cet actionneur binaire fait intervenir une structure mécanique bistable (comme bon nombre d'actionneurs binaires du micromonde) en silicium, dont le basculement est réalisé par deux paires d'actionneurs thermiques (chacune de ces paires permet de basculer le module dans un état). Un principe de blocage est également utilisé dans cette structure afin de limiter le déplacement entre les deux positions atteignables par ce module, et permettre une robustesse de ces deux positions.

Ce module bistable possède des dimensions de $8 \times 2 \text{ mm}^2$ et permet de générer un déplacement de 5, 10 ou $20 \mu\text{m}$ (en fonction du modèle fabriqué) entre ses deux positions atteignables. Il est capable de développer des forces de $\sim 1,5 \text{ mN}$, rendant chacun de ses états stable, répétable et robuste. Ce type de blocage est unique dans le domaine des actionneurs numériques à l'échelle micrométrique et a nécessité une attention particulière pour la phase de conception .

2.6 Conclusion

Le concept de robot numérique n'est pas nouveau, et de nombreuses études ont déjà été menées sur le sujet à l'échelle macroscopique. Inspirés de l'électronique numérique, ces robots permettent de générer des déplacements précis, stables et répétables sans

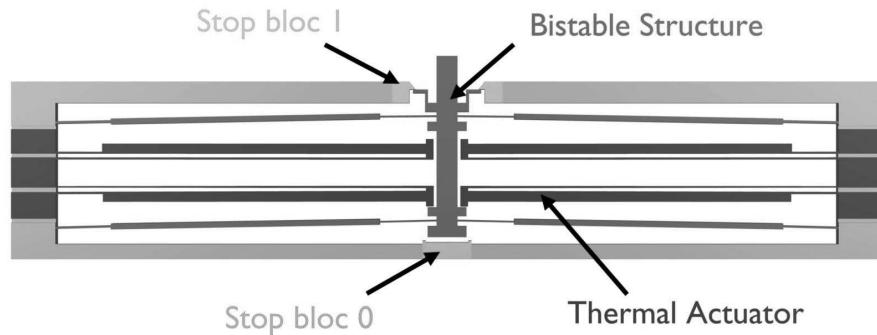


FIGURE 2.30 – Module bistable.

nécessiter l'utilisation de capteurs. Les actionneurs binaires sont de plus généralement de faible coût comparé à leurs homologues continus.

À l'échelle micrométrique, ce concept n'a pas encore été étudié, bien que de nombreux microsystèmes binaires aient vu le jour pour des applications dans des microrelais (électriques ou optiques) ou des microvalves. La plupart de ces microsystèmes binaires n'utilisent réellement qu'une seule de leur position atteignable. Cette position fait souvent l'objet de calculs approfondis de position et de force, tandis que l'autre position est considérée comme position de repos qui doit seulement être différente de la position principale. Les microsystèmes les plus proches de microrobots numériques sont souvent dénommés convertisseurs numérique analogique (DAC) et permettent de générer des déplacements suivant un seul degré de liberté en associant plusieurs actionneurs binaires. Les actionneurs utilisés dans ce cas font l'objet d'études plus approfondies dans lesquelles les deux positions atteignables sont importantes.

Différents micro-actionneurs binaires ont vu le jour pour réaliser ces microsystèmes (relais ou DAC), et génèrent des déplacement et des forces diverses et variées. Le TABLEAU 2.1 présente un récapitulatif de ces différents actionneurs binaires développés à l'échelle micrométrique. La deuxième colonne décrit le type de maintien de chaque position (A : actif, P : passif).

TABLEAU 2.1 – Comparaison des différents actionneurs binaires développés à l'échelle micrométrique.

Réf.	Type	Dimensions	Course	Alim.	Force (Couple)
[103]	P-A	$100 \times 20 \mu\text{m}^2$	$6 \mu\text{m}$	5V	-
[95]	A-A	-	$6 \mu\text{m}$	150V	-
[45]	P-P	$1,92 \text{ mm}^2$	$110 \mu\text{m}$	85mA	$23,4 \mu\text{N}$
[68]	P-A	-	0,015 rad	-	-
[82]	P-P	-	$141 \mu\text{m}$	30V	0,6 mN
[111]	A-A	$150 \times 100 \mu\text{m}^2$	-	12,5V	-
[43]	P-P	$1,2 \times 1 \text{ mm}^2$	$100 \mu\text{m}$	-	$50 \mu\text{N}$
[58]	P-P	$2,5 \times 0,6 \text{ mm}^2$	$64 \mu\text{m}$	-	$126 \mu\text{N}$
[24]	P-A	4 mm	$130 \mu\text{m}$	120mA 44V	5-21 mN
[14]	P-P	$100 \times 430 \text{ nm} \times 30 \mu\text{m}$	-	90V	-
[16]	P-P	$8 \times 2 \text{ mm}^2 \times 500 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$	20V	1,54 mN
[73]	P-P	3 mm	10°	-	$2 \mu\text{N} \cdot \text{m}$
[5]	P-P	$7 \times 7 \times 4 \text{ mm}^3$	$84 \mu\text{m}$	-	33 mN

A :maintien actif; P : maintien passif

Chapitre 3

DiMiBot : le microrobot numérique

La cinématique d'un robot définit ses caractéristiques géométriques et ses capacités de déplacement. Nous introduisons dans ce chapitre le microrobot numérique DiMiBot en présentant une architecture cinématique adaptée au micromonde, dévoilant ainsi les capacités d'un tel microrobot.

Sommaire

3.1	Introduction	53
3.2	Cinématique du microrobot numérique	54
3.2.1	Cahier des charges	54
3.2.2	Cas d'une structure serielle	55
3.2.3	Proposition d'une cinématique de microrobot numérique	56
3.3	Modèle géométrique direct	57
3.3.1	Structure élémentaire	58
3.3.2	Structure en escalier	59
3.3.3	Organe terminal	61
3.3.4	Modèle géométrique direct	61
3.4	Espace de travail	63
3.4.1	Espace de travail du VGT (macro)	63
3.4.2	Visualisation de l'espace de travail du DiMiBot	63
3.4.3	Description de l'espace de travail du DiMiBot	64
3.4.4	Influence de la géométrie du DiMiBot sur son espace de travail	66
3.5	Modèle géométrique inverse	69
3.6	Conclusion	71

3.1 Introduction

La conception du module bistable de Chen *et al.* [16] (FIGURE 2.30) ouvre une nouvelle perspective pour la conception de microrobots manipulateurs, en proposant une

alternative à l'élaboration de lois de commande de plus en plus complexes. Elle repose sur une stabilité et une robustesse mécaniques afin de générer des déplacements précis à l'échelle micrométrique. Les robots numériques à l'échelle macroscopique ont, par le passé, démontré les performances qu'ils permettent d'obtenir, alliant facilité de fabrication et faible coût (les actionneurs numériques sont généralement moins onéreux à réaliser que les actionneurs continus) à un ratio force utile sur poids du robot élevé. La plupart de ces robots numériques font usage d'une architecture globalement serielle. Elle consiste en la mise en série de modules élémentaires, chacun étant constitué d'un agencement parallèle d'actionneurs numériques (il ne s'agit donc pas d'une architecture purement serielle, et est souvent qualifiée dans la littérature de macroscopiquement serielle). Ce type d'architecture permet de générer un espace de travail hyper-redondant, c'est à dire dans lequel une seule position peut être atteinte par plusieurs combinaisons d'états différentes (plusieurs consignes de commande différentes). Cela permet de faciliter les déplacements complexes nécessaires pour la réalisation de certaines tâches, puisque proposant différentes approches possibles. Cependant nous avons vu dans le CHAPITRE 1 qu'il n'est pas toujours approprié de s'inspirer de la robotique traditionnelle pour la conception de robots évoluant à l'échelle micrométrique. Certains des problèmes rencontrés par les robots macroscopiques sont parfois peu perturbants à ces échelles, mais pourraient être fortement contraignants pour des microrobots. Il est donc conseillé de développer un type d'architecture propre à ce microrobot et adapté à l'application de tâches dans le micromonde.

3.2 Cinématique du microrobot numérique

3.2.1 Cahier des charges

L'objectif est de concevoir un microrobot porteur permettant d'effectuer des tâches de micromanipulation. Il sera utilisé dans le futur en association avec un outil fixé sur son organe terminal (préhenseur, ...). La nature numérique de ce microrobot lui confère une capacité à se déplacer de manière précise sans utilisation de capteurs, procurant un gain de place conséquent. Il est alors possible de l'utiliser dans des milieux confinés.

Les performances souhaitées pour notre microrobot numérique sont les suivantes :

Spécifications générales du microrobot

- Une commande en **boucle ouverte** afin d'éviter l'utilisation de lois de commande complexes fortement consommatrices en ressources (énergie, espace, temps de calcul, ...). Il s'agit également d'une utilisation du microrobot **sans capteur**, qui sont souvent encombrants et onéreux. L'absence de capteurs concourt également à diminuer l'encombrement.
- Une **indépendance au bruit** permet des déplacements d'une grande précision. L'absence de capteurs limite la présence de bruits électroniques et bruits de mesure. Les bruits mécaniques et thermiques sont également limités par la structure choisie et la présence de stop-blocks au sein des modules bistables.

- Une **petite dimension** du microrobot est préférable pour permettre son utilisation en environnement confiné. Une petite épaisseur est tout particulièrement recommandée pour une utilisation dans un TEM dans lequel la zone de travail est très fine (centimétrique).
- Une **structure monolithique** (en silicium) permet d'éviter les phases d'assemblage du robot (difficiles à l'échelle micrométrique) et les problèmes liés aux liaisons entre éléments solides (jeu mécanique, friction, lubrification, ...).

Spécifications liées à l'espace de travail générée

- La génération d'un espace de travail discret **plan** (2 ddl) sera tout d'abord envisagée.
- Afin de simplifier les études de modélisation du robot (modèle géométrique direct et inverse), l'espace de travail généré sera **carré** avec une répartition homogène des positions discrètes atteignables. Il sera qualifié de **cartésien**.
- Afin d'obtenir un espace de travail **le plus large possible**, une distribution **non redondante** des positions atteignables sera appréciable.
- La **Résolution** de positionnement de ce microrobot devra être submicrométrique.
- Une grande **stabilité** et une grande **robustesse** des positions atteignables devront être assurées par l'utilisation des modules bistables développés dans [16] et par une architecture robotique soigneusement dimensionnée. Ces modules bistables ont été conçus de sorte à être robustes face à une force d'environ 1,5 mN, il serait souhaitable que le microrobot puisse supporter des forces supérieures à cette valeur.
- Une grande **Répétabilité** des positions atteignables devra être assurée.

3.2.2 Cas d'une structure serielle

Pour répondre à ce cahier des charges, une première cinématique serielle de microrobot numérique est proposée. Dans ce type de structure robotique, la partie mobile de chaque module est connectée au module suivant. Comme présenté dans le concept de robotique numérique serielle du CHAPITRE 2, cela permet de générer un robot cartésien (2D dans le cas choisis ici pour un premier concept) dont le déplacement de l'organe terminal correspond à la somme des déplacements de chaque module. La non redondance de l'espace de travail généré est obtenu en choisissant des modules bistables générant des déplacements différents. Tel que montré dans la FIGURE 2.2, dans une structure où chaque module génère un déplacement égal à la moitié du suivant, l'espace de travail généré est non redondant avec une répartition homogène. Des tests de première structure microrobotique de ce type ont été étudiées dans [15] (FIGURE 3.1). Dans le cas de la structure à 3 modules, les modules génèrent respectivement des déplacements de 5, 10 et 20 μm , permettant alors d'atteindre un espace de travail linéaire possédant 8 positions atteignables, de longueur 35 μm avec une résolution de 5 μm .

Ce type d'agencement des modules bistables rencontre cependant quelques difficultés. Tout d'abord ces modules bistables n'ont pas été conçus pour supporter un effort hors plan. La partie mobile d'un module bistable ne peut donc pas supporter le poids de

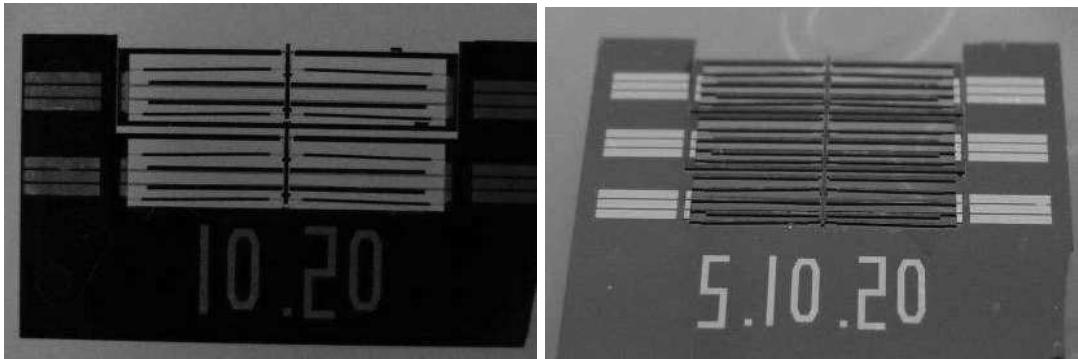


FIGURE 3.1 – Premiers prototypes de microrobots numériques sériels utilisant des modules bistables.

tous les modules qui lui sont fixés en série. Nous avons vu au CHAPITRE 2 un type de robot numérique présentant le même problème à l'échelle macroscopique dans [46]. La solution utilisée dans ce cas fut de fabriquer des actionneurs plus gros à la base de la structure permettant alors de supporter le poids des suivants. Ce genre de solution ne serait d'aucune aide dans le cas du module bistable puisque les efforts se font suivant l'axe hors plan (direction différente de l'actionnement), qui est la faiblesse de ce module. Le deuxième problème concerne les fils de connexion permettant d'alimenter les différents modules. Ces fils sont plutôt rigides et pourraient, lors des déplacements, empêcher certains modules de basculer. Ce phénomène serait surtout observable sur les modules à l'extrême de la structure, subissant le plus grand déplacement.

Afin d'éviter de tels problèmes une architecture de type parallèle est préférable.

3.2.3 Proposition d'une cinématique de microrobot numérique

A l'échelle macroscopique les robots parallèles (plateforme de Gough-Stewart, robot delta, ...) sont réputés pour permettre de grandes vitesses de déplacement, la possibilité de supporter des charges importantes et la génération d'un espace de travail souvent redondant.

Le choix d'une structure robotique parallèle permet d'éviter les problèmes rencontrés avec une architecture serielle. Elle consiste à fixer tous les modules bistables à une même base fixe. De cette manière, les connexions électriques seront effectuées sur cette base fixe et ne perturberont en aucun cas le déplacement des éléments mobiles de la structure robotique. Cette base fixe contribue également à éliminer le problème dû au poids des modules bistables. Le déplacement des modules est transmis jusqu'à l'organe terminal par l'utilisation d'une architecture articulée particulière. De cette manière la charge est équitablement répartie sur tous les modules bistables de la structure. Ceci est valable pour le poids de cette architecture (force exercée suivant la direction hors plan), mais également pour les efforts rencontrés lors des tâches de manipulation de ce microrobot. La présence d'obstacles par exemple générera une distribution des efforts sur tous les modules bistables de la structure, conduisant à l'augmentation de la robustesse du mi-

crorobot en comparaison à une structure de type série par laquelle toute la charge est appliquée sur le dernier module.

Le choix de la structure robotique parallèle s'est porté sur une organisation particulière des différents modules, permettant de répondre aux attentes établies par le cahier des charges. Cette structure est représentée sous forme de schéma cinématique sur la FIGURE 3.2, dans laquelle les modules bistables sont représentés par des rectangles. Ils sont tous fixés à une même base fixe, et génèrent un déplacement de leur élément moteur (nommé shuttle) suivant l'axe Y_0 du référentiel \mathcal{R}_0 .

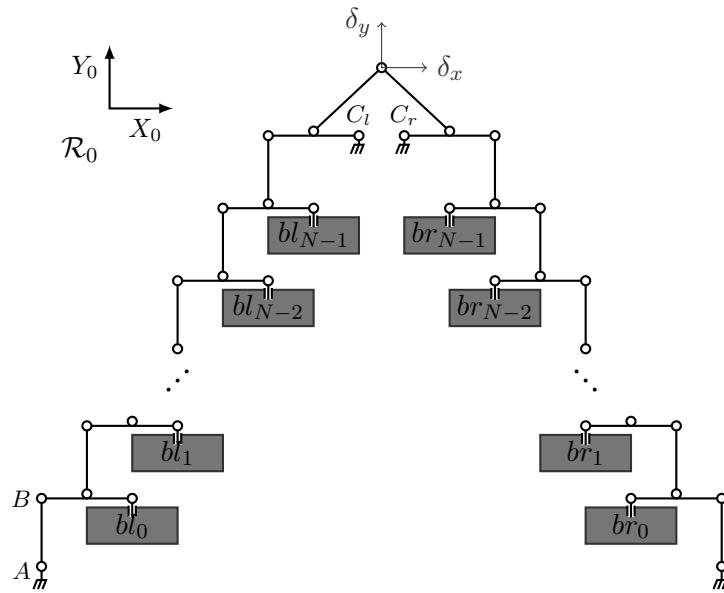


FIGURE 3.2 – Schéma cinématique de la structure robotique.

Cette architecture symétrique fait intervenir $2N$ modules bistables, N modules à gauche nommés bl_i ($0 \leq i \leq N - 1$) de bas en haut, et N modules à droite nommés br_j ($0 \leq j \leq N - 1$). Elle permet alors de générer un espace de travail contenant 2^{2N} positions discrètes atteignables. Tous les modules utilisés génèrent le même déplacement Δ entre leurs deux positions stables (suivant l'axe Y_0). Ce déplacement est transmis par l'architecture jusqu'à l'organe terminal (extrémité haute de la structure) de déplacement $[\delta_x \quad \delta_y]^T$.

3.3 Modèle géométrique direct

L'architecture proposée est constituée de l'association en cascade de structures élémentaires et d'une structure finale associant les deux parties symétriques du robot. Ces deux éléments sont représentés sur la FIGURE 3.3. La structure élémentaire (utilisée $2(N + 1)$ fois dans la FIGURE 3.2, formant des marches d'escalier) est constituée d'une poutre horizontale et d'une poutre verticale, articulées entre elles.

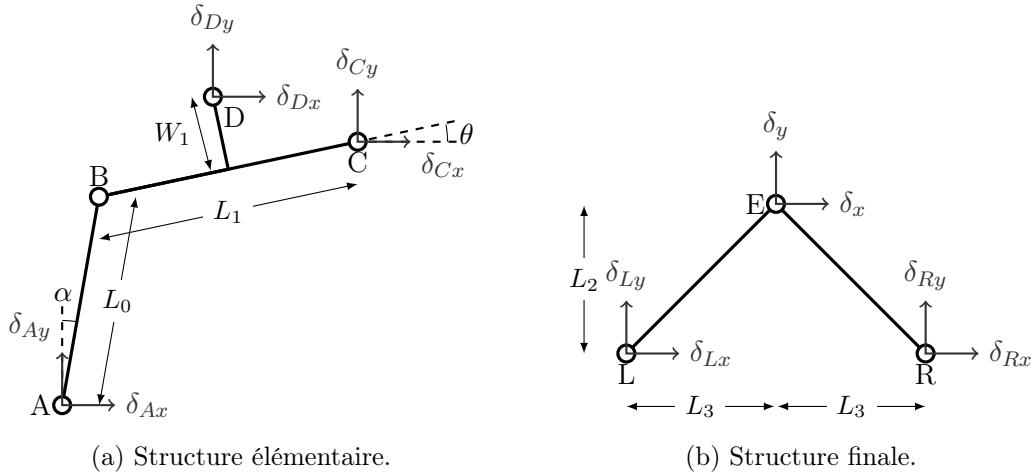


FIGURE 3.3 – Schéma cinématique de la structure élémentaire (a), et de la structure finale (b) constituant le microrobot numérique.

La structure élémentaire (voir FIGURE 3.3a) est constituée de deux poutres articulées l'une à l'autre au point B et elles sont également articulées au reste de la structure aux points A , C et D . Les deux structures élémentaires du haut sont articulées autour d'un point C fixe (notés C_l et C_r sur la FIGURE 3.2), tandis que toutes les autres sont connectées en leur point C à un module bistable. Le point A des structures élémentaires du bas sont également fixes.

3.3.1 Structure élémentaire

Afin d'établir un modèle géométrique direct de cette structure nous allons commencer par calculer un modèle pour une structure élémentaire. En considérant les déplacements des points A et C comme les données d'entrée de cette structure, et le déplacement du point D comme la donnée de sortie, nous en établissons un modèle. Cette structure récupère le déplacement du module bistable auquel il est connecté au point C , puis associe ce déplacement au déplacement généré par la partie basse du microrobot au point A afin de le transmettre vers la partie haute de la structure (jusqu'à l'organe terminal) au point D .

Plusieurs hypothèses sont établies pour faire ces calculs.

- toutes les poutres sont supposées rigides.
- les liaisons pivot sont parfaites, générant une rotation autour d'un point fixe sans friction.
- l'approximation des petits angles est permise par la génération de petits déplacements (micrométriques) en comparaison de la taille des poutres (millimétrique).

Le déplacement généré au point D ($[\delta_{D_x} \quad \delta_{D_y}]^T$) est exprimé en fonction du déplacement du point C et de l'angle θ dans (3.1), et également en fonction du déplacement du point A et des angles θ et α dans (3.2).

$$\begin{bmatrix} \delta_{Dx} \\ \delta_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{Cx} + \frac{L_1}{2}(1 - \cos\theta) - W_1 \sin\theta \\ \delta_{Cy} - W_1(1 - \cos\theta) - \frac{L_1}{2} \sin\theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{Dx} \\ \delta_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{Ax} + L_0 \sin\alpha - \frac{L_1}{2}(1 - \cos\theta) - W_1 \sin\theta \\ \delta_{Ay} - L_0(1 - \cos\alpha) - W_1(1 - \cos\theta) + \frac{L_1}{2} \sin\theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

En combinant ces deux équations, et en utilisation l'approximation des petits angles, les expressions de α et θ peuvent être calculées en fonction des déplacements des points A et C et des variables géométriques de la structure (3.3).

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\delta_{Cx} - \delta_{Ax}}{L_0} \\ \theta = \frac{\delta_{Cy} - \delta_{Ay}}{L_1} \end{cases} \quad (3.3)$$

S'en déduit alors le déplacement du point D en fonction des déplacements des points A et C par l'intermédiaire d'une multiplication matricielle avec une matrice jacobienne dans (3.4).

$$\begin{bmatrix} \delta_{Dx} \\ \delta_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} & 1 & -\frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{Ax} \\ \delta_{Ay} \\ \delta_{Cx} \\ \delta_{Cy} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Ce calcul a été réalisé pour une structure élémentaire telle que définie dans la partie gauche de l'architecture robotique de la FIGURE 3.2. De la même manière, du côté droit de la structure, lorsque cette structure élémentaire est la symétrique de la précédente, le déplacement du nouveau point D' est exprimé par l'équation (3.5) en fonction des déplacements des points correspondants A' et C' .

$$\begin{bmatrix} \delta_{D'x} \\ \delta_{D'y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{W_1}{L_1} & 1 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{A'x} \\ \delta_{A'y} \\ \delta_{C'x} \\ \delta_{C'y} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.3.2 Structure en escalier

Il convient alors d'associer ces structures élémentaires entre elles pour générer un déplacement à la base de l'organe terminal (aux points L et R de la FIGURE 3.3).

Considérons tout d'abord la partie gauche du microrobot (FIGURE 3.4) avec le déplacement du point L qui dépend des déplacements des modules bistables de la partie gauche de la structure (nommés bl_i et de déplacement $[bl_{ix} \ bl_{iy}]^T$). Le déplacement de ce point L $[\delta_{Lx} \ \delta_{Ly}]^T$ est tout d'abord exprimé en fonction des déplacements de la structure élémentaire du haut (à laquelle il appartient), donnant l'équation (3.6). Étant donné que cette structure élémentaire est articulée autour d'un point fixe (et non connectée à un module bistable), l'équation peut être simplifiée avec l'utilisation d'une matrice

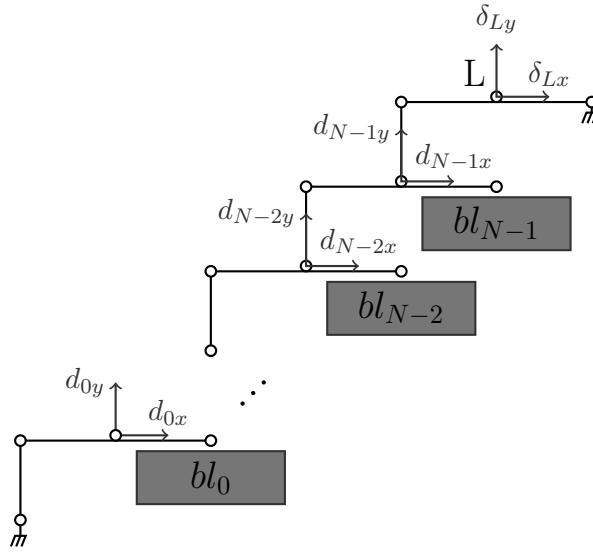


FIGURE 3.4 – Schéma cinématique de la structure en escalier de la partie gauche.

jacobienne carrée de dimension 2, ne dépendant que du déplacement du point A (de déplacement $[d_{N-1x} \ d_{N-1y}]^T$) de cette première structure élémentaire.

$$\begin{bmatrix} \delta_{Lx} \\ \delta_{Ly} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{N-1x} \\ d_{N-1y} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

En associant cette équation à l'équation régissant l'étage du dessous, il en résulte :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta_{Lx} \\ \delta_{Ly} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} & 1 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{N-2x} \\ d_{N-2y} \\ bl_{N-1x} \\ bl_{N-1y} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{N-2x} \\ d_{N-2y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{N-1x} \\ bl_{N-1y} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

En itérant de la même manière jusqu'au dernier étage du bas nous obtenons alors une expression représentant le déplacement du point L en fonction des déplacements générés par chacun des modules de la partie gauche du microrobot.

$$\begin{bmatrix} \delta_{Lx} \\ \delta_{Ly} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^{N-1-i} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{ix} \\ bl_{iy} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Où les bl_{ix} et bl_{iy} sont les déplacements générés suivant les axes X_0 et Y_0 respectivement par le module bistable bl_i ($0 \leq i \leq N-1$ numérotés du bas vers le haut).

De la même manière, l'équation de la partie droite du microrobot (possédant également N modules) prend la forme suivante.

$$\begin{bmatrix} \delta_{Rx} \\ \delta_{Ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \begin{bmatrix} 0 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^{N-1-j} \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} br_{jx} \\ br_{jy} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Où les br_{jx} et br_{jy} sont les déplacements générés suivant les axes X_0 et Y_0 respectivement par le module bistable br_j ($0 \leq j \leq N-1$ numérotés du bas vers le haut).

3.3.3 Organe terminal

Intéressons nous maintenant à l'organe terminal (point E de la FIGURE 3.3b) dont le déplacement ($[\delta_x \ \delta_y]^T$) peut être exprimé en fonction des déplacements des points L ($[\delta_{Lx} \ \delta_{Ly}]^T$) et R ($[\delta_{Rx} \ \delta_{Ry}]^T$). Ce calcul est similaire à celui de la structure élémentaire développé au § 3.3.1. Conduisant à l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{L_3} & 1 & -\frac{L_2}{L_3} \\ \frac{L_3}{L_2} & 1 & -\frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{Lx} \\ \delta_{Ly} \\ \delta_{Rx} \\ \delta_{Ry} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3.4 Modèle géométrique direct

En combinant les équations (3.8), (3.9) et (3.10) nous pouvons finalement obtenir le modèle géométrique direct de ce microrobot. Il s'agit de l'équation représentant le déplacement de l'organe terminal du microrobot (point E $[\delta_x \ \delta_y]^T$) en fonction des états binaires (0 ou 1) des différents modules (bl_i et br_j). Le calcul de cette équation est détaillé dans (3.11).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{L_3} \\ \frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{Lx} \\ \delta_{Ly} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_2}{L_3} \\ -\frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{Rx} \\ \delta_{Ry} \end{bmatrix} \right) \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{L_3} \\ \frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^{N-i} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{ix} \\ bl_{iy} \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_2}{L_3} \\ -\frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \begin{bmatrix} 0 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^{N-j} \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} br_{jx} \\ br_{jy} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{L_3} \\ \frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2}\right)^{N-i} \begin{bmatrix} 0 & \frac{W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{ix} \\ bl_{iy} \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_2}{L_3} \\ -\frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2}\right)^{N-j} \begin{bmatrix} 0 & \frac{-W_1}{L_1} \\ 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} br_{jx} \\ br_{jy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Ajout des actionneurs

Nous constatons que les déplacements suivant l'axe X_0 (bl_{ix} et br_{jx}) sont supprimés de l'équation lors de la multiplication avec les matrices les précédant. Nous allons alors uniquement considérer un microrobot numérique dont les modules bistables ne génèrent un déplacement que suivant la direction Y_0 , comme celui présenté sur la FIGURE 3.2. Étant donné que tous les modules bistable d'un même robot génèrent le même déplacement Δ entre leurs deux états, nous pouvons introduire cette variable dans cette équation, en association avec les états binaires (bl_i et $br_j \in \{0; 1\}$) des différents modules. Ainsi, les bl_{ix} et br_{jx} sont nuls, et nous pouvons exprimer les bl_{iy} et br_{jy} par l'équation (3.12).

$$\begin{cases} bl_{ix} = 0 \\ br_{jx} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} bl_{iy} = \Delta \cdot bl_i \\ br_{jy} = \Delta \cdot br_j \end{cases} \quad (3.12)$$

Ceci nous conduit à l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} 1 & \frac{L_2}{L_3} \\ \frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2}\right)^{N-i} \begin{bmatrix} W_1 \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \Delta \cdot bl_i + \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_2}{L_3} \\ -\frac{L_3}{L_2} & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2}\right)^{N-j} \begin{bmatrix} -W_1 \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix} \Delta \cdot br_j \right) \quad (3.13)$$

Elle peut être représentée sous la forme d'une multiplication matricielle par l'équation (3.14).

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{L_2}{2L_3} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{L_3}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & -\left(\frac{1}{2}\right)^0 & \dots & -\left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \\ \left(\frac{1}{2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & \left(\frac{1}{2}\right)^0 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{N-1} \\ \vdots \\ bl_0 \\ br_{N-1} \\ \vdots \\ br_0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Afin d'obtenir un espace de travail carré (comme spécifié dans le cahier des charges), il est cependant nécessaire de faire une petite simplification qui consiste à dimensionner les poutres de l'organe terminal de telle sorte qu'elles fassent un angle de $\frac{\pi}{2}$ entre elles. Ainsi les longueurs L_3 et L_2 sont égales, résultant en $\frac{L_2}{L_3} = \frac{L_3}{L_2} = 1$. Il est par ailleurs possible d'imaginer des structures robotiques non symétriques, avec un nombre de modules différent dans la partie gauche de la structure et dans la partie droite. En supposant N_L modules à gauche et N_R modules à droite, l'équation finale du modèle géométrique direct du DiMiBot est exprimée dans (3.15).

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \begin{bmatrix} 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N_L-1} & -1 & \dots & -\left(\frac{1}{2}\right)^{N_R-1} \\ 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N_L-1} & 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N_R-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{N_L-1} \\ \vdots \\ bl_0 \\ br_{N_R-1} \\ \vdots \\ br_0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.4 Espace de travail

L'intérêt essentiel d'établir le modèle géométrique d'un robot réside dans le calcul de l'espace de travail de ce robot. Cet espace de travail représente une cartographie de toutes les positions atteignables par l'organe terminal du robot. Pour les robots traditionnels (utilisant des actionneurs continus) cet espace est représenté par une surface (ou un volume pour les robots générant un déplacement en trois dimensions), mais dans le cas des robots numériques, il s'agit d'une liste des points discrets atteignables (dans un plan pour le DiMiBot).

3.4.1 Espace de travail du VGT (macro)

Un constat fait lors de la conception des robots numériques à l'échelle macroscopique concerne la difficulté à calculer leur espace de travail. Cela résulte de la grande quantité de positions atteignables. Il n'est par exemple pas aberrant d'imaginer des robots numériques possédant 30 actionneurs numériques ou plus (générant $2^{30} \cong 10^9$ états atteignables) rendant difficiles le calcul et le stockage d'un si grand nombre de données. De nombreuses recherches ont été menées sur ces robots numériques à l'échelle macroscopique afin de développer des méthodes de calcul appropriées permettant d'obtenir des représentations approximatives. Ainsi Ebert-Uphoff et Chirikjian ont développé dans [38] un algorithme permettant d'obtenir une densité d'espace de travail de ce type de robot. Cela consiste à discréteriser l'espace de travail atteignable en un certain nombre de pixels (ou voxels pour des espaces de travail en trois dimensions) et calculer le nombre de positions atteintes dans chacun de ces pixels. Afin de réaliser une représentation visuelle de ce calcul, une couleur est attribuée à chaque pixel représentant le nombre de positions atteintes dans le pixel.

3.4.2 Visualisation de l'espace de travail du DiMiBot

Nous proposons de montrer l'espace de travail dans le cas du DiMiBot à 6 modules ($N_L = N_R = 3$). Cet espace de travail peut être directement calculé à partir de l'équation (3.15) représentant le modèle géométrique direct du microrobot. Cette équation prend

la forme suivant :

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_2 \\ bl_1 \\ bl_0 \\ br_2 \\ br_1 \\ br_0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Valeurs numériques utilisées

Fixons quelques valeurs numériques pour les différentes variables intervenant dans le calcul de ce modèle géométrique direct. Nous avons constaté que les dimensions des poutres de l'organe terminal (FIGURE 3.3b) n'ont pas d'influence sur ce calcul, le seul critère imposé est $\frac{L_3}{L_2} = 1$, c'est à dire que ces deux poutres forment un angle de $\frac{\pi}{2}$ entre elles afin d'assurer une forme carré à l'espace de travail. Pour les DiMiBots réalisés, les longueurs seront définies en fonction de la taille des autres éléments constituant la structure, nous choisissons ici une distance de 10 mm entre les points L et R .

Concernant les dimensions des structures élémentaires (FIGURE 3.3a), elles sont définies en fonction de la taille des modules bistables. Seule l'épaisseur de la poutre horizontale (dimension W_1) peut subir quelques modifications, cela sera d'ailleurs réalisé lors de l'étude du dimensionnement du microrobot au CHAPITRE 4. Pour un premier calcul de l'espace de travail atteignable, nous fixons les valeurs suivantes :

- $L_0 = 4,0$ mm
- $L_1 = 5,8$ mm
- $W_1 = 0,3$ mm

Chacun des 6 modules bistables utilisés dans cette structure génère le même déplacement entre les deux états, suivant la direction Y_0 . Ces modules développés par Chen *et al.* ont été fabriqués en différentes versions générant un déplacement de 20, 10 ou 5 μm . Dans le cas présent, nous utiliserons ceux générant un déplacement $\Delta = 10 \mu\text{m}$ pour ce calcul. L'espace de travail atteignable par ce microrobot est représenté sur la FIGURE 3.5.

3.4.3 Description de l'espace de travail du DiMiBot

Comme demandé par le cahier des charges, cet espace de travail est de forme carrée dans lequel tous les points sont répartis de manière homogène. La distance entre chaque point et ses plus proches voisins est la même pour tous les points. Cette distance représente la résolution du DiMiBot. Elle peut être calculée grâce au modèle géométrique direct. En observant le modèle géométrique direct, nous visualisons l'influence de chaque module sur le déplacement de l'organe terminal (exprimé dans le référentiel \mathcal{R}_0). Les modules de la partie gauche de la structure (les bl_i) génèrent un déplacement identique suivant les directions X_0 et Y_0 , tandis que les modules de droite (br_j) génèrent un déplacement opposé suivant ces deux directions. En introduisant un nouveau référentiel

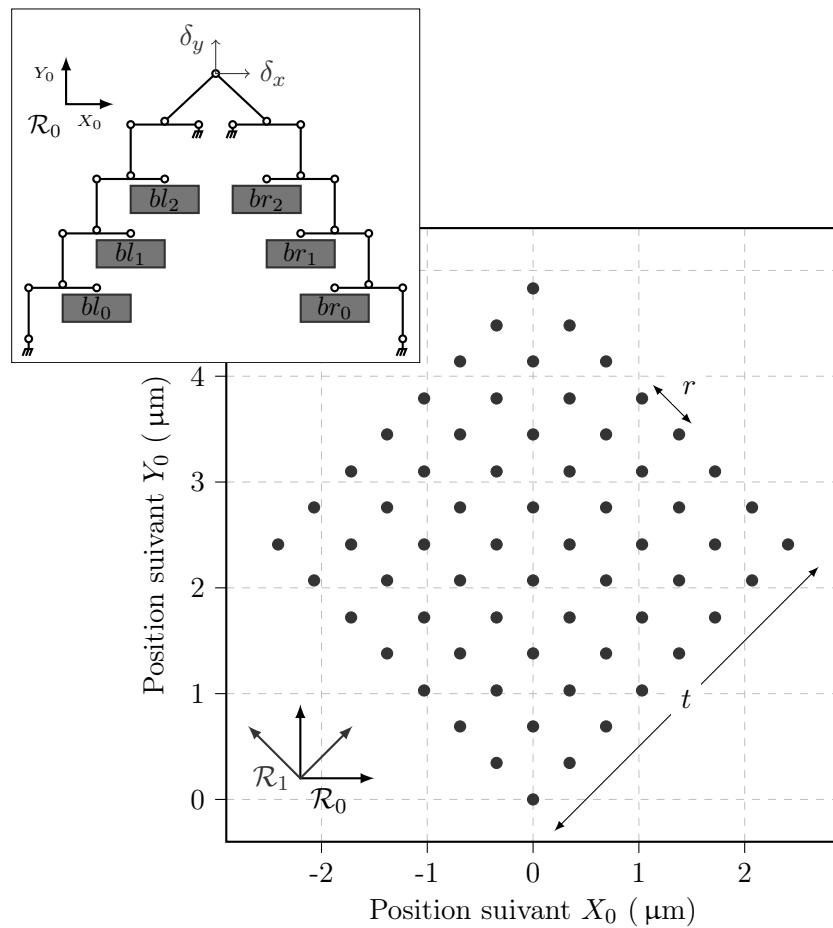


FIGURE 3.5 – Espace de travail atteignable par un microrobot numérique contenant 6 modules bistables, chacun générant un déplacement $\Delta = 10 \mu\text{m}$.

\mathcal{R}_1 correspondant à la rotation d'angle $\frac{\pi}{4}$ du référentiel \mathcal{R}_0 , ceci peut se traduire de la manière suivante :

- les modules bl_i génèrent un déplacement suivant X_1 ;
- les modules br_j génèrent un déplacement suivant Y_1 .

Il est également possible de distinguer que le module bl_i génère un déplacement deux fois plus petit que le déplacement du module bl_{i+1} (de même pour les modules du côté droit de la structure). Ainsi les déplacements les plus petits sont générés par les modules bl_0 et br_0 , dont le déplacement égale la résolution de l'espace de travail. Il est donc possible de mettre en équation la résolution de cet espace de travail (3.17).

$$r = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \frac{1}{4} \sqrt{2} \quad (3.17)$$

La taille de l'espace de travail peut également être calculée à partir du modèle géométrique direct par l'équation (3.18).

$$t = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \sum_{i=0}^2 \left(\frac{1}{2} \right)^i \sqrt{2} \quad (3.18)$$

Cet espace de travail d'un robot à 6 modules contient alors $64 (= 2^6)$ positions atteignables dans un carré de côté $t = 3,43 \mu\text{m}$, avec une résolution $r = 0,49 \mu\text{m}$ produisant un microrobot de résolution submicrométrique.

Validation

Afin de valider le modèle géométrique direct élaboré précédemment ainsi que l'espace de travail qui en résulte, une simulation géométrique de cette structure a été réalisée sous Matlab. Elle permet essentiellement de valider l'hypothèse d'approximation des petits angles. La comparaison entre l'espace de travail obtenu par simulation et celui obtenu par le modèle géométrique montre très peu de différences (une erreur maximale de 19 nm), prouvant la valeur de ce modèle géométrique.

3.4.4 Influence de la géométrie du DiMiBot sur son espace de travail

Observons maintenant l'influence de l'ajout de modules bistables à cette structure sur la génération de l'espace de travail. Dans l'exemple précédent, le robot symétrique à 6 modules génère un espace de travail carré possédant 64 positions distinctes atteignables. En augmentant la taille du robot de deux modules, tel que représenté sur la FIGURE 3.6, l'espace de travail généré est toujours carré et possède 256 positions distinctes atteignables ($= 2^8$).

L'espace de travail ainsi obtenu (avec 256 positions atteignables) est comparé à celui à 6 modules (générant 64 positions) sur la FIGURE 3.7. La taille de cet espace reste quasiment inchangé lors de cet ajout, seule sa résolution a été modifiée. En rajoutant deux modules supplémentaires (1 de chaque côté de la structure), la résolution de l'espace de travail devient deux fois meilleure (deux fois plus petite), conduisant alors à un espace

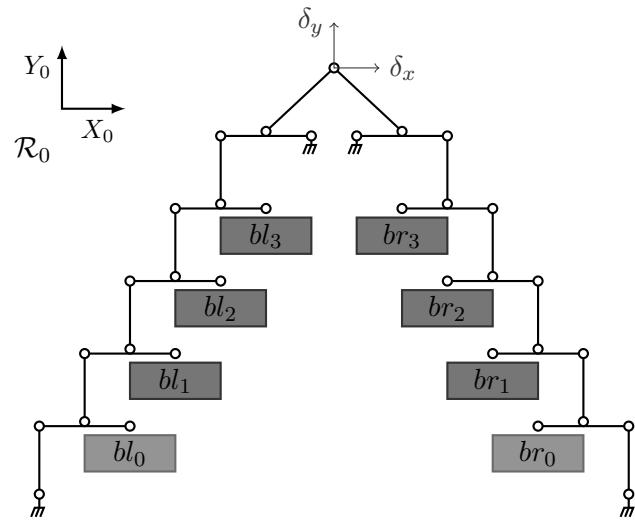


FIGURE 3.6 – Schéma cinématique de la structure robotique avec 8 modules.

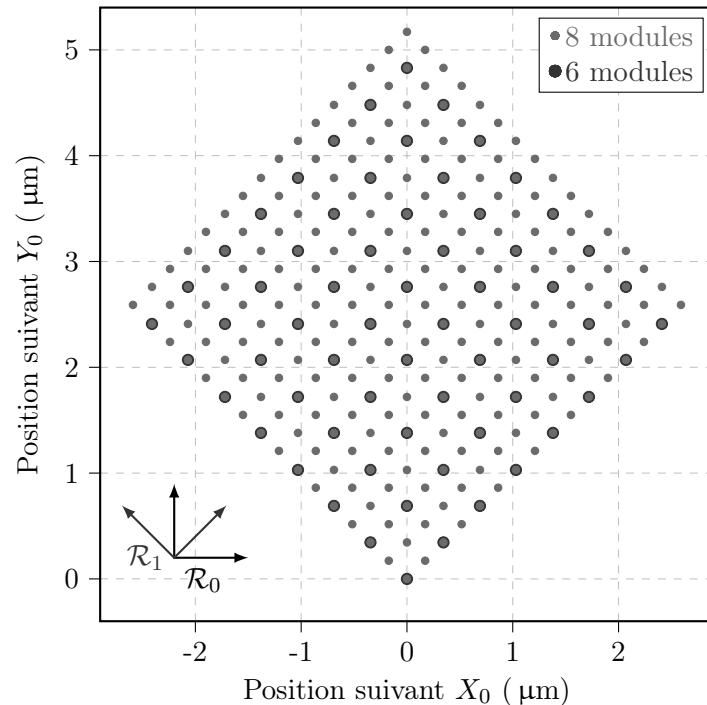


FIGURE 3.7 – Comparaison des espaces de travail générés par un robot à 6 modules et un robot à 8 modules.

de travail carré de $3,66 \mu\text{m}$ de côté avec une résolution de $\sim 244 \text{ nm}$. Par itération, il est théoriquement possible de diviser la résolution de l'espace de travail par 2 en ajoutant un étage supplémentaire à la structure (en ajoutant 1 module de chaque côté de la structure).

Par ailleurs, il est également possible d'imaginer une structure non symétrique dans laquelle le nombre de module à gauche (N_L) est différent du nombre de modules à droite (N_R). Par exemple, en n'ajoutant qu'un module supplémentaire d'un seul côté de la structure, la résolution n'est divisée par 2 que dans une direction de l'espace de travail (direction X_1 si le module est ajouté du côté gauche de la structure, et direction Y_1 si c'est du côté droit, voir FIGURE 3.8). Le modèle géométrique a d'ailleurs été calculé pour

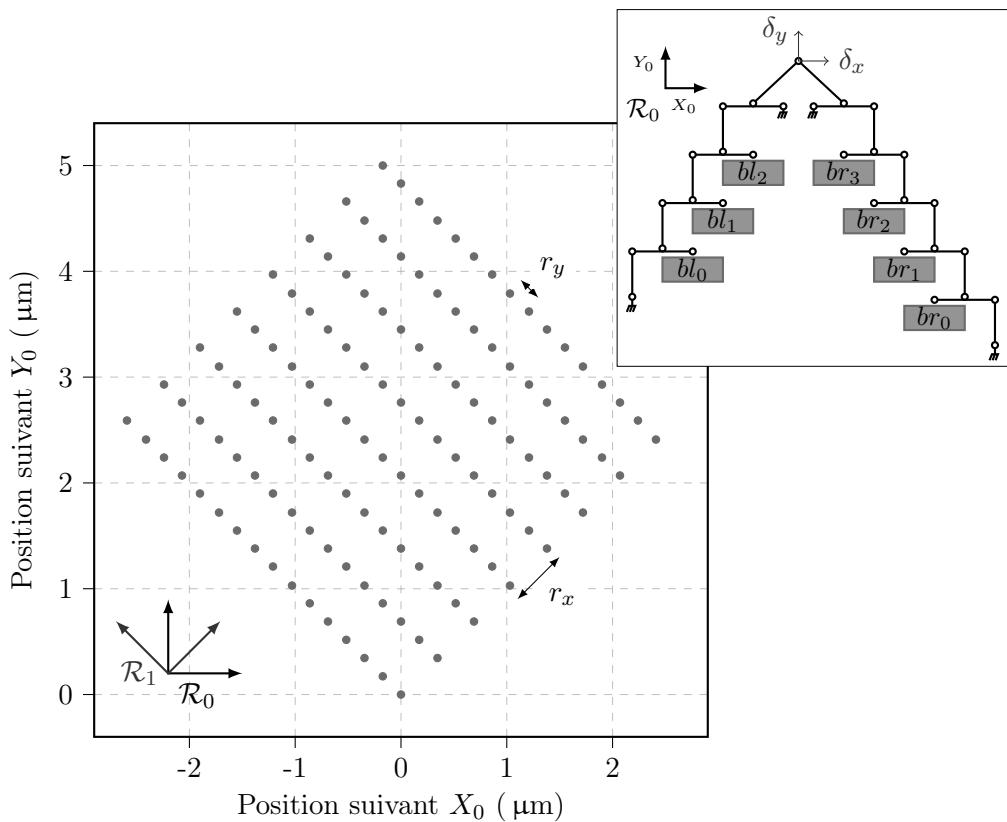


FIGURE 3.8 – Espace de travail d'un DiMiBot à 7 modules ($N_L = 3$ et $N_R = 4$).

un nombre quelconque de modules bistables, et la résolution ainsi que la taille de l'espace de travail peuvent être exprimées en fonction de N_L et N_R . Il est cependant important de noter que deux valeurs différentes de résolution seront calculées, une résolution suivant la direction X_1 (notée r_x) et une autre résolution suivant la direction Y_1 (notée r_y) calculés

avec (3.19).

$$\begin{cases} r_x = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{N_L-1} \sqrt{2} \\ r_y = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{N_R-1} \sqrt{2} \end{cases} \quad (3.19)$$

La taille de l'espace de travail sera également calculée suivant ces deux directions (3.20).

$$\begin{cases} t_x = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \sum_{i=0}^{N_L-1} \left(\frac{1}{2} \right)^i \sqrt{2} \\ t_y = \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \sum_{j=0}^{N_R-1} \left(\frac{1}{2} \right)^j \sqrt{2} \end{cases} \quad (3.20)$$

Distribution des points

Avant de comprendre comment sont organisés ces points dans l'espace de travail, il est nécessaire de fixer une convention de notation des états des modules. Afin de simplifier les notations, nous nous focaliserons ici sur un robot à 6 modules. En notant 0 la position basse (direction Y_0 négative) d'un module bistable, et 1 sa seconde position, alors le point correspondant au mot binaire 000000_b ¹ (tous les modules sont en position basse) se trouve à l'extrémité basse de l'espace de travail. Il est possible de numérotter chacune des positions atteignables en leur associant la valeur numérique décimale associée au mot binaire qui est à l'origine de cette position. Le mot binaire est constitué des états de tous les modules bistables du robot (ici 6 modules), dans l'ordre suivant : $bl_2bl_1bl_0br_2br_1br_0$. La numérotation correspondant à ces mots binaires est représentée sur la FIGURE 3.9

Afin de comprendre comment sont organisés ces points, prenons un exemple. Le point numéroté 29_d est obtenu à partir du mot binaire 011101_b , c'est à dire que les modules bistables bl_2 et br_1 sont en position basse tandis que les quatre autres sont placés en position haute. Chaque côté de la structure robotique permet de générer un déplacement dans une direction donnée, les modules du côté gauche de la structure permettent de générer un déplacement dans la direction X_1 tandis que les modules de droite génèrent un déplacement dans la direction Y_1 . Dans le cas du point numéroté 29_d , il se trouve dans la rangée² numérotée 3_d (correspondant à la première moitié du mot binaire, soit 011_b) suivant la direction X_1 et dans la rangée numérotées 5_d suivant la direction Y_1 (101_b). Le déplacement généré dans une direction est proportionnel au mot binaire correspondant aux états des modules du côté de la structure associée à cette direction. Le bit de poids faible correspondant au module à la base de la structure (bl_0 ou br_0), et le bit de poids fort correspond au module en haut de la structure (bl_{N_L-1} ou br_{N_R-1}).

3.5 Modèle géométrique inverse

Grâce à cette observation, il est possible de définir un modèle géométrique inverse simple de cette structure. Là où les robots numériques traditionnels font usage d'algorithmes complexes basés sur l'hyper-redondance de leur espace de travail et utilisent la

-
1. Le $*_b$ fait référence à une valeur binaire, tandis que le $*_d$ fait référence à une valeur décimale.
 2. Les rangées sont numérotées à partir de la valeur 0.

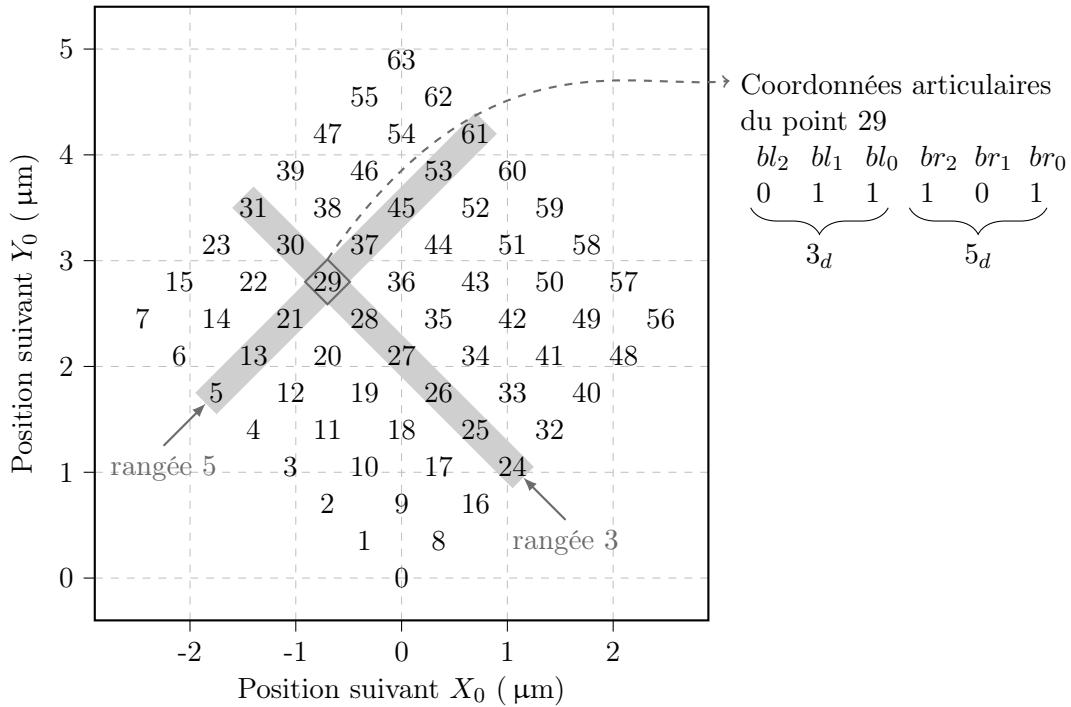


FIGURE 3.9 – Numérotation des points de l'espace de travail.

densité d'espace de travail [39, 92, 96], le DiMiBot, quant à lui, permet une modélisation simplifiée à la fois pour le modèle géométrique direct et pour le modèle géométrique inverse.

Pour cela nous nous plaçons dans le cas du robot tel qu'il a été présenté jusqu'à présent, c'est à dire permettant de générer l'espace de travail carré, non redondant, homogène, cartésien. Cela est traduit géométriquement par :

- les poutres de l'organe terminal font un angle de $\frac{\pi}{2}$ entre elles et sont de même longueur,
- tous les modules génèrent le même déplacement Δ suivant l'axe Y_0 ,
- les déplacements sont de petites amplitude par rapport aux longueurs L_1 et L_0 ,
- les distances BD et CD des structures élémentaires sont égales (FIGURE 3.3a).

Avec ces données, le formalisme du modèle géométrique inverse peut être calculé de manière simple. Le modèle géométrique inverse permet de calculer les états (0 ou 1) des différents modules permettant d'atteindre une position désirée de l'organe terminal. Dans ce calcul, les coordonnées de la position désirée ($[x_d \ y_d]^T$) seront exprimées dans le référentiel \mathcal{R}_1 . Le calcul du modèle géométrique inverse commence par trouver le point accessible le plus proche du point désiré. Pour cela il est nécessaire de connaître la résolution de l'espace de travail atteignable (préalablement calculée par le modèle géométrique direct du microrobot). La rangée la plus proche (suivant X_1 et Y_1) du point désiré est calculée par l'entier le plus proche des valeurs $\frac{x_d}{r_x}$ et $\frac{y_d}{r_y}$ respectivement. Les états des modules bistables peuvent maintenant être calculés en transcrivant le numéro

de rangée en valeur binaire. Chaque bit de chaque mot binaire correspond à l'état d'un module. La rangée suivant la direction X_1 correspond au mot binaire $bl_{N_L-1} \dots bl_1 bl_0$, et la rangée suivant la direction Y_1 correspond au mot binaires $br_{N_R-1} \dots br_1 br_0$.

Le calcul complet du modèle géométrique inverse peut alors être exprimé sous une formulation simple.

$$\begin{cases} bl_i = \left(\left(\left\lfloor \frac{x_d}{r_x} \right\rfloor \& 2^i \right) \neg = 0 \right) \\ br_j = \left(\left(\left\lfloor \frac{y_d}{r_y} \right\rfloor \& 2^j \right) \neg = 0 \right) \end{cases} \quad (3.21)$$

Dans cette équation :

- $\lfloor \cdot \rfloor$ est la fonction arrondi (entier le plus proche)
- x_d et y_d sont les coordonnées dans le repère \mathcal{R}_1 de la position à atteindre
- r_x et r_y sont les résolutions de l'espace de travail dans les directions X_1 et Y_1 respectivement
- $\&$ est la fonction booléenne ET bit à bit
- $\neg =$ est le test booléen de différence
- bl_i est l'état du module bl_i ($0 \leq i \leq N_L - 1$)
- br_j est l'état du module br_j ($0 \leq j \leq N_R - 1$)

Prenons un exemple pour illustrer le fonctionnement de ce modèle géométrique inverse. Dans le cas d'un robot possédant 4 modules bistables (2 de chaque côté de la structure) chacun générant un déplacement $\Delta = 10 \mu\text{m}$, la résolution de l'espace de travail atteignable est $r_x = r_y = 975 \text{ nm}$. Choisissons une position désirée $x_d = 0,4 \mu\text{m}$ $y_d = 2,7 \mu\text{m}$ dans le repère \mathcal{R}_1 . Les calculs de chacun des états permettant d'atteindre la position désirée sont détaillés dans l'ensemble d'équations (3.22).

$$\begin{aligned} bl_0 &= ((\left\lfloor \frac{0,4}{0,975} \right\rfloor \& 1) \neg = 0) & br_0 &= ((\left\lfloor \frac{2,7}{0,975} \right\rfloor \& 1) \neg = 0) \\ &= ((00 \& 01) \neg = 0) & &= ((11 \& 01) \neg = 0) \\ &= \mathbf{false} & &= \mathbf{true} \\ bl_1 &= ((\left\lfloor \frac{0,4}{0,975} \right\rfloor \& 2) \neg = 0) & br_1 &= ((\left\lfloor \frac{2,7}{0,975} \right\rfloor \& 2) \neg = 0) \\ &= ((00 \& 10) \neg = 0) & &= ((11 \& 10) \neg = 0) \\ &= \mathbf{false} & &= \mathbf{true} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Le mot binaire associé à la position désirée est 0011_b . La FIGURE 3.10 présente l'espace de travail de ce microrobot à 4 modules, ainsi que la comparaison entre la position désirée et la position finalement atteinte, calculée par le modèle géométrique inverse.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la cinématique du microrobot numérique Di-MiBot. Ce dernier est constitué d'une architecture parallèle symétrique possédant $2N$

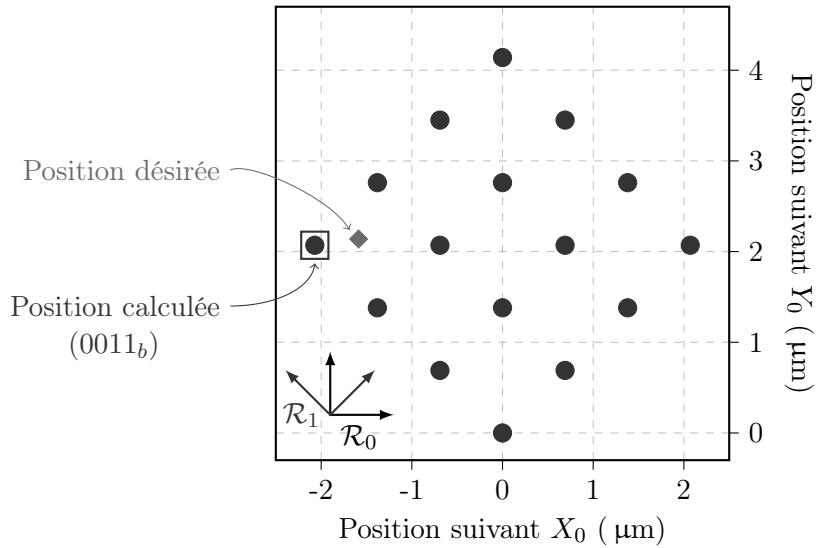


FIGURE 3.10 – Résultat du modèle géométrique inverse.

modules bistables (N de chaque côté de la structure). Dans le cas d'un robot possédant des modules bistables de déplacement $\Delta = 10 \mu\text{m}$ entre leurs deux positions, l'espace de travail atteignable est un carré de $\sim 4 \mu\text{m}$ de côté dont les positions atteignables sont uniformément réparties dans une configuration cartésienne. Le nombre de modules bistables utilisés dans ce microrobot n'agit pas sur la taille de cet espace de travail, mais sur sa résolution. Ainsi un robot possédant 6 modules a une résolution de $\sim 500 \text{ nm}$, et cette résolution est divisée par 2 à chaque fois que deux modules bistables sont ajoutés à la structure. Il génère un déplacement précis à l'échelle submicrométrique.

Cette architecture permet une représentation simple des modèles géométriques direct et inverse. Un modèle géométrique direct représenté sous la forme d'une multiplication par une matrice jacobienne a été établi, permettant un calcul rapide de cet espace de travail. Le modèle géométrique inverse nécessite très peu de ressources de calcul pour être effectué, ce qui sera utile pour les études de planifications de trajectoire étudiées au CHAPITRE 6.

Maintenant que le choix de la structure a été effectué, il est nécessaire de la convertir en véritable microrobot pouvant être microfabriqué. Ceci nécessite au préalable une phase de dimensionnement des différents éléments flexibles constituant cette structure.

Chapitre **4**

Dimensionnement du DiMiBot

Les architectures des microrobots et des microsystèmes en général font appel à des propriétés physiques rarement utilisées en robotique traditionnelle. À ces échelles, les structures flexibles sont préférées aux architectures articulées pour générer des déplacements d'une grande précision. Cette particularité nécessite une étude approfondie du dimensionnement de ces structures afin d'obtenir le comportement souhaité. Ce chapitre d'écrit l'étape de dimensionnement de l'architecture robotique que nous venons de définir.

Sommaire

4.1	Introduction	73
4.2	Articulations au sein de la structure flexible	74
4.2.1	Articulations flexibles	74
4.2.2	Articulations circulaires	75
4.3	Dimensionnement des modules bistables	77
4.3.1	Structure bistable	77
4.3.2	Stop-blocks	79
4.4	Architecture robotique flexible	79
4.4.1	Validation du modèle géométrique	81
4.4.2	Choix des paramètres	83
4.4.3	Dimensionnement des articulations flexibles	84
4.4.4	Dimensionnement des poutres pseudo-rigides	87
4.5	Force de maintien du DiMiBot	89
4.6	Analyse modale	92
4.7	Conclusion	93

4.1 Introduction

Le CHAPITRE 3 était consacré à la conception d'une cinématique de microrobot permettant l'association de plusieurs modules bistables. Cette première étude a permis la

définition d'un arrangement original de plusieurs modules bistables au sein d'une architecture robotique afin de répondre à un cahier des charges (§ 3.2.1), tout particulièrement concernant l'espace de travail discret générée. Grâce à cette cinématique, un espace de travail planaire, discret de résolution submicrométrique est généré par l'organe terminal du microrobot. Les dimensions d'un tel microrobot, ainsi que ses caractéristiques d'utilisation (aucun capteur n'est nécessaire pour générer des déplacements précis à l'échelle submicrométrique) en font une structure adaptée à des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage en milieux confinés.

L'étude que nous décrivons à présent consiste à concevoir la structure réelle du microrobot. L'utilisation d'articulations traditionnelles au sein de cette structure robotique est prohibée pour deux raisons. Premièrement ceci nécessiterait d'effectuer une étape d'assemblage de cette structure qui serait fastidieuse et délicate, et nécessiterait l'utilisation de structures de positionnement capables de grande précision de positionnement. Le deuxième problème concerne les limitations physiques de ces liaisons articulées. Bien que certains microrobots font usage de ce type d'articulations inspirées de l'échelle macroscopique (tel le *pocket delta* de la société Asybil, ou le *mm3a* de la société Kleindiek Nanotechnik présentés au CHAPITRE 1), l'approche top-down de conception des micro-robots (miniaturisation des robots traditionnels) est rarement une solution avantageuse. Ces articulations sont en effet la cause de nombreuses limitations (friction, lubrification, jeu mécanique, ...) qui peuvent être ignorées ou compensées par certaines lois de commande à l'échelle macroscopique, mais qui sont fortement perturbatrices et sources d'erreurs à l'échelle micrométrique, engendrant alors une grande perte de précision. Afin de prévenir ce genre de problèmes, il convient d'éviter l'utilisation de structures articulées, et d'utiliser des structures monolithiques flexibles, comme il a été spécifié dans le cahier des charges.

Les structures monolithiques flexibles sont, en effet, fort répandues à l'échelle micrométrique. Elles ont fait l'objet de recherches approfondies afin d'optimiser leurs performances.

4.2 Articulations au sein de la structure flexible

4.2.1 Articulations flexibles

Une particularité des structures déformables est l'utilisation de moyens d'articulation spécifiques. À la différence des mécanismes conventionnels dont les articulations font intervenir la mobilité relative entre deux structures rigides, de nombreux mécanismes flexibles sont monolithiques et utilisent la déformation élastique des articulations flexibles inhérentes à la structure pour en contrôler les déformations [49]. L'utilisation de telles articulations fournit la possibilité aux structures flexibles de réaliser des déplacements similaires aux architectures traditionnelles. Nous les retrouvons dans un grand nombre de microsystèmes, et particulièrement dans les microrobots et micropositionneurs présentés au CHAPITRE 1.

Ces articulations flexibles sont essentiellement représentées sous trois formes principales : rectangulaire, circulaire, et ovale (FIGURE 4.1), chacune fournissant des propriétés différentes de déformation. Les articulations rectangulaires subissent des déformations sur toute la longueur de l'articulation, permettant de supporter des déformations importantes, et générant des contraintes internes relativement faibles. Les articulations circulaires au contraire concentrent les déformations en une zone localisée, produisant des contraintes importantes. Ils sont cependant très utilisés car leur comportement (rotation autour d'une zone localisée fixe) est très similaire à celui des liaisons pivot utilisées pour articuler des structures assemblées. Les articulations de forme ovale quant à elles constituent un compromis entre ces deux types d'articulations flexibles, assurant une déformation légèrement étendue et des contraintes relativement distribuées.

Dans le cas de l'architecture microrobotique étudiée ici, le choix s'est porté sur l'utilisation de articulations flexibles circulaires, permettant d'assurer un comportement similaire à la structure du schéma cinématique établie. Ces types d'articulations flexibles circulaires sont en effet fortement utilisés puisqu'elles possèdent un comportement relativement intuitif, similaire aux articulations robotiques traditionnelles.

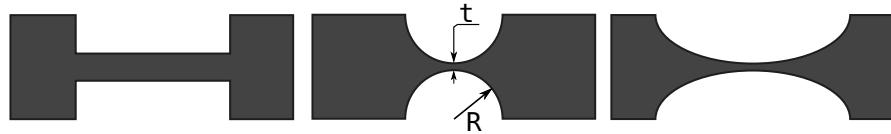


FIGURE 4.1 – Différents types d'articulations flexibles : rectangulaire, circulaire et ovale.

4.2.2 Articulations circulaires

Les articulations flexibles circulaires ont fait l'objet de nombreuses études pour l'utilisation dans des microsystèmes. Yong *et al.* [108] comparent les différents modèles ayant déjà été établis [69, 77, 101] pour de telles articulations flexibles avec des résultats obtenus par simulation en éléments finis ainsi qu'avec des résultats expérimentaux. Ce type d'étude permet d'établir un domaine de validité de chacun de ces modèles. Le critère utilisé pour identifier ce domaine est le rapport t/R (R étant le rayon de l'articulation circulaire et t la largeur du col de l'articulation, voir FIGURE 4.1). Les résultats de cette étude ont, par la suite, été utilisés par Yong *et al.* pour la conception d'une plateforme de nanopositionnement planaire 2 ddl utilisant deux actionneurs piézoélectriques [106] ainsi qu'un micropositionneur 3 ddl [107] utilisant trois actionneurs piézoélectriques (FIGURE 4.2).

Koseki *et al.* proposent également dans [57] une approche matricielle pour le calcul de la cinématique de structures faisant intervenir des articulations flexibles de type circulaire. Cette méthode est illustrée par un micropositionneur générant un déplacements spatial suivant 3 ddl, utilisant des actionneurs piézoélectriques et une structure parallèle.

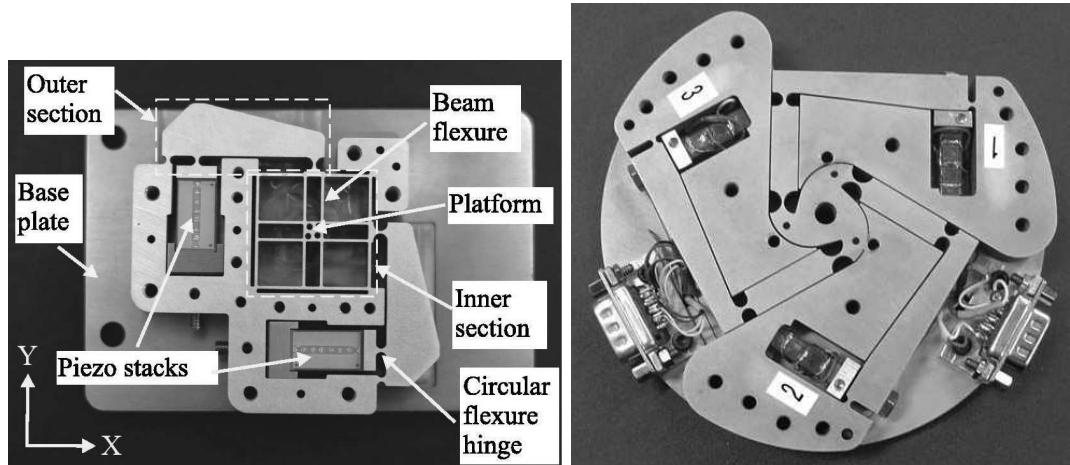


FIGURE 4.2 – Exemples de plateformes de micropositionnement planaire utilisant des actionneurs piézoélectriques et une structure flexible constituée d'articulations circulaires, fabriquées par usinage traditionnel [106, 107].

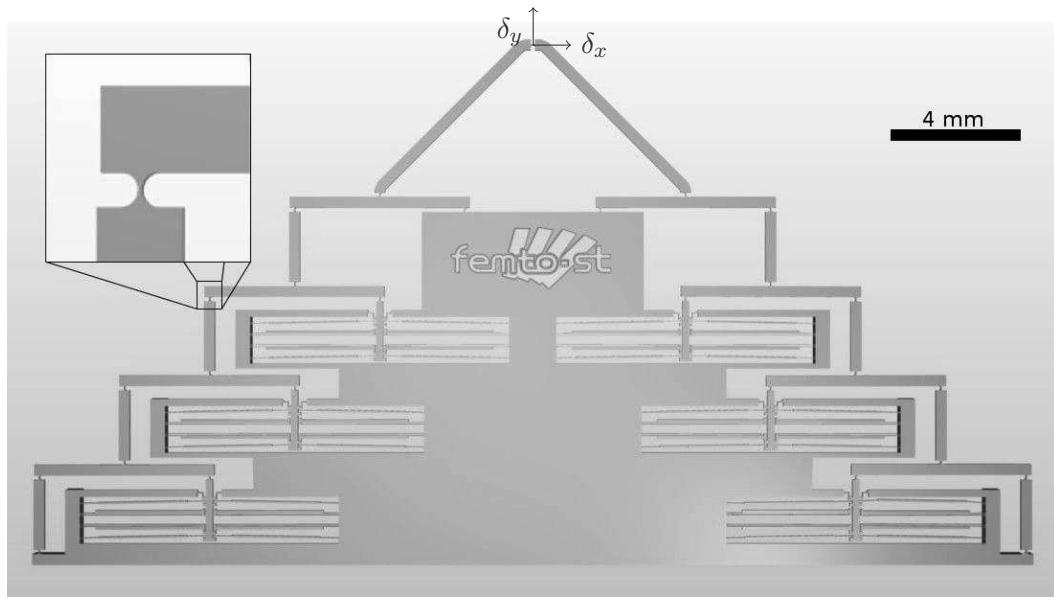


FIGURE 4.3 – Visualisation CAO d'un DiMiBot à 6 modules bistables.

La conception du DiMiBot fait également intervenir des articulations flexibles circulaires pour articuler l'architecture flexible du microrobot. Une visualisation CAO du microrobot monolithique contenant 6 modules bistables¹ et l'architecture flexible constituée de poutres et d'articulations circulaires est présentée sur la FIGURE 4.3. Avant de débuter l'étape de dimensionnement des différents éléments de cette architecture flexible, il est nécessaire de connaître avec précision les caractéristiques techniques (force, déplacement, ...) des éléments qui vont interagir avec elle. Il convient alors d'étudier les modules bistables utilisés.

4.3 Dimensionnement des modules bistables

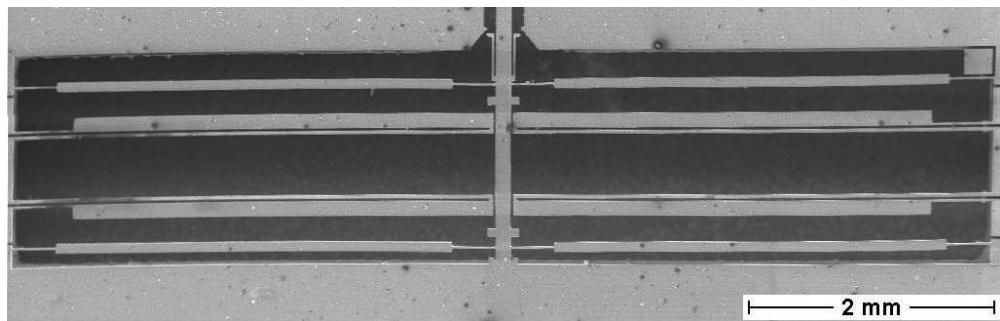


FIGURE 4.4 – Image MEB d'un module bistable.

Comme expliqué au CHAPITRE 2, les modules bistables sont constitués de trois éléments : une structure mécanique bistable, deux paires d'actionneurs électro-thermiques et deux stop-blocks (FIGURE 4.4). Les dimensions de cet *actionneur binaire* sont d'environ 10×2 mm pour une épaisseur des parties mobiles de $100 \mu\text{m}$. La structure mécanique bistable étant l'élément central de ce module, c'est elle qui en régit le comportement.

4.3.1 Structure bistable

Détaillons ici la composition et le fonctionnement de cette structure bistable (FIGURE 4.5). Cette dernière est constituée de quatre poutres pseudo-rigides articulées par des articulations flexibles rectangulaires. Chaque poutre est connectée d'un côté à un cadre fixe et de l'autre côté au shuttle, partie mobile générant le déplacement de sortie du module bistable. Les caractéristiques dimensionnelles intervenant dans l'optimisation du dimensionnement de ce module bistable sont les suivantes :

- longueur et largeur des poutres pseudo-rigides ;
- longueur et largeur des articulations flexibles rectangulaires ;
- amplitude de la structure bistable.

1. Nous nous intéresserons dans ce chapitre essentiellement sur le dimensionnement d'un DiMiBot à 6 modules.

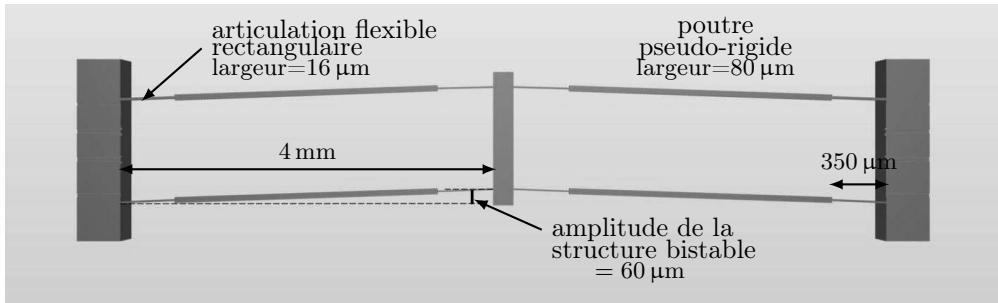


FIGURE 4.5 – Dimensions de la structure mécanique bistable d'un module bistable.

Ce type de structure est très utilisé dans les microsystèmes dits numériques (voir CHAPITRE 2) pour générer des déplacements entre deux positions prédéfinies. Des simulations en éléments finis de cette structure bistable ont été réalisées avec le logiciel Ansys afin d'en caractériser le comportement. Différentes dimensions de la structure bistable peuvent être utilisées, conduisant à des comportements légèrement différents. L'optimisation des dimensions de ce module bistable fut étudié lors d'une thèse précédente. Les dimensions choisies pour cette structure sont représentées sur la FIGURE 4.5. Le comportement d'une telle structure est caractérisé par la rapport force/déplacement du shuttle dont la courbe est représentée sur la FIGURE 4.6 pour les dimensions choisies.

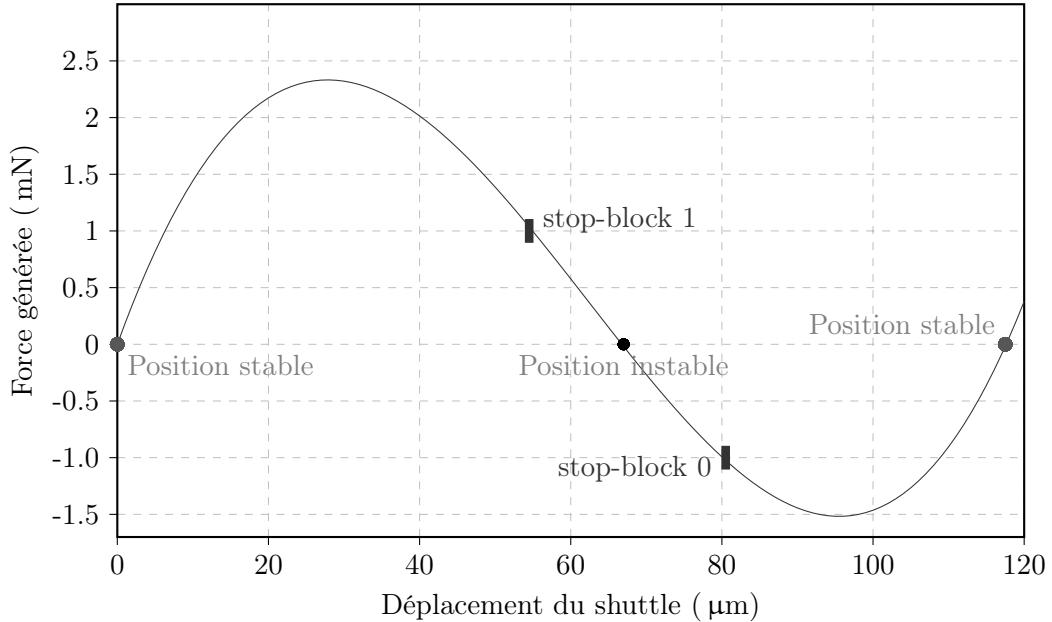


FIGURE 4.6 – Relation force/déplacement de la structure bistable, et positionnement des stop-blocks pour obtenir un déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$ et des forces de blocage de 1 mN.

Un déplacement total de $117 \mu\text{m}$ est obtenu entre les deux positions stables de la structure bistable. Afin de basculer de la première position stable à la deuxième, il est nécessaire d'appliquer un déplacement supérieur à $67.5 \mu\text{m}$ (afin de dépasser la position instable) et une force supérieur à $2,35 \text{ mN}$. Cependant, ces deux positions naturellement stables n'assurent aucune robustesse au maintien en position, cela se traduit par la génération d'une force nulle par le shuttle (voir FIGURE 4.6). Le moindre petit effort appliqué sur le shuttle en génère alors le déplacement. Ces deux positions sont donc fortement sensibles aux perturbations extérieures et sujettes à des erreurs de positionnement.

4.3.2 Stop-blocks

Afin d'assurer une robustesse des positions stables de cet actionneur binaire, des stop-blocks ont été ajoutés de part et d'autre de la position instable afin de limiter le déplacement du shuttle à une valeur désirée et générer deux nouvelles positions stables robustes. La position des stop-blocks présentée sur la FIGURE 4.6 permet une amplitude de déplacement de $25 \mu\text{m}$ entre les deux nouvelles positions et assure une robustesse de $1,0 \text{ mN}$ pour chacune de ces positions. Les actionneurs binaires que nous allons utiliser pour la conception du microrobot numérique génèrent alors un déplacement plus grand entre leurs deux états atteignables que ceux utilisés lors de l'étude cinématique effectuée au CHAPITRE 3 (qui était fixé à $10 \mu\text{m}$). Cette différence n'a cependant pas de grande influence sur les résultats ultérieurs, les déplacements sont toujours suffisamment petits pour effectuer l'approximation des petits angles, et les modèles géométriques direct et inverse sont toujours valides. L'espace de travail sera alors de plus grande taille, avec une résolution moindre.

Cependant, après microfabrication le shuttle se trouve dans la position naturellement stable de gauche (coordonnées $(0,0)$ de la FIGURE 4.6), en dehors de l'intervalle entre les deux nouvelles positions stables utilisées. Il est nécessaire de l'insérer entre les deux stop-blocks avant de pouvoir utiliser ce module bistable. Cette étape préalable à l'utilisation est appelée activation du module. Elle n'est réalisée qu'une seule fois, et consiste à pousser manuellement le shuttle au delà du premier stop-block. Afin de permettre la réalisation de cette opération aisément, le stop-block 1 possède une forme particulière constituée de structures flexibles (FIGURE 4.7) autorisant l'insertion du shuttle, tandis que le stop-block 0 n'est constitué que d'une simple butée limitant le déplacement du shuttle. Par convention, nous appelons les deux positions atteignables du module bistable état 0 et état 1. L'état 1 étant celui obtenu lorsque le shuttle est bloqué par le stop-block 1 (parfois nommée position haute), et l'état 0 (position basse) correspond à la position du shuttle bloqué par le stop-block 0 (FIGURE 4.7).

4.4 Architecture robotique flexible

La structure flexible utilisée pour transmettre le déplacement de ces modules bilstables (au nombre de 6 dans le microrobot pris en exemple ici) jusqu'à l'organe terminal est l'élément essentiel du microrobot, dont le dimensionnement doit être réalisé minutieusement. Cette structure flexible fait donc l'objet de simulations en éléments finis

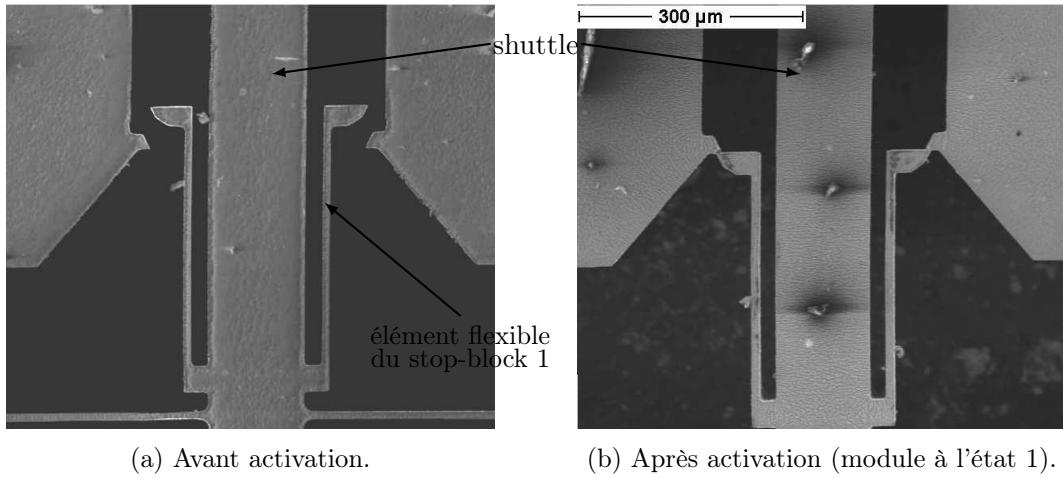


FIGURE 4.7 – Image MEB du stop-block 1 avant et après activation.

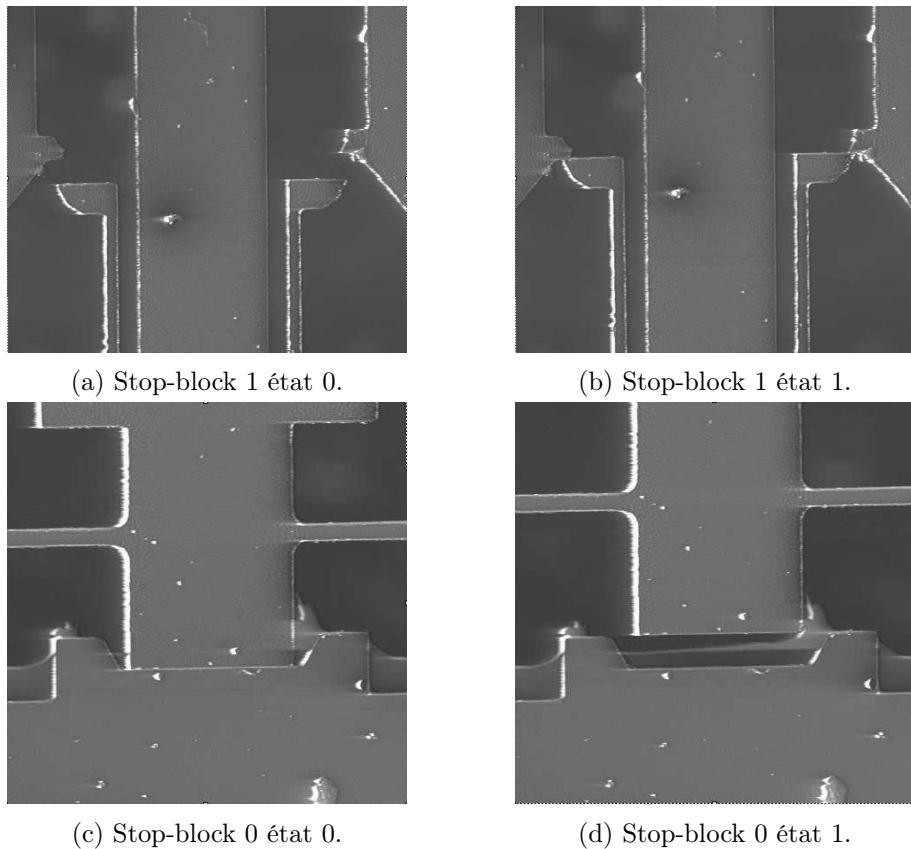


FIGURE 4.8 – Position du shuttle par rapport au stop-block 1 ((a) et (b)) et par rapport au stop-block 0 ((c) et (d)).

approfondies. Elle est constituée de poutres pseudo-rigides articulées entre elles par des articulations flexibles circulaires (voir FIGURE 4.3), reproduisant le schéma cinématique du microrobot établi au CHAPITRE 3. Le comportement de cette structure est simulé avec le logiciel Ansys, afin d'en effectuer un dimensionnement permettant le comportement attendu. Des détails concernant ces simulations sont exposés en ANNEXE A. L'implantation de cette structure dans le logiciel Ansys est montrée sur la FIGURE 4.9. Cette simulation servira dans un premier temps à vérifier que l'espace de travail généré par une telle structure coïncide avec celui calculé grâce à la modélisation du chapitre précédent.

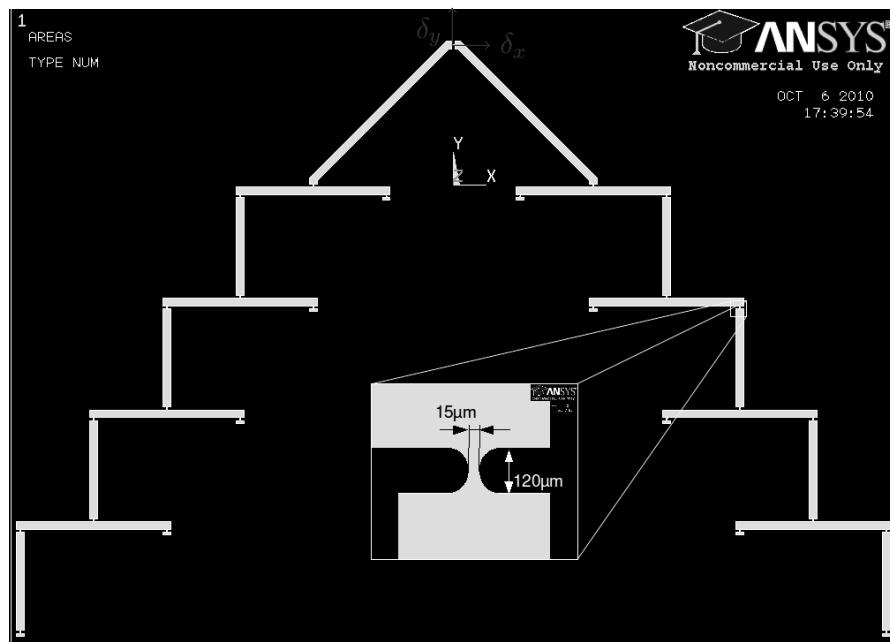


FIGURE 4.9 – Image de simulation de la structure flexible du DiMiBot à 6 modules sous Ansys.

4.4.1 Validation du modèle géométrique

Lors de cette étude, le déplacement des 6 modules bistables est simulé pour les 64 états atteignables par ce microrobot. Le déplacement appliqué à la structure flexible par chaque module bistable est constitué de l'addition du déplacement d'activation ($55 \mu\text{m}$ dans le cas des modules bistables utilisés) et du basculement d'un état stable à l'autre (de déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$). Le déplacement de l'organe terminal du robot est alors mesuré pour les 64 états atteignables. Ces mesures sont retranscrites dans la FIGURE 4.10 et comparées aux déplacements calculés par le modèle géométrique direct. Les paramètres de la structure flexible utilisés pour cet exemple ont été choisis après plusieurs simulations (détailées plus loin). Les valeurs de ces paramètres sont les suivantes :

- poutres pseudo-rigides de largeur $W = 300 \mu\text{m}$;

- articulations circulaires de rayon $R = 60 \mu\text{m}$;
- articulations circulaires de largeur de col $t = 15 \mu\text{m}$;
- épaisseur de la structure de $100 \mu\text{m}$;
- module d'Young du silicium $E = 1,69 \text{ GPa}$;
- coefficient de Poisson $\nu = 0,23$.

Nous pouvons prédire la résolution théorique R_{th} de l'espace de travail obtenu grâce au modèle géométrique. Elle est donnée par (4.1) où $W_1 = W + 2 \times R$ et L_1 est tel que défini au CHAPITRE 3.

$$\begin{aligned}
 R_{th} &= \frac{\Delta}{4} \left(\frac{W_1}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^{N_R-1} \sqrt{2} \\
 &= \frac{25}{4} \left(\frac{300 + 2 \times 60}{5800} + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sqrt{2} \\
 &= 1,265 \mu\text{m}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

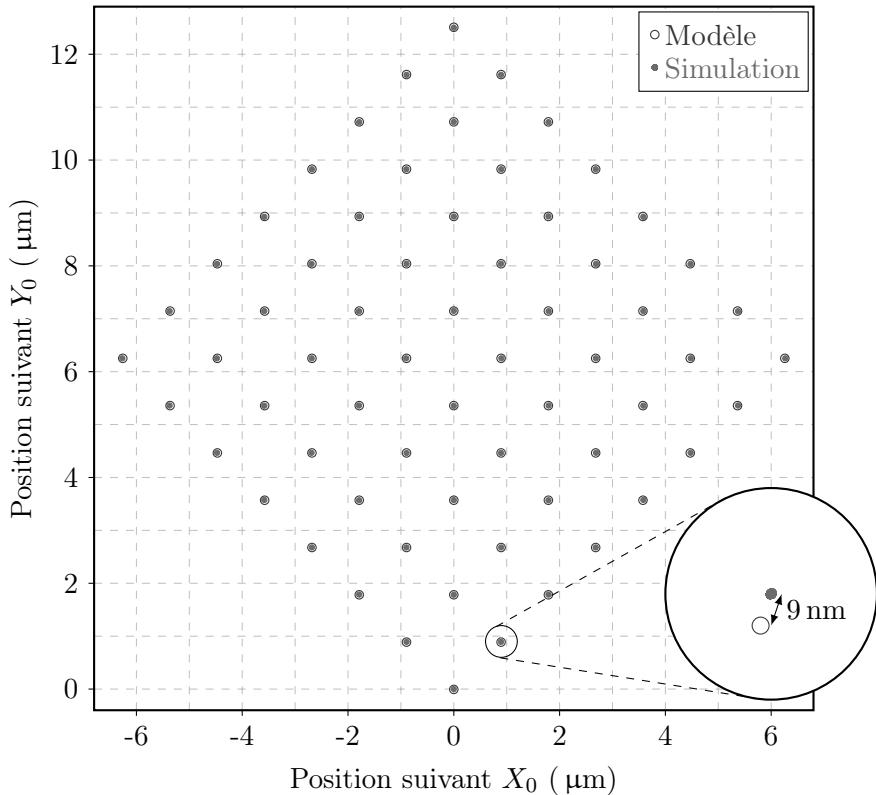


FIGURE 4.10 – Comparaison entre l'espace de travail obtenu par modélisation et celui obtenu par simulation pour un robot de 6 modules générant chacun un déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$.

La résolution de l'espace de travail mesurée par la simulation en éléments finis est $R_{sim} = 1,264 \mu\text{m}$. Elle est donc identique. En analysant les données de la FIGURE 4.10,

nous constatons que ces deux espaces de travail sont quasiment superposables. L'erreur maximale entre une position obtenue par simulation et la même obtenue par le modèle est de 9 nm, ce qui est négligeable pour une résolution de l'espace de travail de l'ordre du micromètre.

Cette première simulation a permis d'effectuer une première validation du modèle géométrique direct calculé au CHAPITRE 3. La légère erreur (9 nm) entre les deux espaces de travail n'est pas perturbante pour un microrobot générant un espace de travail d'une résolution de 1,265 μm , mais cela deviendrait inacceptable pour des *nanorobots* atteignant des résolutions de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Le plus grand robot réalisable pour lequel les hypothèses de calcul du modèles géométrique direct permettent d'obtenir des résultats correctes (erreur de calcul $<10\%$ de la résolution) est un robot possédant 10 modules bistables générant chacun un déplacement de 25 μm entre leurs états (permettant d'obtenir une résolution de 158 nm).

4.4.2 Choix des paramètres

Pour cette partie de l'étude concernant le dimensionnement de la structure flexible, seuls certains paramètres seront étudiés afin d'optimiser le comportement de cette architecture robotique.

Le choix du matériau utilisé pour la fabrication du microrobot numérique s'étant porté sur le silicium – avec lequel les dimensionnements des actionneurs thermiques et de la structure bistable ont été réalisés – le module d'Young restera inchangé. Ce matériau est en effet très utilisé à l'échelle micrométrique grâce à ses propriétés mécaniques et électriques permettant de réaliser des structures électro-mécaniques monolithiques. Étant par ailleurs connectée de manière monolithique aux modules bistables, pour lesquels l'épaisseur des parties mobiles a été définie à 100 μm , cette architecture robotique possède la même épaisseur qui restera inchangée au cours de cette étude. Les seuls paramètres sur lesquels nous focaliserons le dimensionnement sont :

- le rayon des articulations flexibles R ;
- la largeur de col des articulations flexibles t ;
- la largeur des poutres pseudo-rigides W .

Afin de trouver les valeurs optimales pour ces paramètres, nous considérerons deux critères résultant de la simulation permettant de quantifier les différentes configurations de dimensionnement. L'objectif principal étant ici de trouver un dimensionnement de la structure flexible qui soit physiquement réalisable. Le premier critère concerne les caractéristiques mécanique de l'architecture utilisée. Lors des déplacements des modules bistables, les déformations de la structure flexible engendrent des contraintes internes à cette structure qui ne doivent pas dépasser un certain seuil, correspondant à la limite de rupture du matériau utilisé (silicium). Le deuxième critère concerne l'interaction réciproque entre la structure flexible et les modules bistables utilisés. Lorsque ces modules changent d'état ils génèrent un déplacement et une déformation de la structure flexible. À la manière d'un ressort déformé, cette structure tend à retourner vers sa position de repos (telle qu'elle a été fabriquée), et génère alors une force de rappel sur ces modules bistables. Afin d'assurer un bon fonctionnement du microrobot, les forces générées par

la structure flexible ne doivent pas dépasser les forces acceptables par les modules bistables (force de blocage) établie à 1 mN par le positionnement des stop-blocks. Dans le cas contraire, il serait possible de voir certains modules changer d'état, engendrant des déplacements non désirés du microrobot. Nous définirons alors comme résultats des simulations ces deux critères (force et contrainte) afin de s'assurer qu'ils restent dans des limites acceptables lors du basculement des modules bistables.

4.4.3 Dimensionnement des articulations flexibles

Deux paramètres interviennent dans le dimensionnement des articulations flexibles, leur rayon et leur largeur. Les valeurs de ces deux paramètres étudiés ici varient de la manière suivante :

- rayon des articulations flexibles $R \in \{20; 30; 40; 60; 100 \mu\text{m}\}$,
- largeur des articulations flexibles $t \in \{10; 15; 20 \mu\text{m}\}$.

La simulation en éléments finis de l'architecture flexible pour chacun des 64 états atteignables est effectuée pour les différentes configurations des paramètres des articulations flexibles. Les résultats de ces simulations sont ensuite traités afin de définir l'influence de ces paramètres et d'en trouver une valeur optimale. Le premier critère étudié pour ce dimensionnement concerne les forces appliquées par la structure flexible sur chacun des 6 modules bistables du microrobot.

Force générée sur les modules

Deux cas distincts sont considérés lors de la mesure de forces appliquées sur un module bistable, dépendant de l'état dans lequel se trouve le module subissant cet effort. Lors de l'étude précédente concernant les modules bistables (§ 4.3), les stop-blocks ont été positionnés de telle sorte que la force de blocage soit la même pour les deux états ($= 1 \text{ mN}$). Cependant une configuration différente de la position des stop-blocks est également envisageable, et générera des forces de blocage différentes pour chaque état. Il est donc nécessaire d'observer les forces générées sur un module bistable en fonction de l'état dans lequel il se trouve (état 0 ou état 1), afin de considérer une optimisation du positionnement des stop-blocks. La FIGURE 4.11 représente le maximum des forces appliquées sur l'ensemble des 6 modules pour tous les états atteignables par le DiMiBot en fonction des deux paramètres des articulations flexibles (leur rayon R et leur largeur t), dans le cas $W = 300 \mu\text{m}$. Sur cette figure sont représentées deux séries de courbes. L'une en traits pleins représente la force maximale appliquée sur un module étant à l'état 0 (position basse), tandis que la série de courbes en pointillés représente la force maximale appliquée sur un module étant à l'état 1 (position haute).

Les forces observées ont une valeur positive lorsqu'elles s'opposent à la stabilité de la position actuelle (ne devant donc pas dépasser la valeur de $+1,0 \text{ mN}$). Ainsi dans le cas des modules à l'état 1, la force appliquée sur le module étant négative, elle tend à fortifier la stabilité de la position en tirant le shuttle vers le stop-block 1. Cette force (dans la direction $+Y_0$) est due au déplacement généré lors de la phase d'activation (ici déplacement de $55 \mu\text{m}$). Dans le cas des modules dans l'état 0, le déplacement supplémentaire

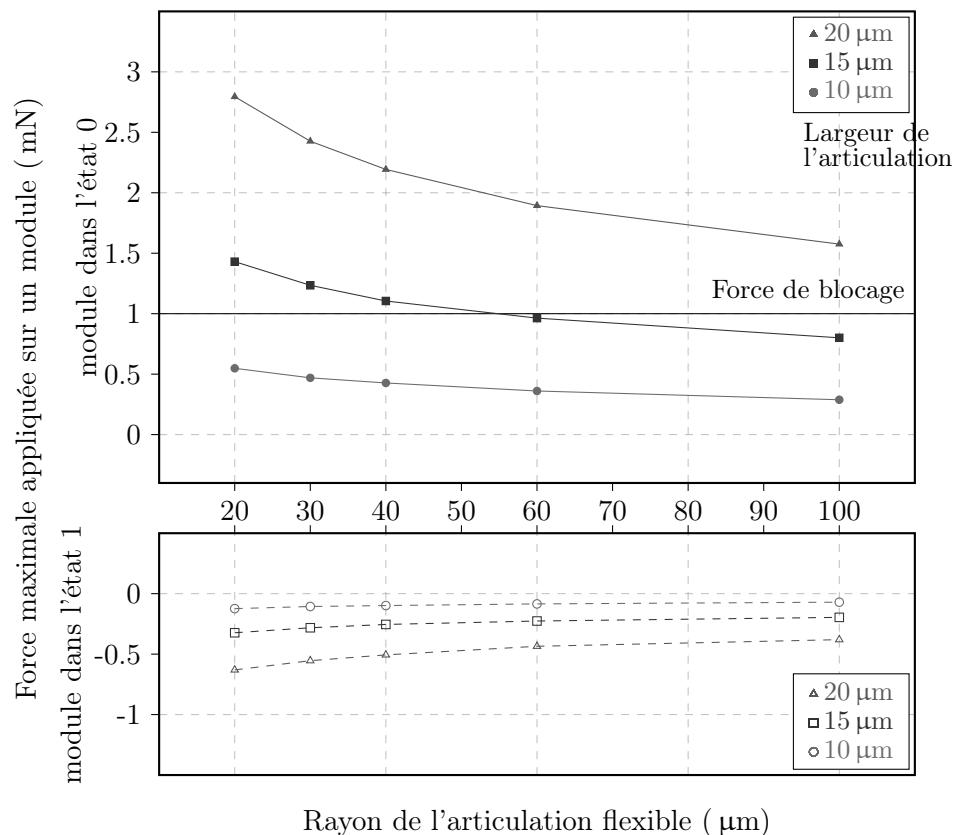


FIGURE 4.11 – Force maximale appliquée par la structure mécanique flexibles sur l'ensemble des modules bistables lorsqu'ils sont à l'état 0 (en trait plein) et à l'état 1 (en pointillés).

TABLEAU 4.1 – Distribution des forces (mN) sur les différents modules bistables, dans le cas de microrobots possédants des nombres différents de modules bistables.

	bl_0	bl_1	bl_2	bl_3	br_3	br_2	br_1	br_0
8 Modules	0,915	0,757	0,722	0,778	0,778	0,722	0,757	0,915
6 Modules	0,963	0,849	0,847	-	-	0,847	0,849	0,963
4 Modules	1,061	0,986	-	-	-	-	0,986	1,061

du shuttle de $\Delta = 25 \mu\text{m}$ (distance entre les deux état du module) s'ajoute à l'activation et génère une force de rappel dans la même direction ($+Y_0$), mais qui, cette fois, s'oppose à la stabilité, puisque tendant à éloigner le shuttle du stop-block 0. C'est donc cet état 0 qui pose le plus de contraintes. Étant donné que la force de blocage acceptable par le module bistable est de 1 mN, nous observons que l'utilisation d'articulations circulaires de rayon $R = 60 \mu\text{m}$ et de largeur $t = 15 \mu\text{m}$ est juste à la limite du dimensionnement théoriquement acceptable.

Observons maintenant la distribution des forces sur les différents modules constituant le microrobot (TABLEAU 4.1). Ces forces sont données dans le cas de l'utilisation d'articulations flexibles de dimensions $15 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ pour des DiMiBot contenant 4, 6 et 8 modules bistables. Les modules subissant l'effort le plus important sont ceux du bas de la structure (bl_0 et br_0). Nous constatons alors que pour des microrobots possédant des dimensions similaires, le nombre de modules utilisés influence la distribution des forces. En augmentant le nombre de modules bistables au sein du microrobot numérique, les forces se répartissent sur un plus grand nombre de modules et deviennent alors plus faibles, contribuant alors à la génération de robots plus robustes. Il est important de noter, d'après le TABLEAU 4.1, qu'avec de telles dimensions un microrobot possédant 4 modules bistables (ou moins) ne permettrait pas un comportement correct avec un tel dimensionnement. En effet les efforts générés sur les modules bl_0 et br_0 sont supérieurs à la force de blocage de ces modules. Il conviendra alors d'ajuster ces paramètres afin d'obtenir un comportement acceptable des microrobots possédant un faible nombre de modules.

Contrainte mécanique interne à la structure

Le deuxième critère pris en compte pour le dimensionnement de cette architecture concerne les contraintes internes à la structure flexible. Ces contraintes sont localisées dans les articulations flexibles circulaires, et ne doivent pas dépasser le seuil critique. Les valeurs limites de contraintes internes acceptables pour le silicium ne sont pas définies de manière précise dans la littérature, cependant il est de coutume d'utiliser la valeur de 1 GPa comme seuil critique. La valeur maximale présente dans la structure bistable pour les 64 configurations possibles est représentée sur la FIGURE 4.12 en fonction des dimensions des articulations flexibles. Ces résultats montrent que la valeur critique de 1 GPa n'est pas le critère le plus contraignant entrant dans le dimensionnement du Di-

MiBot. Il est cependant possible d'observer dans la littérature des seuils atteignant des valeurs jusqu'à 0,5 GPa afin de pouvoir garantir la tenue de la structure. Cette valeur permettrait alors de fixer une limite, une nouvelle fois, sur les dimensions $15 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ des articulations flexibles.

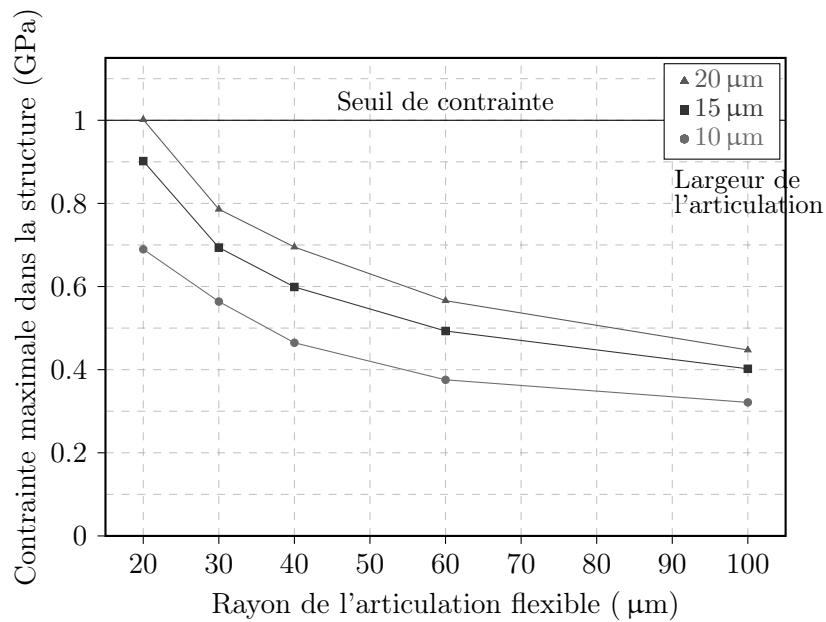


FIGURE 4.12 – Contrainte mécanique maximale appliquée au sein de la structure flexible en fonction des articulations flexibles.

4.4.4 Dimensionnement des poutres pseudo-rigides

Le dernier paramètres que nous allons étudier est la largeur W des poutres pseudo-rigides constituant cette architecture robotique. Nous effectuons les mêmes simulations que précédemment en fixant les paramètres des articulations flexibles à 15 μm de largeur et 60 μm de rayon, et en faisant varier la largeur des poutres $W \in \{150; 300; 600 \mu\text{m}\}$. Les résultats sont reportés sur la FIGURE 4.13 où la contrainte mécanique maximale au sein de la structure est représentée sur le graphique de gauche, et la force maximale générée sur l'ensemble des modules bistables est représentée sur le graphique de droite. Nous constatons que ce paramètre a relativement peu d'influence en comparaison des paramètres liés aux articulations flexibles. Il est cependant préférable d'utiliser une largeur de poutre inférieure à 450 μm afin de ne pas dépasser le seuil de la force de blocage des modules bistables. Nous conserverons alors la valeur de 300 μm .

L'ensemble des critères conduit alors à une valeur limite unique de dimensions des articulations flexibles à utiliser pour assurer la faisabilité du microrobot et son comportement cohérent avec le cahier des charges fixé. Étant amené à être microfabriqué par

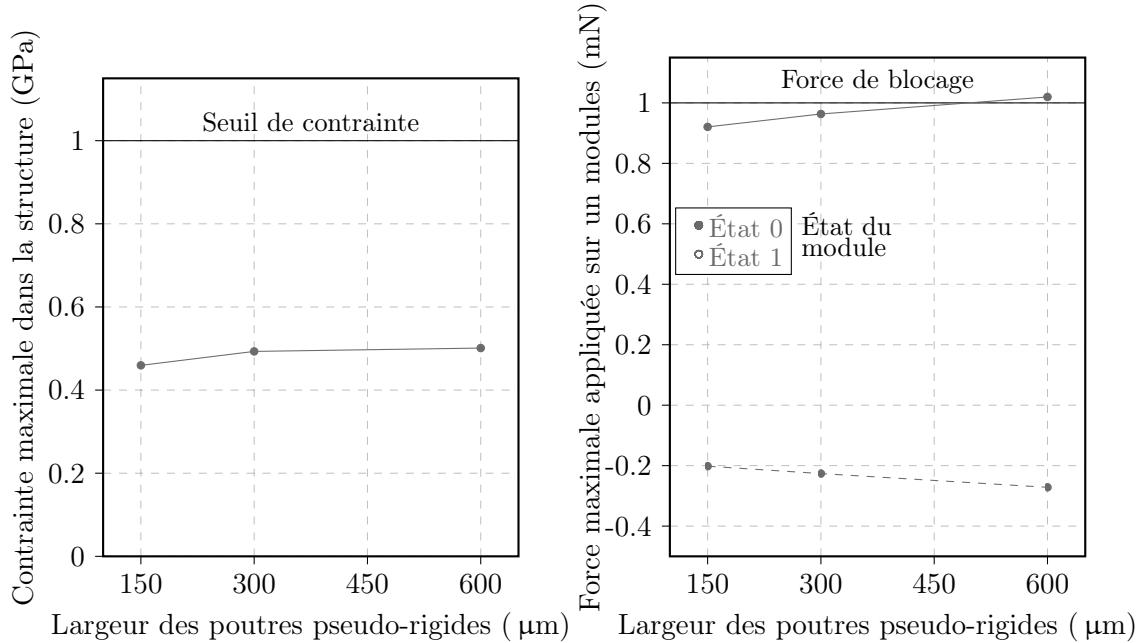


FIGURE 4.13 – Résultat des simulations effectuées concernant le dimensionnement des poutres pseudo-rigides, contraintes internes à gauche et force appliquée sur les modules à droite.

des procédés de microfabrication en salle blanche, les dimensions de ce microrobot ne doivent cependant pas être trop petites pour que les défauts de fabrication fréquents (surgravure, ...) ne soient pas source de difficultés majeures. Des défauts de microfabrication de l'ordre du micromètre peuvent ainsi être observés. Il est préférable de réaliser des structures possédant des éléments de largeur supérieure à $10\text{ }\mu\text{m}$ afin d'éviter tout risque lié à ces défauts. Afin de prévenir les problèmes de force pour des robots possédant un faible nombre de modules, il est également préférable de choisir une taille des articulations flexibles adaptée aux limites obtenues par simulation.

Nous nous intéresserons alors par la suite à des structures contenant des articulations flexibles de dimensions $12\text{ }\mu\text{m}$ de largeur et $60\text{ }\mu\text{m}$ de rayon.

4.5 Force de maintien du DiMiBot

Le choix des dimensions des différents éléments de la structure flexible (articulations et poutres) nous a permis de fixer une structure assurant un bon fonctionnement du microrobot. Nous nous proposons maintenant de poursuivre le dimensionnement pour l'obtention de la force de maintien du DiMiBot. Il s'agit de la capacité du robot à conserver son positionnement lorsqu'il est en présence de forces extérieures appliquées sur l'outil qui est fixé à son organe terminal.

Tout robot évoluant dans un environnement donné est amené à rencontrer des forces perturbatrices lors de la manipulation d'objets ou toute autre tâche qui lui est assignée. Elles sont générées par les objets à manipuler, par les obstacles dans le scénario de micromanipulation, mais également par la physique du micromonde tel que les forces électrostatiques ou d'adhésion. Cela est particulièrement le cas lors de micromanipulation en milieu humide où seul l'organe terminal du robot et l'outil sont immersés. Ces forces sont alors générées par l'interface entre les deux milieux. De telles forces perturbatrices peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de la dizaine de millinewtons à l'échelle du micromonde. Elles accentuent les déformations de la structure flexible et engendrent une augmentation des forces subies par les différents modules bistables.

L'objectif de l'étude de robustesse consiste à observer le comportement du microrobot numérique lorsqu'il est en présence de telles forces perturbatrices. Cela permet de définir un seuil de force applicable sur l'organe terminal pour lequel le comportement du microrobot reste acceptable. Ceci est essentiellement observé par le biais de l'augmentation des contraintes internes à la structure et des forces générées sur l'ensemble des modules bistables. Pour cela une série de simulations en éléments finis, pour lesquelles différentes forces extérieures sont appliquées à l'extrémité de l'organe terminal du microrobot, sont réalisées. Les mêmes données que lors des précédentes études ont résulté de cette simulation (force générée sur les modules et contraintes internes), pour une configuration unique des articulations flexibles ($12\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$) et des poutres ($300\text{ }\mu\text{m}$ de largeur). Ces forces extérieures sont appliquées suivant les directions $+X_1$ et $-X_1$ à l'extrémité de l'organe terminal, et prennent les valeurs 1, 2, 5 et 10 mN successivement.

La structure étant symétrique, des forces appliquées suivant la direction $\pm Y_1$ donnent les mêmes résultats de simulation, aussi seule la direction X_1 est simulée.

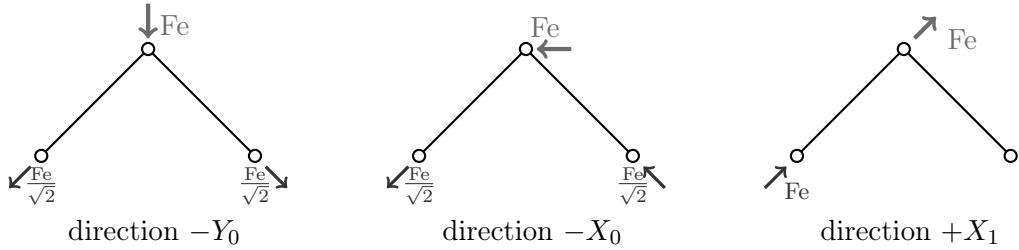


FIGURE 4.14 – Répartition d'une force extérieure Fe sur les deux côtés de la structure flexible en fonction de sa direction.

Comme le montre la FIGURE 4.14, l'application d'une force suivant une direction $\pm X_0$ ou $\pm Y_0$ est répartie suivant les deux côtés du DiMiBot, tandis qu'une force appliquée suivant la direction $\pm X_1$ (ou $\pm Y_1$) est entièrement transmise à un seul côté de la structure. Ce dernier cas présente la transmission maximale de force vers la structure et les modules bistables – générant une perturbation maximale du comportement du microrobot – c'est sur ce type d'effort que nous concentrons notre étude.

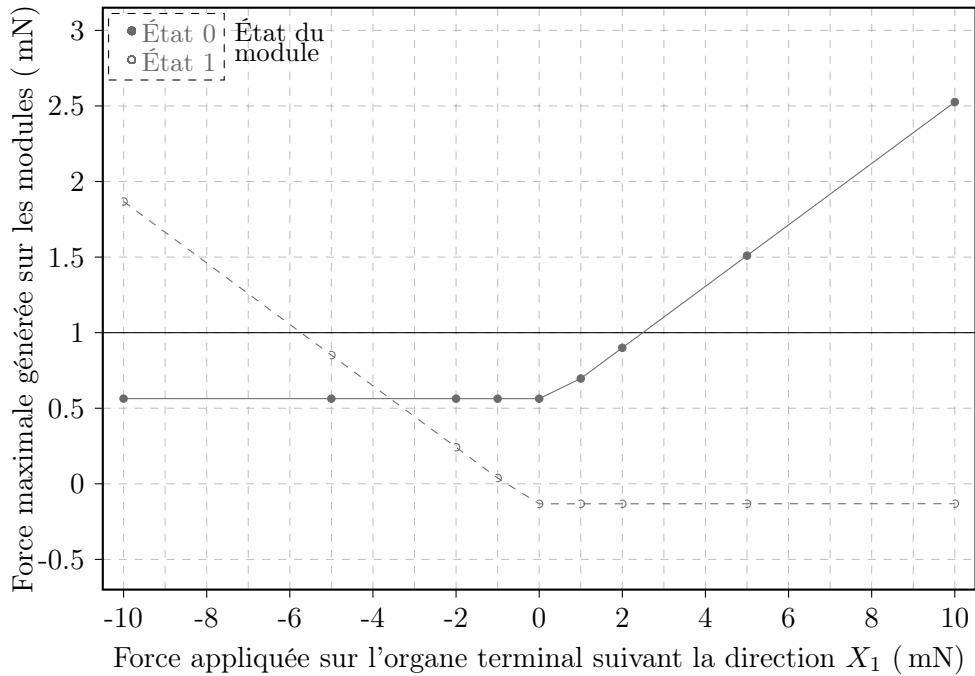


FIGURE 4.15 – Force maximale appliquée sur les modules bistables en fonction de la force extérieure appliquée sur l'organe terminal.

La FIGURE 4.15 représente les résultats de ces simulations, liés à la distribution des forces générées sur les modules bistables. La courbe en trait plein représente la force maximale appliquée sur un module à l'état 0 tandis que la courbe en pointillés représente la force maximale appliquée sur un module à l'état 1. Nous constatons qu'une force externe appliquée dans la direction $+X_1$ s'oppose à la stabilité des modules à l'état 0, tandis qu'une force externe de direction $-X_1$ perturbe uniquement la stabilité des modules à l'état 1.

Une autre constatation qui peut être effectuée concerne le module sur lequel la force maximale est générée. Nous avons vu précédemment (sur le TABLEAU 4.1) que les modules subissant les efforts les plus grands sont les modules du bas de la structure robotique (bl_0 et br_0). Cependant cette courbe montre que à partir d'un certain seuil de force extérieure, cette force maximale générée se déplace sur les modules du haut de la structure (les plus proches de l'organe terminal). Cela est faiblement perceptible sur la courbe en trait plein de la FIGURE 4.15 sur laquelle nous pouvons distinguer une différence de pente de la courbe entre les zones $0 \sim 1 \text{ mN}$ et $1 \sim 10 \text{ mN}$. Démontrant alors qu'à partir d'une force extérieure de 2 mN , les forces maximales générées passent du module bl_0 au module bl_2 (dans le cas d'une force appliquée suivant la direction $+X_1$).

Le résultat essentiel de cette courbe représente le seuil maximal de force applicable sur l'organe terminal du DiMiBot avant qu'il ne provoque le basculement involontaire d'un module du robot. Dans le cas d'une telle structure, il est alors possible de supporter une force extérieure de $2,5 \text{ mN}$ avant que la force générée sur un module bistable ne dépasse la force de blocage.

Ces forces externes appliquées sur l'organe terminal du microrobot n'ont, en revanche, quasiment aucune influence sur l'évolution des contraintes mécaniques internes à la structure mécanique. L'application d'une force de 10 mN provoque une évolution de la contrainte maximale inférieure à $0,5 \text{ MPa}$, évolution quasiment imperceptible et donc négligeable.

Déplacement de l'espace de travail

Intéressons nous maintenant à l'influence de telles forces externes sur la génération de l'espace de travail à l'extrémité de l'organe terminal du microrobot. En supposant que tous les modules soient suffisamment robustes, cette force exerce un déplacement global de l'espace de travail dans la direction de la force appliquée. Ce déplacement, linéairement dépendant de la force appliquée, est représenté sur la FIGURE 4.16 pour des largeurs de poutres différentes, l'une de $300 \mu\text{m}$ de largeur et l'autre deux fois plus épaisse. Comme le démontre cette figure, ce déplacement est essentiellement dû à la déformation des poutres pseudo-rigides constituant la structure flexible, et plus particulièrement des deux poutres constituant l'organe terminal du microrobot.

Ce déplacement peut paraître comme une source d'erreur de positionnement, mais il peut tout aussi bien être bénéfique aux applications de tâches de micromanipulation. En effet, il assure au microrobot une certaine compliance, permettant d'éviter la rupture

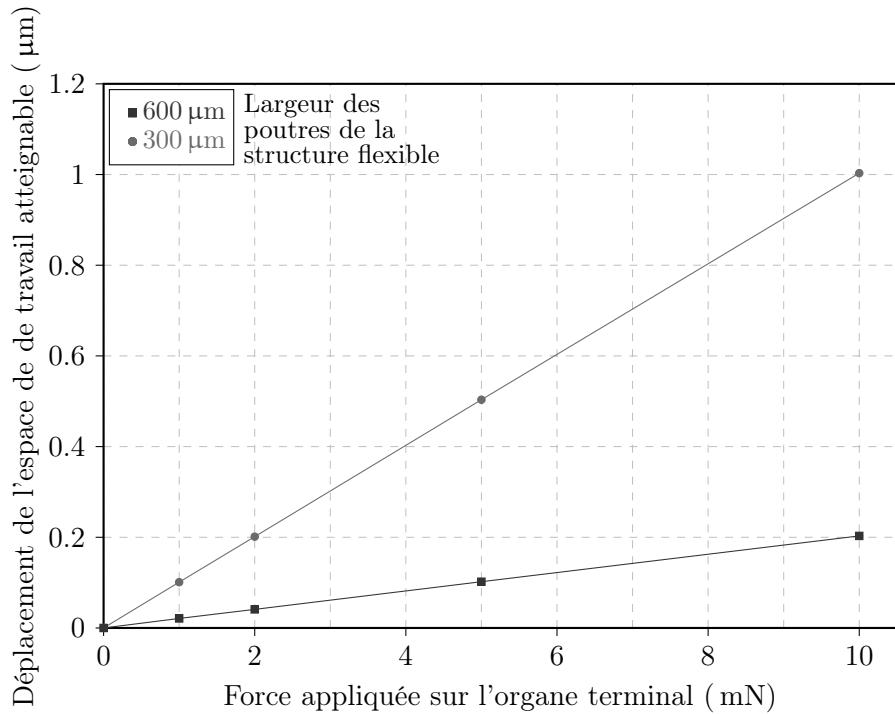


FIGURE 4.16 – Déplacement maximal de l'organe terminal lors de l'application d'une force extérieure sur celui-ci.

du robot lorsqu'il rencontre des obstacles. La présence d'un élément compliant dans le système de micro-assemblage présente également un avantage dans l'assemblage de microsystèmes, permettant de compenser certains défauts de précisions de positionnement.. Cette technique est utilisée par exemple par Das *et al.* [26] qui utilisent des micro-objets (micromiroirs) possédant une partie compliant permettant de les insérer dans des encoches par emboîtement élastique, malgré les défauts de précision du micromanipulateur, afin de réaliser un microspectromètre.

Le déplacement de l'organe terminal du microrobot atteignant $0,25 \mu\text{m}$ pour une force de $2,5 \text{ mN}$ n'est donc pas un réel problème en considérant une résolution de l'espace de travail de $1,265 \mu\text{m}$.

4.6 Analyse modale

Une autre étude pouvant intervenir dans la qualification de la robustesse du microrobot concerne l'analyse du comportement vibratoire de sa structure. Cette étude est nécessaire afin d'assurer la sécurité du microrobot lors de son utilisation dans certaines machines (dont l'utilisation génère un bruit mécanique) ainsi que lors de sa fabrication (ayant lieu au sein de machines).

Nous procédons alors à une analyse modale de la structure précédemment modélisée sous Ansys pour en visualiser les différents modes de résonance. Une représentation en perspective de la structure déformée pour les quatre premiers modes de résonance est visible sur la FIGURE 4.17. Ces résultats montrent un premier mode de flexion hors plan apparaissant à la fréquence de 1243 Hz, ce qui est compatible avec une utilisation en machine, dont les vibrations générées sont autour de 300 Hz.

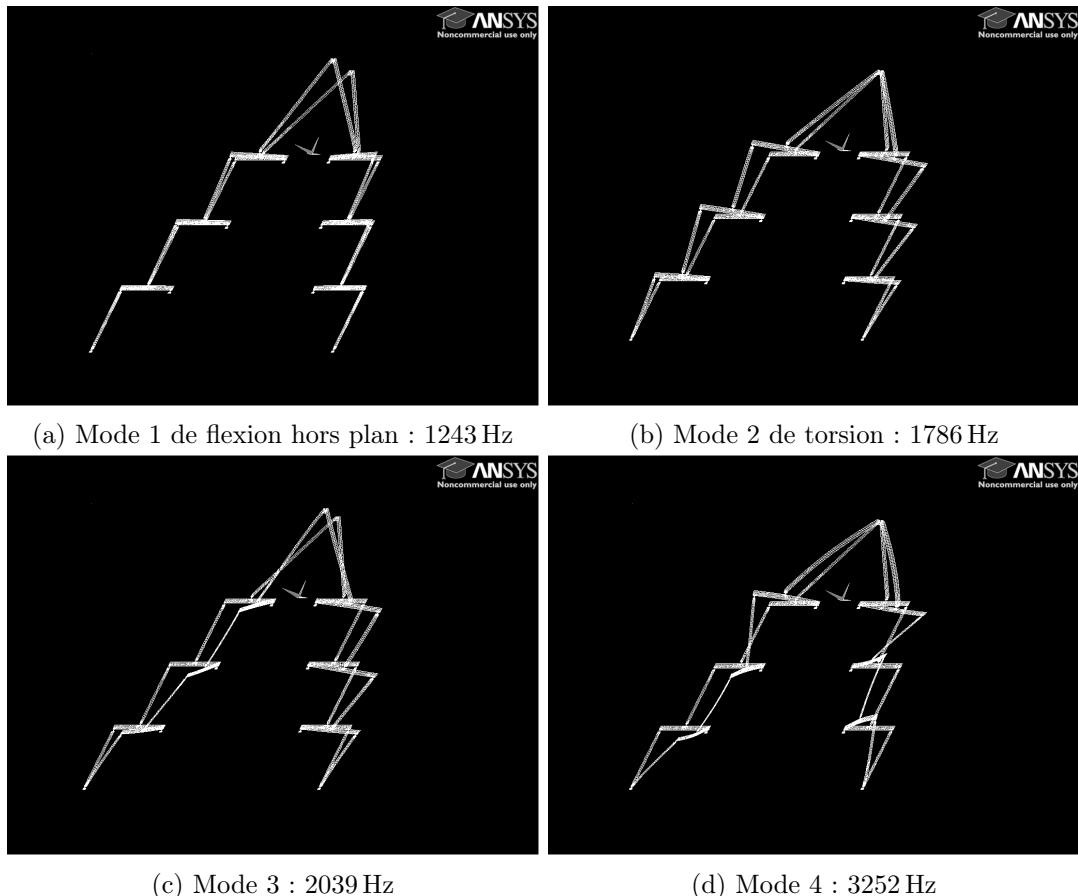


FIGURE 4.17 – Modes de résonance de la structure flexible du DiMiBot à 4 modules.

Nous pouvons également considérer la déflexion de l'organe terminal dû à la pesanteur seule. Cette déflexion n'est que de $0,22 \mu\text{m}$ (pour une longueur des poutres de 7,7 mm), ne présentant alors aucun problème (tel qu'un angle inadéquat de l'organe terminal) pour le type de tâches qui lui est attribué.

4.7 Conclusion

Nous avons établi une architecture flexible, faisant usage de poutres pseudo-rigides articulées par des articulations flexibles circulaires, mettant en œuvre le schéma cinéma-

TABLEAU 4.2 – Dimensions choisies pour le microrobot à fabriquer.

Modules bistables	
Déplacement	$\Delta = 25 \mu\text{m}$
Offset d'activation	$55 \mu\text{m}$
Structure robotique flexible	
Largeur poutres pseudo-rigides	$W = 300 \mu\text{m}$
Rayon articulations flexibles	$R = 60 \mu\text{m}$
Largeur articulations flexibles	$t = 12 \mu\text{m}$

tique développé au CHAPITRE 3. Une première étude en éléments finis a permis de valider le modèle géométrique direct, et de s'assurer que l'espace de travail atteignable par une telle structure est conforme au cahier des charges spécifié. Une différence essentielle entre l'étude menée pendant le chapitre précédent et celui-ci concerne le déplacement généré entre les deux positions stables des modules bistables utilisés. Ainsi, afin d'utiliser des modules bistables compatibles avec l'utilisation d'une architecture robotique (en particulier permettant de développer des efforts suffisants), le déplacement généré entre les deux positions stables d'un module a dû être augmenté, atteignant une valeur de $25 \mu\text{m}$. Cette différence n'empêche pas l'utilisation du modèle géométrique direct calculé et ne fait qu'augmenter la taille de l'espace de travail atteignable, permettant d'atteindre une course plus grande, mais augmentant également la résolution du robot à $1,265 \mu\text{m}$ pour un robot possédant 6 modules bistables. L'espace de travail atteignable est donc conforme au cahier des charges spécifié, de forme carré avec une répartition homogène des points.

Les études en éléments finis qui ont suivi ont permis de définir des dimensions appropriées des modules bistables et de la structure robotique flexible utilisée afin de permettre son utilisation pour des tâches de micromanipulation. Le récapitulatif des dimensions choisies est rappelé dans le TABLEAU 4.2. Une telle structure robotique permet alors son utilisation en présence de forces atteignant $2,5 \text{ mN}$.

Chapitre 5

Microfabrication et caractérisation

Après l'avoir conçu, nous allons, dans ce chapitre, donner vie au premier microrobot numérique.

La fabrication est l'une des étapes les plus difficiles pour obtenir des microsystèmes. Elle doit mettre en œuvre plusieurs procédés dont les enchainements et étapes comportent une part importante de savoir-faire.

Une fois le microrobot réalisé, il est caractérisé et comparé aux résultats attendus.

Sommaire

5.1	Microfabrication en salle blanche	96
5.1.1	Procédés de microfabrication utilisés	96
5.1.2	Principaux défauts de microfabrication	97
5.2	Le DiMiBot au sein du wafer	97
5.3	Flowchart du DiMiBot	100
5.3.1	Masque A : connexions électriques	101
5.3.2	Masque B : gravure des parties mobiles	101
5.3.3	Masque C : libération des microrobots	102
5.4	Prototype opérationnel	104
5.4.1	Observation au MEB	104
5.5	Caractérisation	105
5.5.1	Modules bistables	105
5.5.2	Caractérisation robotique	109
5.5.3	Force de maintien	110
5.6	Utilisation du DiMiBot	111
5.6.1	Au sein d'un MEB	111
5.6.2	Première micromanipulation	111
5.7	Conclusion	114

5.1 Microfabrication en salle blanche

Les techniques de microfabrication en salle blanche permettent la fabrication d'éléments de petite taille (micrométrique). Elles sont essentiellement basées sur des procédés d'ablation chimique et de dépôt de matière réalisés sur un wafer, plaque circulaire (souvent en silicium) dont les dimensions standard sont de 4 pouces de diamètre pour quelques centaines de micromètres d'épaisseur. La salle blanche fournit un environnement contrôlé en température, humidité, vibration, présence de particules volatiles, *etc.* afin d'éviter toute perturbation lors de la fabrication de ces éléments de très petite taille.

Nous allons présenter les principaux procédés de microfabrication qui seront utilisés pour la réalisation du DiMiBot. Un process de microfabrication se déroule en plusieurs étapes, chacune spécifiée par la génération d'un masque (couche sacrificielle permettant de protéger certaines zones du wafer lors de l'ablation ou dépôt de matière). Ce masque peut être réalisé en résine ou en métal (préalablement réalisé à partir d'un masque en résine).

5.1.1 Procédés de microfabrication utilisés

Photolithographie

Toute étape de microfabrication fait intervenir une phase de photolithographie permettant de créer un masque en résine. Cette photolithographie se déroule en plusieurs étapes. Un film mince de résine est, tout d'abord, réparti sur la totalité du wafer par induction centrifuge (plus connu sous le terme anglais *spin-coating*), assurant une épaisseur homogène sur le wafer. Cette résine est ensuite exposée à un rayonnement ultra-violet suivant un certain motif grâce à un masque, préalablement fabriqué par usinage laser, positionné au dessus du wafer lors de l'exposition. Les zones exposées seront par la suite soit conservées, soit retirées selon le type de résine utilisé (négative ou positive) lors du développement. Une fois ces étapes terminées, la résine est prête à servir de masque de protection pour la suite du process.

Gravure

La gravure est une étape essentielle qui permet de donner forme aux structures mécaniques des microsystèmes. Elle consiste essentiellement en l'ablation chimique de la matière. Deux types de gravure peuvent être utilisés :

- la gravure en milieu humide ;
- la gravure sèche.

La gravure en milieux humide fait plus souvent référence à la gravure des métaux (aluminium, nickel, or, ...), et se fait en plongeant le wafer entier dans un bain d'une solution corrosive pendant une durée plus ou moins longue en fonction du matériau et de l'épaisseur à graver. La gravure humide peut également faire référence à la gravure du dioxyde de silicium (également nommé silice, SiO_2) qui se fait par BHF (Buffered Hydrofluoric Acid), mais peut également s'effectuer par gravure sèche en vapeur HF (Acide Fluorhydrique).

La gravure sèche se fait, quant à elle, la plupart du temps à l'intérieur d'une machine sous vide. La gravure RIE (Reactive Ion Etching) expose le wafer à un plasma énergétique assurant sa gravure à la fois chimique et physique (par bombardement des ions). Une technique de gravure sèche plus rapide et permettant de plus grande profondeurs de gravure peut également être utilisée, il s'agit de la DRIE (Deep Reactive Ion Etching). Cette méthode fait intervenir une étape de passivation qui permet de protéger les flancs et focalise ainsi l'action de gravure dans la direction normale au wafer.

Dépôt

Le dépôt de matière peut se faire par deux procédés dont la seule différence réside dans l'ordre dans lequel sont réalisées les différentes étapes. Le premier procédé nommé *lift-off* nécessite d'effectuer la photolithographie en premier sur le wafer, et se poursuit par le dépôt de matière (par pulvérisation ou évaporation). Les éléments déposés sur la résine seront ensuite retirés lors du nettoyage de la résine à l'acétone. Dans le second cas, une couche de métal est tout d'abord déposée sur la totalité du wafer, et la phase de photolithographie sera réalisée sur cette couche de métal. Une étape de gravure humide du métal s'ajoute alors au process de dépôt avant le nettoyage de la résine qui protégeait les éléments de métal à conserver.

5.1.2 Principaux défauts de microfabrication

La nature essentiellement chimique des procédés de microfabrication en salle blanche provoque souvent quelques défauts bien connus, dont le principe d'optimisation de procédé du microfabrication consiste à atténuer les effets. Le premier principe d'optimisation considère généralement les étapes de photolithographie afin d'obtenir une épaisseur de résine adéquate possédant des flancs de bonne qualité.

Les défauts de microfabrication les plus courants interviennent lors des étapes de gravure, dont une liste est présentée sur la FIGURE 5.1. Afin de réduire ces problèmes, le process de gravure doit être optimisé pour les structures à fabriquer (technique de gravure utilisée, temps de gravure, temps de repos, ...).

5.2 Le DiMiBot au sein du wafer

En réponse au cahier des charges spécifié au CHAPITRE 3, le DiMiBot est réalisé de manière monolithique dans un wafer en silicium. Ne nécessitant aucune phase d'assemblage, la fabrication du microrobot se résume essentiellement aux procédés de microfabrication en salle blanche, après laquelle il sera presque entièrement opérationnel. Il ne restera en effet plus qu'à réaliser l'activation manuelle de chaque module ainsi que les connexions électriques sur un PCB (*Printed Circuit Board*) avant de pouvoir utiliser réellement le microrobot.

Le support utilisé pour la microfabrication de ce microrobot est un wafer SOI (Silicon On Insulator) de 4 pouces (100 mm de diamètre). Un wafer SOI possède 3 couches distinctes, deux couches de silicium (dopées positivement dans notre cas) séparées par

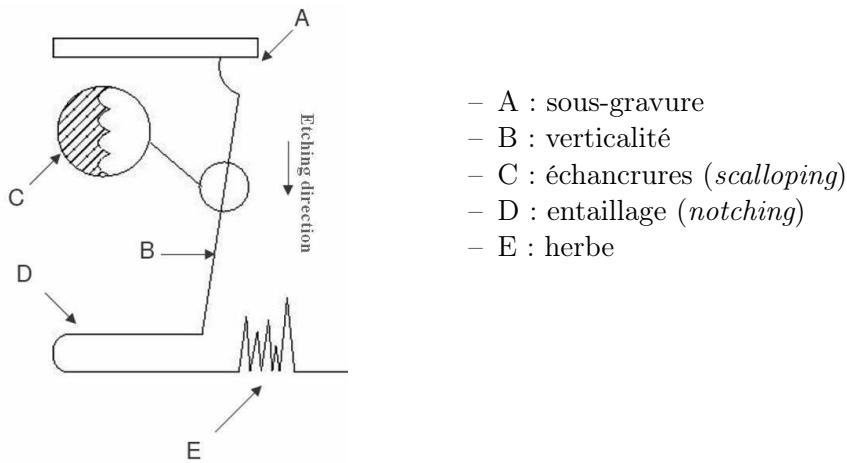


FIGURE 5.1 – Profil de gravure DRIE classique.

une couche d'isolant électrique. C'est ici du dioxyde de silicium qui est utilisé comme isolant électrique. Les épaisseurs de chacune de ces couches sont :

- couche supérieure (*device layer*) : 100 µm,
- couche d'oxyde (*buried oxide “BOX” layer*) : 1 µm,
- couche inférieure (*handle layer*) : 300 µm.

La couche supérieure est celle accueillant les éléments mobiles du microrobot (modules bistables et structure flexible) ainsi que les connexions électriques. La couche inférieure sert de renforcement, fournissant un bâti fixe permettant de maintenir les parties fixes ensemble. La couche de silice a un rôle essentiel d'isolation électrique permettant d'isoler les différentes connexions électriques servant à l'alimentation des actionneurs. L'épaisseur totale du wafer (et ainsi des microrobots qui en résulteront) est de 401 µm, procurant ainsi une caractéristique intéressante au microrobot en rendant possible son utilisation en milieu confiné.

En microfabrication, on cherche généralement à optimiser l'espace utilisé sur un wafer. Dans cet objectif, plusieurs dizaines d'échantillons d'un même microsystème sont microfabriqués sur un seul wafer. Cela permet de prévenir les défauts de fabrication (statistiquement non nuls), pouvant avoir lieu en différents endroits du wafer et générant souvent quelques microsystèmes inutilisables. La fabrication de nombreux échantillons prévient également de la casse expérimentale quasiment inévitable lors de la manipulation de microsystèmes aussi fragiles. Dans le cas du DiMiBot, étant donné sa relative grande taille (un DiMiBot à 4 modules a une dimension de 36 × 24 mm) très peu de ces microrobots peuvent être positionnés sur un seul wafer de 4 pouces. Durant les phases de test de dimensionnement, différents microrobots avec différentes dimensions sont placés sur un même wafer de 4 pouces. Un exemple d'agencement de plusieurs microrobots numériques au sein d'un wafer est montré sur la FIGURE 5.2.

Un DiMiBot possédant 4 modules (au centre du wafer), et cinq DiMiBots possédant 2 modules, ainsi que quelques modules bistables seuls ont été insérés dans ce wafer. Une

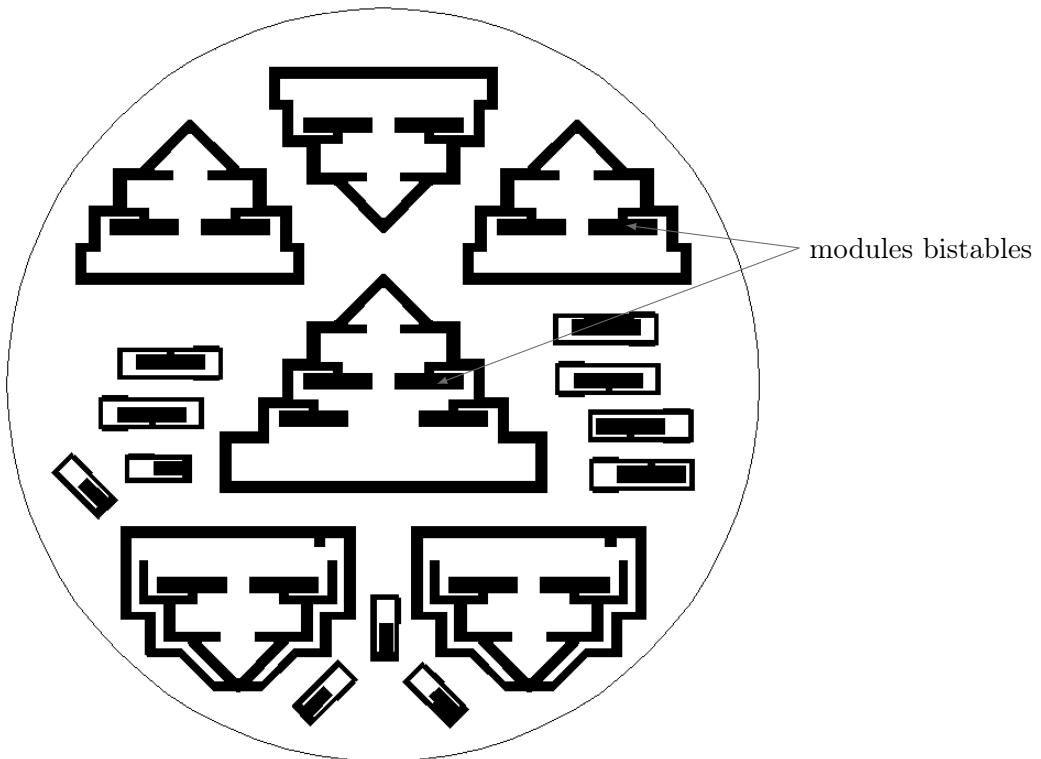


FIGURE 5.2 – Arrangement des DiMiBots au sein du wafer.

organisation différente a également été considérée permettant de réaliser un microrobot possédant 6 modules bistables. Il serait cependant difficile de concevoir des robots de plus grande taille sur ce type de wafer.

Une optimisation du dimensionnement a été réalisée lors de cette étape. Elle fut réalisée pour prendre en compte les connexions électriques utilisées pour l'alimentation des différents modules bistables, et a nécessité le repositionnement des modules bistables. Chaque module bistable possède 6 connexions électriques (voir FIGURE 5.3) : une pour chaque actionneur thermique, et deux masses (les deux actionneurs thermiques du même côté du module partagent la même masse). Un total de 24 connexions électriques doit être réalisé pour le microrobot utilisant 4 modules bistables. Ces connexions se terminent par des carrés de $1200 \mu\text{m}$ de côté, qui serviront à connecter le microrobot à l'interface de puissance.

Afin de laisser la place suffisante pour toutes ces connexions électriques, une optimisation de dimensions a dû être effectuée. Elle fait intervenir une augmentation de la distance entre les deux parties symétriques du microrobot. Cette modification n'a aucune influence sur la génération de l'espace de travail atteignable tant que les poutres de l'organe terminal forment un angle de $\frac{\pi}{2}$ entre elles. La deuxième conséquence est une

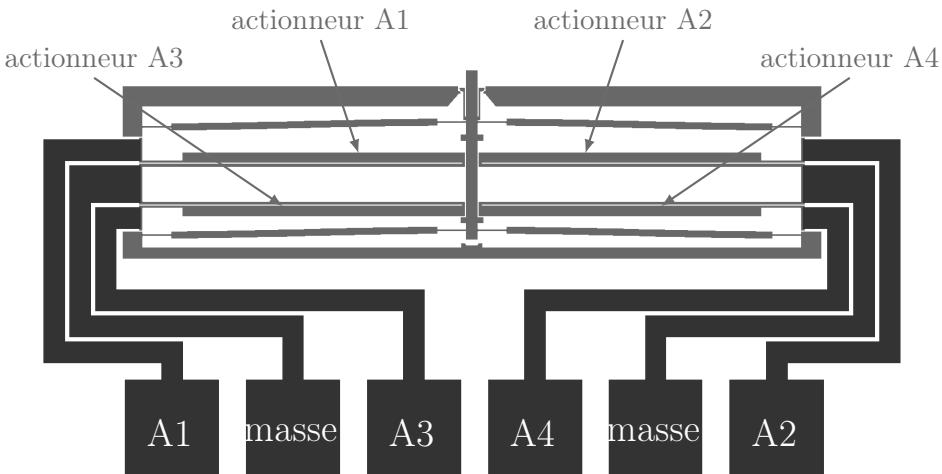


FIGURE 5.3 – Positionnement des connexions électriques pour l'alimentation d'un module bistable.

révision des longueurs L_0 et L_1 des poutres verticales et horizontales de l'architecture robotique flexible dont l'influence n'altère en rien le type d'espace de travail atteignable par le DiMiBot. D'après le calcul du modèle géométrique direct, nous pouvons en effet affirmer que la longueur des poutres verticales L_0 n'a aucune influence sur la transmission des déplacements des modules bistables. La longueur des poutres horizontales L_1 a cependant une influence infime sur la taille totale de l'espace de travail atteignable. Elles n'altèrent en rien sa forme globale (carré), ni sa répartition homogène de points.

Malgré la grande quantité de connexions électriques à réaliser, seuls 9 câbles sont nécessaires pour le contrôle d'un DiMiBot à 4 modules. Il faut une masse (commune à tous les modules) et deux signaux différents pour chaque module, l'un permettant d'effectuer le basculement vers l'état 1 en actionnant les deux actionneurs thermiques A1 et A2 simultanément, et l'autre signal pour effectuer le basculement vers l'état 0 (actionneurs A3 et A4). L'alimentation de chaque paire d'actionneurs sous une tension de 20 V pendant une durée d'une dizaine de millisecondes est théoriquement nécessaire au basculement du module bistable dans l'une ou l'autre des deux positions atteignables ([16]).

5.3 Flowchart du DiMiBot

La fabrication du microrobot sur le wafer SOI se déroule en trois grandes étapes :

- la réalisation des connexions électriques ;
- la fabrication des éléments mobiles (modules bistables et structure flexible) ;
- la libération des structures.

À chacune de ces étapes correspond la réalisation d'un masque de résine. Nous présentons ici chacune de ces trois étapes.

5.3.1 Masque A : connexions électriques

Le premier masque correspond à la réalisation des connexions électriques. Elles sont réalisées en aluminium déposé sur la surface du wafer. Cet aluminium est également utilisé pour afficher certaines annotations (dimensions, logo, ...) sur les structures microfabriquées afin de les identifier. Le flowchart de cette étape est présenté sur la FIGURE 5.4.

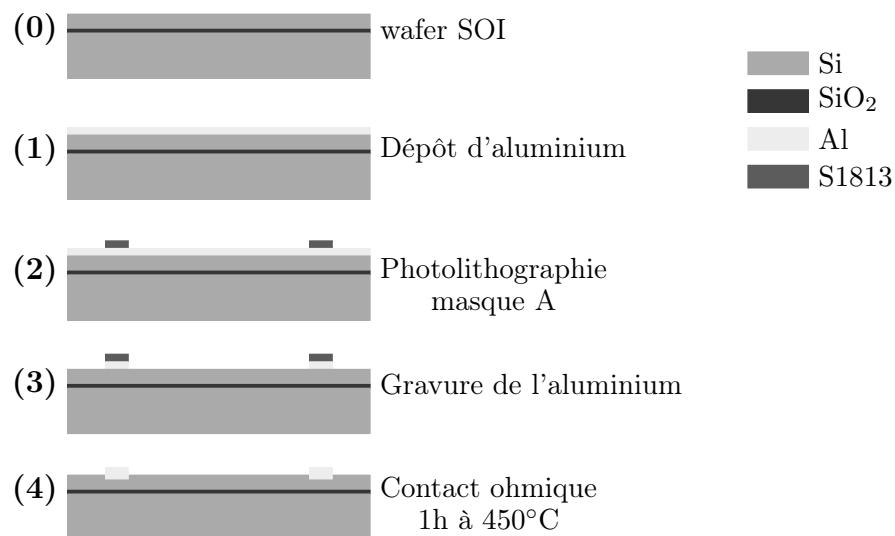


FIGURE 5.4 – Flowchart lié au masque A, permettant la réalisation des connexions électriques.

La première étape consiste à déposer une couche de 800 nm d'aluminium sur la surface totale du wafer par pulvérisation. Une étape de photolithographie s'en suit avec une résine nommée S1813 créant un masque de 1,3 µm d'épaisseur. Le wafer est ensuite plongé dans un bain d'une solution permettant la gravure de l'aluminium non protégé par le masque. Après avoir nettoyé le wafer, une dernière étape est nécessaire afin d'assurer une bonne conductivité des connexions électriques, il s'agit d'effectuer le contact ohmique entre l'aluminium et la couche de silicium. Ceci se fait par un recuit du wafer dans un four à 450°C pendant 1 h, permettant aux atomes d'aluminium de diffuser dans le silicium, assurant un contact électrique de bonne qualité entre les connexions électriques et les actionneurs thermiques.

5.3.2 Masque B : gravure des parties mobiles

La deuxième grande étape de fabrication concerne la gravure de la couche supérieure de silicium qui donnera la forme des éléments mobiles du microrobot (modules bistables et architecture flexible). Pour cela, la deuxième photolithographie est réalisée par dessus

les connexions en aluminium, et utilise, cette fois, une résine différente autorisant une couche plus épaisse du masque et permettant une meilleure qualité des flancs du masque (plus verticaux). Il s'agit de la résine AZ9260 dont nous déposons une couche de 6,3 µm. Afin d'optimiser le process de gravure nous décidons que les zones à graver auront toutes la même dimension. Ceci permet de graver chaque zone du wafer à la même vitesse. Nous éviterons alors, autant que possible, les défauts de gravure (et particulièrement le problème de sur-gravure de certaines structures). Ainsi les zones de gravure sont des tranchées de 20 µm de largeur qu'il convient de graver sur toute l'épaisseur de la couche supérieure (100 µm) jusqu'à la couche de silice.

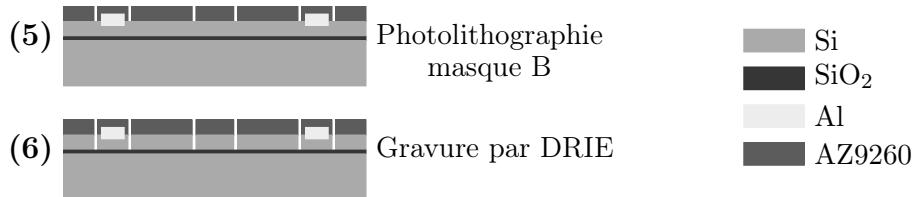


FIGURE 5.5 – Flowchart lié au masque B, permettant la fabrication des structures mobiles.

5.3.3 Masque C : libération des microrobots

La dernière étape de microfabrication est la plus délicate puisque les structures réalisées tendent à devenir très fines et de plus en plus fragiles. Cette étape consiste à graver la couche inférieure du wafer (300 µm d'épaisseur), ainsi que la couche de silice (1 µm d'épaisseur) afin de libérer les parties mobiles de la structure et de pouvoir également libérer le microrobot complet. Elle fait intervenir un troisième masque pour lequel les zones à graver ne sont plus des tranchées de largeur fixe, mais sont de larges zones de gravure. À cause de cela la phase de gravure n'est pas toujours très homogène, mais cela est moins contraignant sur cette couche de silicium qui sert de base fixe et dont les dimensions ne sont pas critiques. Étant donné la large épaisseur de silicium à graver et le fait qu'il faudra également, par la suite, graver la couche de silice (ce qui prend beaucoup de temps malgré sa faible épaisseur), il est nécessaire d'avoir un masque de résine d'une épaisseur suffisante. En effet durant les process de gravure la résine se détériore légèrement, tout particulièrement lors de la gravure par DRIE pour laquelle l'action physique de gravure accentue la détérioration de la résine. Ainsi, nous utilisons un masque de résine de 9 µm d'épaisseur. Nous observons sur le flowchart de la FIGURE 5.6 que nous conservons la résine restante de l'étape précédente (gravure de la couche supérieure). Ce résidu de résine permet de protéger l'aluminium du dévelopeur, utilisé lors de la phase de photolithographie, qui attaque l'aluminium.

La gravure de la couche inférieure de silicium est réalisée par le même procédé DRIE que pour la couche supérieure. Cependant, elle sera réalisée pendant une durée plus longue. Une étape supplémentaire est, par ailleurs, réalisée avant d'atteindre la fin de la gravure (avant d'atteindre la couche de silice). Elle consiste à placer un wafer support

en dessous de celui qui est usiné. Ce second wafer permet de protéger le premier (lorsque la structure devient fragile) contre le flux d'hélium servant au refroidissement. Ce wafer support sera conservé tout au long de la gravure, ainsi que lors de la phase de gravure de la silice. Cette dernière étape de gravure de la silice n'est pas réalisée par BHF comme il est coutume de le faire, mais par gravure sèche RIE (Reactive Ion Etching). Les différents éléments de la structure ainsi terminés sont en effet trop fragiles pour être plongés dans un bain. Il ne sera donc pas possible d'effectuer la gravure de la silice en milieu humide, ni de nettoyer le wafer dans un bain d'acétone. Le positionnement du wafer au dessus du bain lors d'une gravure par vapeur de HF peut également s'avérer une étape délicate. En effet, les liaisons sécables permettant de fixer le microrobot au reste du wafer pouvant être fragilisées au cours du process, il serait malencontreux que le microrobot tombe du wafer dans le bain, cassant ainsi certaines parties fragiles de la structure.

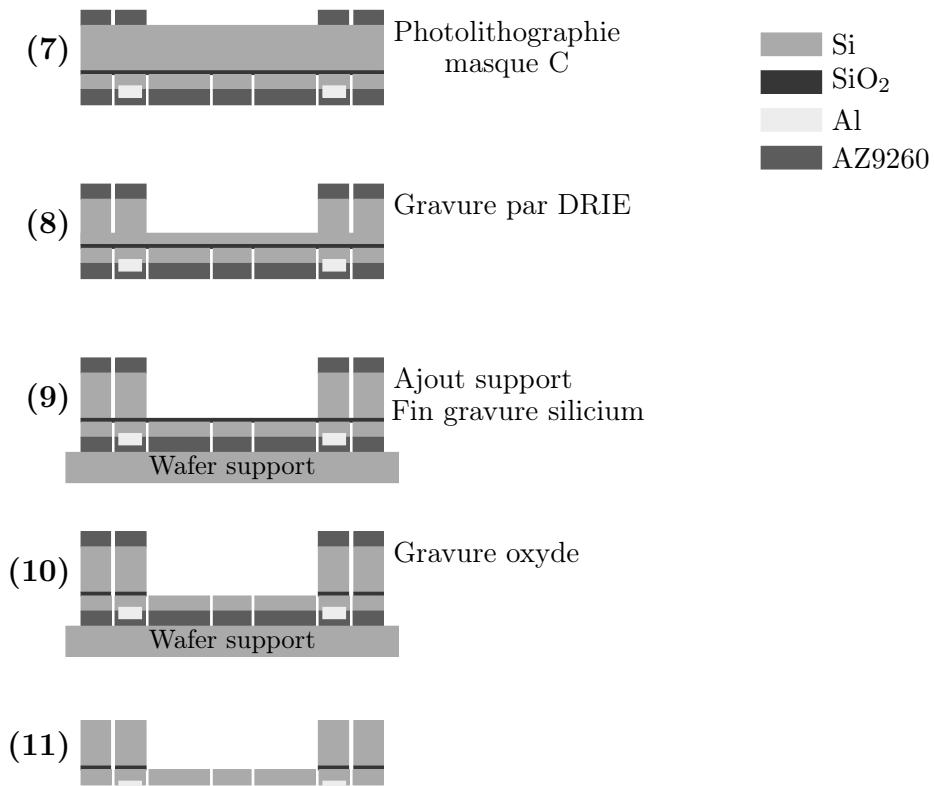


FIGURE 5.6 – Flowchart lié au masque C, libération des structures.

Le process de fabrication est complet et il nous a permis d'obtenir des DiMiBots. Les trois masques utilisés lors de ce process de microfabrication sont présentés dans l'ANNEXE B.

5.4 Prototype opérationnel

Une fois sortis de la salle blanche, les microrobots sont terminés, mais pas encore tout à fait opérationnels. Afin de les utiliser, nous les collons sur un PCB à partir duquel nous pourrons apporter l'alimentation électrique à chaque actionneur thermique. Une fois collé sur le PCB, une phase de *wirebonding* est nécessaire pour relier les connexions électriques des microrobots à celles des PCB. Ceci est fait en soudant un fin fil d'or entre ces deux connexions. La FIGURE 5.7 montre un DiMiBot possédant 4 modules bistables collé sur son PCB (juste avant d'effectuer le wirebonding).

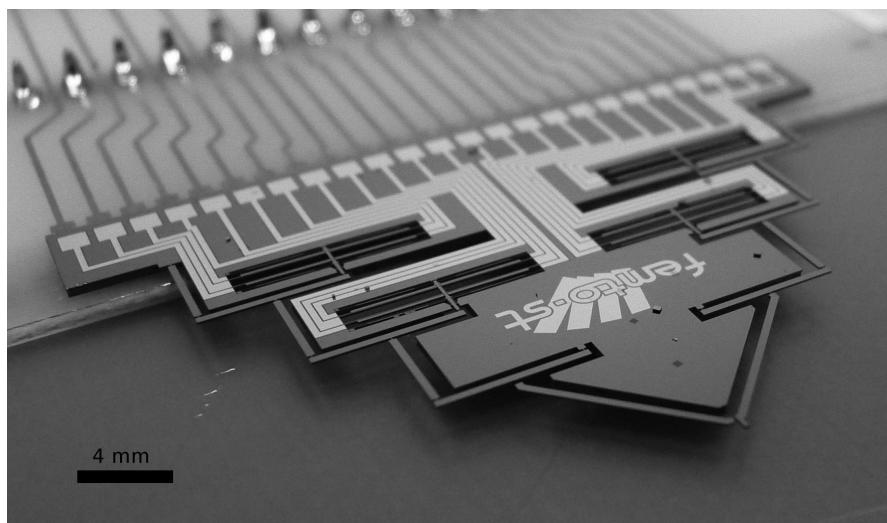


FIGURE 5.7 – Photo d'un DiMiBot à 4 modules collé sur son PCB avant wirebonding.

Nous nous focaliserons par la suite sur ce DiMiBot à 4 modules qui présente un intérêt plus important d'un point de vue robotique grâce à la génération d'un plus grand nombre de positions atteignables que les DiMiBots à 2 modules. Avant de procéder à la caractérisation de ce microrobot, c'est à dire vérifier que son comportement réel est cohérent avec les modélisations et simulations effectuées, il est essentiel de s'assurer que ce microrobot est opérationnel. Ceci est réalisé en analysant méticuleusement (au microscope optique ou électronique) les différents éléments du robot pour s'assurer qu'aucune rupture n'est présente, et que les défauts de microfabrication sont acceptables.

5.4.1 Observation au MEB

Le microrobot est observé au microscope électronique à balayage (dont quelques images illustrent le CHAPITRE 4). Une attention toute particulière est attachée aux articulations flexibles circulaires, éléments les plus fragiles du microrobot où peuvent se concentrer les ruptures.

Ces résultats montrent des défauts de fabrication non homogènes, accentués sur les poutres des modules bistables. Cette première observation n'a cependant rien d'alarmant et constitue une première validation de la fabrication du DiMiBot.

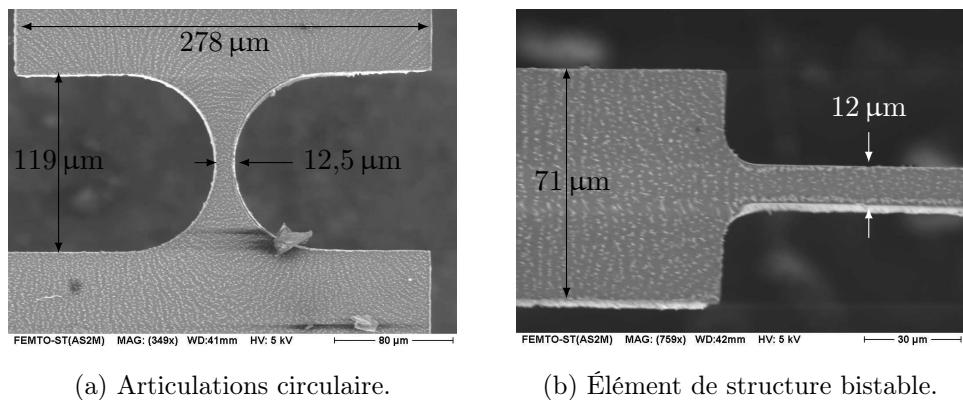


FIGURE 5.8 – Dimensions mesurées d'une articulation circulaire flexible et d'une poutre.

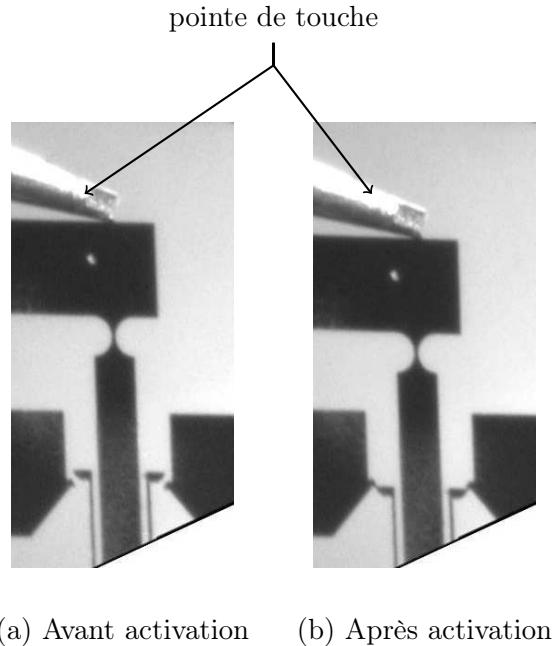
5.5 Caractérisation

La caractérisation du DiMiBot consistera, dans un premier temps, en l'analyse des modules bistables, puis se focalisera sur la caractérisation robotique du microrobot complet.

5.5.1 Modules bistables

Après avoir activé manuellement les 4 modules bistables à l'aide d'une pointe de touche (FIGURE 5.9), les premiers tests permettant de vérifier le fonctionnement des modules bistables peuvent être effectués. La première étape consiste à vérifier les résistances électriques des différents actionneurs thermiques les constituant. La résistance moyenne obtenue pour les 16 actionneurs thermiques du microrobot est de $332,32\Omega$. La valeur théorique de cette résistance est de 375Ω pour des actionneurs en silicium dont la résistivité est $0,02\Omega\cdot\text{cm}$, les caractéristiques du fabricant certifiant une résistivité électrique comprise entre $0,01$ et $0,02\Omega\cdot\text{cm}$. Les actionneurs thermiques sont utilisés par paires pendant un laps de temps très court permettant de pousser le shuttle au delà de sa position instable, à partir de laquelle il bascule de lui-même vers sa position stable où il restera sans apport énergétique extérieur. Ainsi, le calcul de l'énergie nécessaire pour basculer le shuttle vers l'une ou l'autre des deux positions sera fait en considérant la résistance électrique de deux actionneurs thermiques en parallèle, A1 et A2 ou A3 et A4 (voir la FIGURE 5.3). D'après les calculs effectués lors du dimensionnement des actionneurs thermiques [16], l'application d'une tension de 20 V aux bornes des actionneurs thermiques pendant une durée d'une dizaine de millisecondes permet de générer une élévation de température de la poutre chaude de l'actionneur thermique de 300°C . Ceci assure le déplacement et la force adéquate au basculement du shuttle.

Lors de cette étape de caractérisation nous appliquons différentes tensions aux bornes des paires d'actionneurs thermiques. Une électronique simple à base de relais électriques a été utilisée pour commander la durée d'actionnement des actionneurs thermiques. La mesure du temps minimal d'actionnement de la paire d'actionneurs nécessaire pour le



(a) Avant activation (b) Après activation

FIGURE 5.9 – Photo de l'activation manuelle d'un module bistable du microrobot.

basculement du shuttle est réalisée pour chaque tension appliquée. Il est alors possible d'en déduire l'énergie minimale nécessaire au basculement du module avec l'équation (5.1).

$$E = R_{eq} \times U^2 \times t_{min} \quad (5.1)$$

où R_{eq} est la résistance équivalente des deux actionneurs mis en parallèle, et t_{min} le temps d'actionnement minimal mesuré pour chaque tension U appliquée. Les résultats obtenus lors de cette analyse énergétique sont séparés pour chaque paire d'actionneur de chaque module bistable du microrobot, et présentent des performances différentes en fonction de l'état dans lequel le basculement est effectué (vers l'état 0 ou vers l'état 1). Les résultats obtenus sont donnés sur la FIGURE 5.10.

Ces résultats montrent une certaine tendance sensiblement similaire pour tous les modules bistables, mis à part quelques difficultés pour le module br_0 , qui nécessite un temps d'actionnement supérieur afin de permettre le basculement du shuttle. Par exemple pour une tension de 16 V, un temps de 20 ms est nécessaire pour ce module, tandis qu'environ 9 ms sont suffisantes pour les autres modules bistables (lors du basculement vers l'état 1). Ce problème est probablement lié à un défaut de fabrication de ce module, qui peut se traduire par une structure bistable trop rigide, pour laquelle un apport énergétique plus important est nécessaire lors de son basculement.

Mis à part ce léger défaut de fabrication, nous pouvons conclure d'après la FIGURE 5.10 que l'énergie nécessaire au basculement d'un module bistable peut être inférieure à 25 mJ en choisissant une tension d'actionnement appropriée. Pour de telles caractéristiques, la durée d'actionnement des actionneurs thermiques est inférieure à

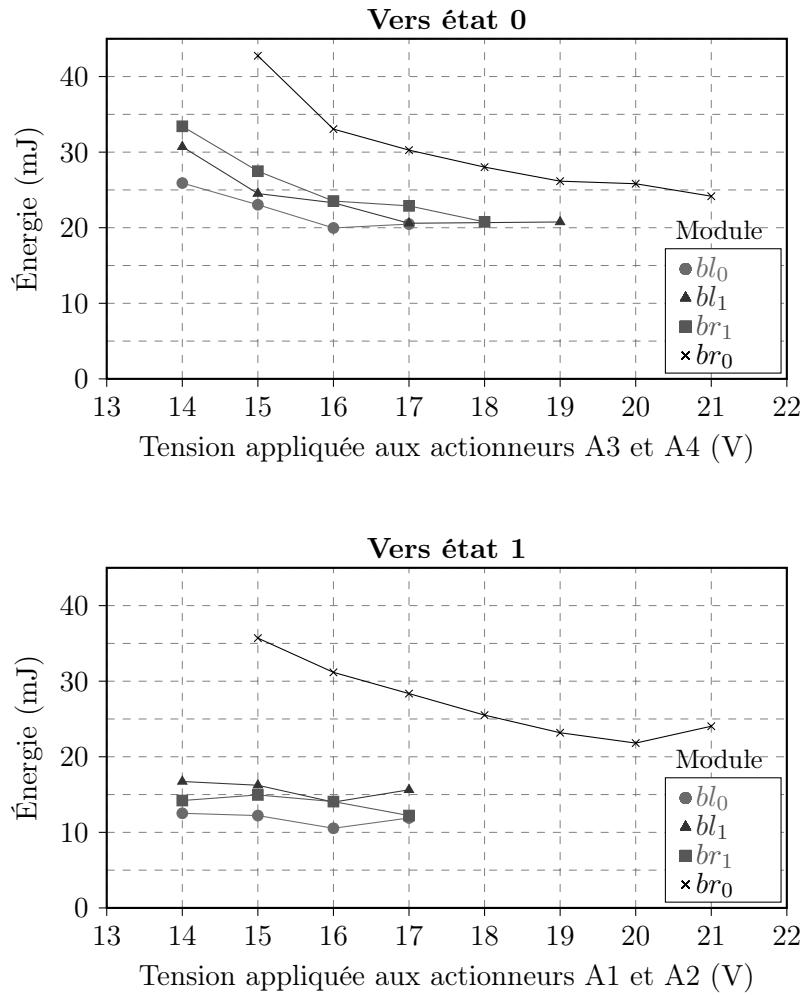


FIGURE 5.10 – Énergie nécessaire pour le basculement des modules en fonction de la tension appliquée aux bornes des actionneurs thermiques.

TABLEAU 5.1 – Déplacement généré par chaque module.

Module bistable	Déplacement entre deux états
bl_1	36,20 μm
bl_0	35,34 μm
br_1	33,60 μm
br_0	36,50 μm

20 ms. Cependant, la nature thermique de ces actionneurs nécessite un temps d'attente de l'ordre de la centaine de millisecondes pour permettre le refroidissement des actionneurs après actionnement. Ainsi de manière pratique, nous avons effectué des cycles de basculement à une fréquence de 3,5 Hz, soit un basculement toutes les 140 ms.

Mesurons maintenant le déplacement généré par chacun des modules bistables constituant le microrobot. Pour cela nous utilisons le MEMS Analyzer MSA-500 de la société Polytec (FIGURE 5.11), qui permet d'observer et de caractériser par vision stroboscopique des déplacements à l'échelle nanométrique.



FIGURE 5.11 – MEMS Analyzer MSA-500 de la société Polytec.

Les résultats mesurés pour chaque module bistable sont exposés dans le TABLEAU 5.1. Nous notons une très nette différence entre les déplacements mesurés et les déplacements souhaités (25 μm). Ce déplacement est en effet plus grand à cause de défauts de micro-fabrication fréquemment rencontrés telle la surgravure. Elle est essentiellement causée par une trop longue exposition du wafer aux plasmas de gravure, et est caractérisée par

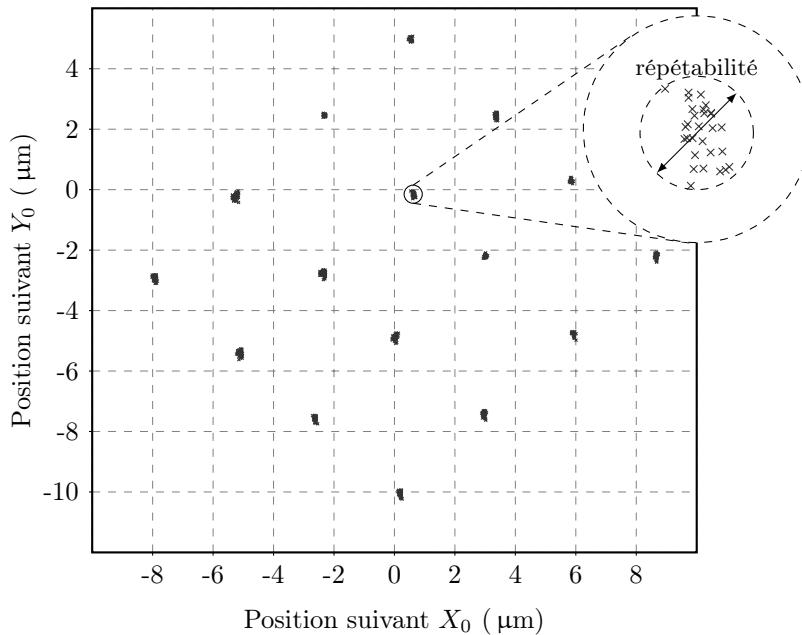


FIGURE 5.12 – Espace de travail mesuré par le MEMS Analyzer.

des zones de gravure plus larges. Ceci génère alors une distance plus grande entre les stop-blocks et le shuttle, conduisant à un plus grand déplacement entre les deux états de chaque module.

5.5.2 Caractérisation robotique

Cette partie de la caractérisation permet d'établir les performances réelles du DiMiBot fabriqué : sa course, sa résolution et sa répétabilité.

Nous observons pour cela l'espace de travail atteignable par le DiMiBot. Des commandes répétées de tous les mots binaires possibles ont été effectuées afin de déterminer les déplacements générés à l'extrémité de l'organe terminal. L'espace de travail observé est représenté sur la FIGURE 5.12. Les positions atteintes sont réparties en nuages de points concentrés en certaines localisations correspondant aux positions discrètes atteignables par le microrobot. Cet espace de travail possède la forme caractéristique carrée de l'espace de travail calculé, dont la répartition des points semble à première vue homogène avec une bonne répétabilité.

Une différence notable avec l'espace de travail prévu peut cependant être observée : il s'agit de la taille de cet espace de travail, qui est plus grande que celle attendue. Cette différence est due aux déplacements de chacun des modules bistables. Les mesures de transmission de déplacement de chaque module bistable vers l'organe terminal sont répertoriées dans le TABLEAU 5.2. À partir de la distance entre les deux états de chaque module, il est possible de déduire le déplacement généré par chaque module sur l'organe

TABLEAU 5.2 – Déplacement généré par chaque module et sa répercussion sur le déplacement de l'organe terminal.

Module bistable	Basculement	Déplacement Théorique	Mesuré	Répétabilité
bl_1	36,20 μm	7,33 μm	7,71 μm	90 nm
bl_0	35,34 μm	3,58 μm	3,77 μm	90 nm
br_1	33,60 μm	6,80 μm	7,12 μm	75 nm
br_0	36,50 μm	3,69 μm	3,89 μm	60 nm

terminal du microrobot grâce au modèle géométrique direct. Ces données sont exposées dans la troisième colonne du TABLEAU 5.2 et comparées aux déplacements mesurés sur les nuages de points obtenus expérimentalement (dans la quatrième colonne). Ces résultats montrent une erreur maximale de 5% entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du modèle géométrique direct. Il est également important de noter que l'espace de travail ainsi mesuré n'est pas parfaitement de forme carré. Cela est du au fait que la mesure n'a pas été effectuée au centre de l'articulation flexible liant les deux poutres de l'organe terminal, mais à l'extrémité d'une extension de l'organe terminal à proximité de cette articulation flexible. Les calculs théoriques du déplacement de l'organe terminal (dans le TABLEAU 5.2) ont été effectués en prenant cette différence en compte.

5.5.3 Force de maintien

La force que ce microrobot est capable de générer à l'extrémité de son organe terminal est un critère important qui permet de justifier son utilisation pour des tâches de micromanipulation. Pour observer cette force de maintien, nous appliquons une force externe à l'extrémité de la pointe de l'organe terminal. Cette force est appliquée dans la direction $-Y_0$ et mesurée par un capteur de force de la société Femto-Tools (voir FIGURE 5.13) positionné en face du microrobot. Cette mesure permet de déterminer la robustesse d'un tel microrobot. Lors de l'application d'une force extérieure sur l'organe terminal, si cette force dépasse la limite de robustesse du microrobot (telle que définie au CHAPITRE 4), il est possible que l'un des modules du microrobot bascule à cause de cette force. Étant donné l'orientation de cette force ($-Y_0$), ce type de basculement sera fait de l'état 1 vers l'état 0 d'un module. Comme vu sur la FIGURE 4.15, ce cas est le moins critique (courbe en pointillé) permettant théoriquement de supporter un effort de 5,7 mN (contre 2,5 mN dans l'autre cas suivant la direction $-X_1$). Cependant, le sens de cette force correspond au type d'utilisation actuellement envisageable pour ce microrobot, qui ne peut que pousser des micro-objets.

Ces mesures ont permis de définir une force de maintien de 5,2 mN dans la direction $-Y_0$, avant que le module bistable bl_1 ne bascule vers l'état 0. Ce qui est cohérent avec les valeurs théoriques calculées (malgré les défauts de microfabrication).

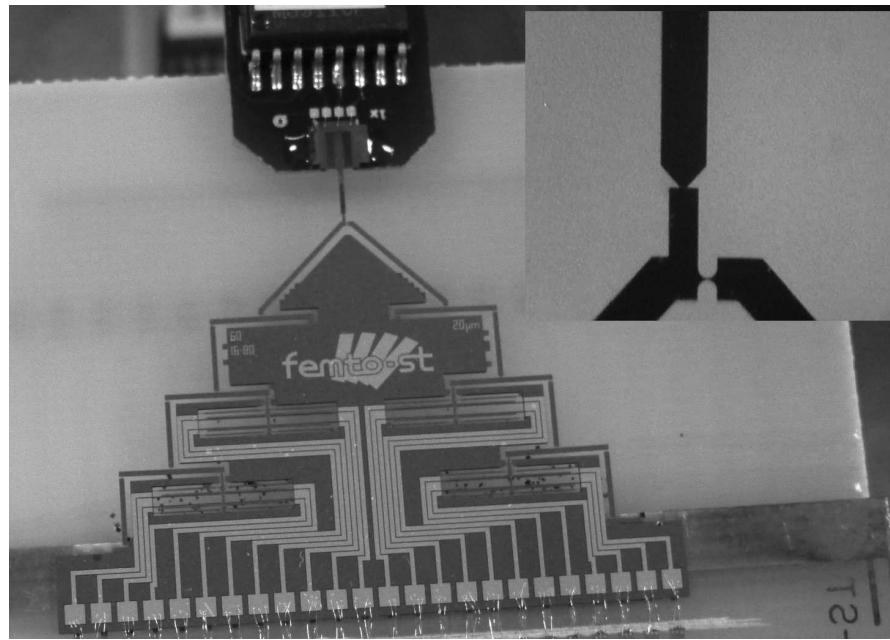


FIGURE 5.13 – Capteur de force positionné en face de l'organe terminal du microrobot.

Une synthèse des caractéristiques de ce DiMiBot est présentée dans le TABLEAU 5.3.

5.6 Utilisation du DiMiBot

5.6.1 Au sein d'un MEB

Suite aux mesures de dimensions du microrobot effectuées au sein du MEB, une première étude d'utilisation du DiMiBot en milieu confiné est effectuée. L'utilisation du DiMiBot au sein du microscope électronique à balayage permet en effet une première validation des capacités techniques d'un tel microrobot.

L'utilisation sous vide nécessite une connectique adaptée, permettant de contrôler le microrobot de l'extérieur. La FIGURE 5.14 montre le DiMiBot à 4 modules fixé et connecté à l'intérieur du MEB.

L'utilisation de ce microrobot sans capteurs au sein d'un environnement sous vide permet de valider l'une des compétences de ce microrobot assurant la possibilité de réaliser des tâches de micropositionnement précis en milieux confinés.

5.6.2 Première micromanipulation

Ce premier prototype de DiMiBot à 4 modules a prouvé la faisabilité d'une telle structure en générant un espace de travail discret cohérent avec les résultats attendus (calculés par modélisation et simulés). Un premier test de micromanipulation a pu être

TABLEAU 5.3 – Synthèse des caractéristiques techniques du DiMiBot.

Modules	
Quantité	4
Déplacement entre états	$\sim 35 \mu\text{m}$
Énergie de basculement	< 30 mJ
Espace de travail généré	
Nombre de points	16
Course	10,5 μm
Résolution	3,5 μm
Répétabilité	< 90 nm
Force de maintien	5,2 mN

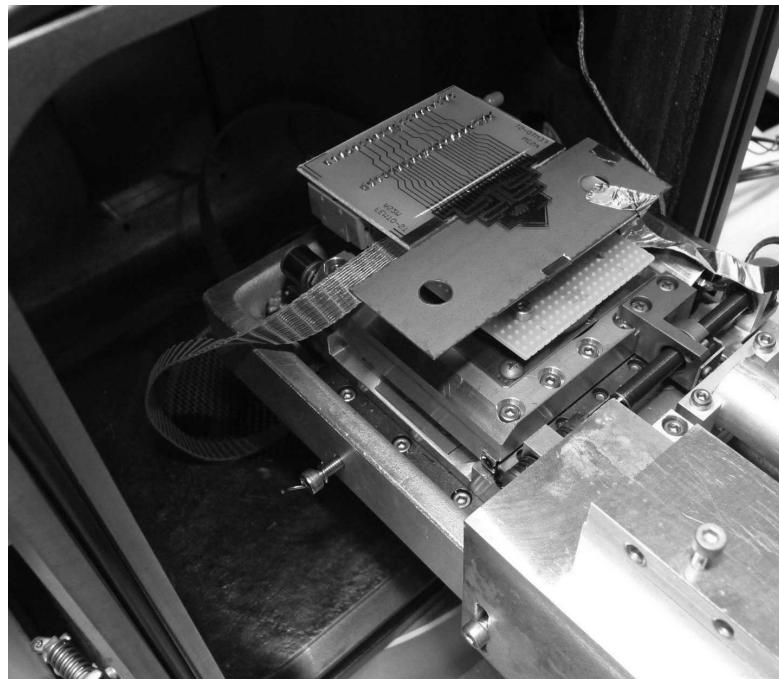


FIGURE 5.14 – DiMiBot connecté à l'intérieur d'un MEB.

effectué avec ce premier microrobot numérique. Le DiMiBot étant dans un premier temps uniquement utilisé comme micropositionneur, et non en tant que microrobot sur lequel serait fixé un outil (micropince ou autre), ce test de micromanipulation ne fera intervenir que des poussées d'objets à l'échelle micrométrique. L'objet manipulé est une microbille de $150\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre (FIGURE 5.15). Nous avons choisi un objet suffisamment volumineux pour éviter de rencontrer les problèmes d'adhésion ou autres effets indésirables (électrostatique par exemple). Ceci nous a permis de conduire des manipulations sans comportement “aléatoire” dans le plupart des cas.

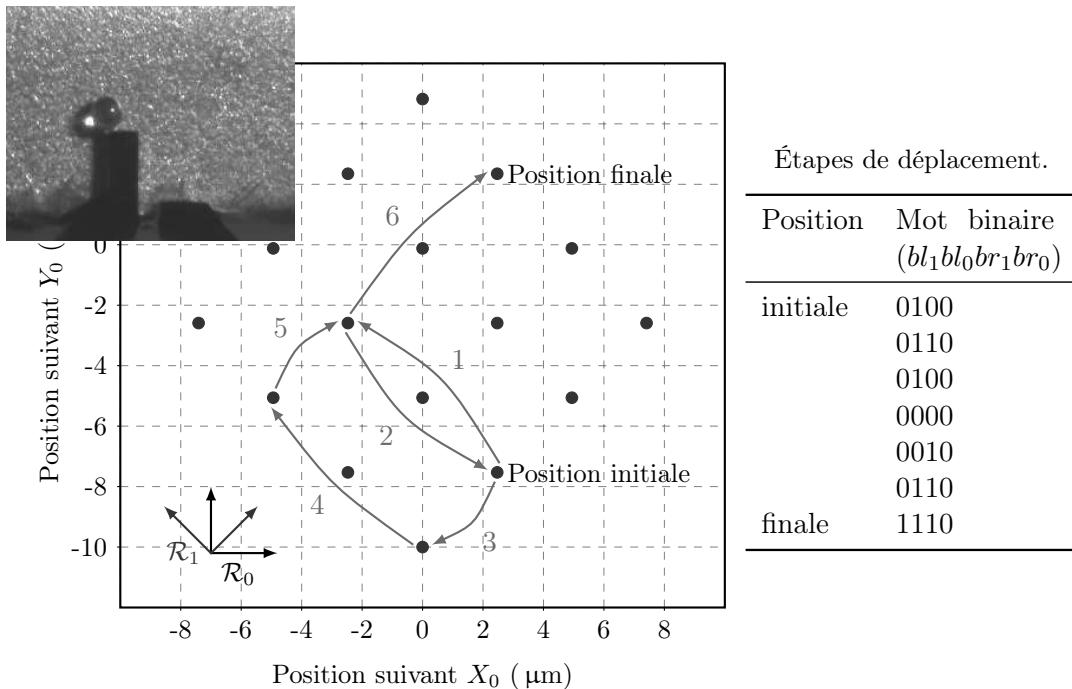


FIGURE 5.15 – Déplacement d'une microbille de $150\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre.

Nous avons effectué un déplacement de cette microbille suivant les deux directions du plan, dont le détail des étapes est présenté dans la FIGURE 5.15. Le premier déplacement est effectué dans la direction $+Y_1$ à l'étape 1 sur une distance de $7\text{ }\mu\text{m}$ par basculement du module br_1 vers l'état 1. Les étapes 2 à 5 servent ensuite à contourner la microbille pour venir positionner l'organe terminal du microrobot sur un autre côté de la bille. Finalement l'étape 6 effectue le deuxième déplacement de la microbille suivant la direction $+X_1$ sur une distance de $7\text{ }\mu\text{m}$ par basculement du module bl_1 vers l'état 1.

Lors de ces déplacements, nous n'actionnons qu'un seul module à la fois. Nous expliquerons au CHAPITRE 6 que ceci permet de contrôler la trajectoire empruntée par l'organe terminal lors du déplacement d'un point discret à un autre.

5.7 Conclusion

L'étape de microfabrication du DiMiBot fut la plus difficile et chronophage de ce travail de thèse, nécessitant de nombreux cycles d'essai-erreur avant d'obtenir un flowchart de bonne qualité et répétable. Le moment le plus délicat étant la gravure des derniers micromètres de silicium de la face inférieure lors de l'ajout du wafer support perturbant le bon refroidissement du wafer.

Le microrobot est réalisé sur un wafer SOI de 401 μm d'épaisseur et nécessite trois grandes étapes de microfabrication :

- la réalisation des connexions électriques en aluminium ;
- la gravure des éléments mobiles de la structure ;
- la libération du microrobot.

Les masques servant à la réalisation de chacune de ces étapes sont détaillés dans l'ANNEXE B.

Cette étape de microfabrication a finalement permis de donner vie à notre microrobot numérique. Un DiMiBot symétrique à 4 modules (générant 16 positions atteignables) a permis de confronter les modélisation et simulations réalisées à la réalité. Malgré les défauts de microfabrication, les résultats obtenus par ce microrobots sont encourageants, et permettent de justifier l'usage d'un tel microrobot pour des tâches de micromanipulation en milieux confinés, grâce à ses grandes performances de stabilité et de répétabilité de positionnement effectuée en boucle ouverte.

Planification de trajectoire

Nous introduisons dans ce chapitre une première approche concernant le contrôle (effectué en boucle ouverte) de ce microrobot numérique. Sa particularité “numérique” fait de lui un microrobot dont les déplacements ne sont pas intuitifs. Il nécessite alors l'utilisation de nouveaux outils afin de planifier les trajectoires qu'il lui est possible d'emprunter entre deux points de l'espace de travail. Ce chapitre se focalise sur cette étude de planification de trajectoire.

Sommaire

6.1	Trajectoire pour les robots numériques macroscopiques	115
6.2	Application au DiMiBot	117
6.2.1	Particularités du DiMiBot	117
6.2.2	Utilisation de la théorie des graphes	120
6.2.3	Calcul de trajectoire	123
6.2.4	Introduction des obstacles	124
6.3	Graphe hyper-cubique	127
6.3.1	Introduction à l'algorithme A*	127
6.3.2	Application au DiMiBot	129
6.3.3	Le graphe hyper-cubique	129
6.3.4	Utilisation de l'algorithme A* pour le DiMiBot	131
6.4	Application à la micromanipulation	133
6.5	Conclusion	133

6.1 Trajectoire pour les robots numériques macroscopiques

L'utilisation d'un robot nécessite de contrôler avec précision la pose de son outil à tout instant. Cela consiste à définir la courbe géométrique que doit suivre l'outil entre deux points et le mouvement de rotation qu'il doit subir entre les orientations de départ et d'arrivée. Une fonction de temps de chacun de ces paramètres (position et orientation)

doit alors être définie afin de calculer les fonctions du temps des coordonnées articulaires du robot. Ces calculs peuvent devenir particulièrement complexes en présence d'obstacles au sein de la scène de travail.

Dans le cas des robots numériques, le calcul de trajectoire est différent puisque les coordonnées articulaires ne sont plus des variables continues, mais des valeurs binaires. La robotique numérique est un domaine particulier de la robotique permettant la génération de déplacements de très grande précision et stabilité par l'utilisation d'une commande en boucle ouverte simple. Une particularité intéressante de ces robots numériques est qu'ils ne nécessitent aucune phase d'étalonnage. La seule étape préalable à l'utilisation du robot qui pourrait se rapprocher de l'étalonnage serait de forcer tous les modules à une valeur donnée afin de s'assurer de la position de départ (par exemple positionner tous les actionneurs binaires à l'état 0). Connaissant la position dans laquelle nous débutons ainsi que la suite des commandes effectuées, une connaissance parfaite de la position de l'organe terminal du robot est assurée malgré l'absence de capteurs.

Compte-tenu de ce type de commande, la planification de trajectoire des robots numériques présente un point de vue légèrement différent de celui des robots traditionnels. Comme il est impossible de contrôler temporellement le déplacement d'un actionneur binaire, aucune analyse dynamique n'est envisagée. Seule la trajectoire empruntée par l'organe terminal du robot peut être contrôlée.

Suite à la conception du robot numérique VGT développé par Chirikjian [19], et de ses différentes variantes (particulièrement 3D), de nombreuses recherches de contrôle de ce type de robot ont été effectuées. Bon nombre de ces études concernent les calculs des modèles géométriques direct et inverse [38, 39, 63, 20, 60, 92], tandis que quelques-unes se focalisent sur le contrôle de la trajectoire empruntée par l'organe terminal du manipulateur [62, 67, 18]. La trajectoire que le robot doit suivre est définie par une suite de points qu'il doit atteindre les uns après les autres dans un certain ordre. Il s'agit par exemple de suivre une trajectoire en forme d'ellipse, laquelle ayant été discrétisée en un certain nombre de points caractéristiques. Cette étude de trajectoire consiste à définir les actionneurs binaires à activer (dont l'état doit changer) pour atteindre le point suivant de la trajectoire.

La technique utilisée ici consiste à simplifier la recherche de trajectoire pour les robots possédant un grand nombre d'actionneurs (par exemple une trentaine), afin d'éviter d'explorer tout l'espace des configurations possibles à la recherche de la meilleure solution. Cet algorithme [62] fait usage de l'hyper-redondance de l'espace de travail généré par un tel robot. Afin de limiter l'espace des positions à explorer pour atteindre une position désirée, il tente d'effectuer chaque déplacement (chaque discrétisation de la trajectoire) en n'actionnant que 3 actionneurs binaires (sur les 30 actionneurs binaires d'un robot à 10 modules). Dans ce cas la recherche se focalise donc sur $\binom{30}{3} (=4060)$ positions au lieu d'explorer les 2^{30} positions atteignables par le manipulateur. Se limiter à un certain nombre d'actionneurs n'est possible que grâce à l'hyper-redondance de ce manipulateur

pour lequel chaque position peut être atteinte par un grand nombre de configurations différentes. Ceci se fait malheureusement au détriment de la précision de positionnement car il n'est pas toujours possible d'atteindre la position exacte en ne basculant que 3 actionneurs, et à une trajectoire entre deux points non contrôlée.

Les résultats obtenus avec cet algorithme sont présentés sur la FIGURE 6.1 pour un robot numérique possédant 10 modules (soit 30 actionneurs binaires). Comme nous pouvons le constater avec ces tests de trajectoire elliptique (FIGURE 6.1a) et de trajectoire possédant des points de rebroussement (FIGURE 6.1b), il est très difficile de forcer un robot numérique à emprunter une trajectoire désirée.

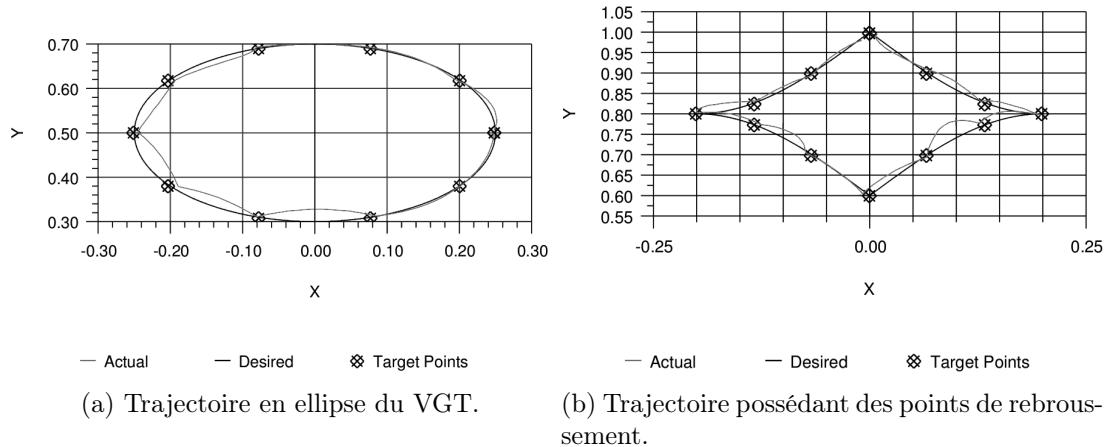


FIGURE 6.1 – Trajectoires complexes effectuées par un manipulateur VGT possédant 10 modules (30 actionneurs binaires)[62].

6.2 Application au DiMiBot

6.2.1 Particularités du DiMiBot

Dans le cas du DiMiBot l'utilisation des mêmes procédés de planification de trajectoire n'est pas applicable pour plusieurs raisons. Les algorithmes utilisés pour la planification de trajectoire de robots numériques tel que le VGT utilisent l'aspect fortement redondant de l'espace de travail généré par un tel robot. L'espace de travail généré par le DiMiBot ne présentant quant à lui aucune redondance — caractéristique essentielle définie par le cahier des charges — il nous faut définir une nouvelle approche permettant l'élaboration des calculs de trajectoire.

Une particularité fondamentale du DiMiBot, fait par ailleurs intervenir une certaine restriction dans les capacités de commande de ce microrobot. Il s'agit de la nature bistable des actionneurs binaires utilisés, qui ne nous permet pas de contrôler la dynamique de déplacement du robot. Si nous souhaitons par exemple basculer deux modules bistables simultanément, nous actionnerions les actionneurs thermiques de chaque modules au même instant, mais cela ne permettrait en aucun cas d'obtenir une dynamique identique

de basculement des deux modules. En effet, le phénomène de basculement se produisant en une fraction de milliseconde au cours de la durée d'actionnement des actionneurs thermiques (< 20 ms), il est impossible de prédire quel module basculera en premier. Nous ne pouvons donc pas identifier avec certitude la trajectoire empruntée par l'organe terminal du DiMiBot lors du basculement de plusieurs modules simultanément. Afin de contrôler de manière optimale la trajectoire empruntée par le robot, nous avons décidé de ne basculer qu'un seul module bistable à la fois.

Cette particularité des structures bistables — contrairement à d'autres types d'actionneurs binaires dont le déplacement est linéaire dans le temps (basés sur le phénomène électrostatique, ...) — nous force à établir un procédé de planification de trajectoire adapté au DiMiBot.

Il est maintenant nécessaire de connaître les types de déplacements qu'il est possible d'effectuer avec cette restriction d'actionnement d'un seul module à la fois. La nature de l'espace de travail atteignable par le DiMiBot, bien qu'étant pratique par sa forme carré et sa répartition homogène, présente une particularité pouvant être difficile à contourner lors des calculs de planification de trajectoire. Cette particularité concerne la distance parcourue par l'organe terminal lors du basculement d'un module bistable. Les modules bistables du microrobot sont numérotés en fonction du déplacement qu'ils génèrent sur l'organe terminal.

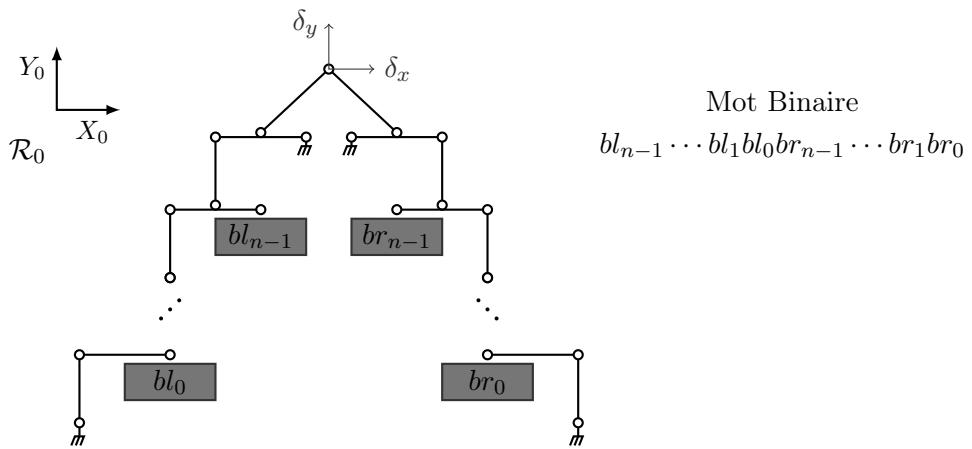


FIGURE 6.2 – Schéma cinématique de la structure robotique.

Les modules correspondant aux bits de poids faible (au bas de la structure, bl_0 et br_0) génèrent un déplacement d'un seul incrément (égal à la résolution de l'espace de travail), tandis que les modules de poids fort (bl_{n-1} et br_{n-1} pour un microrobot symétrique possédant $2n$ modules bistables) génèrent un déplacement valant 2^{n-1} incréments. Ainsi, pour se déplacer d'un point à un autre en ne basculant qu'un module à la fois, il est souvent nécessaire de basculer un grand nombre de modules, pouvant générer de grands déplacements, et conduisant parfois à traverser tout l'espace de travail. Ceci est

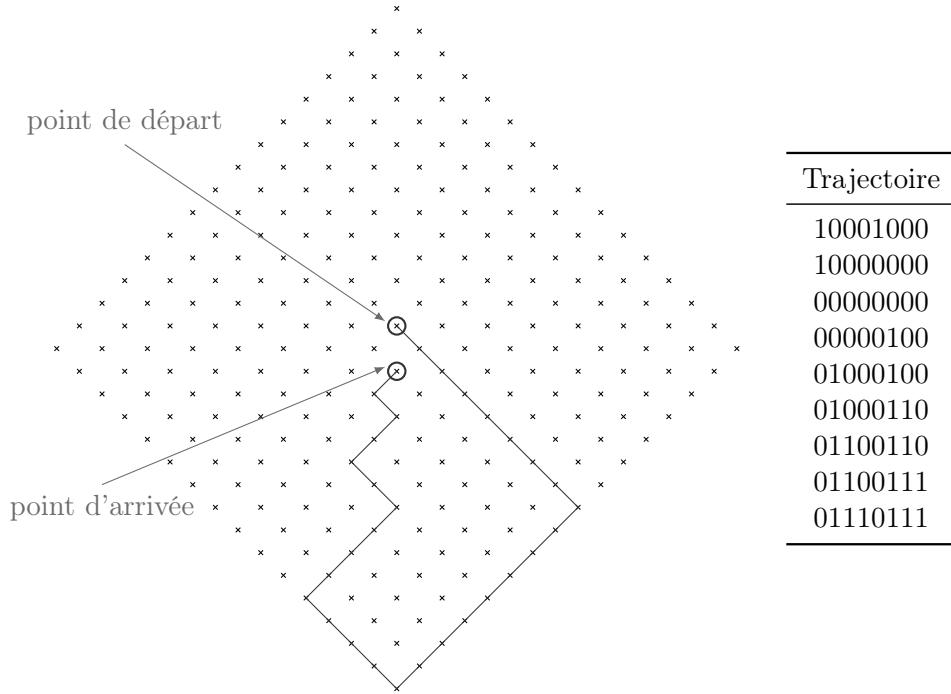


FIGURE 6.3 – Exemple de trajectoire au sein de l'espace de travail d'un DiMiBot à 8 modules, générant 256 positions atteignables.

particulièrement le cas lorsque le déplacement d'un point à un autre fait intervenir le basculement d'un bit de poids fort générant un déplacement d'une distance égale à la moitié de la taille de l'espace de travail.

Une illustration de cette particularité est présentée sur la FIGURE 6.3 où est calculée la trajectoire de l'organe terminal permettant de relier deux points au centre de l'espace de travail. Dans cet exemple un DiMiBot symétrique à 8 modules (générant 256 positions atteignables) est utilisé. Les 8 bits du microrobot doivent être basculés pour permettre le déplacement du point de départ (de mot binaire 10001000_b) au point d'arrivée (01110111_b). Le déplacement entre ces deux points fait donc intervenir au minimum 8 étapes de basculement. Plusieurs chemins sont envisageables permettant le passage d'un point à un autre. La différence entre ces chemins n'est autre que l'ordre dans lequel s'effectue le basculement de ces 8 modules. Dans ce cas, étant donné qu'il est nécessaire de basculer 8 modules, $8! = 40320$ trajectoires sont envisageables. Le choix effectué ici à titre d'illustration consiste à basculer en premier les bits de poids fort (du côté droit, puis du côté gauche). Ceci se traduit par des déplacements de grande amplitude en premier, puis de plus en plus petit jusqu'à atteindre le point objectif. La distance parcourue par l'organe terminal lors de cette trajectoire est égale à $2^3 + 2^3 + 2^2 + 2^2 + 2^1 + 2^1 + 2^0 + 2^0 = 30$ incrément. Chacune des $8!$ trajectoires minimisant la distance parcourue entre ces deux points faisant intervenir les mêmes modules une seule fois, la distance parcourue par

l'organe terminal est la même pour toutes ces solutions envisageables.

Cette réflexion peut être menée pour tout déplacement entre deux points de l'espace de travail, quel que soit le type de DiMiBot considéré (même non symétrique). En connaissant les mots binaires correspondant aux positions de départ et d'arrivée (calculés par le modèles géométrique inverse), nous pouvons déterminer la distance parcourue lors de la trajectoire minimale permettant de joindre ces deux points. Pour cela il suffit d'appliquer l'opération booléenne XOR (NON-OU) bit à bit aux deux mots binaires calculés (de départ et d'arrivée) afin de déterminer les modules qu'il est nécessaire de basculer. Le résultat de cette opération est exprimé sous la forme $Xl_{N_L-1} \dots Xl_0 Xr_{N_R-1} \dots Xr_0$ (pour un robot à N_L modules à gauche et N_R modules à droite). La distance minimale parcourue au cours de cette trajectoire est exprimée par l'équation (6.1) où $N_m = \max\{N_R; N_L\}$.

$$dist = \sum_{i=0}^{N_L-1} Xl_i \cdot 2^{i+N_m-N_L} + \sum_{j=0}^{N_R-1} Xr_j \cdot 2^{j+N_m-N_R} \quad (6.1)$$

Avec cette contrainte n'autorisant le basculement que d'un module à la fois, le microrobot ne peut pas être utilisé pour réaliser des trajectoires complexes, telles que des trajectoires elliptiques, mais se limite à des déplacements en ligne droite de longueur plus ou moins longues. Cependant, pour les tâches de micromanipulation auxquelles il est destiné, ce type de trajectoire ne présente pas un grand intérêt.

Dans le cas du DiMiBot il est donc aisé de trouver un chemin minimal entre deux points, sans recourir à des calculs et algorithmes complexes. L'étude de planification de trajectoire, présente cependant un intérêt dans le cas où des obstacles sont présents dans la scène de manipulation. Le calcul de trajectoire devient alors plus compliqué et nécessite une nouvelle approche basée sur des calculs d'optimisation combinatoire.

6.2.2 Utilisation de la théorie des graphes

Le problème que nous voulons résoudre est souvent nommé problème du plus court chemin. Il consiste à déterminer la trajectoire à emprunter entre un point de départ et un point d'arrivée en optimisant un certain critère, souvent associé à la distance parcourue. Ce problème d'optimisation combinatoire, qui consiste à choisir *le* meilleur chemin parmi tous ceux possibles, fait généralement appel à la théorie des graphes qui permet de représenter de manière simple les différentes options de déplacement envisageables.

Un graphe est constitué de deux éléments : un ensemble non-vide fini de noeuds, noté V (d'après l'appellation anglaise *vertices*), et un sous-ensemble E (*edges*) de V^2 constituant les arêtes liant deux noeuds entre eux (symbole d'un déplacement possible entre ces deux noeuds). Le graphe est alors noté $G = (V, E)$. Le calcul du chemin optimal consiste à trouver un chemin (suite d'arêtes du graphe G) dont la somme des coûts (valeur attribuée aux arêtes en fonction d'un critère donné) soit minimale entre les points de départ

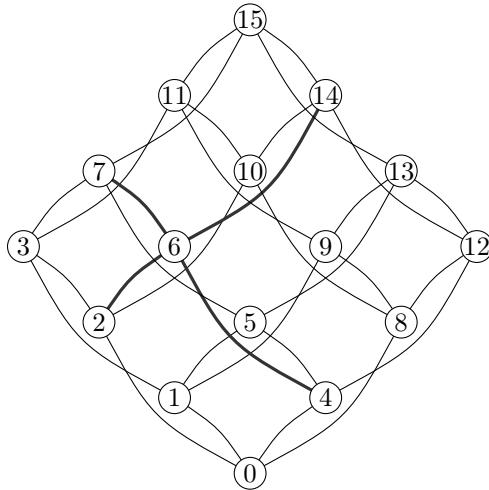


FIGURE 6.4 – Graphe d'un DiMiBot symétrique possédant 4 modules bistables.

et d'arrivée. La méthode dite *brutale* permettant d'atteindre ce résultat consiste à énumérer tous les chemins possibles du graphe permettant de lier les deux nœuds considérés, et de choisir celui qui minimise le critère. Ceci peut être réalisé pour de petits graphes, mais devient rapidement très consommateur de ressources (temps de calcul et stockage des données) quand la taille du graphe augmente.

La FIGURE 6.4 représente le graphe d'un DiMiBot symétrique à 4 modules bistables. Un tel microrobot permet de générer un espace de travail carré possédant 16 positions atteignables représentées par les 16 nœuds de ce graphe. La disposition de ces 16 nœuds dans cette représentation graphique correspond à la distribution géographique réelle des points atteignables. Chacun de ces nœuds est connecté par 4 arêtes à 4 autres nœuds, correspondant au basculement des 4 modules du robot. Au total, ce graphe possède 32 arêtes ($= (N_R + N_L) \times 2^{N_R + N_L - 1}$). Chacune possède un coût relatif au critère que l'on cherchera à optimiser.

Fonction de coût

Afin de trouver une trajectoire optimale, il est nécessaire de définir un critère définissant l'optimalité. Nous proposons ici deux possibilités de fonction de coût :

- nombre de basculements nécessaires ;
- distance parcourue par l'organe terminal.

Dans le premier cas toutes les arêtes du graphe possèdent le même poids (établi à 1), tandis que dans le deuxième cas les poids sont exprimés en puissance de 2. La puissance de ce poids correspondant à l'indice du module bistable associé à ce déplacement. Ainsi, dans le graphe de la FIGURE 6.4, sur les 4 arêtes reliées à un nœud, deux ont un poids de 1 ($= 2^0$, correspondant aux déplacements générés par les modules bl_0 et br_0), et les deux autres ont un déplacement de 2 ($= 2^1$, déplacements des modules bl_1 et br_1).

TABLEAU 6.1 – Matrice d'adjacence pondérée d'un DiMiBot symétrique à 4 modules.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	1	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0
3	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0
6	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0
7	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0
9	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0
10	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0
11	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0
13	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2
14	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	1	0

Prenons par exemple le point numéroté 6 dans le graphe de la FIGURE 6.4, correspondant au mot binaires 0110_b , il est connecté à deux arêtes de poids 1 le liant aux nœuds 2 (0010_b) et 7 (0111_b), et à deux arêtes de poids 2 le liant aux nœuds 4 (0100_b) et 14 (1110_b).

Un outil très pratique permettant de représenter mathématiquement un tel graphe est la matrice d'adjacence. Il s'agit d'une matrice carrée, symétrique si le graphe n'est pas orienté (chaque arête peut être parcourue dans les deux sens), dont la taille correspond au nombre de nœuds du graphe. Deux nœuds sont dits adjacents lorsqu'ils sont reliés entre eux par une arête. Le coût de cette arête est listé dans cette matrice. La matrice d'adjacence pondérée (où le poids correspond à la distance parcourue) correspondant au graphe de la FIGURE 6.4 est représentée dans le TABLEAU 6.1, où les adjacences du nœud 6 sont mises en évidence. Étant donné que les arêtes ne sont pas orientées (le basculement vers l'état 0 ou vers l'état 1 d'un même module relie les deux mêmes points de l'espace de travail), la matrice obtenue est symétrique, et nous retrouvons alors les mêmes informations sur la ligne et la colonne du nœud 6.

La distribution de points obtenue par un tel microrobot, ainsi que la numérotation que nous en avons choisie, permettent de calculer la matrice d'adjacence de n'importe quel DiMiBot. Suite aux deux choix possibles concernant la fonction de coût, deux calculs légèrement différents de la matrice d'adjacence sont envisageables. Une matrice d'adjacence unitaire (notée Adj dans l'équation (6.2)) correspondant au cas où le critère considéré est le nombre de basculement effectués, et une matrice d'adjacence pondérée (notée $AdjP$ dans l'équation (6.3)) lorsque le poids d'une arête correspond à la distance

(en nombre d'incrément) séparant les deux nœuds de cette arête. Le calcul de la matrice d'adjacence se fait de manière récursive :

$$\begin{aligned} Adj(1) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ Adj(N) &= \begin{bmatrix} Adj(N-1) & I(2^{N-1}) \\ I(2^{N-1}) & Adj(N-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Où N est le nombre total de modules constituant le microrobot numérique (qu'il soit paire ou impaire), et $I(x)$ est la matrice identité de taille x .

Dans le cas du calcul d'une matrice d'adjacence pondérée, où le poids utilisé correspond à la distance entre les deux positions, le calcul est légèrement plus compliqué et nécessite de considérer N_R et N_L , respectivement le nombre de modules utilisés dans la partie droite et dans la partie gauche du DiMiBot.

$$\begin{aligned} AdjP(1,0) &= \begin{bmatrix} 0 & 2^0 \\ 2^0 & 0 \end{bmatrix} \\ AdjP(N_L,0) &= \begin{bmatrix} AdjP(N_L-1,0) & 2^{N_L-1}I(2^{N_L-1}) \\ 2^{N_L-1}I(2^{N_L-1}) & AdjP(N_L-1,0) \end{bmatrix} \\ AdjP(N_L,N_R) &= \begin{bmatrix} AdjP(N_L,N_R-1) & 2^{N_R-1}I(2^{N_L+N_R-1}) \\ 2^{N_R-1}I(2^{N_L+N_R-1}) & AdjP(N_L,N_R-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Ainsi, la matrice d'adjacence du TABLEAU 6.1 est obtenue par le calcul de $AdjP(2,2)$.

6.2.3 Calcul de trajectoire

Dans cette approche, nous imaginons une version améliorée du DiMiBot pour laquelle une pointe a été collée à l'extrémité de l'organe terminal et descendant (perpendiculairement au plan du robot) sur la scène de micromanipulation. Le corps du microrobot n'est pas un obstacle en lui-même à la manipulation des micro-objets. Nous considérons alors le robot comme un point se promenant dans l'espace de travail atteignable et pouvant pousser des micro-objets dans toutes les directions et pas seulement dans les directions $+X_1$ et $+Y_1$ comme c'était le cas pour le test de micromanipulation d'une microbille au CHAPITRE 5.

À partir de la matrice d'adjacence définie précédemment, nous pouvons explorer le graphe à la recherche d'un chemin optimal permettant de relier deux points désirés. La méthode *brutale* permettant de réaliser ce calcul consiste à énumérer tous chemins possibles reliant ces deux points, et de choisir celui qui minimise la fonction de coût.

Un algorithme développé par Edsger Dijkstra en 1956 [32] permet de simplifier cette recherche. Cette technique consiste à explorer tous les chemins possibles du graphe par ordre croissant de coût (du plus court au plus long) jusqu'à en trouver un qui permette d'atteindre le point désiré. Cet *algorithme de Dijkstra* est détaillé sur l'**Algorithme 1**.

Cet algorithme recherche le chemin optimal entre le nœud de départ n_0 et le nœud d'arrivée n_{but} . Pour cela il utilise deux ensembles de nœuds, un ensemble ouvert \mathcal{O} des

Algorithme 1 : Algorithme de Dijkstra(n_0, n_{but}).

```

début
  initialiser  $\mathcal{O}$  à  $(n_0)$  avec  $g^*(n_0) = 0$ 
  initialiser  $\mathcal{F} \leftarrow \emptyset$ 
  tant que  $\mathcal{O} \neq \emptyset$  faire
    choisir un nœud  $n$  de  $\mathcal{O}$  pour lequel  $g^*(n)$  est minimum
    si  $n = n_{but}$  alors
      retourner(succès)
    pour chaque voisin  $n'$  du nœud  $n$  tel que  $n' \notin \mathcal{F}$  faire
       $g' = g^*(n) + c(n, n')$ 
      si  $n' \notin \mathcal{O}$  alors
        ajouter  $n'$  à  $\mathcal{O}$  avec  $g^*(n') = g'$ 
        attacher un pointeur de  $n'$  vers  $n$ 
      sinon
        si  $g' < g^*(n')$  alors
           $g^*(n') = g'$ 
          déplacer le pointeur de  $n'$  vers  $n$ 
      deplacer  $n$  de la liste  $\mathcal{O}$  dans  $\mathcal{F}$ 
    retourner(échec)
fin

```

nœuds à considérer, et un ensemble fermé \mathcal{F} des nœuds déjà étudiés. La fonction $g^*(n)$ représente la distance séparant le nœud n du noeud de départ n_0 , calculé avec la fonction de coût $c(n, n')$. À la fin de l'algorithme, le chemin optimal calculé est représenté par la liste chaînée construite par les pointeurs successifs définis au cours de l'algorithme.

La liste des voisins d'un nœud est calculée à partir de la matrice d'adjacence (éléments non nuls de la ligne correspondant au nœud considéré) dans laquelle est défini le coût entre le nœud et ses voisins.

Cet algorithme permet de calculer le chemin le plus court entre deux noeuds d'un graphe, mais nécessite cependant une grande capacité de calcul puisqu'explorant une grande zone du graphe dans toutes les directions à la fois. Une version alternative de cet algorithme permet de diminuer les ressources nécessaires en partant de deux nœuds. Il s'agit de l'algorithme de Dijkstra bidirectionnel. Il consiste à effectuer l'algorithme de Dijkstra en partant de n_0 et l'algorithme de Dijkstra inverse (pour lequel le sens des arêtes est inversé) en partant du nœud n_{but} . L'algorithme se termine lorsqu'un même nœud est scanné par les deux directions de recherche.

6.2.4 Introduction des obstacles

Comme expliqué précédemment, dans le cas du DiMiBot, il n'est pas difficile de trouver l'un des chemins les plus courts en basculant les modules nécessaires les uns après

les autres. L'algorithme de Dijkstra ne fait que choisir le premier plus court chemin qu'il calcule. L'utilisation d'un tel algorithme n'est justifié que pour des cas plus difficiles où certains obstacles viennent perturber ce calcul.

Cependant, cela introduit une difficulté supplémentaire dans le cas du DiMiBot qu'il est nécessaire de prévenir. En théorie des graphes (souvent utilisée pour des configurations géographiques), la définition d'un nœud comme obstacle consiste généralement à supprimer ce nœud du graphe, ainsi que toutes les arêtes qui y sont connectées. Dans le cas du DiMiBot, cela est plus compliqué. Il est en effet nécessaire de supprimer certaines autres arêtes. Reprenons l'exemple du nœud 6 du graphe de la FIGURE 6.4 que nous supposerons comme étant un obstacle. Dans ce cas les 4 arêtes liées au nœud 6 (en direction des nœuds 2, 4, 7 et 14) sont bien évidemment supprimées, mais il faut également supprimer les arêtes qui généreraient un déplacement passant par cet obstacle. Il s'agit des arêtes connectant les nœuds 2 à 10, et 5 à 7. La difficulté consiste ici à déterminer ces arêtes supplémentaires et à les supprimer de la matrice d'adjacence. Ceci est fait par l'**Algorithme 2**.

Algorithme 2 : Algorithme de suppression des arêtes non triviales en présence d'obstacles.

début

Considérer uniquement les points suivant la rangée de direction X_1 contenant l'obstacle n_o

pour chaque point n de cette rangée d'un côté de n_o **faire**

pour chaque bit bl_i du côté gauche de la structure **faire**

$n' \leftarrow$ inverser le bit bl_i du point n

si n' et n sont de part et d'autre de n_o **alors**

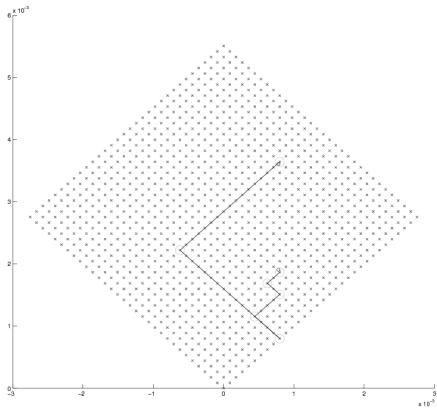
$\quad \quad \quad$ Supprimer l'arête (n', n) de la matrice d'adjacence

Répéter pour la rangée de direction Y_1 contenant l'obstacle n_o (avec les bits br_j)

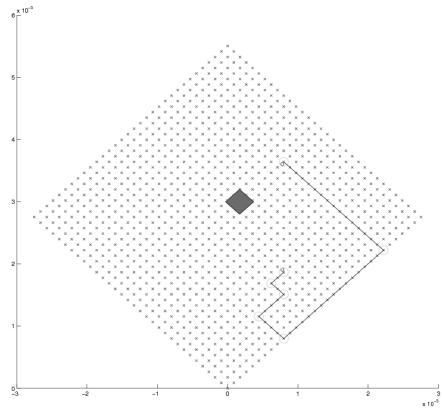
fin

Nous avons testé cet algorithme sur un espace de travail théoriquement généré par un DiMiBot possédant 10 modules bistables (1024 positions atteignables). La FIGURE 6.5 présente les résultats de calcul de trajectoire dans différents cas de présence d'obstacles. Lors de l'implémentation de cet algorithme de Dijkstra sous Matlab, le temps nécessaire de calcul pour trouver le plus court chemin dans un espace de travail généré par un DiMiBot possédant 10 modules bistables est d'environ 23,5 s. L'algorithme de Dijkstra bidirectionnel permet quant à lui de trouver un chemin similaire (de même longueur) mais en un temps beaucoup plus court ($\sim 8,5$ s). Ces calculs ont été effectués sur un PC sous linux avec un processeur Intel Core 2 Duo à 3,00 GHz.

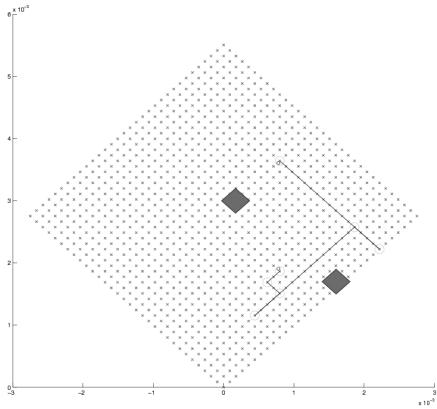
Dans le dernier cas de la FIGURE 6.5, la distance parcourue est un peu plus grande que dans les autres cas (les obstacles empêchant de trouver un chemin plus court). La distance est alors de 46 incrément contre 44 dans les autres cas, et le temps de calcul est 1 s plus long.



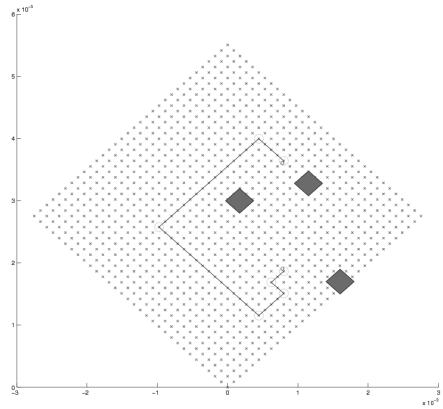
(a) sans obstacle.



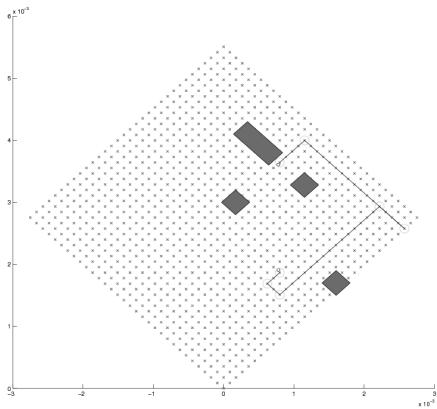
(b) avec 1 obstacle.



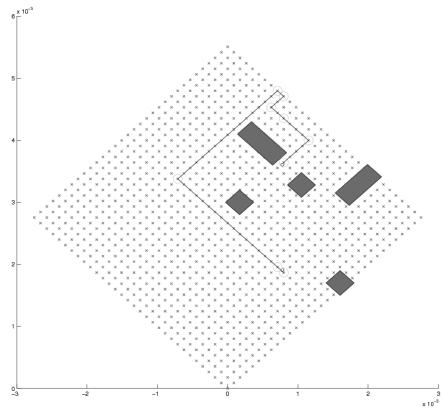
(c) avec 2 obstacles.



(d) avec 3 obstacles.



(e) avec 4 obstacles.



(f) avec 5 obstacles.

FIGURE 6.5 – Application de l'algorithme de Dijkstra dans un espace de travail de 1024 points dans des situations sans obstacle et avec plusieurs obstacles.

Cet algorithme de Dijkstra permet d'obtenir de très bons résultats puisqu'il assure de trouver le chemin le plus court entre deux points. Il peut cependant s'avérer très lent puisqu'il nécessite d'explorer une grande partie du graphe. Un temps de calcul de 23,5 s est déjà long pour un microrobot à 10 modules, mais peut s'étendre à plus de 15 min en rajoutant seulement 2 modules supplémentaires. D'autres algorithmes ont été développés par la suite pour améliorer les temps de calcul nécessaires. L'un des plus connu est l'algorithme A*.

6.3 Graphe hyper-cubique

6.3.1 Introduction à l'algorithme A*

Un algorithme souvent utilisé pour la planification de trajectoire est l'algorithme A*. Contrairement à l'algorithme de Dijkstra il ne permet pas toujours de trouver la solution optimale, mais permet en revanche de trouver une bonne solution en un temps de calcul très court. Il est inspiré de l'algorithme de Dijkstra auquel il ajoute l'utilisation d'une heuristique permettant d'orienter la recherche suivant une certaine direction. Il est en particulier très utilisé pour la recherche du plus court chemin géographique. Dans un tel cas, la carte est quadrillée, chaque pixel correspondant à un noeud (dont certains sont des obstacles inaccessibles), et les arêtes connectent les noeuds voisins. Une information très intéressante peut alors être extrapolée de cette représentation qui consiste à savoir dans quelle direction focaliser la recherche afin d'atteindre une position donnée. Par exemple, si l'on souhaite aller à une position qui se trouve au Nord-Est de notre position actuelle, il est plus judicieux de commencer les recherches vers le Nord ou vers l'Est que vers le Sud ou l'Ouest. Ces deux dernières options ayant statistiquement le plus de chances d'augmenter la distance du chemin à parcourir. Voici exactement ce que fait l'algorithme A* [47] dont le détail est exprimé dans l'**Algorithme 3**.

Dans cet algorithme, nous cherchons le chemin le plus court entre les noeuds n_0 et n_{but} . Étant donné qu'il est inspiré de l'algorithme de Dijkstra, les mêmes sous-ensembles ouvert \mathcal{O} et fermé \mathcal{F} sont définis dans cet algorithme. À chaque noeud considéré, une estimation de la distance du chemin complet (de n_0 à n_{but}) passant par ce noeud est calculée en sommant la distance déjà parcourue pour atteindre ce point (avec la même fonction de coût c) à une estimation (donnée par une certaine heuristique h^*) de la distance qu'il reste à parcourir pour atteindre le noeud n_{but} .

Cette heuristique est souvent représentée par le calcul de la distance euclidienne entre le noeud considéré au moment du calcul et le noeud de destination n_{but} , qui est une bonne estimation de la distance qu'il reste à parcourir. Dans d'autres cas, c'est la distance Manhattan qui représente une meilleure estimation. Cela pourrait par exemple être le cas du DiMiBot qui se déplace uniquement suivant les directions X_1 et Y_1 (on utiliserait alors la distance Manhattan dans le référentiel \mathcal{R}_1). Le choix de l'heuristique est important puisqu'il permet de justifier de l'optimalité de la solution trouvée. Il est prouvé que si cette heuristique choisie ne surestime pas la véritable valeur de la distance restante pour parcourir le chemin, alors la solution trouvée par l'algorithme est optimale.

Algorithme 3 : Algorithme $A^*(n_0, n_{but})$.

```

début
  initialiser  $\mathcal{O}$  à  $(n_0)$  et calculer  $f^*(n_0)$ 
  initialiser  $\mathcal{F} \leftarrow \emptyset$ 
  tant que  $\mathcal{O} \neq \emptyset$  faire
    choisir un noeud  $n$  de  $\mathcal{O}$  pour lequel  $f^*(n)$  est minimum
    si  $n = n_{but}$  alors
      retourner(succès)
    pour chaque voisin  $n'$  du noeud  $n$  faire
       $f' = f^*(n) + c(n, n') + h^*(n') - h^*(n)$ 
      si  $n' \notin \mathcal{F} \cup \mathcal{O}$  alors
        ajouter  $n'$  à  $\mathcal{O}$  avec  $f^*(n') = f'$ 
        attacher un pointeur de  $n'$  vers  $n$ 
      sinon
        si  $f' < f^*(n')$  alors
           $f^*(n') = f'$ 
          déplacer le pointeur de  $n'$  vers  $n$ 
          si  $n' \in \mathcal{F}$  alors
            le déplacer dans  $\mathcal{O}$ 
        fin
      déplacer  $n$  de la liste  $\mathcal{O}$  dans  $\mathcal{F}$ 
    retourner(échec)
fin

```

6.3.2 Application au DiMiBot

Dans le cas du DiMiBot, choisir une heuristique basée sur la position géographique n'est pas nécessairement le meilleur choix envisageable. En effet, même si la position géographique du point de destination est au dessus et à droite de la position actuelle, chercher dans cette direction n'apporte pas d'avantage particulier. En absence d'obstacles, chercher dans une direction particulière ou une autre n'a aucun intérêt, la différence essentielle sera que la solution trouvée sera différente, il s'agira de l'un des chemins optimaux. Illustrons cela avec l'exemple simple de la FIGURE 6.4. Si le point de départ est le point 6 et que nous souhaitons atteindre le noeud 10 (qui se trouve au Nord-Est du point 6), alors la recherche dans la direction Nord-Est conduira au chemin suivant 6 – 14 – 10, tandis qu'une recherche dans le direction Sud-Ouest conduira au chemin 6 – 2 – 10. Ces deux chemins nécessitent tous deux le basculement des deux mêmes modules (dans un ordre différent) et conduisent à la même distance (égale à 3 incrément). Cet exemple peut être extrapolé à des espaces de travaux plus complexes.

Afin d'utiliser une heuristique appropriée au DiMiBot, nous introduisons une nouvelle manière de représenter le graphe sur laquelle nous nous baserons pour appliquer l'algorithme A*. La matrice d'adjacence est, en effet, peu appropriée à des graphes de très grande taille. Avec un DiMiBot à n modules, le nombre de noeuds du graphe est 2^n , et la taille de la matrice d'adjacence est $2^n \times 2^n$. Effectuer des calculs avec de telles matrices d'adjacences est très gourmand en ressources.

6.3.3 Le graphe hyper-cubique

Nous introduisons ici une nouvelle représentation mathématique des graphes pour le DiMiBot. À la manière d'un graphe de type géométrique, nous souhaitons représenter dans ce graphe la "proximité numérique" des différents noeuds. C'est à dire que chaque voisin d'un noeud dans ce graphe sera adjacent à ce noeud. Ce nouveau graphe nous permet de nous repérer au sein de l'espace de travail et de savoir dans quelle direction nous orienter pour atteindre l'objectif fixé.

Le *graphe hyper-cubique* (tel que nous le nommons ici) est inspiré du positionnement du code gray pour permettre de positionner les noeuds les uns par rapport aux autres. Commençons par l'exemple simple d'un microrobot numérique à 2 modules. Il permet de générer 4 positions atteignables (FIGURE 6.6).

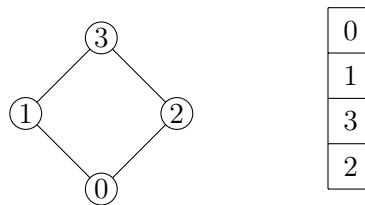


FIGURE 6.6 – Graphe hyper-cubique d'un DiMiBot à 2 modules.

Dans la représentation choisie, tous les noeuds positionnés les uns à côté des autres sont des voisins binaires. C'est à dire qu'un seul bit change entre ces deux noeuds. Il est important de remarquer que cette représentation est circulaire, en effet les noeuds 0 et 2 sont également voisins binaires. Nous avons choisi dans cette représentation de mettre le point 0 en haut, mais n'importe quel autre point aurait également fait l'affaire. Chaque noeud possède donc bien deux voisins binaires (grâce aux deux modules présents dans le microrobot).

Dans le cas d'un microrobot à 4 modules, le nombre de noeuds augmente. Chacun de ces noeuds possède alors 4 voisins binaires, et nous pouvons représenter ce nouveau graphe sous la forme d'un carré (FIGURE 6.7), également circulaire.

0	2	10	8
1	3	11	9
5	7	15	13
4	6	14	12

FIGURE 6.7 – Graphe hyper-cubique d'un DiMiBot à 4 modules.

Avec cette représentation nous observons rapidement que le noeud 6 possède 4 voisins qui sont les noeuds 2, 4, 7 et 14, et le noeud 0 possède les voisins 1, 2, 4 et 8.

En augmentant encore la taille du robot à 6 modules, cette représentation graphique prend la forme d'un cube dans lequel chaque noeud possède 6 voisins (2 dans chaque dimension du cube). De manière générale, cette représentation graphique prend la forme d'un hyper-cube (d'où l'appellation graphe hyper-cubique) dont la dimension est égale au nombre d'étages de modules présents dans le microrobot. Un DiMiBot symétrique possédant $2N$ modules bistables possède alors N étages de modules. La taille de ce graphe est de 4 noeuds par dimension, correspondant aux 4 états possibles par cet étage (comptant 2 modules). Le graphe compte donc au total 4^N noeuds ($= 2^{2N}$ états atteignables par le DiMiBot).

Dans le cas d'un robot non symétrique (possédant N_L modules à gauche et N_R modules à droite), le nombre d'étages du robot est $\max\{N_L; N_R\}$, ce qui est également la dimension du graphe obtenu. Cependant, dans ce cas, il ne s'agit pas d'un hyper-cube, mais d'un hyper-parallélépipède dont certaines dimensions possèdent seulement deux noeuds (et non quatre), il s'agit des dimensions correspondant aux étages ne possédant qu'un seul module.

Une caractéristique intéressante de cette représentation hyper-cubique¹ concerne le calcul de la fonction de coût. Chaque dimension i de cet hyper-cube correspond à l'étage $i - 1$ de modules bistables du DiMiBot. Or, à chaque étage de module correspond une valeur de longueur de déplacement de l'organe terminal. Par exemple l'étage $i - 1$ génère un déplacement de 2^{i-1} incrément. Ainsi, à chaque voisin du noeud n suivant la dimen-

1. Nous travaillons essentiellement avec des microrobots symétriques.

sion i du graphe hyper-cubique correspond un coût 2^{i-1} .

Maintenant que nous avons défini notre nouvel outil et vu qu'il pouvait simplifier la tâche, il s'agit de le construire mathématiquement pour qu'il soit utilisé dans l'algorithme A*. Nous utilisons pour cela une forme matricielle (plus précisément des hyper-matrices) pour stocker cette représentation. Ceci se fait de manière itérative par concaténation de matrices suivant la dimension i d'après l'équation (6.4).

$$\begin{aligned} G_0 &= 0 \\ G_i &= concat(i, G_{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1} + 2^{N+i-1}, G_{i-1} + 2^{N+i-1}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

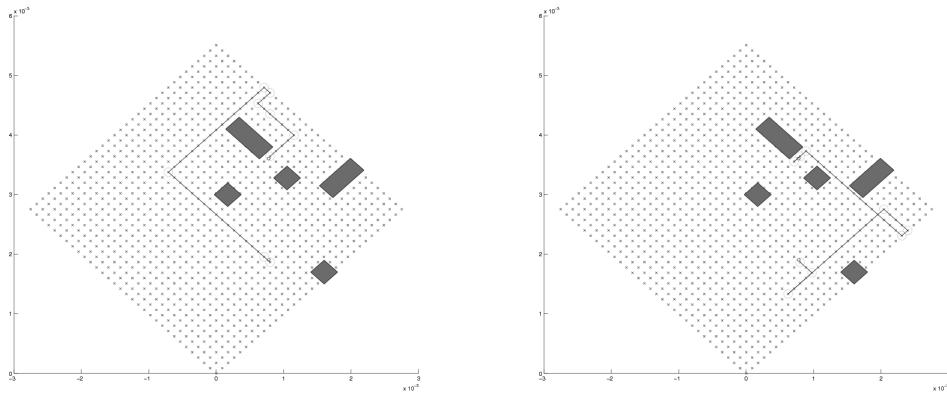
L'utilisation de ce graphe hyper-cubique permet de définir mathématiquement la position d'un nœud dans le graphe, ce qui permet d'effectuer facilement sa localisation. Il permet également de calculer facilement l'heuristique nécessaire à l'algorithme A* qui détermine le chemin qu'il reste à parcourir pour atteindre le nœud but. Elle est calculée en sommant les distances aux nœuds voisins dans chaque dimension du graphe hyper-cubique. Ce calcul revient à effectuer le calcul de l'équation (6.1).

6.3.4 Utilisation de l'algorithme A* pour le DiMiBot

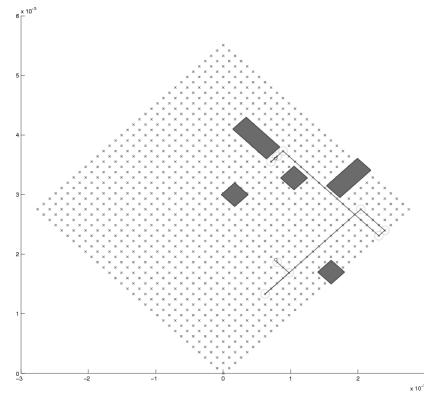
La définition de ce nouveau graphe hyper-cubique permet l'implémentation de l'algorithme A* (**Algorithme 3**) pour le calcul de trajectoire d'un DiMiBot. Le graphe hyper-cubique présente en effet quelques avantages de calculs en comparaison de l'utilisation de la matrice d'adjacence. Tout d'abord, il nécessite moins de ressources de stockage, possédant 2^{2N} éléments face à 2^{4n} pour la matrice d'adjacence (pour un robot symétrique à $2N$ modules). Il permet également une simplification de la recherche des $2N$ voisins binaires d'un point et ne nécessite pas d'explorer toute la lignes de la matrice d'adjacence à la recherche d'éléments non nuls (comme c'est le cas avec la matrice d'adjacence).

Ainsi, cet algorithme présente de bons résultats en comparaison des algorithmes précédents, comme présenté sur la FIGURE 6.8. Cet exemple montre le cas d'un robot à 10 modules, en présence de 5 obstacles. Les quatre algorithmes testés trouvent une des solutions du chemin optimal (avec une distance de 46 incrément). La grande différence entre ces algorithmes réside dans le temps de calcul nécessaire pour obtenir ce type de résultat (voir TABLEAU 6.2).

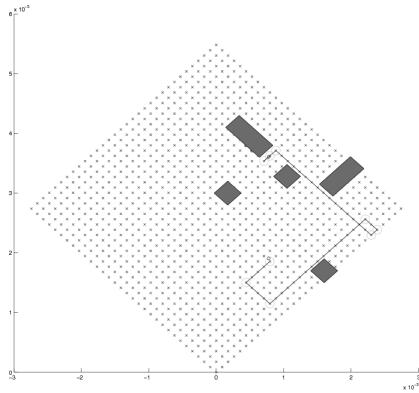
À la vue de ces résultats, l'utilisation de l'algorithme A* associé à l'utilisation du graphe hyper-cubique présente un intérêt considérable. Il est possible d'effectuer des calculs pour des robots pouvant posséder une vingtaine de modules sans difficulté, alors que le calcul de la matrice d'adjacence rencontre quelques problèmes bien avant cela, dû à des limitations de mémoire de Matlab.



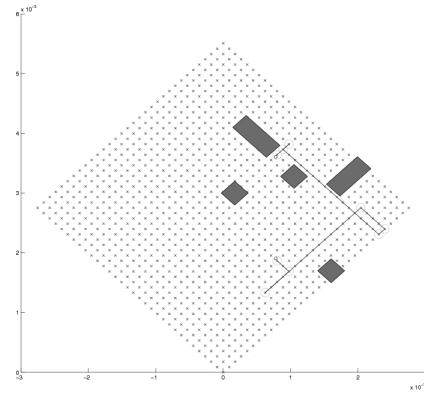
(a) Algorithme de Dijkstra.



(b) Algorithme de Dijkstra bidirectionnel.



(c) Algorithme A* avec la matrice d'adjacence.



(d) Algorithme A* avec le graphe hyper-cubique.

FIGURE 6.8 – Comparaison des différents algorithmes de planification de trajectoire.

TABLEAU 6.2 – Comparaison des temps de calcul nécessaires aux calculs de planification de trajectoire avec différents algorithmes.

Nombre de modules	Algorithme			
	Dijkstra	Dijkstra Bi-directionnel	A* avec matrice d'adjacence	A* avec graphe hyper-cubique
10	24,8 s	9,07 s	0,15 s	0,24 s
12	1120 s	300 s	1,17 s	0,94 s
14	-	-	-	1,37 s
16	-	-	-	4,21 s
18	-	-	-	41,8 s
20	-	-	-	193,5 s

- : limitation de mémoire de Matlab

6.4 Application à la micromanipulation

Les tâches de micromanipulation que nous avons testées pour ce type de microrobot concernent la poussée de micro-objets suivant les directions X_1 et Y_1 . Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires :

- Calcul de la trajectoire désirée de l'objet ;
- Pour chaque ligne droite de cette trajectoire :
 - Placement de l'organe terminal derrière l'objet ;
 - Poussée de l'objet.

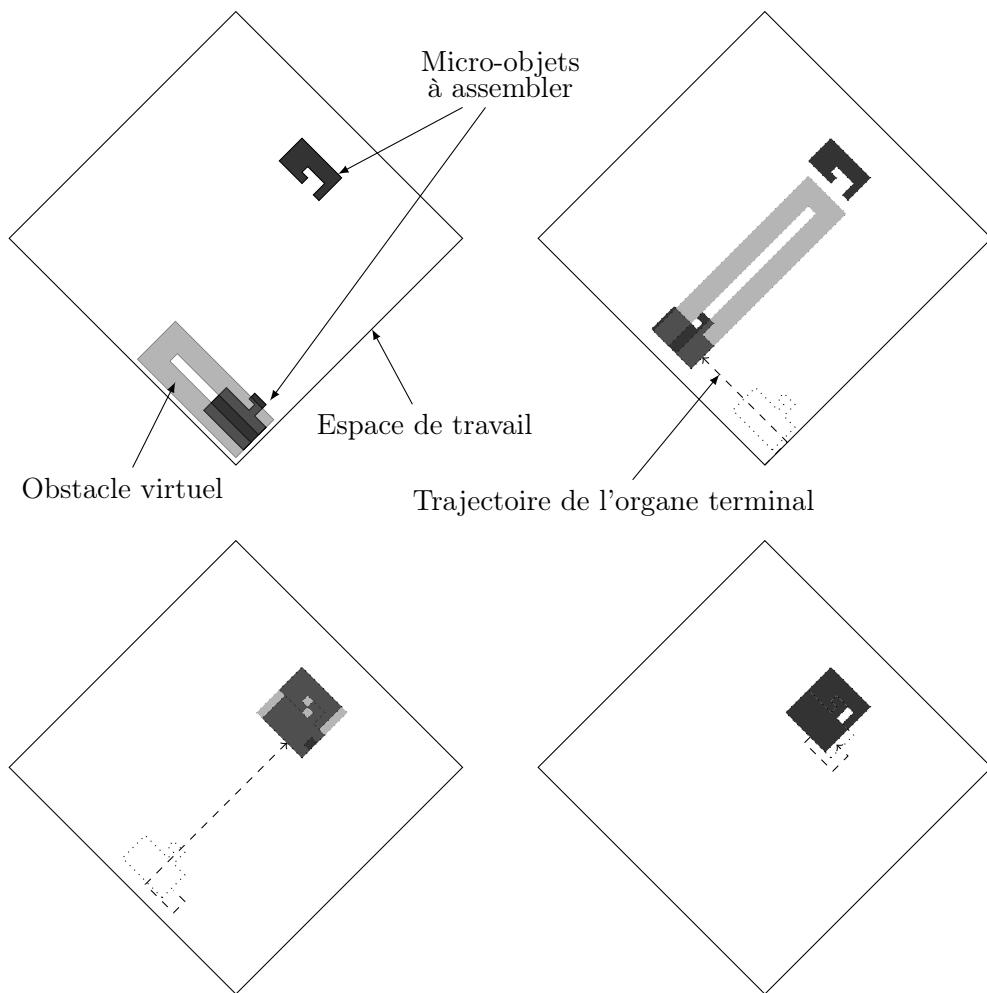


FIGURE 6.9 – Différentes étapes de micro-assemblage de micro-objets par planification de trajectoire avec obstacles virtuels.

Pour réaliser ces deux dernières étapes, un calcul de planification de trajectoire avec obstacles est utilisé. Ceci consiste à créer un obstacle virtuel en forme de U autour de l'objet. Le micro-objet se trouve à l'ouverture du U tandis que le point de destination

est au fond du U. Ainsi le microrobot contourne le micro-objet avant de le pousser (possiblement à plusieurs reprises) au fond de l'obstacle virtuel.

La FIGURE 6.9 montre l'utilisation des obstacles virtuels pour le micro-assemblage de deux micro-objets. Le déplacement du micro-objet se déroule en 3 étapes, et un calcul de planification de trajectoire de l'organe terminal (qui au départ se trouve au point 0) est effectué à chacune de ces étapes. Dans cet exemple, nous avons supposé que le DiMiBot utilisé permet d'atteindre une très grande résolution. Ainsi il est possible d'effectuer de très petits déplacements.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une première tentative de commande du DiMiBot. La nature de ce microrobot lui confère de bonnes propriétés de contrôle, ne nécessitant aucun capteur et assurant une bonne précision de positionnement en boucle ouverte. De plus, le déplacement d'un point à un autre ne nécessite pas de calculs complexes puisqu'il suffit de basculer les modules bistables correspondant aux bits différents entre le mot binaire du point de départ et celui du point de destination.

Cependant, ces calculs deviennent plus complexes lorsque des obstacles interviennent au sein de l'espace de travail. Pour cela, il est nécessaire de faire appel aux techniques d'optimisation combinatoire de la théorie des graphes. Des algorithmes tels que l'algorithme de Dijkstra ou l'algorithme A* ont été développés pour le calcul du chemin optimal au sein d'un graphe. Nous avons testé ces algorithmes sur le DiMiBot pour deux exemples de fonctions de coût servant de critère d'optimisation. Ces deux critères sont :

- le nombre de modules basculés ;
- la distance parcourue par l'organe terminal.

D'autres types de critères d'optimisation auraient pu être utilisés, par exemple pour trouver un chemin qui minimise l'aire occupée par la trajectoire empruntée.

Les algorithmes de Dijkstra et A* montrent de bons résultats puisqu'ils permettent de trouver l'un des chemins les plus courts entre les deux points considérés. L'algorithme A* est cependant beaucoup plus rapide grâce à l'utilisation d'une heuristique permettant d'orienter les recherches.

De plus nous, définissons une nouvelle représentation graphique (nommée graphe hyper-cubique) permettant de représenter notre espace de travail d'une manière plus simple. Cette nouvelle représentation permet de minimiser la taille des outils mathématiques qu'il est nécessaire de manipuler lors des calculs de planification de trajectoire, ce qui permet un gain de temps important lorsque nous considérons de très grands DiMiBots (possédant par exemple jusqu'à 20 modules bistables).

Conclusion et perspectives

Bilan des travaux

L'objectif de ce travail de thèse consistait à explorer un nouveau domaine de la micro-robotique permettant de palier certains problèmes fréquemment rencontrés lors de tâches de manipulation effectuées sur des objets de taille micrométrique. Dans ce mémoire, nous avons présenté la conception, la modélisation, la microfabrication et la commande d'un microrobot numérique, nommé DiMiBot (Digital MicroroBot). Ce microrobot, fondé sur l'utilisation d'actionneurs binaires, permet de générer un espace de travail discret d'une grande précision sans utiliser de capteur. Il associe une commande simplifiée et un encombrement réduit.

Après avoir présenté les enjeux et les moyens développés pour effectuer des tâches de micromanipulation adaptées à l'assemblage de microsystèmes, nous avons introduit le concept de robot numérique. Ce type de robot inspiré de l'électronique numérique utilise des actionneurs binaires permettant de générer des déplacements d'une grande précision sans utiliser de capteur. Ce concept est nouveau à l'échelle micrométrique et fondé sur des travaux antérieurs du laboratoire qui avaient permis de définir l'actionneur (module bistable) de base des microrobots numériques.

Le cœur de cette thèse consistait à définir une architecture robotique originale permettant l'utilisation de ces modules bistables en guise d'actionneurs. Le choix d'une architecture robotique parallèle s'est rapidement fait afin d'éviter des problèmes de poids et de connexions électriques des modules bistables (inévitables dans le cas d'une structure robotique serielle). Nous avons défini une cinématique parallèle originale permettant de transmettre le déplacement des modules bistables, fixés au bâti du microrobot, jusqu'à l'organe terminal. Cette architecture symétrique permet la génération d'un espace de travail plan de forme carrée dans lequel toutes les positions discrètes atteignables sont réparties de manière homogène.

La définition de cette cinématique a abouti à une modélisation robotique directe et inverse. Le modèle géométrique direct permet de calculer la disposition des points

atteignables par le microrobot au sein de l'espace de travail. Le modèle géométrique inverse, habituellement difficile à calculer pour les robots numériques du fait de la grande quantité de positions atteignables, fait dans ce cas appel à la distribution homogène et organisée des positions atteignables.

Afin de prévenir les problèmes liés aux articulations traditionnelles (utilisées dans les microrobots commercialisés), le microrobot développé ici est conçu de manière monolithique. Cette particularité permet non seulement d'éviter les défauts de précision liés aux jeux mécaniques, mais permet également d'éviter une étape d'assemblage fastidieuse. Une étude de dimensionnement des différents éléments de l'architecture robotique flexible a alors été menée par simulation en éléments finis. Elle fut essentiellement menée dans le but de définir les dimensions optimales des articulations flexibles pour une utilisation de ce microrobot adaptée aux tâches de micromanipulation.

L'étape de microfabrication du microrobot numérique ainsi dimensionné fut particulièrement difficile. De nombreuses tentatives permettant de trouver un process de microfabrication optimisé pour le DiMiBot ont été effectuées. Cette étape a finalement abouti à l'élaboration d'un process de microfabrication adéquat, ayant permis la réalisation des premiers prototypes de DiMiBot.

La caractérisation d'un DiMiBot à 4 modules bistables (générant chacun un déplacement de 35 μm) a été comparée aux résultats calculés par modélisation et par simulation, et a permis la validation expérimentale du concept de microrobot numérique. Ces résultats sont encourageants pour le futur de la microrobotique numérique. De dimensions $36 \times 24 \text{ mm}^2 \times 401 \mu\text{m}$, ce microrobot permet la génération d'un espace de travail carré de 10,5 μm de côté au sein duquel les 16 positions distinctes atteignables sont réparties de manière homogène avec une résolution de 3,5 μm . Il permet une robustesse de positionnement face à une force de 5,2 mN. Sa faible consommation énergétique ($< 30 \text{ mJ}$ pour effectuer un basculement), sa très grande répétabilité (mesurée à 90 nm) ainsi que son utilisation en boucle ouverte en font un outil très performant pour effectuer des tâches de micromanipulation précises. Des premières tentatives de micromanipulation d'une microbille, ainsi qu'une utilisation au sein d'un MEB permettent d'entrevoir les réelles capacités de ce microrobot.

Le DiMiBot fait l'objet d'un brevet déposé en Février 2011, et étendu à l'international en Janvier 2012.

Perspectives

De nombreuses perspectives de recherche se dessinent à partir de ces travaux. Une première partie de ces perspectives concerne l'extension de l'utilisation du DiMiBot à d'autres applications, tandis qu'une deuxième partie envisage le développement de nouvelles architectures de microrobot numérique.

Utilisation du DiMiBot

La microfabrication d'un premier prototype de DiMiBot à 4 modules a permis d'effectuer une caractérisation expérimentale validant les résultats théoriques. Il a également permis d'effectuer des premiers tests d'utilisation de ce microrobot. Cependant de nombreux tests d'application peuvent encore être proposés pour l'utilisation d'un tel microrobot. Un challenge intéressant serait son utilisation au sein d'un microscope électronique en transmission (TEM). Sa compatibilité MEB ayant déjà été validée, l'utilisation du DiMiBot au sein d'un TEM pour des applications de micromanipulation présenterait une grande avancée technologique. Aucun microrobot n'est à l'heure actuelle capable d'effectuer une telle tâche. Sa faible épaisseur (401 μm), sa compatibilité au vide d'air ainsi que sa commande précise en boucle ouverte en font un outil parfaitement adapté à ce type d'application.

Une autre perspective envisage une conception inverse d'un microrobot numérique. Afin d'être adapté à une tâche spécifique, il peut être demandé la génération d'un espace de travail particulier, dont la distribution des positions discrètes atteignables serait optimisée pour une tâche particulière. L'architecture ainsi conçue serait une optimisation de l'architecture développée ici dans laquelle des propriétés géométriques seraient modifiées.

Microrobot numérique tridimensionnel

À plus long terme, il est possible d'envisager la conception de microrobots numériques tridimensionnels, permettant de générer un espace de travail discret à 3 dimensions. Une cinématique possible peut être directement inspirée de celle développée ici (FIGURE 7.1a). La modélisation de ce type de microrobot est vraisemblablement similaire à celle du DiMiBot, où chacune des trois parties du microrobot génère un déplacement dans une direction de l'espace de travail tridimensionnel. Dans ces conditions de conception, la planification de la trajectoire de ce microrobot peut-être effectuée de la même manière. La représentation hypercubique peut également être utilisée dans ce cas, mais présente quelques particularités pouvant être difficiles à représenter de manière mathématique.

Cette cinématique présente un certain nombre d'avantages puisqu'elle permet simplement une adaptation des résultats précédemment établis, mais présente un fort inconvénient : il s'agit de la nature non monolithique de ce type d'architecture, qui nécessiterait alors des phases d'assemblage.

Une autre possibilité de microrobot numérique tridimensionnel pourrait prendre une forme similaire aux robots parallèles tels que la plateforme de Gough-Stewart, ou inspirée des robots planaires de type 3-PRR. Ce type de structure pourrait avoir l'avantage d'être de nature monolithique, où trois DiMiBot (inclinés par rapport au plan de fabrication, voir la FIGURE 7.1b) permettraient de positionner une plateforme suivant 3 ddl ou plus. Cet exemple de structure perdrait l'avantage de la génération d'un espace de travail non-redondant, et nécessiterait l'élaboration de nouvelles modélisations et de nouvelles lois de commande, mais permettrait de conserver une structure monolithique et une faible

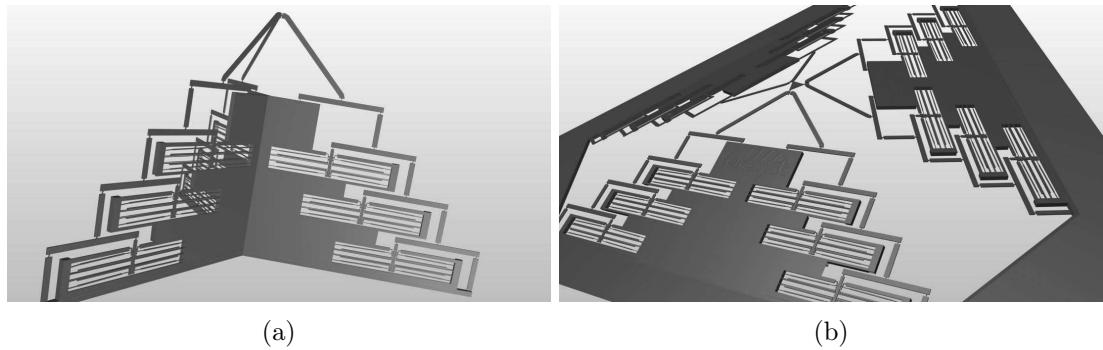


FIGURE 7.1 – Visualisation CAO de deux exemples de microrobots numériques tridimensionnels.

épaisseur.

Bibliographie

- [1] <http://www.asyri.ch/products/delta-robots.html>.
- [2] <http://www.nanotechnik.com/mm3a-lmp.html>.
- [3] <http://www.percipio-robotics.com>.
- [4] ADOUANE, L. *Architectures de contrôle comportementales et réactives pour la coopération d'un groupe de robots mobiles*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2005.
- [5] BARTH, J., AND KOHL, M. A bistable magnetically enhanced shape memory microactuator with high blocking forces. *Physics Procedia* 10, 0 (2010), 189 – 196. Systems/E-MRS 2010 Spring Meeting.
- [6] BASSET, P., KAISER, B., WALENNE, M., COLLARD, D., AND BUCHAILLOT, L. A 100v-ic for the remote powering and control of a microrobot using an electrostatic ciliary motion system. In *IEEE International Conference on TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (2003).
- [7] BEXELL, M., AND JOHANSSON, S. Fabrication and evaluation of a piezoelectric miniature motor. *Sensors and Actuators A : Physical* 75, 1 (1999), 8–16.
- [8] BEYELER, F., NEILD, A., OBERTI, S., BELL, D., SUN, Y., DUAL, J., AND NELSON, B. Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field. *Journal of Microelectromechanical Systems* 16, 1 (2007), 7–15.
- [9] BIRCH, M., QUINN, R., HAHM, G., PHILLIPS, S., DRENNAN, B., FIFE, A., VERMA, H., AND BEER, R. Design of a cricket microrobot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2000).
- [10] BONVILAIN, A., AND CHAILLET, N. Prototypes of thermal actuated microlegs insect-like micro-robot. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 36 (2002), 1277–1293.
- [11] BROUWER, D., DE JONG, B., AND SOEMERS, H. Design and modeling of a six dofs mems-based precision manipulator. *Precision Engineering* 34, 2 (2010), 307 – 319.

- [12] BRUFAU, J., PUIG-VIDAL, M., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J., SAMITIER, J., SNIS, N., SIMU, U., JOHANSSON, S., DRIESEN, W., BREGUET, J., GAO, J., ET AL. Micon : Small autonomous robot for cell manipulation applications. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (2005), IEEE, pp. 844–849.
- [13] CAPRARI, G., BALMER, P., PIGUET, R., AND SIEGWART, R. The autonomous micro robot “alice” : a platform for scientific and commercial applications. In *Micromechatronics and Human Science, 1998. MHS’98. Proceedings of the 1998 International Symposium on* (1998), IEEE, pp. 231–235.
- [14] CHARLOT, B., SUN, W., YAMASHITA, K., FUJITA, H., AND TOSHIYOSHI, H. Bistable nanowire for micromechanical memory. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18, 4 (2008), 045005 (7pp)–.
- [15] CHEN, Q. *Microrobotique numérique fondée sur l'utilisation de modules bistables : conception, fabrication et commande de modules monolithiques*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2010.
- [16] CHEN, Q., HADDAB, Y., AND LUTZ, P. Digital microrobotics based on bistable modules : Design of compliant bistable structures. In *IEEE/ASME International Conference on Mechtronic and Embedded Systems and Applications* (Beijing, China, 2008), pp. 36–41.
- [17] CHEN, Y., SUH, J., KOVACS, G., DARLING, R., AND BÖHRINGER, K. Modeling and control of a 3-degree-of-freedom walking microrobot. In *Hilton Head* (2006).
- [18] CHERNONOZHIN, V. *Binary manipulator motion planning*. PhD thesis, -, 2006.
- [19] CHIRIKJIAN, G. A binary paradigm for robotic manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1994), pp. 3063–3069.
- [20] CHIRIKJIAN, G., AND EBERT-UPHOFF, I. Numerical convolution on the euclidean group with applications to workspace generation. *Robotics, IEEE Transactions on* 14, 1 (1998), 123–136.
- [21] CHO, K.-J., AND ASADA, H. Architecture design of a multi-axis cellular actuator array using segmented binary control of shape memory alloy. In *Robotics, IEEE Transactions on* (2006).
- [22] CHRONIS, N., AND LEE, N. Electrothermally activated su-8 microgripper for single cell manipulation in solution. In *Journal of Microelectromechanical Systems* (2005).
- [23] CHU, X., XING, Z., GONG, W., LI, L., AND GUI, Z. Vibration analysis of stepping piezoelectric micro-motor using wiggle mode. In *Materials Sciences & Engineering B* (2003).
- [24] COCHRAN, K. R., FAN, L., AND DEVOE, D. L. High-power optical microswitch based on direct fiber actuation. *Sensors and Actuators A : Physical* 119, 2 (2005), 512 – 519.
- [25] DANEMAN, J., TIEN, N., SOLGAARD, O., PISANO, A., LAU, K., AND MULLER, R. Linear microvibromotor for positioning optical components. *Journal of Microelectromechanical Systems* 5 (1996), 159–165.

- [26] DAS, A., S., J., POPA, D., AND STEPHANOU, H. On the precision alignment and hybrid assembly aspects in manufacturing of a microspectrometer. In *IEEE Conference on Automation Science and Engineering* (2008).
- [27] DE BOER, M., LUCK, D., ASHURST, W., MABOUDIAN, R., CORWIN, R., WALRAVEN, J., AND REDMOND, J. High-performance surface-micromachined inchworm actuator. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13 (2004), 63–74.
- [28] DE JONG, B., BROUWER, D., DE BOER, M., JANSEN, H., SOEMERS, H., AND KRIJNEN, G. Design and fabrication of a planar three-dofs mems-based manipulator. *Journal of Microelectromechanical Systems* 19, 5 (2010), 1116–1130.
- [29] DE JONG, B., BROUWER, D., JANSEN, H., DE BOER, M., AND KRIJNEN, G. Nanometer resolution tem sample manipulator for rotational and translational positioning. In *19th European Conference on Solid-State Transducers, EuroSensors XIX 2005* (September 2005), vol. TP 43. This work has been made possible by the financial support of the Dutch ministry of economic affairs program IOP Precision Technology.
- [30] DEJEU, J., GAUTHIER, M., ROUGEOT, P., AND BOIREAU, W. Adhesion forces controlled by chemical self-assembly and ph : Application to robotic microhandling. *ACS Applied Materials & Interfaces* 1, 9 (2009), 1966–1973. PMID : 20355821.
- [31] DEVITA, L., PLANTE, J., AND DUBOWSKY, S. The design of high precision parallel mechanisms using binary actuation and elastic averaging : with application to mri cancer treatment. In *12th IF to MM World Congress* (2007).
- [32] DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1 (1959), 269–271. 10.1007/BF01386390.
- [33] DONALD, B., LEVEY, C., MCGRAY, C., PAPROTNY, I., AND RUS, D. An untethered, electrostatic, globally controllable mems micro-robot. In *Journal of microelectromechanical systems* (2006).
- [34] DONALD, B., LEVEY, C., AND PAPROTNY, I. Planar microassembly by parallel actuation of mems microrobots. *Journal of Microelectromechanical Systems* 17, 4 (2008), 789–808.
- [35] DONG, J., MUKHOPADHYAY, D., AND FERREIRA, P. M. Design, fabrication and testing of a silicon-on-insulator (soi) mems parallel kinematics xy stage. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17, 6 (2007), 1154–1161.
- [36] EBEOFORS, T., MATTSSON, J. U., AND KÄLVESTEN. A robust micro conveyer realized by arrayed polyimide joint actuators. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 10 (2000), 1–13.
- [37] EBEOFORS, T., ULFSTEDT MATTSSON, J., KÄLVESTEN, E., AND STEMME, G. A walking silicon micro-robot. In *IEEE International Conference on TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (1999).
- [38] EBERT-UPHOFF, I., AND CHIRIKJIAN, G. Efficient workspace generation for binary manipulators with many actuators. *Journal of Robotics Systems* 12 (1995), 383–400.

- [39] EBERT-UPHOFF, I., AND CHIRIKJIAN, G. Inverse kinematics of discretely actuated hyper-redundant manipulators using workspace densities. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Minneapolis, MN, 1996), vol. 2, pp. 1012–1017.
- [40] EDQVIST, E., SNIS, N., MOHR, R., SCHOLZ, O., CORRADI, P., GAO, J., DIÉGUEZ, A., WYRSCH, N., AND JOHANSSON, S. Evaluation of building technology for mass producible millimetre-sized robots using flexible printed circuit boards. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 19, 7 (2009), 075011.
- [41] ERISMIS, M. A., NEVES, H. P., PUERS, R., AND HOOF, C. V. Saw-tooth vernier ratchets for electrostatic inchworm actuators. *Sensors and Actuators A : Physical* 156, 1 (2009), 66 – 71. <ce :title>EUROSENSORS XXII, 2008</ce :title>.
- [42] FATIKOW, S., WICH, T., HULSEN, H., SIEVERS, T., AND JAHNISCH, M. Micro-robot system for automatic nanohandling inside a scanning electron microscope. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2006).
- [43] FREUDENREICH, M., MESCHEDER, U., AND SOMOGYI, G. Simulation and realization of a novel micromechanical bi-stable switch. *Sensors and Actuators A : Physical* 114, 2–3 (2004), 451 – 459.
- [44] FRUTIGER, D., KRATOCHVIL, B., AND NELSON, B. Magmites - microrobots for wireless microhandling in dry and wet environments. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (may 2010), pp. 1112 –1113.
- [45] GOMM, T., HOWELL, L. L., AND SELFRIDGE, R. H. In-plane linear displacement bistable microrelay. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12, 3 (2002), 257–264.
- [46] HAFEZ, M., LICHTER, M., AND DUBOWSKY, S. Optimized binary modular reconfigurable robotic devices. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 8 (2003), 18–25.
- [47] HART, P., NILSSON, N., AND RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on* 4, 2 (1968), 100 –107.
- [48] HÉRIBAN, D., AGNUS, J., GAUTHIER, M., ET AL. Micro-manipulation of silicate micro-sized particles for biological applications. In *5th International Workshop on Microfactories* (2006).
- [49] HOWELL, L. *Compliant Mechanisms*. 2001.
- [50] HU, W., ISHII, K. S., AND OHTA, A. T. Micro-assembly using optically controlled bubble microrobots. *Applied Physics Letters* 99, 9 (2011), 094103.
- [51] IVAN, I., HWANG, G., AGNUS, J., RAKOTONDRABE, M., CHAILLET, N., AND RÉGNIER, S. First experiments on magpier : a planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* (2011), IEEE, pp. 102–108.
- [52] KAAJAKARI, V., RODGERS, S., AND LAL, A. Ultrasonically driven surface micro-machined motor. In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (2000).

- [53] KHARBOUTLY, M., GAUTHIER, M., AND CHAILLET, N. Modeling the trajectory of a micro particle in a dielectrophoresis device for dynamic control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (may 2010), pp. 4125–4130.
- [54] KIM, K., LIU, S., ZHANG, Y., AND SUN, Y. Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic mems microgripper with two-axis force feedback. *Journal of Micromechanics Microengineering* 18, 5 (2008).
- [55] KIM, S.-H., HWANG, I.-H., JO, K.-W., YOON, E.-S., AND LEE, J.-H. High-resolution inchworm linear motor based on electrostatic twisting microactuators. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15, 9 (2005), 1674–1682.
- [56] KŁADATIS, P. E., AND BRIGHT, V. M. Prototype microrobots for micro-positioning and micro-unmanned vehicles. *Sensors and Actuators* 80 (2000), 132–137.
- [57] KOSEKI, Y., TANIKAWA, T., KOYACHI, N., AND ARAI, T. Kinematic analysis of translational 3-dof micro parallel mechanism using matrix method. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2000).
- [58] KWON, H. N., HWANG, I.-H., AND LEE, J.-H. A pulse-operating electrostatic microactuator for bi-stable latching. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15, 8 (2005), 1511–1516.
- [59] KWON, J., YANG, J., LEE, S., AND S.K., C. Electromagnetically actuated micromanipulator using an acoustically oscillating bubble. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21 (2011), 115023–115132.
- [60] KYATKIN, A. B., AND CHIRIKJIAN, G. Computation of robot configuration and workspaces via the fourier transform on the discrete-motion group. *The International Journal of Robotics Research* 18 (1999), 601–615.
- [61] LEE, K.-C., AND LEE, S. S. Deep x-ray mask with integrated electro-thermal micro xy-stage for 3d fabrication. *Sensors and Actuators A : Physical* 111, 1 (2004), 37 – 43. <ce :title>Micromechanics section of Sensors and Actuators, based on contributions revised from the Technical Digest of the 16th IEEE International conference on Micro Electro mechanical Systems (MEMS 2003)</ce :title>.
- [62] LEES, D., AND CHIRIKJIAN, G. A combinatorial approach to trajectory planning for binary manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Minneapolis, MN, 1996), vol. 3, pp. 2749–2754.
- [63] LEES, D., AND CHIRIKJIAN, G. An efficient method for computing the forward kinematics of binary manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Minneapolis, MN, 1996), vol. 2, pp. 1012–1017.
- [64] LENDERS, C., GAUTHIER, M., AND LAMBERT, P. Parallel microrobot actuated by capillary effects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2011).
- [65] LI, Y., AND XU, Q. A novel design and analysis of a 2-dof compliant parallel micromanipulator for nanomanipulation. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 3 (July 2006), 247–254.

- [66] LI, Y., AND XU, Q. Design and analysis of a totally decoupled flexure-based xy parallel micromanipulator. *Robotics, IEEE Transactions on* 25, 3 (2009), 645–657.
- [67] LICHTER, M., SUJAN, V., AND DUBOWSKY, S. Computational issues in the planning and kinematics of binary robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Washington, DC, USA, 2002), vol. 1, pp. 341–346.
- [68] LIU, Q., AND HUANG, Q.-A. Micro-electro-mechanical digital-to-analog converter based on a novel bimorph thermal actuator. In *IEEE International Conference on Sensors* (Orlando, FL, USA, June 2002), pp. 1036–1041.
- [69] LOBONTIU, N., PAYNE, J. S., O’MALLEY, E., AND SAMUELSON, M. Parabolic and hyperbolic flexure hinges : flexibility, motion precision and stress characterization based on compliance closed-form equations. *Precision Engineering* 26, 2 (2002), 183 – 192.
- [70] LOPEZ-WALLE, B., GAUTHIER, M., AND CHAILLET, N. Principle of a submerged freeze gripper for microassembly. *Robotics, IEEE Transactions on* 24, 4 (aug. 2008), 897 – 902.
- [71] LUHARUKA, R., AND HESKETH, P. J. A fully-compliant, in-plane rotary, bistable micromechanism. *ASME Conference Proceedings 2005*, 4224X (2005), 481–485.
- [72] LUHARUKA, R., AND HESKETH, P. J. Design of fully compliant, in-plane rotary, bistable micromechanisms for mems applications. *Sensors and Actuators A : Physical* 134, 1 (2007), 231 – 238.
- [73] LUHARUKA, R., AND HESKETH, P. J. A bistable electromagnetically actuated rotary gate microvalve. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18, 3 (2008), 035015 (14pp)–.
- [74] MIURA, K. Variable geometry truss concept. Tech. rep., The Institute of Space and Astronautical Science, 1984.
- [75] MORITA, T., KUROSAWA, M., AND HIGUCHI, T. An ultrasonic micromotor using a bending cylindrical transducer based on pzt thin film. In *Sensor and Actuators A* (1995).
- [76] MUKHOPADHYAY, D., DONG, J., PENGWANG, E., AND FERREIRA, P. A soi-mems-based 3-dof planar parallel-kinematics nanopositioning stage. *Sensors and Actuators A : Physical* 147, 1 (2008), 340–351.
- [77] PAROS, J. How to design flexure hinges. *Mach Des* 37 (1965), 151–156.
- [78] PAWASHE, C., FLOYD, S., AND SITTI, M. Dynamic modeling of stick slip motion in an untethered magnetic micro-robot. *Proceedings of Robotics : Science and Systems IV, Zurich, Switzerland* (2008).
- [79] PAWASHE, C., FLOYD, S., AND SITTI, M. Multiple magnetic microrobot control using electrostatic anchoring. *Applied Physics Letters* 94, 16 (2009), 164108.
- [80] PIEPER, D. *The kinematics of manipulators under computer control*. PhD thesis, Stanford University, Stanford, CA, 1968.
- [81] PLANTE, J.-S., AND DUBOWSKY, S. *Dielectric elastomers as electromechanical transducers*. Elsevier, 2008, ch. Binary Actuation, pp. 270–278.

- [82] QIU, J., LANG, J., SLOCUM, A., AND STRUMPLER, R. A high-current electro-thermal bistable mems relay. In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (Kyoto, Japan, 2003), pp. 64–67.
- [83] RAKOTONDRABE, M., CLÉVY, C., AND LUTZ, P. Complete open loop control of hysteretic, creeped, and oscillating piezoelectric cantilevers. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 7, 3 (2010), 440–450.
- [84] RAKOTONDRABE, M., HADDAB, Y., AND LUTZ, P. Development, modeling, and control of a micro-/nanopositioning 2-dof stick-slip device. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 14, 6 (2009), 733–745.
- [85] RÉGNIER, S., AND CHAILLET, N. *La Microrobotique. Applications à la Micromanipulation*. Lavoisier, Oct. 2008.
- [86] RUFFIEUX, D. An aln piezoelectric microactuator array. In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (2000).
- [87] SANTER, M., AND PELLEGRINO, S. Compliant multistable structural elements. *International Journal of Solids and Structures* 45, 24 (2008), 6190 – 6204.
- [88] SCHMOECKEL, F., AND WÖRN, H. Remotely controllable mobile microrobots acting as nano positioners and intelligent tweezers in scanning electron microscopes (sems). In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2001).
- [89] SHAY, B., HUBBARD, T., AND KUJATH, M. Linear frictional micro-conveyors. In *Sensor and Actuators A : Physical* (2008).
- [90] SIMU, U., AND JOHANSSON, S. Analysis of quasi-static and dynamic motion mechanisms for piezoelectric miniature robots. In *Sensor and Actuators A* (2006).
- [91] SUJAN, V., LICHTER, M., AND DUBOWSKY, S. Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (Como, Italy, 2001), vol. 2, pp. 1273–1278.
- [92] SUTHAKORN, J., AND CHIRIKJIAN, G. A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators. *Journal of Advanced Robotics* 15, 2 (2001), 225–244.
- [93] TAKEDA, M. Applications of mems to industrial inspection. In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (2001), pp. 182–191.
- [94] TIAN, Y., SHIRINZADEH, B., ZHANG, D., LIU, X., AND CHETWYND, D. Design and forward kinematics of the compliant micro-manipulator with lever mechanisms. *Precision Engineering* 33, 4 (2009), 466 – 475.
- [95] TOSHIYOSHI, H., KOBAYASHI, D., MITA, M., HASHIGUCHI, G., FUJITA, H., ENDO, J., AND WADA, Y. Microelectromechanical digital-to-analog converters of displacement for step motion actuators. *Journal of Microelectromechanical systems* 9, 2 (june 2000), 218–225.
- [96] WANG, Y. A fast workspace-density-driven inverse kinematics method for hyper-redundant manipulators. *Robotica* 24, 5 (Sept. 2006), 649–655.

- [97] WINGERT, A., LICHTER, M., AND DUBOWSKY, S. On the kinematics of parallel mechanisms with bi-stable polymer actuators. In *Int. Symp. Advances Robot Kinematics* (Barcelona, Spain, June 2002).
- [98] WINGERT, A., LICHTER, M., AND DUBOWSKY, S. On the design of large degree-of-freedom digital mechatronic devices based on bistable dielectric elastomer actuators. *Mechatronics, Transactions on* 11, 4 (August 2006), 448–456.
- [99] WOOD, R. The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect. *Robotics, IEEE Transactions on* 24, 2 (2008), 341–347.
- [100] WOOD, R., MAHADEVAN, R., DHULER, V., DUDLEY, B., COWEN, A., HILL, E., AND MARKUS, K. Mems microrelays. *Mechatronics* 8, 5 (1998), 535 – 547.
- [101] WU, Y., AND ZHOU, Z. Design calculations for flexure hinges. *Review of scientific instruments* 73, 8 (2002), 3101–3106.
- [102] YASUDA, T., SHIMOYAMA, I., AND MIURA, H. Microrobot actuated by a vibration energy field. *Sensors and Actuators* 43 (1994), 366–370.
- [103] YEH, R., CONANT, R., AND PISTER, K. Mechanical digital-to-analog converters. In *Tenth International Solid-State Sensors and Actuators Conference* (Sendai, Japan, 1999), pp. 998–1001.
- [104] YESIN, K., VOLLMERS, K., AND NELSON, B. Actuation, sensing, and fabrication for in vivo magnetic microrobots. *Experiments Robotics IX* 21 (2006), 321–330.
- [105] YI, B.-J., CHUNG, G. B., NA, H. Y., KIM, W. K., AND SUH, I. H. Design and experiment of a 3-dof parallel micromechanism utilizing flexure hinges. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 19, 4 (2003), 604–612.
- [106] YONG, Y., APHALE, S., AND MOHEIMANI, S. Design, identification, and control of a flexure-based xy stage for fast nanoscale positioning. *IEEE Transactions on Nanotechnology* 8, 1 (2009), 46.
- [107] YONG, Y., AND LU, T.-F. Kinetostatic modeling of 3-rrr compliant micro-motion stages with flexure hinges. *Mechanism and Machine Theory* 44 (2009), 1156–1175.
- [108] YONG, Y., LU, T.-F., AND HANDLEY, D. Review of circular flexible hinge design equations and derivation of empirical formulations. *Precision Engineering* 32 (2008), 63–70.
- [109] YUE, Y., GAO, F., ZHAO, X., AND GE, Q. J. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-dof perpendicular parallel micro-manipulator. *Mechanism and Machine Theory* 45, 5 (2010), 756 – 771.
- [110] ZETTL, B., SZYSZKOWSKI, W., AND ZHANG, W. Accurate low dof modeling of a planar compliant mechanism with flexure hinges : the equivalent beam methodology. *Precision Engineering* 29, 2 (2005), 237 – 245.
- [111] ZHOU, G., TAY, F. E. H., CHAU, F. S., ZHAO, Y., AND LOGEESWARAN, V. Micromechanical torsional digital-to-analog converter for open-loop angular positioning applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14, 5 (2004), 737–745.

Annexe A

Détail des simulations effectuées en éléments finis

Les simulations en éléments finis ont été réalisés à l'aide du logiciel Ansys. Elles ont permis de comprendre le type de comportement que nous pouvions attendre d'une telle architecture robotique, ayant pour premier but de valider la modélisation effectuée de manière analytique. Elles furent par la suite fortement utilisées pour une étude de dimensionnement des différentes parties constituant l'architecture flexible du microrobot.

Bien que des robots de taille différente (2, 4, 6, 8 et 10 modules) aient été simulés, les résultats se sont focalisés sur des architectures robotiques à 4 ou 6 modules.

A.1 Analyse statique

Lors de ces simulations, la totalité du robot n'a pas été modélisée, seule l'architecture robotique flexible l'a été (laissant de côté les modules bistables). L'objectif étant en partie de comprendre l'action générée par cette architecture flexible sur les différents modules bistables du robot.

Ce robot n'assurant que des déplacements planaires, les premières études furent focalisées sur le comportement de ce robot dans le plan. L'élément de maillage qui fut utilisé au sein du logiciel Ansys est le PLANE2 (FIGURE A.1) qui est un élément triangulaires à 6 noeuds. Il génère des contraintes et déformations quadratiques planaires.

Le maillage de la structure a été fait à l'aide de l'outil de maillage automatique interne à Ansys avec un maillage le plus fin possible. Des détails de maillage de cette structure sont représentés sur la FIGURE A.2, dans laquelle nous observons naturellement une finesse de maillage accrue au niveau des articulations flexibles.

Les caractéristiques utilisés lors de cette étude sont les suivantes :

- module d'Young du silicium $E = 1,69 \text{ GPa}$;
- coefficient de Poisson $\nu = 0,23$;
- épaisseur de la structure $100 \text{ } \mu\text{m}$.

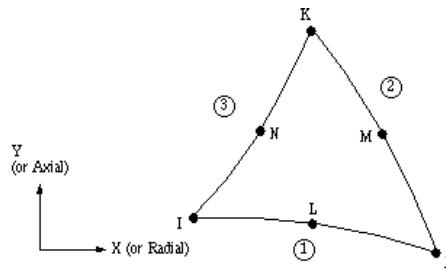


FIGURE A.1 – Élément Ansys PLANE2.

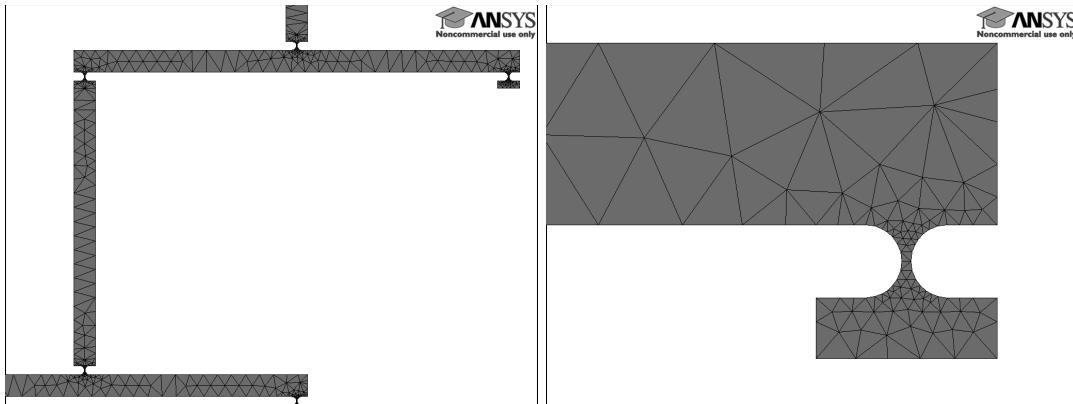


FIGURE A.2 – Détail du maillage de différents éléments de la structure flexible.

D'autres types d'éléments (planaires et parfois même volumiques) ont été utilisés à titre de comparaison pour différentes finesse de maillages. Ces études présentent des résultats similaires, avec tout de même une légère différence lors de maillages trop grossiers ($SMRTSIZE > 4$). Les résultats des différentes simulations sont comparés au résultats obtenus par le modèle géométrique direct (équation (3.15)). L'erreur maximale de positionnement de l'organe terminal entre la modélisation et la simulation est alors mesurée, et reproduite dans le TABLEAU A.1.

Il est par ailleurs important de garder quelques réserves quant aux résultats fournis par les simulations. Lors des simulations le matériau utilisé est supposé isotrope, ce qui n'est pas le cas du silicium utilisé (avec une orientation cristalline $\langle 100 \rangle$) pour lequel le module d'Young et le coefficient de Poisson varient en fonction de l'orientation.

La valeur de 9 nm d'erreur entre le modèle et la simulation n'est donc pas une valeur sûre, mais permet de valider la justesse de la modélisation analytique calculée (erreur très faible en comparaison de la résolution de l'espace de travail calculé), malgré les hypothèses considérées.

TABLEAU A.1 – Erreur maximale mesurée entre la position de l’organe terminal calculée par le modèle géométrique direct et celle simulée par éléments finis, pour différents éléments de maillage.

Élément	Erreur mesurée
PLANE182	7,925 nm
PLANE183	9,403 nm
PLANE2	9,400 nm
PLANE42	8,904 nm
PLANE82	8,904 nm
SHELL181	9,426 nm
SHELL43	8,904 nm
SHELL63	8,904 nm
SHELL93	9,403 nm

TABLEAU A.2 – Fréquence des quatre premiers modes de vibration de la structure robotique obtenus par simulation avec différents éléments de maillage.

Élément	Mode 1	Mode 2	Mode 3
SHELL181	1258 Hz	1807 Hz	2066 Hz
SHELL43	1266 Hz	1822 Hz	2079 Hz
SHELL63	1578 Hz	2833 Hz	2989 Hz
SHELL93	1243 Hz	1786 Hz	2039 Hz

A.2 Analyse modale

L’analyse modale fait intervenir la même structure (sans les modules bistables). Lors de cette étude des éléments de maillage volumiques ont été utilisé, assurant des déplacements tridimensionnels (éléments de type SHELL). Cette analyse modale a été faite en utilisant la méthode de Lanczos. Les résultats obtenus lors de cette analyse avec différents éléments de maillage sont représentés dans le TABLEAU A.2, fournissant des données sensiblement similaires.

Les simulations ne prenant pas en compte la présence des modules bistables du microrobot, ces résultats ne permettent que de fournir une information générale sur le comportement du DiMiBot.

Annexe B

Masques de microfabrication

B.1 Les 3 masques associés à la microfabrication

Structures réalisées sur ce wafer : Annexe

- 1 DiMiBot à 4 modules bistables ;
- 5 DiMiBot à 2 modules bistables ;
- 6 structures bistables seules ;
- 5 structures de test permettant de mesurer le module d'Young.

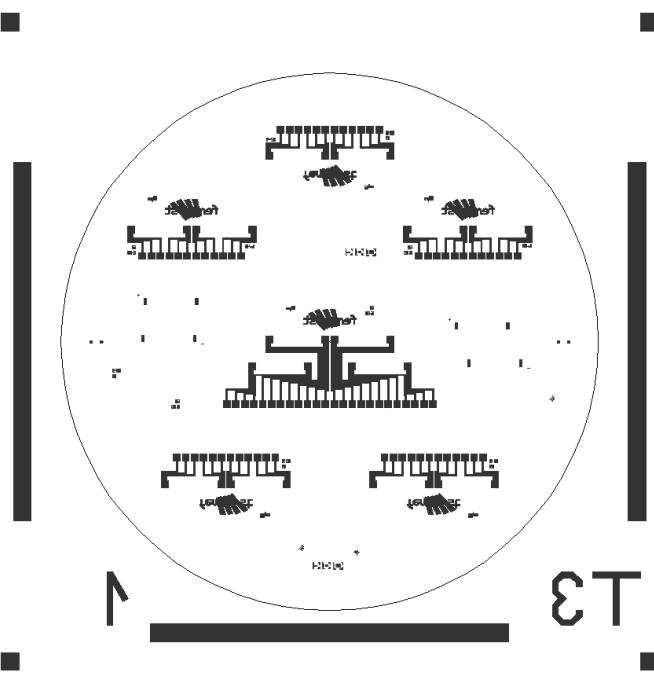


FIGURE B.1 – Masque A : connexions électriques.

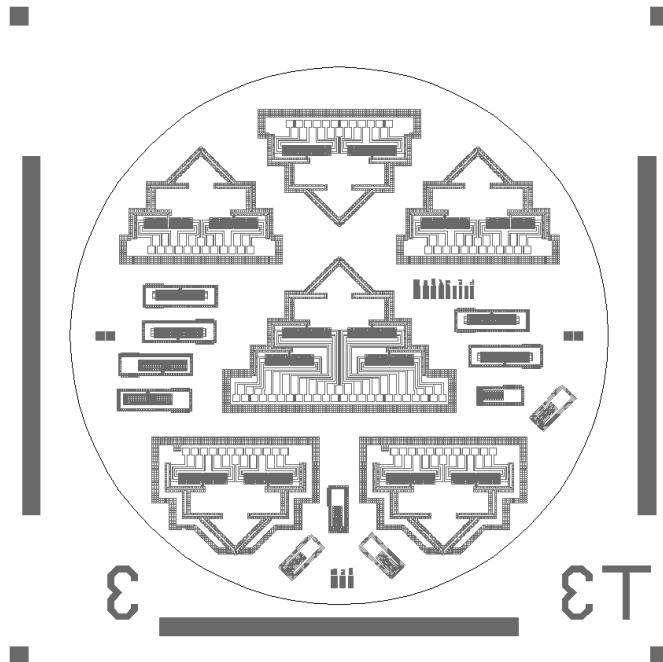


FIGURE B.2 – Masque B : gravure des parties mobiles.

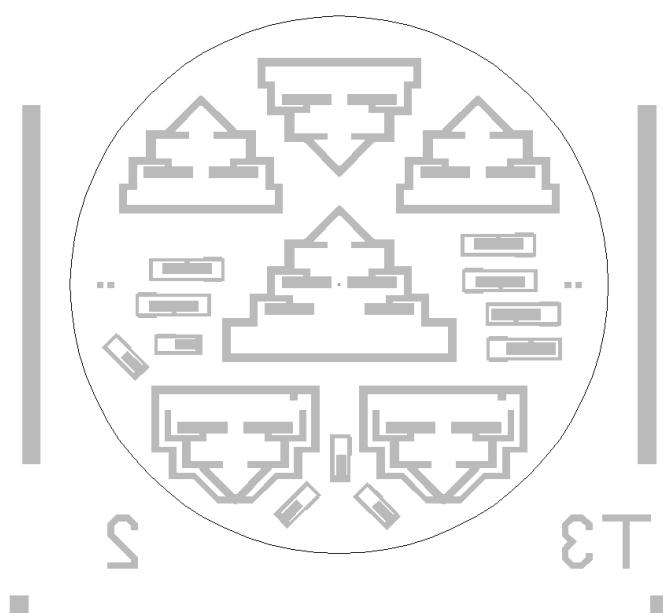


FIGURE B.3 – Masque C : libération des microrobots.

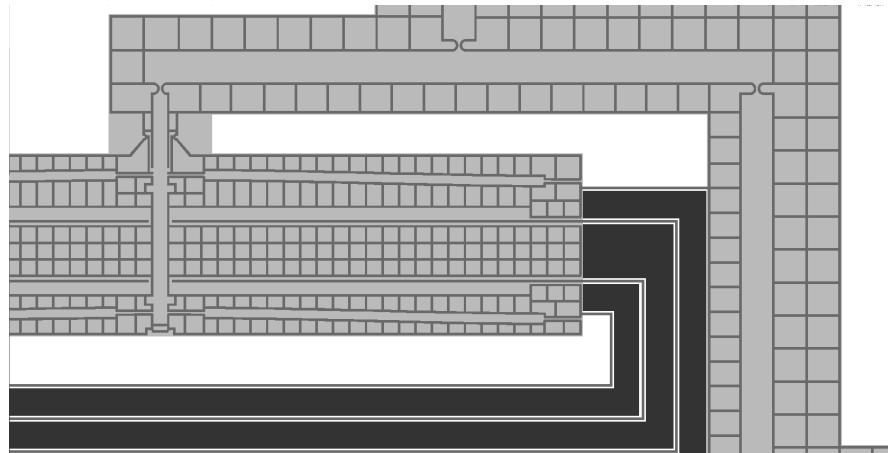


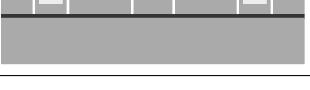
FIGURE B.4 – Détail des trois masques sur une zone regroupant un module ainsi que la poutre horizontale et la poutre verticale qui y sont connectées.

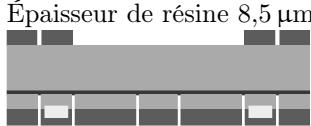
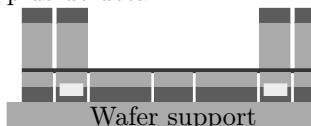
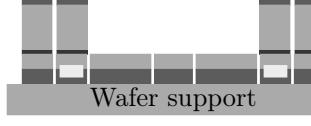
B.2 Détail du process de microfabrication

Wafer initial :

- Wafer 4" SOI (Silicon On Insulator)
- Résistivité : 0,01 – 0,02 Ωcm
- Orientation cristalline : $\langle 100 \rangle$
- Dopé : P
- Épaisseur du *device layer* : 100 μm
- Épaisseur du *BOX layer* : 1 μm
- Épaisseur du *handle layer* : 300 μm



	Process	Paramètre techniques	Remarques
1.0 Process 1 : Connexions électrique et contact ohmique			
1.1	Dépot d'aluminium	Dépôt de 800 nm d'aluminium sur la Pulve PLASSYS Utilisation de la cible Al 4" Générateur Huttinger <ul style="list-style-type: none"> - pression 7e-3 mBar - courant 1A - 8min (vitesse 100nm/min) 	<i>Le générateur huttinger peut être instable, il faut parfois réduire le courant.</i>  <i>Résultat réel : 760 ~ 850 nm avec 0,88A pendant 9min (vitesse ~ 90 nm/min)</i>
1.2	1 ^{ère} photolithographie (top side)	Résine : S1813 <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse 4000rpm - Accélération 4000rpm/s - Temps 30s Recuit à 120°C pendant 2min15s Exposition 60mJ/cm ² Développement 20s dans MF26A	Épaisseur de résine : 1,3 µm 
1.3	Gravure humide de l'aluminium	Temps de gravure ~ 30min	<i>Vérifier au microscope optique que tout l'aluminium a disparu, sinon cela pourrait perturber les prochaines étapes de gravure (cela peut résulter en une gravure non homogène)</i> 
1.4	Contact Ohmic	Recuit à 450°C pendant 1h sous vide	effectué par Pascal Blind 
Fin du process 1			
2.0 Process 2 : Structure en face supérieure			
2.1	2 ^{nde} photolithographie (top side)	Résine : AZ9260 <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse 4500rpm - Accélération 4000rpm/s - Temps 30s Recuit 105°C pour 5min Exposition 800 mJ/cm ² Développement ~ 1min30s dans AZ400K (avec 3/4 eau)	Épaisseur de résine 6,3 µm 
2.2	Gravure DRIE	Gravure 100 µm du device layer sur DRIE Alcatel Process Bosch (BR20) Temps total de gravure ~ 17min	Ne pas enlever la résine après gravure La résine sert à protéger l'aluminium du développeur lors de la photolithographie en face inférieure 
	Fin du process 2		

3.0 Process 3 : Libération de la structure			
3.1	3 ^{ème} photolithographie (bottom side)	Résine : AZ9260 <ul style="list-style-type: none"> – Vitesse 2600rpm – Accélération 3000rpm/s – Temps 30s Recuit 105°C pendant 5min Exposition 950 mJ/cm ² Développement ~ 2min dans AZ400K (avec 3/4 eau)	Épaisseur de résine 8,5 µm 
3.2	Gravure DRIE	Graver ~ 280 µm handle layer sur DRIE Alcatel Process Bosch (BR20) Temps total de gravure ~ 47min	vitesse de gravure ~ 5,8 µm/min 
3.3	Continuer gravure DRIE	Graver les derniers ~ 20 µm handle layer sur DRIE Alcatel Utilisation d'un wafer support pour protéger les structures maintenant fragiles du flux d'hélium (utilisé pour le refroidissement)	Cette étape est souvent la plus délicate. Voir les remarques générales pour plus de détail. 
3.4	Finir la gravure par RIE	Si nécessaire, utiliser la RIE Plassys pour graver précautionneusement les derniers microns de silicium SF6 20sccm O2 7sccm 10 µBar 75 W	
3.5	Gravure silice par RIE	Gravure SiO2 1 µm CHF3 10sccm C2F6 5sccm 60 µmBar 80 W	Temps total de gravure ~ 1h 
3.6	Nettoyage de la résine par plasma O2	Plasma O2 dans la RIE Plassys (les structures sont trop fragiles et doivent être nettoyées en environnement sec) O2 20sccm 100 µmBar 80 W	Temps total de nettoyage >30min pour chaque face 
	Fin du process 3		

Remarques générales

Pendant l'étape 3.3, lors de la gravure des derniers microns de la face inférieure, le problème principal est dû à l'augmentation de la température du wafer. Au sein de la DRIE Alcatel, un flux d'hélium provenant de la base de la chambre permet de refroidir le wafer lors du process de gravure. À cette étape du process, la structure robotique est presque entièrement gravée, et certains parties deviennent très fragiles et pourraient ne pas résister à la pression de ce flux. Afin de protéger la structure, un wafer support est collé (avec des gouttes d'huile) au wafer subissant la gravure. Cependant ce wafer support constitue alors un obstacle au flux d'hélium et empêche le refroidissement correct du wafer, même en diminuant la température à 10° (au lieu de 20°). Par ailleurs, étant donné que les structures ne sont supportées que par des poutres fines (liaisons sécables), la propagation de la chaleur devient difficile lorsque la structure n'est plus connectée au reste du substrat (lorsque le process de gravure est presque terminé). Ce problème de hausse de température conduit à des effets indésirés tel que la *liquéfaction* de la résine, et même la brûlure de résine et parfois même de certaines poutres en silicium (même en diminuant le temps de gravure à 1 ou 2 cycles). Pour cette raison il est parfois préférable de finir la gravure en RIE, qui est très long (même pour seulement quelques microns) et génère beaucoup de sur-gravure.¹

Historique du process

- Différents process ont été explorés lors de la fabrication du DiMiBot. La différence principale entre ces process est l'ordre dans lequel sont réalisées les différentes étapes, principalement concernant les étapes de gravure (face supérieure ou face inférieure en premier). Le process qui a finalement abouti à la réalisation d'une structure fonctionnelle est celui présenté ici (gravure du device layer en premier). Cependant quelques problèmes liés à l'utilisation du wafer support peuvent apparaître. Quelques poutres peuvent rester collée au wafer support, et casser ...
Une solution à ce problème serait de créer une surface incurvée du wafer support qui ne serait alors en contact qu'avec les bords du wafer à graver, mais pourrait accroître les problèmes liés à la température.
... La solution parfaite reste à trouver.
- Différentes résines ont également été testées (SPR-220 3.0 pour le masque de l'étape 2.1), mais les meilleurs résultats furent observés avec la résine AZ9260 qui permet la génération de flans de meilleur qualité, et permet de réaliser des masques plus épais. Cette dernière caractéristique est très intéressante puisque nous conservons ce masque lors de la gravure de la face inférieure.

1. Ce process pourrait être plus aisés avec la nouvelle DRIE qui possède un clampage électrostatique (et non mécanique). Ceci pourrait prévenir les problèmes de température.

Annexe C

Mesures effectuées sur MEMS Analyser

C.1 Actionnement du DiMiBot

Afin de contrôler l'actionnement des modules bistables, un système électronique faisant intervenir un microcontrôleur et des relais électriques est utilisé. Ce système définit le temps d'actionnement des paires d'actionneurs thermiques, permettant alors de contrôler l'énergie apportée au module bistable lors d'une action de basculement. Ceci fut d'ailleurs utilisé pour mesurer le temps d'actionnement minimum nécessaire au basculement du module au § 5.5.1. Afin d'effectuer les mesures du déplacements générés par le DiMiBot à 4 modules, cette carte électronique a été synchronisée avec le signal de sortie du MEMS Analyser.

C.2 Fonctionnement du MEMS Analyser

Le MEMS analyser est un système de mesure optique par stroboscopie pour les MEMS, permettant d'effectuer des mesures à l'échelle nanométrique. Afin d'observer la dynamique du déplacement d'un système, il est nécessaire que le système génère un déplacement périodique à une fréquence donnée. Le MEMS Analyser prend alors une image lors de chaque cycle périodique. L'instant auquel est prise cette image est décalé pour chaque cycle afin de reconstruire au final le cycle complet.

Les calculs de déplacement sont ensuite effectués par traitement d'images. Afin d'obtenir une bonne résolution de mesure, une référence fixe doit être placée dans la scène observée (voir FIGURE C.2).

C.3 Mesures

Les mesures ont été effectuées sur chacun des 4 modules bistables (mesurant le déplacement du shuttle entre les deux positions stables) ainsi que sur l'organe terminal (mesurant son déplacement associé à l'actionnement de chaque module). Ces mesures

ont effectuées sur des cycles de deux secondes au cours desquels un module bistable change d'état toute les secondes. La période d'échantillonnage étant de 25 ms, 80 images sont prises lors de cette mesure, 40 lorsque le module considéré est à l'état 0, et 40 lorsqu'il est à l'état 1. Les mesures de l'organe terminal lors de l'actionnement du module bl_1 sont représentées sur la FIGURE C.1. Ceci permet de mesurer le déplacement mesuré par ce module, ainsi que la répétabilité atteignable par ce module. Tous les résultats obtenus sont répertoriés dans le TABLEAU 5.2. Lors de la mesure de l'espace de travail complet

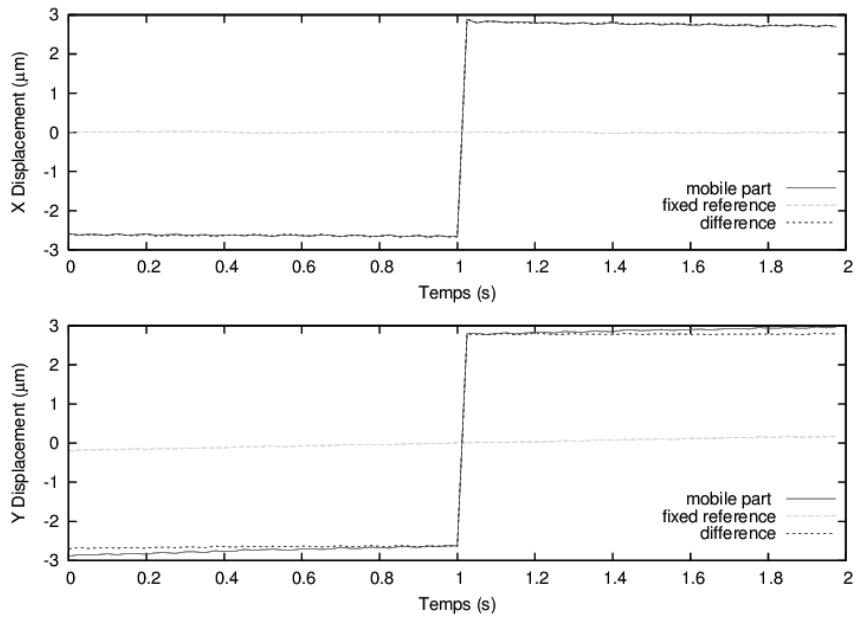


FIGURE C.1 – Résultats fournis par le MEMS Analyser.

atteignable, tous les actionneurs sont basculé un certain nombre de fois (FIGURE C.3) permettant alors de mesurer la position de chacune des 16 positions atteignables par le DiMiBot.

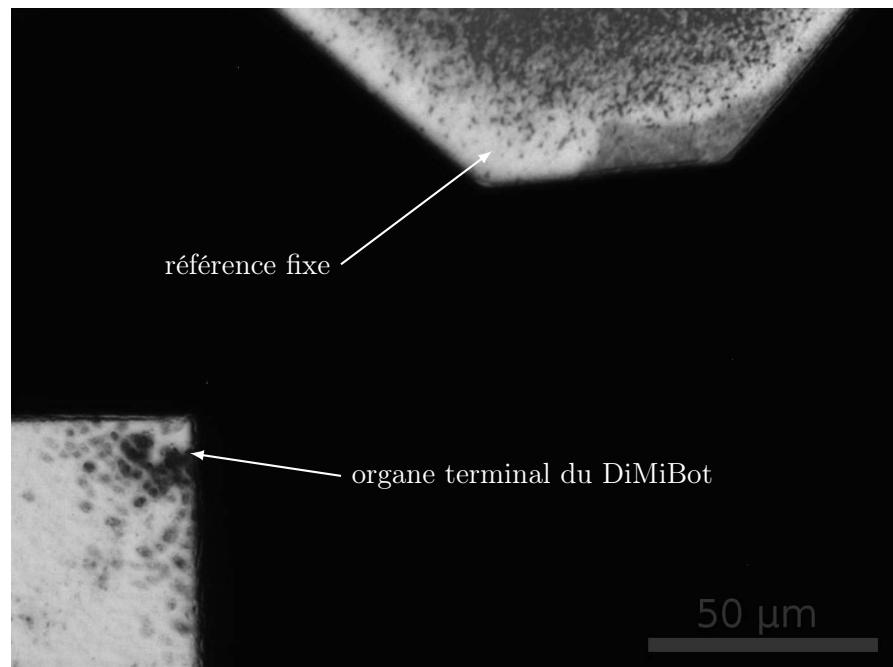


FIGURE C.2 – Résultats fournis par le MEMS Analyser.

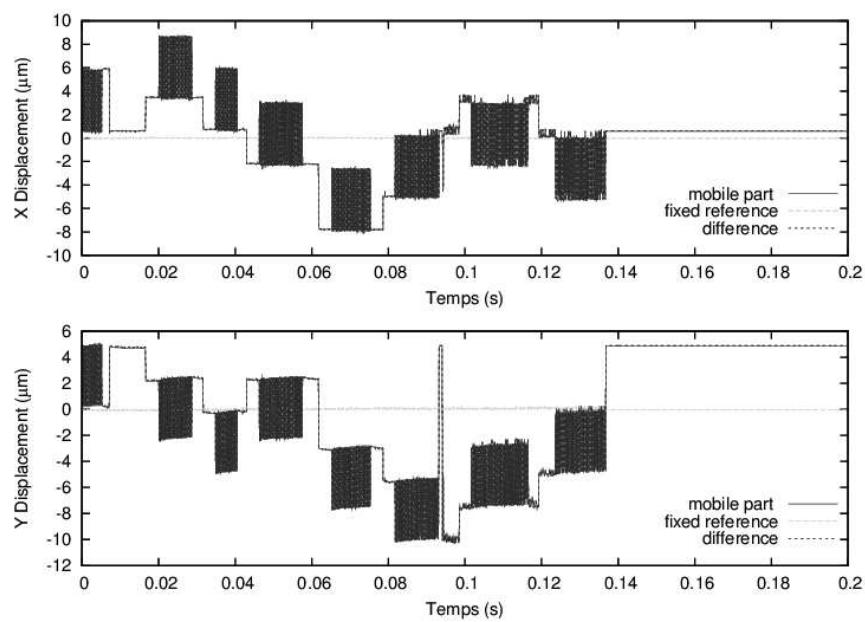


FIGURE C.3 – Résultats du MEMS Analyser lors de la mesure de l'espace de travail complet atteignable.

Publications personnelles

- Journal international à comité de lecture

[1] - **V. Chalvet**, Y. Haddab and P. Lutz, *A microfabricated planar digital microrobot for precise positioning based on bistable modules*, IEEE Transactions on Robotics, Accepté le 11 Janvier 2013 , DOI : 10.1109/TRO.2013.2240174.

- Conférence internationale avec actes et à comité de lecture

[2] - **V. Chalvet**, A. Zarzycki, Y. Haddab and P. Lutz, *Digital microrobotics based on bistable modules : design of a non-redundant digital micropositioning robot*, proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, ZH, May 2011, pp. 3628-3633.

- Chapitre de livre

[3] - Y. Haddab, **V. Chalvet**, Q. Chen and P. Lutz, *Digital Microrobotics using MEMS technology*, in *Advanced Mechatronics and MEMS Devices*, Springer, ISBN 978-1-4419-9984-9, August 2012.

- Colloque national

[4] - **V. Chalvet**, Y. Haddab and P. Lutz, *La microrobotique pour la micromanipulation en milieu confiné*, Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique, La Rochelle, France, octobre 2011.

- Workshop

[5] - **V. Chalvet**, Y. Haddab and P. Lutz, *Digital microrobot base on bistable modules. New paradigm in conception of microrobots for precise micromanipulation*, μ -Control workshop, Besançon, France, septembre 2012.

- Brevet

[6] - **V. Chalvet**, Y. Haddab A. Zarzycki and P. Lutz, *Micro-robot, procédé de commande, procédé de simulation et programmes d'ordinateur associés*, WO/2012/104546 - Déposé le 03 Février 2011, étendu à l'international le 31 Janvier 2012.

- En cours de soumission

[7] - Y. Haddab, **V. Chalvet**, and M. Rakotondrabe , *Approches de commande en boucle ouverte pour les micro-manipulateurs flexibles à base de matériaux actifs*, Hermes, première lecture.

[8] - **V. Chalvet**, Y. Haddab, and P. Lutz , *Control and trajectory planing of a non-redundant digital microrobot, article en cours d'écriture*.

Résumé :

Le développement récent en micro- et nano-technologies (dans des domaines tels que l'horlogerie, l'électronique, l'optique, le biomédical, ...) a créé un fort besoin concernant des systèmes capables de manipuler et d'assembler des objets de plus en plus petits. La conception de stations robotisées, capables de manipuler des micro-objets, s'est multipliée à travers le monde, faisant intervenir des actionneurs de haute résolution adaptés au micromonde, ainsi que de nombreux capteurs.

Ce mémoire ouvre une nouvelle voie pour le développement de robots de micromanipulation. Il présente la conception, la modélisation, la fabrication et la commande d'un nouveau concept de microrobot, le DiMiBot (Digital MicroroBot). Il s'agit du premier microrobot numérique – inspiré de l'électronique numérique – qui fait intervenir des actionneurs binaires pour générer un déplacement discret d'une grande précision sans nécessiter de capteur (en boucle ouverte). Ces actionneurs binaires extrêmement répétables et robustes (les modules bistables), assurent chacun un déplacement précis de 25 μm . Ils sont associés de manière monolithique à une architecture robotique parallèle flexible, assurant la génération d'un espace de travail discret, dont les 2^N (N est le nombre de modules bistables utilisés au sein du DiMiBot) positions distincts atteignables sont parfaitement stables, répétables et robustes mécaniquement. Elles sont réparties de manière homogène dans un carré de 10,5 μm de côté.

La microfabrication du premier prototype de microrobot numérique en silicium – faisant suite à un dimensionnement minutieux en éléments finis – a été réalisé au sein de la salle blanche MIMENTO de l'institut FEMTO-ST. Ce DiMiBot possédant 4 modules bistables assure une résolution de 3,5 μm pour une répétable de chacune des 16 positions atteignables de 90 nm.

Mots-clés : microrobot, numérique, boucle ouverte, microfabrication, structure flexible, structure bistable

Abstract:

With the current expansion of micro- and nano-technologies (in such domains as watchmaking, electronics, optics, biomedical, ...), came the necessity to build systems able to manipulate and make the assembly of smaller and smaller objects. Design of robotic stations, able to manipulate micro-objects, expanded all over the world, making use of high resolution actuators and numerous sensors adapted to the microworld.

This thesis opens a new paradigm in the design of micromanipulation robotics. We present the design, modeling, fabrication and control of a new microrobot, the DiMiBot (Digital MicroroBot). It is the first digital microrobot — inspired from digital electronics — which makes use of binary actuators for the generation of discrete displacements with high accuracy without any sensors (open-loop control). These highly repeatable and robust binary actuators (bistable modules) generate an accurate displacement of 25 μm . They are monolithically combined with a parallel flexible architecture, allowing the generation of a discrete workspace, in which all the 2^N (N is the number of bistable modules used) distinct reachable positions are perfectly stable, repeatable and mechanically robust. They are evenly spread inside a 10.5 μm length square.

After dimensioning, the first digital microrobot prototype in silicon was microfabricated in MIMENTO clean-room of FEMTO-ST institute. This DiMiBot has 4 bistable modules and generates a workspace of 3.5 μm resolution with 90 nm repeatability.

Keywords: microrobot, digital, open-loop control, microfabrication, flexible structure, bistable structure



■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr