HAL
open science

Etude et réalisation d'un microrobot à pattes : structure mécanique et micro-actionnement

Agnès Bonvilain

To cite this version:

Agnès Bonvilain. Etude et réalisation d'un microrobot à pattes : structure mécanique et micro-actionnement. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Franche-Comté, 2002. Français. NNT : . tel-00010356

HAL Id: tel-00010356

https://theses.hal.science/tel-00010356v1

Submitted on 3 Oct 2005

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

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

N° d'ordre 933

Année 2002

THESE

préparée au
Laboratoire d'Automatique de Besançon (UMR CNRS 6596)

et présentée à
L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

pour obtenir le
GRADE DE DOCTEUR D'UNIVERSITE
en AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE

Etude et réalisation d'un microrobot à pattes : structure mécanique et micro-actionnement

par
Agnès PESSIOT - BONVILAIN
(DEA en Automatique Informatique et Robotique)

Soutenue le 25 novembre 2002 devant la Commission d'examen :

Rapporteurs	**D COLLARD**	Directeur de recherche CNRS à l'IEMN de Lille
	A TOUBOUL	Professeur à l'Université de Bordeaux 1
Examinateurs	**A DELCHAMBRE**	Professeur à l'Université Libre de Bruxelles
Président du jury	**E BIGLER**	Professeur à l'ENSMM de Besançon
Directeur de thèse	**A BOURJAULT**	Professeur à l'ENSMM de Besançon
Codirecteur de thèse	**N CHAILLET**	Professeur à l'Université de Franche-Comté

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) au sein du groupe « microrobotique et microsystèmes ».

Je remercie Monsieur Alain Bourjault, Professeur à l'ENSMM et directeur du LAB, de m'avoir accueillie dans son laboratoire, de m'avoir offert un cadre de travail des plus favorables et pour la confiance qu'il m'a témoigné tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et toute ma gratitude à Monsieur Nicolas Chaillet, Professeur à l'Université de Franche-Comté, pour son encadrement. En plus de ses compétences et de sa rigueur scientifique, ses qualités humaines, son intérêt, sa patience, ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité ont été une aide précieuse et m'ont permis de bénéficier d'un encadrement irréprochable. Je le remercie d'avoir toujours répondu à mes sollicitations, jusqu'à la rédaction de ce mémoire.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Dominique Collard, Directeur de recherche CNRS à l'IEMN de Lille, et à Monsieur André Touboul, Professeur à l'Université de Bordeaux, pour avoir accepté de rapporter ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur Emmanuel Bigler, Professeur à l'ENSMM de Besançon, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens également à remercier Monsieur Alain Delchambre, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour avoir accepté de le juger en tant que membre du jury.

Je veux aussi assurer de toute ma reconnaissance Monsieur Patrick Rougeot, ingénieur de recherche au LAB, pour sa disponibilité, son aide et ses qualités humaines.

Je remercie également Monsieur Joël Agnus, ingénieur d'étude au LAB, pour son aide et sa participation à la caractérisation des actionneurs.

J'aimerais remercier Monsieur Skandar Basrour, Professeur à l'Université de Grenoble, et Monsieur Jean-René Coudevylle, doctorant au LPMO, pour leur aide précieuse lors des phases d'électrodéposition des premières structures.

Je tiens à remercier Madame Emmanuelle Pichonat doctorante au LPMO pour son aide et son soutien sur le long chemin de la maîtrise du logiciel Ansys, ainsi que pour les longues discussions sur la modélisation thermique.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Pascal Blind du CTM, Messieurs Christian Bonjour, Gilles Marianneau, Yannick Gruson, Jean-Claude Jeannot et Mademoiselle Blandine Guichardaz du LPMO et Messieurs Jean-Claude Renaud et Jacques Vendeville du LOPMD, pour s'être longuement et patiemment investis pour mes différentes réalisations en salle blanche.

Je ne peux oublier à cette occasion mes collègues du LAB, du LPMO, de l'IMFC et tous ceux que j'ai côtoyé en salle blanche, pour leur soutien, leur bonne humeur, ainsi que leur

contribution à ce travail de thèse et dont le nom n’a pu apparaître explicitement.

Enfin, j’aimerais conclure en remerciant de tout cœur Philippe mon mari, Aurélie et Pierrick mes enfants et les membres de ma famille qui ont participé, dans l’ombre, à la réussite de ce projet. Ils ont fait preuve de compréhension et de patience lorsque je ne pouvais me rendre aussi disponible qu’ils l’auraient souhaité. Ils ont su trouver les mots pour m’aider à trouver l’énergie et me donner la force de poursuivre lorsque cela était nécessaire.

SOMMAIRE

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Insectes et microrobots 5

1 Introduction 7

2 Description des insectes 7

2.1 Morphologie des insectes 8
2.2 Structure des pattes 9
2.2.1 Locomotion des insectes 11
2.2.2 Coordination des pattes 12
2.2.3 Différentes démarches de l'insecte et les forces mises en jeu 13
2.2.4 Différents organes contribuant aux mouvements de la patte 14
2.3 Bio-inspiration 16
2.4 Conclusion 17

3 Microrobots à pattes réalisés par microfabrication 18

3.1 Robot "moucheron" 19
3.2 Microrobot "articulé" 20
3.3 Robot "microfourmi" 21
3.4 Microrobots "de micropositionnement" 22
3.5 Microrobot "marcheur" 23
3.6 Microrobot "sans fil" 25
3.7 Microrobot "marcheur omnidirectionnel" 26
3.8 Synthèse des caractéristiques des différents microrobots 27

4 Conclusion 28

5 Références bibliographiques 28

Chapitre 2 : Etude, réalisation et caractérisation d'actionneurs piézo-électriques et thermiques 31

1 Introduction 33

2 Les micro-actionneurs 33

2.1 Les micro-actionneurs électrostatiques 34
2.2 Les micro-actionneurs électromagnétiques 36
2.3 Les micro-actionneurs magnétostrictifs 37
2.4 Les micro-actionneurs piézo-électriques 38
2.5 Les micro-actionneurs fluidiques 39
2.6 Les micro-actionneurs à expansion thermique 40
2.7 Les micro-actionneurs à Alliage à Mémoire de Forme (AMF) 41
2.8 Les micro-actionneurs chimiques 42
2.9 Conclusion 43

3 Choix du mode d'actionnement 43
3.1 Performances des micro-actionneurs 44
3.2 Objectif de notre microrobot 44
3.3 Sélection du principe d'actionnemENT 45
4 Etude et caractérisation des actionneurs piézo-électriques 46
4.1 Principe de fonctionnement et propriétés 46
4.2 Modèle statique des actionneurs piézo-électriques 47
4.2.1 Les actionneurs unimorphes 48
4.2.2 Les actionneurs bimorphes 50
4.3 Dimensionnement des actionneurs piézo-électriques 51
4.4 Réalisation des actionneurs piézo-électriques 52
4.5 Expérimentation des actionneurs piézo-électriques 52
5 Etude et caractérisation des actionneurs thermiques 57
5.1 Actionneurs thermiques de type bilame 58
5.1.1 Principe de fonctionnement et propriétés 58
5.1.2 Etude thermique 59
5.1.2.1 La conduction 60
5.1.2.2 La convection 60
5.1.2.3 Le rayonnement 60
5.1.3 Modèle statique d'un actionneur thermique de type bilame 61
5.1.4 Dimensionnement de l'actionneur thermique de type bilame 62
5.1.4.1 Coefficient de convection du bilame 64
5.1.4.2 Calcul des flux de convection et de rayonnement du bilame 65
5.1.4.3 Simulation numérique thermique du bilame 65
5.1.4.4 Détermination de la température dans un matériau d'une section du bilame .. 67
5.1.5 Réalisation des bilames thermiques 69
5.1.6 Expérimentation des bilames thermiques 70
5.1.7 Conclusion 72
5.2 Les actionneurs thermique en U 72
5.2.1 Principe de fonctionnement et propriétés 72
5.2.2 Etude thermique 73
5.2.2.1 Modélisation thermique analytique 73
5.2.2.2 Détermination de la température le long du bras chaud de l'actionneur en U . 74
5.2.2.3 Modélisation thermique numérique de l'actionneur en U 75
5.2.3 Modèle statique de l'actionneur thermique en U 76
5.2.4 Dimensionnement des actionneurs thermiques en U 79
5.2.5 Réalisation des actionneurs thermiques en U 80
5.2.6 Expérimentation des actionneurs thermiques en U 81
5.2.7 Conclusion 86
5.3 Les actionneurs thermiques de type patte 86
6 Comparaison des actionneurs de type poutre piézo-électrique et thermique 88
7 Applications des actionneurs étudiés 89
8 Conclusion 90
9 Références bibliographiques 90

Chapitre 3 : Développement des pattes du microrobot 95

1 Introduction 97

2 Conception des pattes 97

2.1 Structure des pattes 97
2.2 Principe de fonctionnement 97
2.3 Etude mécanique des pattes 98
2.3.1 Etude mécanique statique 98
2.3.1.1 Les bilames thermiques 98
2.3.1.2 La poutre de liaison 100
2.3.1.3 Le pied 100
2.3.2 Etude mécanique dynamique 101
2.3.3 Conclusion 102

3 Dimensionnement des pattes 102

4 Micropattes en nickel sur silicium : type 1 103

4.1 Simulations numériques des températures et des déformations 104
4.2 Réalisation des micropattes en nickel sur silicium 107
4.3 Expérimentation des micropattes en nickel sur silicium 108
4.3.1 Mesure du comportement statique 109
4.3.2 Mesure du comportement dynamique 112
4.4 Performances des micropattes en nickel sur silicium 113
4.5 Conclusion 114

5 Micropattes en résine SU-8 sur silicium : type 2 114

5.1 Simulations numériques des températures et des déformations 117
5.2 Expérimentation des micropattes en résine SU-8 sur silicium 120
5.2.1 Mesure du comportement statique 121
5.2.2 Expérimentation dynamique 123
5.3 Performances des micropattes en résine SU-8 sur silicium 125
5.4 Conclusion 126

6 Micropattes à actionneurs en opposition et liaison de 60 µm : type 3 126

6.1 Structure 127
6.2 Principe de fonctionnement 127
6.3 Simulation numérique 127
6.4 Réalisation 130
6.5 Expérimentation 131
6.6 Performances 133
6.7 Conclusion 134

7 Micropattes à actionneurs en opposition et liaison de 20 µm : type 4 135

7.1 Simulations numériques 135
7.2 Réalisations 138
7.3 Expérimentations 139

7.4 Performances 140
7.5 Conclusion 141

8 Conclusion 141

9 Références bibliographiques 141

Chapitre 4 : Microfabrications mises en œuvre pour la réalisation du microrobot 143

1 Introduction 145

2 Le substrat utilisé 145

3 Procédé de fabrication des actionneurs thermiques en U 146

4 Procédé de fabrication des micropattes en nickel sur silicium : type 1 146

4.1 Description du procédé de fabrication 147
4.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication 148

5 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium : type 2 151

5.1 Description du procédé de fabrication 151
5.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication 152

6 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 60 µm : type 3 153

6.1 Description du procédé de fabrication 153
6.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication 155

7 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 20 µm : type 4 155

7.1 Description du procédé de fabrication 156
7.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication 157

8 Procédé de fabrication de la structure complète du microrobot 159

8.1 Description du procédé de fabrication 159
8.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication 161

9 Conclusion 162

10 Références bibliographiques 163

Chapitre 5 : Réalisation et expérimentation du microrobot 165

1 Introduction 167

2 Structure du microrobot 167

3 Etude mécanique de la structure du microrobot 170

3.1 Etude mécanique dynamique du microrobot 171

3.2 Détermination de la rugosité maximale de la surface sur laquelle le microrobot peut se déplacer 174

4 Modélisation numérique sous Ansys du microrobot 176

5 Réalisation du microrobot 179

6 Expérimentations 182

7 Conclusion 187

8 Références bibliographiques 188

Conclusion générale 189

Références bibliographiques 193

Annexes 201

ANNEXES 1 : Caractéristiques du PZT de la société PI 204

ANNEXES 2 : Fichier Ansys pour la modélisation d'un bilame thermique 205

ANNEXES 3 : Fichier Ansys pour la modélisation de l'actionneur thermique en U 210

ANNEXE 4 : *Les microtechnologies* 215

ANNEXE 5 : Description des procédés de fabrication des actionneurs 224

ANNEXE 6 : Procédé de fabrication des actionneurs IMM 235

ANNEXE 7 : Procédé de fabrication des actionneurs à l'IMFC 236

ANNEXE 8 : Procédé de fabrication des pattes en nickel sur silicium : type 1 237

ANNEXE 9 : Procédé de fabrication des pattes en résine SU-8 sur silicium : type 2 240

ANNEXE 10 : Procédé de fabrication des pattes en résine SU-8 sur silicium avec liaison en SU-8 de 60 µm : type 3 243

ANNEXE 11 : Procédé de fabrication des pattes en résine SU-8 sur silicium avec liaison en SU-8 de 20 µm : type 4 246

ANNEXE 12 : Procédé de fabrication du microrobot 250

ANNEXE 13 : Schéma de la carte d'alimentation 254

ANNEXE 14 : Contenu du CD-ROM 255

Introduction générale

Le domaine microscopique a toujours fasciné et nourri la science fiction. Les avancées scientifiques et technologiques permettent aujourd'hui de l'approcher, et les besoins dans ce domaine ne cessent de croître. L'observation de la nature, et notamment des insectes, montre leur très grande utilité dans notre vie si nous pouvions les maîtriser et les commander. L'inspection en milieu confiné, le travail collectif, le déplacement de très petits objets, la construction d'édifices complexes sont autant de tâches que nous pourrions leur confier.

La microrobotique s'applique à la manipulation d'objets de petites dimensions comme la micromanipulation d'éléments biologiques ou l'assemblage de pièces micromécaniques rigides. Elle concerne aussi l'exploration et l'inspection en milieu fortement confiné ou en milieu hostile ainsi que l'inspection, voire la réparation de canalisations de très faible diamètre. Dans le secteur médical, la microrobotique est utilisée dans le diagnostic, la thérapie ou les opérations de chirurgie minimalement invasive ; dans ce domaine, il s'agit d'avoir une vue de l'environnement dans lequel on travaille ; la microrobotique a donc aussi un aspect vision. Enfin, le convoyage ou le positionnement d'objets de petites dimensions dans les micro-usines du futur font également partie de la microrobotique. De manière plus générale, la microrobotique s'applique à tout ce qui tend à maîtriser le micromonde ou à inter-agir dessus. La microrobotique est par essence même fortement pluridisciplinaire.

Au carrefour de la robotique et des microsystèmes, la microrobotique est une discipline nouvelle dont l'activité est la conception, la réalisation et la commande de microrobots ou de systèmes microrobotiques en vue de réaliser des opérations à l'échelle millimétrique, micrométrique, voire nanométrique. Un microsystème est un système de petite dimension, souvent fabriqué de façon collective dont l'objectif dimensionnel correspond souvent à un volume total inférieur à un cube de 1 cm de côté. Un microrobot est un microsystème particulier dont la fonction principale est d'engendrer des mouvements nécessaires à son déplacement et/ou à l'orientation d'un ou plusieurs outils.

La problématique en microrobotique est l'intégration, sur des supports de très faibles dimensions, des fonctions fondamentales d'actionnement, de commande, de mesure et de traitement de l'information. Le passage d'un robot à un microrobot ne s'effectue pas par simple réduction homothétique d'échelle. La conception d'un microrobot pose des problèmes spécifiques liés aux domaines du micromonde, où les effets de surface deviennent prépondérants par rapport aux effets de volume. La miniaturisation implique donc de repenser quasi entièrement la conception d'un microrobot.

Les microrobots mobiles peuvent être classés en plusieurs catégories : les microrobots à roues, les microrobots à pattes, les microrobots nageurs et les microrobots volants. Ils peuvent être utilisés individuellement ou de manière collective. Les travaux décrits ici se situent dans le domaine des microrobots à pattes. Ils ne visent pas pour le moment d'application particulière, mais sont avant tout un défi qui permet d'explorer de nombreux aspects de la microrobotique comme le choix des technologies, l'intégration de composants, les interactions avec l'environnement ou l'autonomie.

L'objectif premier était de réaliser un microrobot autonome à pattes sur une seule puce pour obtenir un microrobot de type "insecte". Notre microrobot est un microsystème, en effet, il est

fabriqué de manière collective par microfabrication, et ses dimensions sont très inférieures à un cube de 1 cm de côté.

Dans le premier chapitre, la première partie décrit les insectes, leur morphologie et la structure de leurs pattes. L'objectif est de déterminer le fonctionnement d'une patte et la coordination lors de la marche. Pour s'approcher d'un insecte, il était important de connaître le nombre de degré de liberté d'une de ses pattes, leur position et leurs amplitudes, le nombre et la position des actionneurs ainsi que le nombre, la position et le type des capteurs. Enfin la bio-inspiration nous a permis de cerner le degré de fidélité nécessaire à notre application. La deuxième partie donne une définition du microrobot à pattes tel que celui que nous avons réalisé, puis décrit les microrobots de ce type déjà réalisés de par le monde.

Le deuxième chapitre présente les différents micro-actionnements qu'il nous était possible d'utiliser pour mettre en mouvement les pattes de notre microrobot, le choix s'étant orienté vers deux modes d'actionnement, des actionneurs piézo-électriques et des actionneurs thermiques ont été étudiés et caractérisés. Leur comparaison nous a permis d'effectuer le choix du bilame thermique pour notre application.

Le troisième chapitre retrace la conception des pattes, leur dimensionnement, ainsi que les différents types de pattes réalisés et expérimentés. A l'issu des expérimentations de chaque type de patte, les performances ont été établies et un retour sur conception a été nécessaire plusieurs fois pour améliorer de façon notoire ces performances.

Le quatrième chapitre présente les procédés de microfabrication mis en œuvre pour la réalisation des différentes structures, des actionneurs au microrobot complet. Une présentation générale des microfabrications est donnée en annexe.

Le cinquième chapitre enfin décrit la structure complète du microrobot, son étude mécanique, son dimensionnement, sa fabrication, les expérimentations effectuées et les performances qui en découlent. Notre microrobot est alors comparé aux microrobots déjà réalisés à travers le monde et qui sont décrits au premier chapitre. Pour terminer, les prochaines étapes à réaliser pour aboutir à un microrobot de type "insecte" sont décrites, ainsi que les perspectives pour l'évolution de ce microrobot.

Chapitre 1
Insectes et microrobots

1 Introduction

Considérée un temps comme un prolongement de la robotique, la microrobotique est aujourd'hui un domaine de recherche à part entière. En revanche, ces deux domaines ont en commun la pluridisciplinarité. Un microrobot a en effet des fonctionnalités comparables à un robot traditionnel, mais une simple miniaturisation ne suffit pas à passer de l'un à l'autre. La conception et la réalisation d'un microrobot se heurte à des barrières méthodologiques et technologiques parfois difficiles à franchir.

Actuellement, les développements menées dans le domaine des microtechnologies, ainsi que dans ceux des microcapteurs et des micro-actionneurs sont en plein essor. Pourtant les réalisations plus complètes de type "microsystème robotique" sont encore rares. C'est dans ce domaine que se situe le développement de notre **microrobot à pattes de type insecte**.

Ce premier chapitre propose un état des connaissances sur les insectes, ainsi qu'un état de l'art du domaine des microrobots à pattes réalisés par microfabrication. Le premier paragraphe décrit la morphologie des insectes. Cette étude permet de définir les degrés de liberté d'une patte, la position des actionneurs sur la patte, ainsi que la coordination des pattes pour générer le déplacement de l'insecte. Le deuxième paragraphe est un état de l'art du domaine des microrobots de type insecte déjà réalisés par microfabrication à travers le monde. Les microfabrications sont des procédés de fabrication généralement collective de microcomposants permettant la réalisation de structures en deux dimensions, la troisième étant une succession de dépôts et de gravure, qui amène à parler plus couramment de "2,5 D". Le mode d'actionnement de chaque microrobot, la structure de ses pattes, son principe de locomotion, son encombrement et ses performances sont donnés pour positionner notre microrobot.

2 Description des insectes

Les mammifères, dont l'homme, ont dû apprendre à cohabiter avec les insectes omniprésents, lesquels leur occasionnent certains désagréments (piqûres ou morsures), quand ils ne sont pas le vecteur de maladies ou la cause de dégâts importants aux cultures. Mais, en contrepartie, certaines espèces sont très précieuses en limitant la prolifération des nuisibles, en pollinisant les fleurs ou en produisant diverses matières utiles à l'homme [1].
Si l'homme en avait eu la possibilité, il aurait certainement dressé des insectes afin de réaliser des tâches qui lui sont impossibles, comme se déplacer dans des endroits inaccessibles ou réaliser de petites constructions. Il a néanmoins réussi à élever les abeilles pour le miel ou le ver pour la soie. Pour mieux les connaître, l'homme a étudié ces insectes, leur vie et leur organisation. L'intérêt des insectes se situe dans leur nombre qui est très important, et dans la diversité de leurs formes et de leurs dimensions.

L'objectif de notre étude étant la réalisation d'un microrobot à pattes, les insectes vivants ont été étudiés, afin de mieux connaître leur structure et leur fonctionnement. Cette étude a permis de mettre en évidence la géométrie de leurs pattes ainsi que leur mobilité (leurs mouvements et les forces mises en jeu dans la marche). En premier lieu, c'est de leur locomotion dont nous tenterons de nous rapprocher. Toutefois, les pattes ne sont pas les seuls éléments entrant en jeu dans la locomotion des insectes, le reste de leur morphologie y est intimement lié lui aussi, par leurs organes de perception, de communication et de préhension. Dans la littérature, de nombreux articles traitent de la mécanique des pattes d'insectes, et notamment des différents éléments mis en jeu dans leurs déplacements. Depuis toujours, la vie sous ses différentes

formes a été imitée : l'avion pour voler, le bras manipulateur pour déplacer des objets, le sous-marin pour se déplacer sous l'eau, etc. Depuis l'avènement de la robotique, cette tendance s'est renforcée. Les systèmes résultants sont alors qualifiés de bio-inspirés.

2.1 Morphologie des insectes

Le mot "insecte" vient du latin *insecta*, qui signifie "coupé". C'est Aristote (384 – 322 av. J.-C.) qui a créé ce mot dans l'*Histoire des animaux*, du fait des étranglements du corps des insectes.

Les insectes sont des animaux invertébrés articulés, constitués d'un exosquelette (squelette externe ou cuticule). Ils respirent par des trachées et leur corps est typiquement divisé en trois parties [2]: la tête qui comprend les antennes, les yeux et la bouche, le thorax qui comporte deux paires d'ailes et trois paires de pattes, et l'abdomen (Figure 1.1).

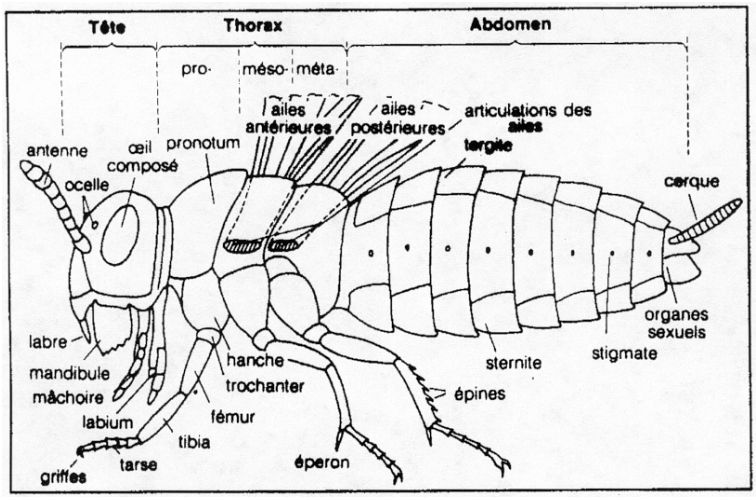


Figure 1.1 : schéma de la structure d'un insecte

La tête de l'insecte possède de nombreux organes sensoriels qui lui sont indispensables. Elle est ainsi ornée d'une paire d'antennes qui abritent plusieurs organes des sens : le toucher, l'odorat et le goût. On trouve également, à l'extrémité de la tête, la bouche qui sert à l'alimentation et également très souvent d'outil de saisie. Les deux yeux sont composés et formés d'une multitude de facettes.

Le caractère tactile des antennes est développé grâce à une grande densité de capteurs sur leur surface. Les insectes sont également capables de distinguer de nombreuses odeurs, comme celle de leur nid ou de la piste qu'ils jalonnent de leurs propres sécrétions.

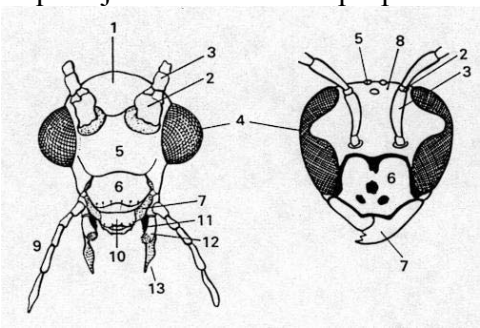


Figure 1.2 : schéma de la structure de la tête d'un insecte: 1 – vertex ; 2 – scape ; 3 – pédicele ; 4 – œil composé ; 5 – front ; 6 – clypeus ; 7 – mandibule ; 8 – ocelle ; 9 – palpe maxillaire ; 10 – labre ; 11 et 12 – maxille ; 13 – palpe labial

La bouche est composée de trois parties bien distinctes (n° 7, 9, 10 et 13 Figure 1.2) : les palpes, les mandibules et le labre [3]. Les palpes peuvent être des organes tactiles, gustatifs, et/ou préhensiles. Il s'agit des différents appendices articulés à l'extrémité de la tête, elles accompagnent diverses parties de la bouche chez les insectes. Les palpes labiaux sont les palpes antérieurs ou intérieurs. Ils forment l'appareil sensoriel du labium des insectes, ils sont plus court que les palpes maxillaires. Le palpe maxillaire est le palpe extérieur, l'appendice la plus visible de la maxille. Elle fait office d'appareil sensoriel et est formée de un à sept articles. Les mandibules forment la partie supérieure des mâchoires. Chacune des deux pièces est dure et cornée, placées en avant des lèvres de certains insectes, elles leur servent à saisir et broyer la nourriture. Les mandibules font office d'organes de préhension, d'armes et d'outils chez les insectes fouisseurs. Elles sont surtout développées chez les mâles. Chez certains coléoptères, elles présentent des cas de dimorphisme et peuvent atteindre des proportions énormes chez le mâle.

La plupart des insectes ont une paire d'yeux composés, c'est à dire des yeux à facettes, qui donnent un ensemble d'images semblables à une mosaïque. Ils ont aussi deux ou trois yeux simples appelés ocelles, qui servent à percevoir les variations d'intensité de la lumière.

Le thorax est la partie du corps située entre la tête et l'abdomen et portant les appendices locomoteurs, six pattes et quatre ailes (Figure 1.1). Sur le prothorax, segment antérieur du thorax, s'articule la tête. Il est soudé en arrière au mésothorax, et porte la première paire de pattes. Le mésothorax, deuxième division du thorax, porte la deuxième paire de pattes et la première paire d'ailes. Il est soudé en arrière au métathorax. Ce dernier est la troisième partie du thorax et porte la deuxième paire d'ailes et la troisième paire de pattes.

L'abdomen est relié au thorax par une partie plus ou moins large appelée pédoncule (si elle est large) ou pétiole (si elle est étroite). L'abdomen renferme le jabot social, l'estomac, l'intestin, les conduits respiratoires, et l'appareil reproducteur.

Le "jabot social" est un estomac un peu spécial que possèdent certains insectes. Ils y gardent en réserve de la nourriture, qui peut être régurgitée et transmise aux autres. La carapace (ou exosquelette) est composée d'une substance résistante et imperméable que l'on nomme chitine. Elle renferme différents pigments qui sont responsables de la couleur de l'animal.

2.2 Structure des pattes

Les pattes des insectes sont constituées de la hanche (appelé aussi coxa), du trochanter, du fémur, du tibia et du tarse, soit en général cinq articles plus les griffes (Figure 1.3). Certaines parties peuvent être atrophiées ou absentes [4]. Les pattes peuvent porter des appendices (épines ou éperons) et leur forme varie beaucoup selon leur fonction.

L'extrémité des pattes est composée d'un coussinet (appelé empodium) et d'une paire de griffes (Figure 1.4). La forme et la taille des pattes varient en fonction des surfaces sur lesquelles se déplace l'insecte [6]. Les griffes permettent de s'accrocher sur un terrain rugueux. Les coussinets de certains insectes leur permettent d'adhérer sur des surfaces parfaitement lisses : soit par l'effet de ventouse (création d'une dépression au centre du coussinet), soit par application d'un lubrifiant à l'extrémité des nombreux poils et l'action de forces de rang moléculaire entre les poils et la surface.

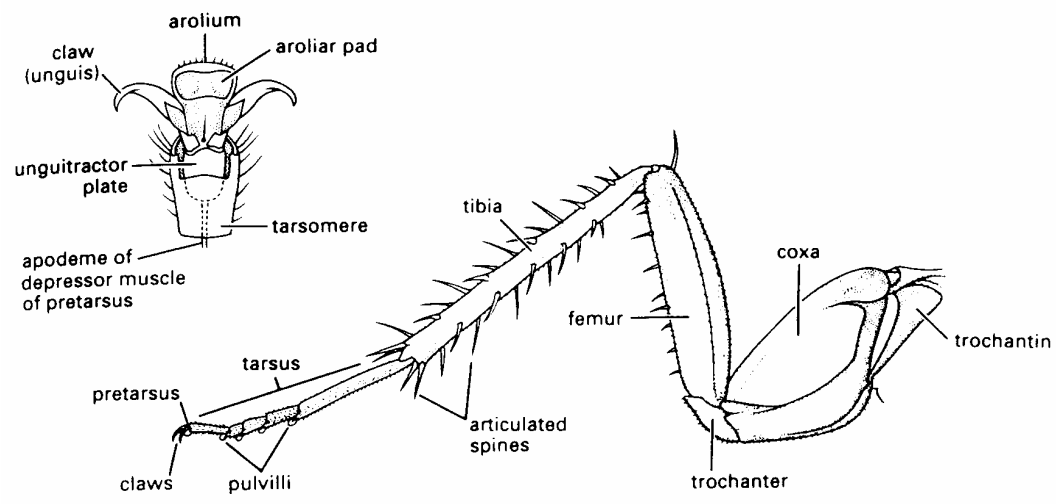


Figure 1.3 : schéma de la structure d'une patte d'insecte

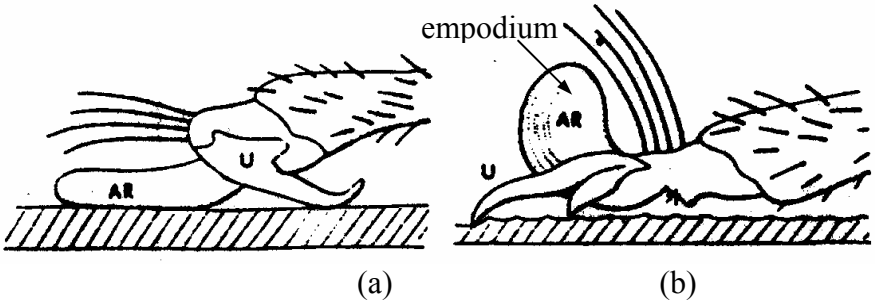
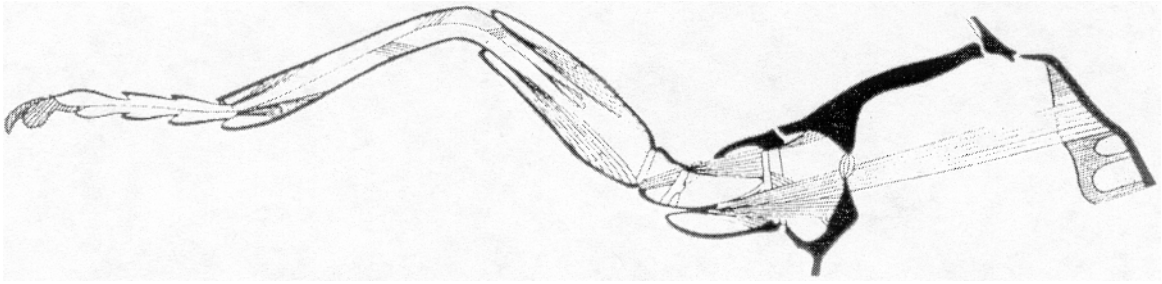


Figure 1.4 : schéma de l'extrémité d'une patte d'insecte
(a) sur surface lisse
(b) sur surface rugueuse

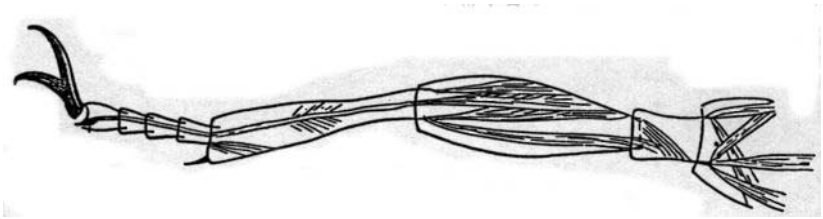
Les degrés de mobilité des pattes sont obtenus par des liaisons pivots ou rotules, possédant respectivement un ou trois degrés de liberté en rotation et aucun en translation, comme schématisé à la Figure 1.5 (c). Toutes ces rotations sont actionnées par des muscles. Suivant les articulations et le type de l'insecte, les rotations sont plus ou moins amples sur les différents axes. Conformément au repère indiqué en Figure 1.5, on trouve :

- une rotation autour de z entre les griffes et le tarse,
- trois rotations, dont deux sont de débattements plus limités (autour de x et y) que la troisième, entre deux éléments du tarse,
- trois rotations, dont deux sont de débattements plus limités (autour de x et y) que la troisième, entre le tarse et le tibia,
- une rotation autour de z entre le tibia et le fémur,
- une arthrodie, c'est à dire aucune mobilité entre le fémur et le trochanter,
- une rotation autour de z de débattement limité entre le trochanter et la hanche,
- trois rotations autour de x, y et z entre la hanche et le corps : c'est l'articulation la plus mobile en terme de débattement.

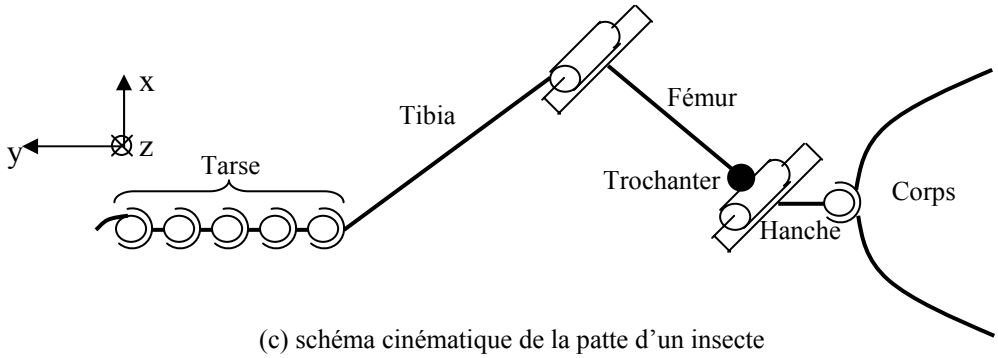
Il a été précisé plus haut que la patte de l'insecte possédait cinq articles tarsaux (dont trois seulement sont représentés à la Figure 1.5 (a)), et qu'entre deux d'entre eux, il y avait trois degrés de liberté en rotation. Néanmoins, un seul muscle actionne ces cinq articles tarsaux, leurs degrés de liberté sont donc tous liés. Au total, la patte d'un insecte possède huit degrés de liberté actifs [5].



(a) implantation des muscles dans la patte de l'insecte



(b) schéma des muscles dans la patte d'un insecte



(c) schéma cinématique de la patte d'un insecte

Figure 1.5 : schémas de la patte d'un insecte : (a) implantation des muscles, (b) schéma des muscles, (c) schéma cinématique

Comme déjà indiqué, les pattes d'un insecte sont actionnées par des muscles. Ainsi que l'indique la Figure 1.5 (b), les muscles de la patte s'insèrent dans l'exosquelette. Chaque mobilité d'une articulation est réalisée par un muscle. La hanche ayant une grande mobilité, plusieurs muscles s'y attachent. Le trochanter quant à lui a une très faible mobilité, il n'est muni que d'un seul muscle. Le fémur possède un grand nombre de muscles pour s'articuler avec la hanche et avec le tibia. Mais c'est aussi lui qui possède le seul muscle qui permet l'articulation du tarse. Le tibia ne possède qu'un muscle propre, un deuxième muscle le traverse mais n'y est pas attaché. Les articles tarsaux n'ont aucun muscle propre. C'est sur l'empodium que s'insère le tendon du muscle long fléchisseur, qui vient du fémur et coulisse dans tous les articles du tarse sans y être attaché. C'est ce muscle qui articule le tarse et permet l'orientation de l'empodium.

2.2.1 Locomotion des insectes

La locomotion des insectes se fait, dans le cas de la marche normale, par [5] :

- le déplacement des pattes trois par trois : les pattes avant et arrière d'un côté et la patte centrale de l'autre. Ces pattes sont repérées en noir sur la Figure 1.6 ;
- la rotation de l'axe du corps par rapport à l'axe de déplacement de l'insecte. Ces axes sont repérés sur la Figure 1.6.

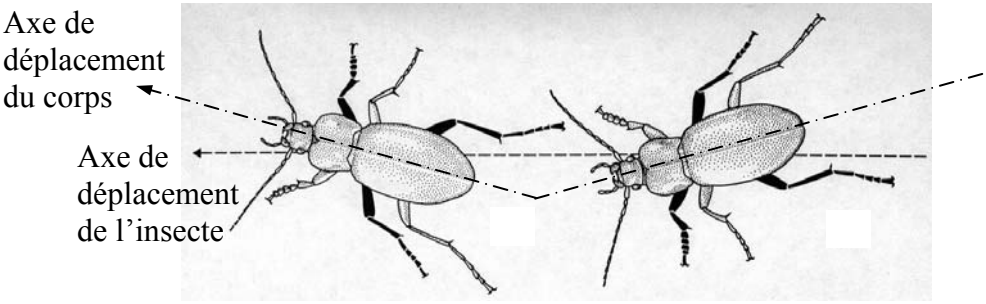


Figure 1.6 : schéma de la locomotion d'un insecte (les pattes en contact avec le sol sont repérées en noir)

La locomotion avec six pattes permet un contact permanent avec le sol de trois d'entre elles. Pendant ce temps, les trois autres se déplacent (la coordination des pattes sera plus particulièrement détaillée au paragraphe 2.2.2). Le centre de gravité d'un insecte en mouvement reste toujours entre les trois pattes au sol, ce qui lui donne une grande stabilité. Les mouvements sont générés par les muscles thoraciques et ceux de la patte.

Pour décrire la locomotion d'un insecte, il est nécessaire de considérer le mouvement individuel d'une patte [6]. Le mouvement cyclique d'une patte consiste en un temps de mouvement patte au sol durant lequel la patte supporte et propulse le corps que l'on peut appeler phase de travail et le temps de retour que l'on peut appeler phase de retour pendant lequel la patte retourne dans sa position initiale en avant par rapport au corps. La Figure 1.7 présente en haut la position de la patte avant vue de profil, et sur la gauche la position de cette même patte vue de dessus durant son déplacement. Le graphique central donne la position du tarse par rapport au corps. Cette figure met aussi en évidence la phase de travail de la patte, plus long que la phase de retour.

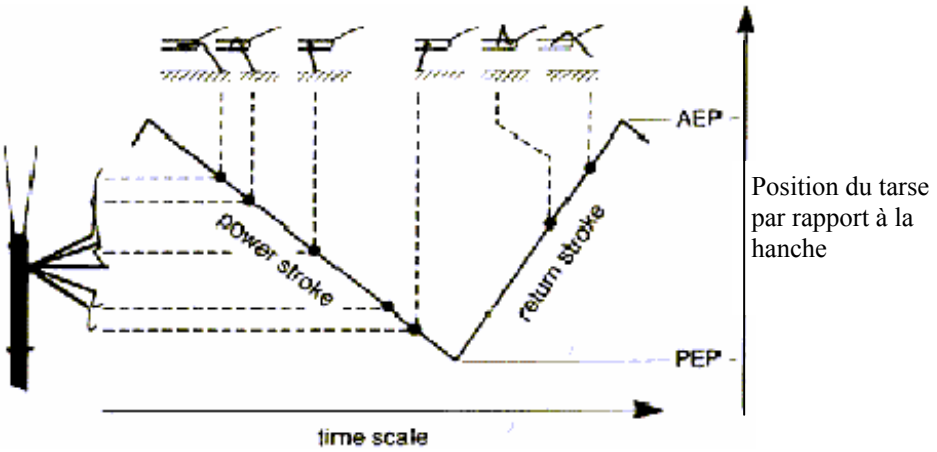


Figure 1.7 : schéma du mouvement cyclique d'une patte, AEP = Anterior Extern Position et PEP = Posterior Extern Position

L'amplitude des forces mises en jeux pendant la marche d'un insecte, sur une surface horizontale est donnée au paragraphe 2.2.3.

2.2.2 Coordination des pattes

Lorsqu'un robot doit se déplacer dans un environnement escarpé, la propulsion au moyen de pattes est généralement plus avantageuse que les systèmes à roues. En revanche, la commande des pattes lors de la marche est en général plus compliquée. Cruse et al., [6] et [23] à [26], répondent à la question : comment les mouvements des pattes doivent-ils être coordonnés ?

Dans l'un de ces articles [25], ils étudient trois solutions très différentes développées dans la nature :

- la marche d'un insecte à six pattes : le carausius morosus (Figure 1.8),
- celle d'un crustacé à huit pattes : l'écrevisse,
- et celle d'un mammifère à quatre pattes : le chat.

Cruse et al. montrent que la coordination dans ces trois cas diffère considérablement.

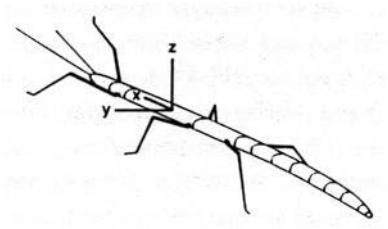


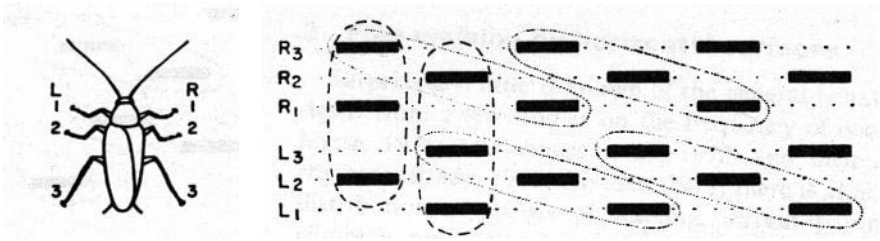
Figure 1.8 : schéma de l'insecte carausus morosus

Qu'est-ce qui influence la coordination des pattes ? La transition entre la phase de travail et la phase de retour d'une patte, mais aussi la phase de travail d'une patte par rapport aux autres pattes, les influences périphériques venant des organes sensitifs de la patte, et les positions extrêmes avant et arrière des pattes.

2.2.3 Différentes démarches de l'insecte et les forces mises en jeu

Différentes techniques ont été mises en œuvre pour étudier les différentes démarches des insectes, selon leur vitesse de déplacement, mais également en fonction du terrain sur lequel ils se déplacent.

Dans tous les cas, la phase de travail de la patte est plus longue que la phase de retour comme le montre la Figure 1.7. D'autre part, suivant la vitesse de déplacement, une ou plusieurs pattes se déplacent simultanément. Rappelons que la marche normale de l'insecte est le déplacement des pattes trois par trois en triangle comme le montre la Figure 1.9.



(a) (b)

Figure 1.9 : schéma de la marche normale d'un insecte. L'axe horizontal représente le temps. (a) numérotation des pattes de l'insecte, (b) les traits gras donnent les phases de travail de chaque patte

Cruse et al. [24] sont parmi les premiers à effectuer des mesures avec Graham [32] en 1985. Cruse et al. utilisent un disque sur lequel il font marcher l'insecte, et qui par l'intermédiaire de transducteurs de force permet de mesurer les différents efforts horizontaux, transversaux et longitudinaux. Ces résultats sont donnés sous forme de graphe (Figure 1.10), pour les différentes pattes en fonction du temps.

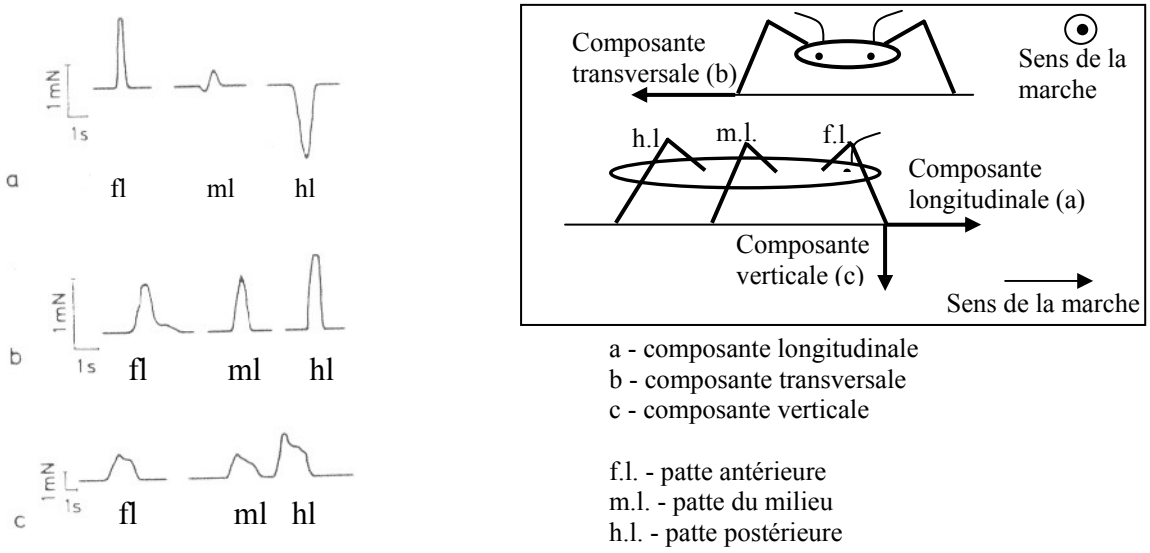


Figure 1.10 : forces mises en jeux dans la marche de l'insecte

Le graphe de la Figure 1.10 donne les valeurs des différentes composantes des forces pour chaque patte de l'insecte en phase de travail [32]. Les composantes des forces sont représentées sur le schéma de l'insecte dans le cadre de cette même figure.

Les forces mises en jeu dans la marche normale de l'insecte sont symétriques par rapport à l'axe du corps : la patte avant droite génère les mêmes efforts que la patte avant gauche, la patte centrale droite génère les mêmes efforts que la patte centrale gauche, et la patte arrière droite génère les mêmes efforts que la patte arrière gauche, mais à des instants différents.
L'amplitude des forces mises en jeu pendant la marche d'un insecte sur une surface horizontale est du même ordre que le poids du corps de l'insecte [32].

2.2.4 Différents organes contribuant aux mouvements de la patte

L'étude de la coordination des pattes dans la marche de l'insecte (carausus morosus), montre la nécessité de l'intervention de certains capteurs, pour ne pas "mélanger" les pattes, c'est à dire pour qu'elles ne se marchent pas les unes sur les autres, ce qui est la plupart du temps possible mécaniquement. De nombreux travaux ont été menés dans ce domaine, pour déterminer les types de capteurs mis en jeu et leurs emplacements. Delcomyn [29] remet en question le fait que la marche des insectes soit uniquement contrôlée par le système neuronal central. Pour lui, les données sensorielles jouent un rôle dans le séquencement de l'action des muscles. Delcomyn [29] et Wilson [33] étudient les mécanismes de la coordination dans le cas d'amputation. Le premier pour conforter son postulat, le suivant pour étudier le mécanisme naturel qui se met en place lors d'une amputation.

Dean, Cruse et Suilmann [26] quant à eux utilisent l'ablation de certains capteurs pour mesurer la différence des déplacements. Ils constatent que l'ablation de capteurs (les cils par exemple) sur la patte centrale engendre de plus grands écarts de position (par rapport à la position sans ablation) sur la patte arrière. Par d'autres expérimentations, ils montrent que l'ablation des capteurs sur une patte influent sur celle-ci lorsque l'insecte ne se déplace pas, alors que lors du mouvement, ce sont les capteurs des pattes adjacentes qui influent sur une patte.

Enfin, Delcomyn et al. [30] donnent une description très précise des caractéristiques et de la distribution des capteurs sur la patte de l'insecte, en terme d'intérêt pour la bio-inspiration.

La capacité des insectes à se déplacer aisément est donc certainement due en grande partie à la riche variété d'informations provenant des organes mécano-sensitifs de ses pattes (Figure 1.11).

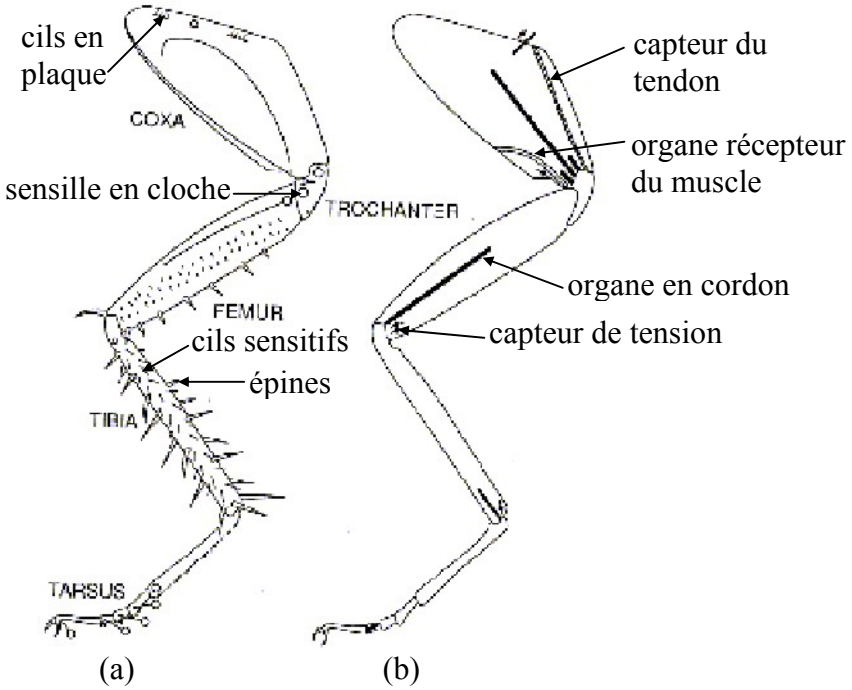


Figure 1.11 : position des différents capteurs sur la patte d'un insecte : (a) capteurs externes, (b) capteurs internes

Si l'on considère leur structure, huit types de capteurs sont associés à une patte d'insecte. Quatre d'entre eux sont internes à l'exosquelette et associés aux muscles. Ils fournissent des informations sur la position ou le mouvement de tout ou partie de la patte. Ces quatre types sont représentés sur la Figure 1.11 (b) : capteur du tendon, organe récepteur du muscle, organe en cordon, capteur de tension. Trois autres types de capteurs sont localisés sur la surface externe de la patte. Ils fournissent des informations sur le contact avec des objets extérieurs et sur les contacts ou mouvements entre différentes parties de la patte. Il s'agit des cils et des épines représentées à la Figure 1.11 (a) : cils en plaque, cils sensitifs, épines. Le dernier type de capteur se trouve intégré dans le cuticule et produit des informations sur les contraintes dans l'exosquelette : il s'agit des sensilles en cloche. Le Tableau 1.1 récapitule la structure, la fonction et la localisation de ces différents types de capteurs [30].

Structure	**Fonction**	**Localisation**
organe récepteur du muscle	capteur de contrainte	interne
capteur du tendon	capteur de contrainte	interne
capteur de tension	capteur de contrainte	interne
organe en cordon	capteur de contrainte	interne
cils en plaque	capteur tactile	externe
épine	capteur tactile	externe
cils sensitifs	capteur sensitif	externe
sensille en cloche	capteur de contrainte	interne

Tableau 1.1 : capteurs mécano-sensitifs d'une patte d'insecte

Après une description dans le détail de chacun de ces capteurs, les auteurs donnent des indications qui peuvent aider dans la sélection et le placement des capteurs d'un microrobot

marcheur, en fonction de l'objectif dans lequel le robot est conçu et dessiné. Par exemple, placer les capteurs de tension aux articulations, là où les contraintes sont les plus importantes, pour disposer d'une plus grande plage de mesure. Placer les capteurs de contact extérieurs sur la partie de la patte la plus éloignée du corps, pour percevoir l'environnement éloigné. Et garder à l'esprit que l'insecte dans la nature est confronté à des situations très variées, d'ou l'importance du nombre de ses capteurs, alors que souvent les robots sont conçus pour des applications plus restreintes. Il n'est donc pas toujours nécessaire de multiplier leur nombre.

2.3 Bio-inspiration

De la biologie à la robotique, que veut-on dire de quelque chose qu'il est "biologiquement inspiré" ? De nombreux degrés d'inspiration sont possibles, de la vague ressemblance à la stricte émulation [19]. Considérons par exemple la locomotion des robots : la plus simple des inspirations biologiques consiste à considérer par l'observation que l'animal avance sur un terrain plat comme avec des roues, ou l'observation que l'utilisation des six pattes par les insectes leur confère une grande stabilité. L'inspiration biologique complexe consiste à essayer de reproduire avec force détails les spécificités d'un insecte. Entre ces deux extrêmes, il y a un grand nombre de positions possibles. Par exemple, pour étudier et réaliser un robot de "type insecte", on peut :

- étudier le nombre et la configuration des degrés de liberté de chaque patte qu'un insecte utilise pour marcher et les efforts moteurs correspondants pour choisir la meilleure géométrie de patte pour un robot,

- examiner en détail les types de capteurs que l'insecte utilise pour permettre la commande du mouvement de ses pattes,

- tenter de décrypter les différentes stratégies de comportement qu'un insecte utilise pour se déplacer sur les différents types de terrains,

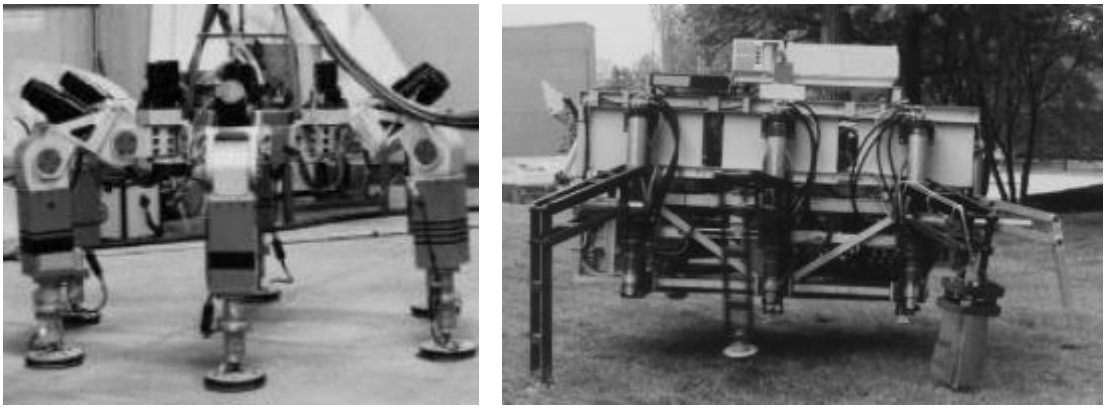
- tenter de fonder la structure de la commande de la marche d'un robot à pattes sur les principes organisationnels et architecturaux des commandes détectées dans la marche d'un insecte.

En robotique, on peut être parfois tenté de s'approcher de la réalité biologique plus qu'il n'est nécessaire. Il s'est parfois avéré peu efficace de porter trop d'attention à la conception d'un système biologiquement inspiré. Par exemple, les ailes d'un avion ne battent pas comme celles d'un oiseau. Néanmoins, pour la réalisation d'un système bio-inspiré, il est important de s'appuyer sur la littérature correspondante dans les domaines biologique, physiologique et comportemental. C'est à partir de ce constat que la robotique a sollicité ce type d'étude sur les animaux aux laboratoires de biologie. La littérature est très fournie dans ce domaine. Seules les références qui traitent de la marche des insectes et dont il est question ci-après, sont citées.

Quatre auteurs (Cruse, Dean, Delcomyn et Graham) ont beaucoup étudié la marche des insectes. Ils ont publié des articles sur la coordination des pattes des insectes, sur les organes mis en œuvre dans la marche, et sur les différentes démarches de l'insecte.

A partir de ces études, de nombreux robots bio-inspirés ont vu le jour. Avec des dimensions métriques et des mouvements très limités pour les premiers, dans les années 80, comme le montre les exemples de la Figure 1.12. Puis les avancées technologiques ont permis de miniaturiser les systèmes à des dimensions décimétriques en leur donnant plus de mobilité

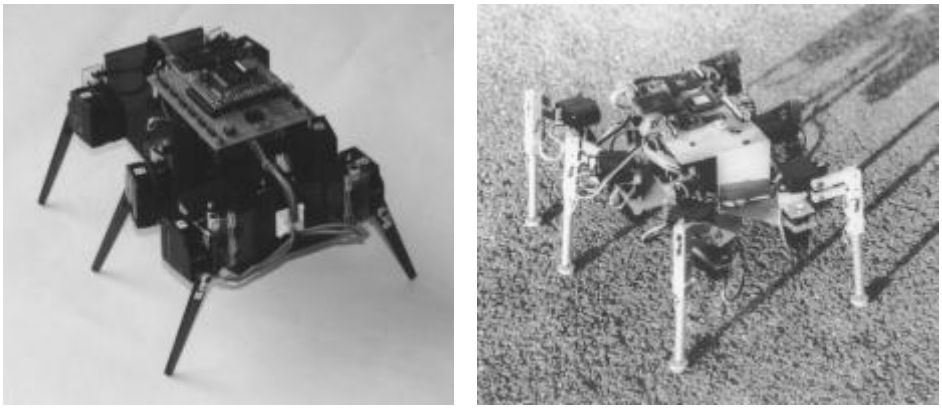
dans les années 90, comme le montre la Figure 1.13. Aujourd'hui les systèmes sont de dimensions millimétriques voire micrométriques, et l'on retrouve des mobilités réduites dues aux contraintes de microfabrication, qui seront décrites en annexe 4.



(a) (b)

Figure 1.12 : (a) AQUAROBO 1 (1984), Tokyo Institute of Technology, Japan
(b) MECANT I (1988-1993), Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland

Il n'est pas possible de survoler ici le nombre incroyable de dispositifs et mécanismes existant dans la nature. Mais une meilleure connaissance de celle-ci (à des échelles de plus en plus petites) associée aux nouvelles possibilités des microtechnologies et de l'intelligence artificielle rendent possibles de nouvelles recherches en microrobotique.



(a) (b)

Figure 1.13 : (a) Gokiburi 1995 (cockroach), Kyoto University, Kyoto, Japan
(b) Leonard 1995, Lab. de Microinformatique, Lausanne, Switzerland

2.4 Conclusion

La nature nous a procuré une immense variété d'animaux marcheurs très habiles. Aujourd'hui, de nombreux robots marcheurs existent, mais ils sont encore beaucoup moins habiles et intelligents que les animaux. Ces dernières années, de nombreux résultats concernant le mouvement des pattes des animaux durant la marche ont été publiés. Les applications des connaissances biologiques (sans excès) dans le développement des robots ont permis un progrès significatif. Pour atteindre ce but, plusieurs questions doivent trouver une réponse. La première concerne le mouvement d'une patte, sa mécanique, sa motorisation, ses capteurs et sa commande. La seconde concerne la coordination des pattes.

La biologie nous donne des réponses techniques pour la conception de la structure, alors que la bio-inspiration apporte une expérience dans le domaine, à savoir quel degré de fidélité il est nécessaire d'avoir dans l'inspiration.

3 Microrobots à pattes réalisés par microfabrication

Les microrobots à pattes étant ceux qui nous intéressent, nous allons les positionner dans l'arborescence des robots. La robotique est en effet un domaine extrêmement vaste, qui englobe aussi bien les robots sous-marins que les robots terrestres, la coopération ou la télé-opération. Effectuer un état de l'art de ce domaine est pratiquement impossible. La Figure 1.14 présente cette arborescence, qui n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais où seules les branches concernées pour positionner le microrobot à pattes sont décrites ici. La typologie dont nous allons présenter l'état de l'art est encadrée en gras sur cette figure.

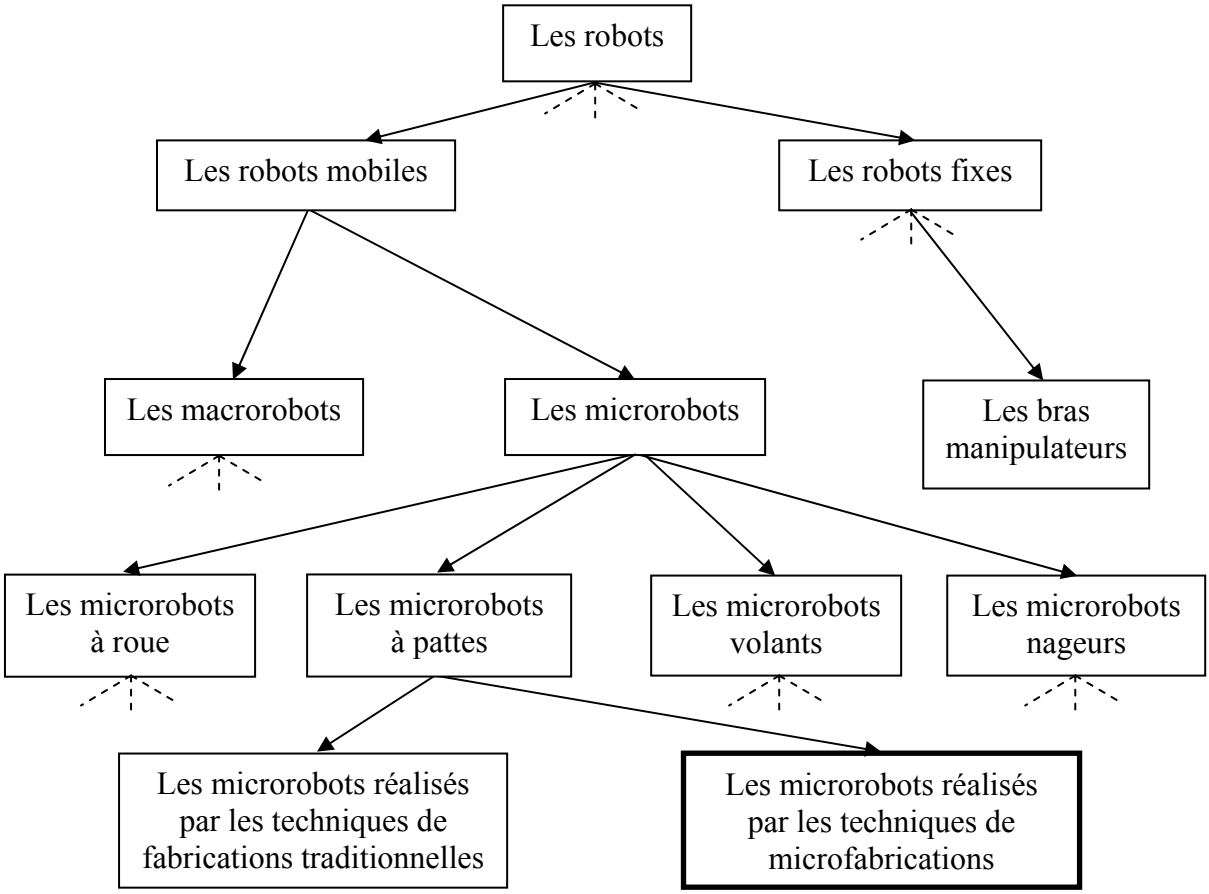


Figure 1.14 : arborescence des robots

Depuis que la course à la miniaturisation a été lancée, les appellations ont devancé les réalisations. En effet, un robot de dimension centimétrique est souvent qualifié de microrobot dès lors qu'il effectue des déplacements avec une résolution micrométriques.

Nous donnons ici une définition qui diffère quelque peu, nous qualifions de microrobot :

- **un robot dont le volume est de quelques cm^3,**
- **un robot fabriqué de façon collective par microfabrication,**
- **un robot effectuant des tâches dans le micromonde.**

Cet état de l'art ne s'intéresse qu'aux microrobots à pattes, dont nous fixerons ici un volume maximal d'un cube de 1 cm de côté, réalisés par les techniques de microfabrication. Les

microrobots décrits sont autonomes dans leurs déplacements, ce qui signifie que le support sur lequel ils se déplacent ne participe pas à leur locomotion. Nous ne parlerons pas ici des microrobots de type "stick-slip", ce type de locomotion nécessitant souvent une surface de déplacement spécifique.

Les noms des microrobots présentés ici sont ceux attribués par leurs auteurs, c'est la raison pour laquelle ils sont entre guillemets. Il s'agit :

- du microrobot "moucheron" de l'université de Boston,
- du microrobot "articulé" de l'université de Berkeley,
- du microrobot "microfourmi" de l'université de Tokyo,
- des microrobot "de micropositionnement" de l'université du Colorado,
- du microrobot "marcheur" de l'université de Stockholm,
- du microrobot "sans fil" de l'université de Lille,
- du microrobot "marcheur omnidirectionnel" de l'université de Washington.

3.1 Robot "moucheron"

Ce microrobot a été conçu par l'équipe du professeur Jan G. Smits au Département d'Ingénierie Electrique à l'Université de Boston aux Etats Unis mais, à notre connaissance, il n'a jamais été réalisé. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées entre 1989 et 1992 ([10], [11]).

Sa structure est présentée en Figure 1.15. Le principe est le suivant : les pattes sont constituées de poutres de silicium sur lesquelles est déposée une couche de ZnO (matériau piézo-électrique), de manière à réaliser des actionneurs piézoélectriques unimorphes (les actionneurs piézo-électriques seront décrits au chapitre 2). Un actionneur piézo-électrique unimorphe est une poutre constituée d'une couche piézo-électrique et d'une couche de matériau passif. Ces poutres sont reliées à leur extrémité par un V appelé pied. Les six pattes sont liées à un corps central qui contient l'électronique de commande autonome. Ce microrobot, nommé "gnat", soit "moucheron", possède également un organe de préhension à l'avant. Il est commandé par une source lumineuse et par un microphone par lesquels il reçoit un signal de commande qui lui permet de se déplacer librement tant que la lumière et le signal sonore sont présents. Son énergie est donnée par des cellules solaires qu'il transporte.

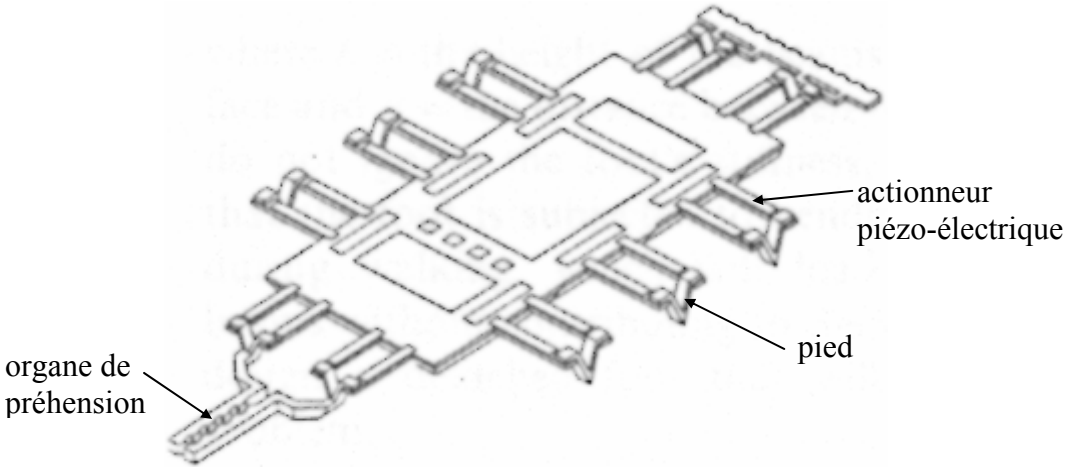


Figure 1.15 : structure du "robot moucheron"

Le déplacement est prévu par la commande judicieuse des six pattes. Les pieds sont réalisés de telle sorte qu'un mouvement de pas peut être obtenu comme le montre la Figure 1.16.

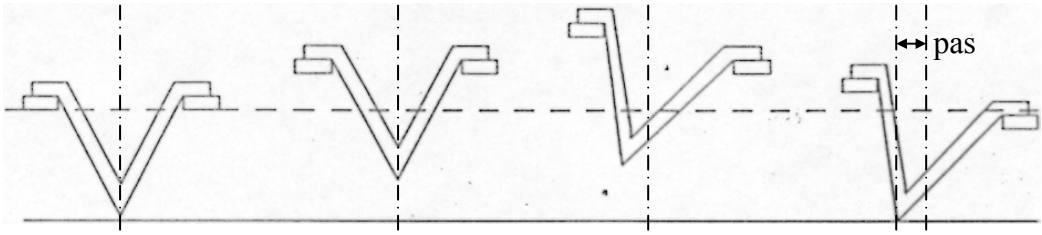


Figure 1.16 : séquence d'actionnement de la patte pour lui faire effectuer un pas

Les caractéristiques de ce microrobot données dans la littérature ne concernent que ses dimensions, soit 4 x 7 mm². En effet, ce microrobot n'ayant vraisemblablement pas été réalisé, seuls des calculs préalables auraient permis de connaître les performances attendues. Cette étude est très intéressante par plusieurs aspects :

- son année d'origine : en effet, ce microrobot a été imaginé il y a plus de dix ans. C'est certainement la raison pour laquelle il n'a pas été réalisé. En effet, certaines microtechnologies n'étaient pas encore complètement au point,
- l'idée de dépôt de couche piézo-électrique,
- sa conception monolithique.

3.2 Microrobot "articulé"

Ce microrobot a été développé dans l'équipe du professeur Kristofer S. J. Pister au Département d'Ingénierie Electrique et Informatique à l'Université de Berkeley aux Etats-Unis. Des informations relatives à ce microrobot ont été publiées depuis 1994 ([12] à [14]).

La structure du corps et des pattes de ce microrobot a déjà été réalisée, et son actionnement par des micro-actionneurs électrostatiques est à l'étude. La structure complète et actionnée est en cours de développement.

La structure mécanique de ce microrobot avec ses membres articulés est fabriquée et assemblée sur un support de silicium. Elle supporte sa commande, ses capteurs et son énergie. L'électronique, les cellules solaires et les capteurs sont fabriqués séparément et montés sur le support de silicium comme le montre la Figure 1.17. Ce microrobot possède 2 degrés de liberté par patte. Son volume final est de 1cm^3. Sa vitesse de déplacement prévue est de 1mm/s.

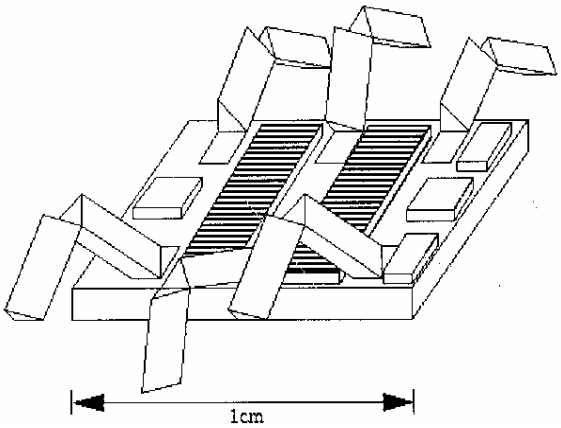


Figure 1.17 : schéma du microrobot articulé de l'université de Berkeley

Les pattes sont actionnées par des moteurs électrostatiques de faible consommation (quelques microwatts), de déplacements de quelques centaines de microns et de force développée de quelques dizaines de micronewtons. La Figure 1.18 schématise le fonctionnement de ces micromoteurs, dont la transmission de mouvement à la patte est repérée sous le nom de "shuttle".

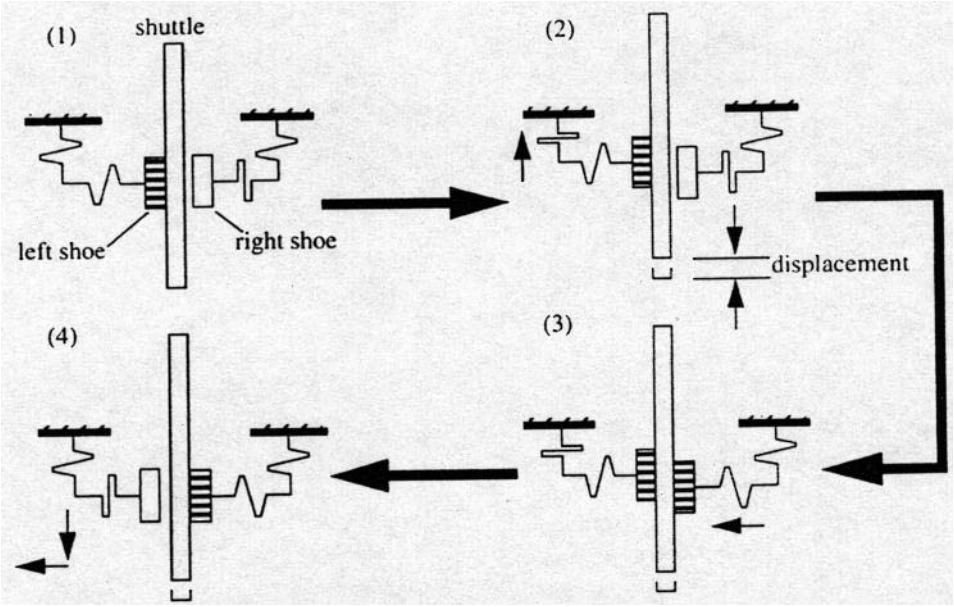


Figure 1.18 : schéma de fonctionnement du moteur électrostatique d'actionnement des pattes du microrobot

La stratégie de déplacement est décrite par la Figure 1.19.

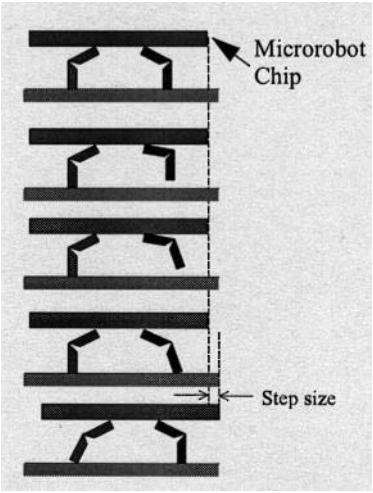


Figure 1.19 : diagramme de la démarche du microrobot de Berkeley

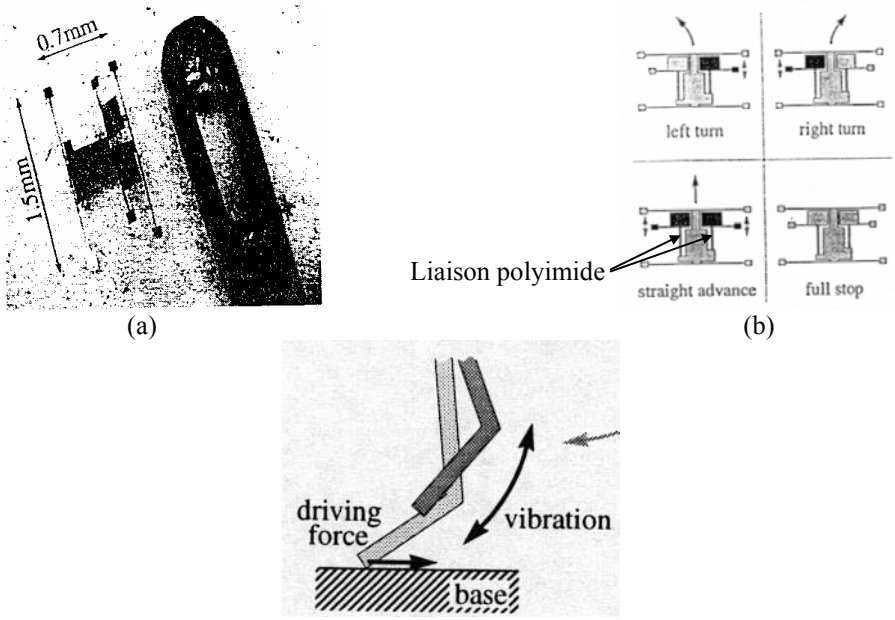
3.3 Robot "microfourmi"

Ce microrobot a été développé par l'équipe du professeur Hirofumi Miura au Département de Mécano-Informatique à l'Université de Tokyo au Japon. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées en 1996 ([7] à [9]).

Ce microrobot est intéressant dans sa conception et sa réalisation, notamment par ses dimensions. Néanmoins il ne correspond pas à la définition du microrobot autonome que nous

avons donnée en introduction, dans le sens où il se déplace sur une surface qui participe à son propre actionnement, lui même étant purement passif.

Sa structure est présentée en Figure 1.20 (a) le long d'une aiguille à coudre. Le squelette du microrobot est en polysilicium, et les parties élastiques de la structure sont en polyimide. Le polysilicium est un silicium polycristallin généralement obtenu par dépôt chimique en phase vapeur, et le polyimide est un polymère couramment utilisé en microfabrication. L'énergie est transmise au microrobot par les fréquences de vibration de la table piézo-électrique sur laquelle il se déplace, ne nécessitant pas de liaison filaire sur le microrobot.



(a) (b) (c)

Figure 1.20 : (a) photo de "micro-fourmi", (b) les quatre sortes de mouvement possibles, (c) schéma de déplacement de la patte en vibration

La marche de "micro-fourmi" n'est pas la même que celle d'un véritable insecte. Le microrobot se déplace sur une table vibrante piézo-électrique. L'amplitude de vibration de la table est très faible (moins d'un micromètre), et lorsque la fréquence de vibration coïncide avec la fréquence naturelle des pattes, ces dernières entrent en résonance avec une grande amplitude et permettent l'avance du microrobot. Les deux pattes centrales grattent le sol pour avancer comme le montre la Figure 1.20 (c), pendant que les quatre autres restent en contact permanent pour supporter le poids du corps.
La fréquence naturelle de la patte est déterminée par la longueur de la liaison polyimide indiquée sur la Figure 1.20 (b), ce qui permet aux deux pattes centrales d'avoir des fréquences différentes. Le microrobot peut alors aller tout droit, et tourner à droite et à gauche en fonction de la fréquence appliquée à la table (Figure 1.20 (b)).

3.4 Microrobots "de micropositionnement"

Ces microrobots ont été développés dans l'équipe du professeur Y. C. Lee au Département d'Ingénierie Mécanique de l'Université du Colorado (Boulder) aux Etats-Unis. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées en 2000 [15].

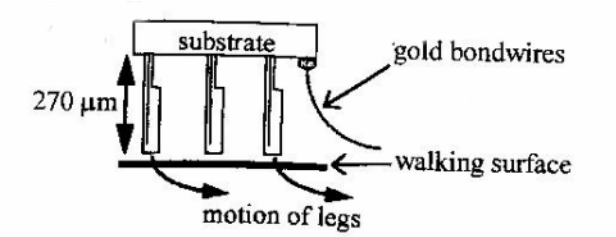
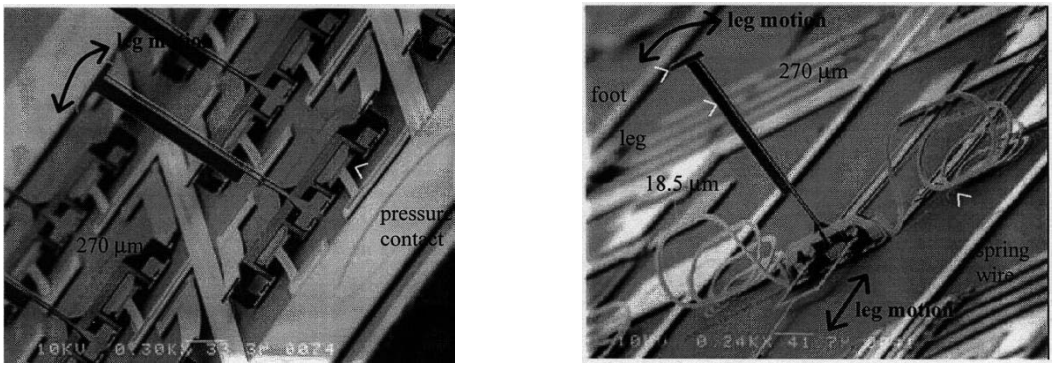


Figure 1.21 : schéma de la structure du microrobot

Ces microrobots sont destinés à marcher sur une surface plane. La Figure 1.21 montre un schéma simplifié de la structure des microrobots. La Figure 1.22 (a) montre la structure d'une patte à un degré de liberté du microrobot, et la Figure 1.22 (b) montre la structure d'une patte à deux degrés de liberté du microrobot.



(a) (b)

Figure 1.22 : (a) structure d'une patte à un degré de liberté, (b) structure d'une patte à deux degrés de liberté

La structure de chacun de ces microrobots n'est pas celle d'un insecte dans le sens où il possède une multitude de pattes (90 dans un cas, 96 dans l'autre). Elles sont l'une et l'autre assez semblables. Ces structures sont toutes les deux mises en mouvement par des actionneurs thermiques. Dans les deux cas, les pattes sont commandées par groupes de six. La structure dont les pattes possèdent un degré de liberté peut porter plusieurs fois son propre poids. Ceci permet d'envisager de lui faire porter sa propre énergie (des cellules solaires), sa commande, des équipements de test non précisés dans les différents articles, des capteurs et des éléments de surveillance. Les deux microrobots diffèrent dans la géométrie des pattes, la taille du corps et le nombre total de pattes.

3.5 Microrobot "marcheur"

Ce microrobot a été développé dans l'équipe du professeur Göran Stemme au Département de Signaux, Capteurs et Systèmes du Royal Institute of Technology de Stockholm en Suède. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées en 1999 ([16] à [18]).

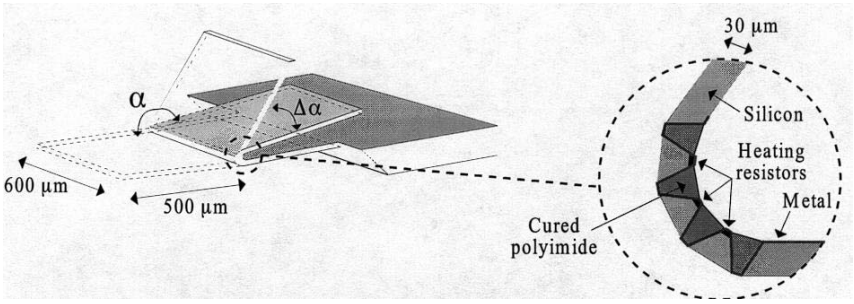


Figure 1.23 : structure du "bras"

Ce microrobot très original est issu d'un microconvoyeur basé sur une surface hérissée de "microbras" actionnés de manière asynchrone. La Figure 1.23 montre la structure du microbras qui possède à son articulation des joints polyimides insérés dans des V du substrat de silicium. Ces joints sont chauffés par conduction thermique par des résistances situées entre chaque joint. Le polyimide ayant un coefficient d'expansion thermique très supérieur à celui du silicium, les joints en se dilatant, de par leur forme vont "dérouler" l'articulation en donnant des amplitudes de mouvement en bout du microbras de l'ordre de plusieurs centaines de microns. La Figure 1.25 montre le schéma et une photo du microconvoyeur. A partir de là, l'auteur a imaginé retourner son convoyeur pour réaliser un microrobot comme le montre la Figure 1.24.

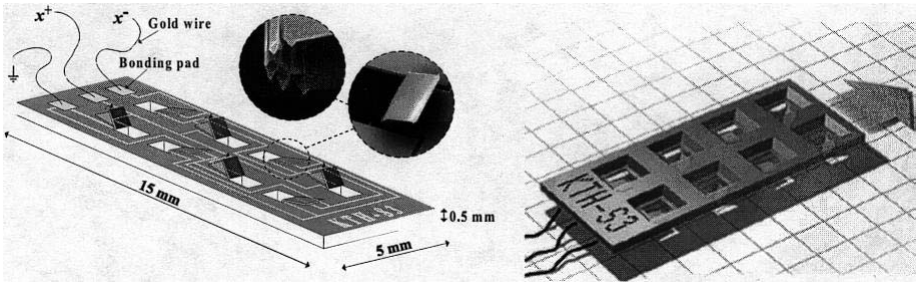
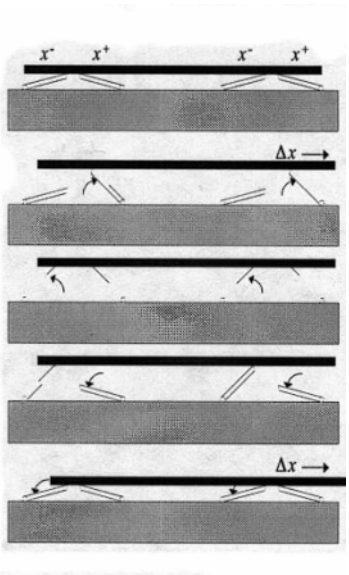
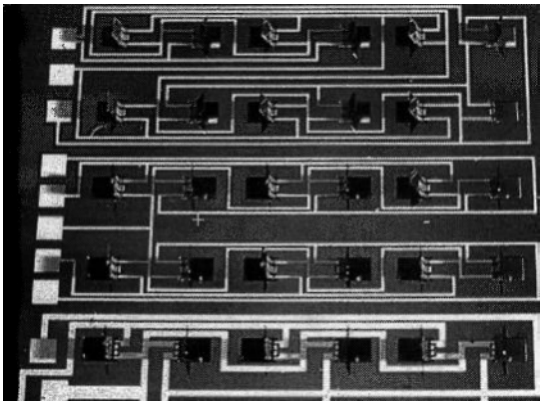


Figure 1.24 : schémas du microrobot : à gauche pattes en l'air et à droite pattes au sol

Ce microrobot est donc constitué d'un corps et de huit pattes réalisés de manière monolithique sur un substrat de silicium. Chacune des pattes est composée de joints polyimide insérés dans des rainures en V du silicium (Figure 1.23). Le chauffage du silicium par effet Joule permet le chauffage des joints par conduction thermique, et ainsi d'obtenir une modification de l'angle d'inclinaison initial de la patte. Les pattes sont rangées deux par deux en vis à vis (Figure 1.25 (a)). L'alimentation en alternance de ces pattes permet au microrobot de se déplacer.



(a)



(b)

Figure 1.25 : (a) schéma du microconvoyeur (b) photo du microconvoyeur

3.6 Microrobot "sans fil"

Ce microrobot est développé par Philippe Basset à l'Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord de l'Institut Supérieur d'Electronique du Nord à Lille en France. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées en 2002 ([20] et [21]).

Ce projet consiste à réaliser de manière hybride un microrobot autonome comme l'indique la Figure 1.26. Ce microrobot est constitué de trois parties principales :

- une antenne de réception RF pour l'alimentation et la transmission des signaux de commande,
- un circuit intégré silicium haute tension,
- un ensemble de micro-actionneurs électrostatiques permettant le déplacement du robot.

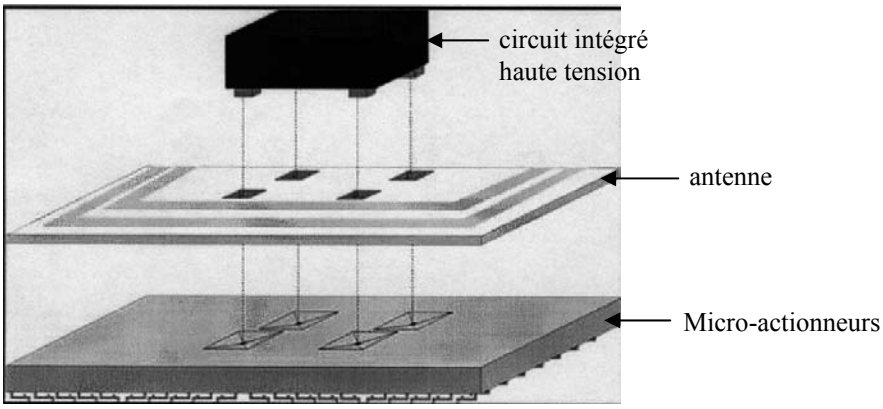


Figure 1.26 : schéma de la structure du microrobot sans fil de l'IEMN

Le circuit intégré haute tension prend en charge la gestion de l'énergie, ainsi que le traitement des données de contrôle. Il génère les signaux électriques qui doivent être appliqués aux actionneurs microsystèmes pour obtenir le déplacement du dispositif.

Dans ce projet, le microrobot n'est pas encore complètement réalisé. Plusieurs étapes ont cependant déjà été validées :

- l'électronique de puissance (circuit intégré haute tension),
- la réalisation de micro-inductances pour l'antenne de réception,
- la réalisation des actionneurs électrostatiques.

La Figure 1.27 montre le principe d'actionnement des micro-actionneurs électrostatiques pour obtenir le déplacement du microrobot. Elle est assez similaire au précédent : le microrobot "marcheur".

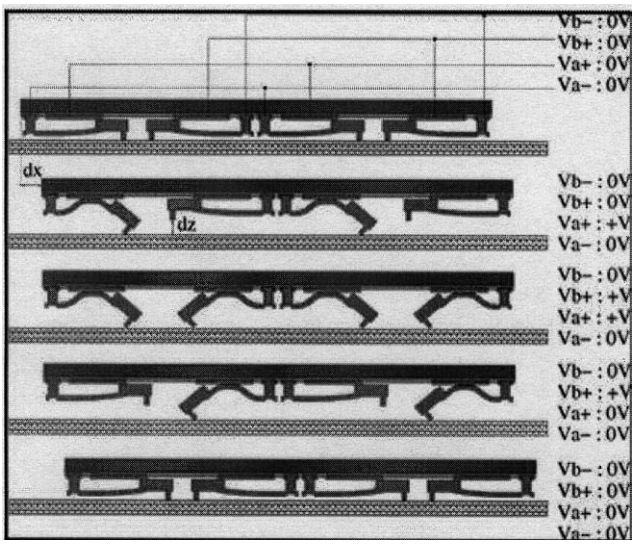


Figure 1.27 : principe d'actionnement pour le déplacement du microrobot

Ses caractéristiques sont :

- une surface de 1,5 x 1,5 cm²,
- une déflexion des actionneurs de 1,5 à 2,5 µm ("dz" sur la Figure 1.27),
- une fréquence d'actionnement de quelques dizaines de hertz,
- 128 micro-actionneurs électrostatiques,
- une longueur de pas de 150 à 240 nanomètres ("dx" sur la Figure 1.27).

Ce microrobot peut se déplacer sur une surface parfaitement lisse et si possible non conductrice. Les pattes possèdent un degré de liberté, et sont positionnées tête-bêche pour obtenir le déplacement de la structure.

3.7 Microrobot "marcheur omnidirectionnel"

Ce microrobot est développé dans l'équipe du professeur Böhringer au Departement d'Engineering Electrique à l'Université de Washington. Les informations relatives à ce microrobot ont été publiées en 2002 [22].

Le déplacement omnidirectionnel de ce microrobot est réalisé par la mise en matrices de 8 x 8 "éléments moteurs", chacun constitué de quatre microcils actionnés thermiquement, orientés orthogonalement. Le microrobot est formé de deux matrices de microcils reliés entre eux par un circuit imprimé. Ce microrobot a une surface d'environ 3 cm², et une hauteur de 1 millimètre. Sa vitesse maximum est de 635 µm par seconde, avec une fréquence d'actionnement de 110 hertz. Son poids propre est de 0,457 gramme, et il peut transporter plus de 3 fois son propre poids.

L'article dont nous disposons ne comporte aucun schéma du microrobot, ni de l'actionnement, mais seulement une photo d'ensemble (). Les microcils sont des actionneurs thermiques bilames constitués d'une résistance chauffante de titane et tungstène, en sandwich entre deux fine couches de polyimide dont les coefficients d'expansion thermiques sont différents. Le microrobot se déplace sur une surface de verre de 10 x 10 cm². Pour un actionnement sous une tension de 7,5 volts, le pas est de 5 µm. Des tensions inférieures permettent de produire des pas moins longs, donc un meilleur positionnement.

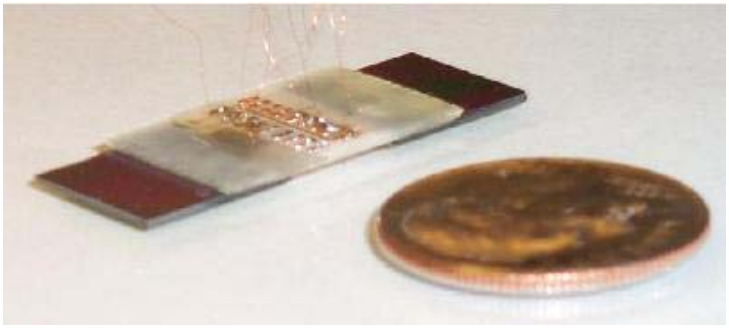


Figure 1.28 : Photo du microrobot marcheur omnidirectionnel

Ce microrobot est intéressant par son mode d'actionnement. Néanmoins il ne correspond pas à la définition du microrobot autonome que nous avons donné en introduction, dans le sens où il se déplace sur une surface spécifique, le verre, sa fabrication est hybride, il n'est pas entièrement réalisé par microfabrication, mais aussi pour ses dimensions qui excèdent quelque peu celles que nous nous sommes fixées.

3.8 Synthèse des caractéristiques des différents microrobots

Nous pouvons ici faire une synthèse des caractéristiques et performances des différents microrobots précédemment présentés (Tableau 1.2). Dans ce tableau, les microrobots sont rangés en colonne, et sont repérés par le nom de leur université d'origine. Dans la littérature, les dimensions sont données en surface pour certains, et en volume pour d'autres. Dans ce tableau, les dimensions sont données hors tout en surface avec la hauteur lorsque celle-ci est connue. Les auteurs de ces différents travaux ont été contactés, néanmoins, certaines informations ne sont pas connues pour tous les microrobots, c'est pourquoi certaines cases sont notées "NC" pour "Non Connu".

Microrobot / Carac-téristiques	Boston	Berkeley	Tokyo	Colorado	Stockholm	Lille	Washington
Dimensions (surface en cm^2x hauteur en mm)	0,28 x 0,2	1 x 0,5	0,0105 x 0,1	0,25 x 0,7	0,75 x 1	2,25 x NC	3 x 1
Actionnement	piézo-électrique	électro-statique	piézo-électrique	thermique	thermique	électro-statique	thermique
Vitesse	NC	1 mm/sec	NC	7,55 µm/s	6 mm/s	2,4 µm/s	635 µm/s
Charge portée	NC	NC	NC	0,128 g	2,5 g	NC	1,448g
Poids propre	NC	NC	NC	32 mg	88 mg	NC	457mg
Puissance con-sommée par patte et par pas	NC	quelques µW	NC	592 mW	90 mW	NC	NC
Longueur du pas	NC	NC	NC	3,75 µm	NC	0,240 µm	5 µm
Fréquence d'actionnement	NC	NC	NC	2 Hz	NC	50 Hz	110 Hz
Etat actuel des travaux	non réalisé	non actionné	terminé	terminé	terminé	en cours	terminé
Nombre de pattes	6	6	6	96	8	128	256 x 2
Autonomie du déplacement	oui	oui	non	oui	oui	partiel-lement	partiellement
Nombre de degré de liberté par patte	2	2	1	2	1	1	1

Tableau 1.2 : synthèse des caractéristiques et performances des microrobots (NC = Non Connu)

Cet état de l'art sur les microrobots existants nous a permis de présenter les différentes réalisations mondiales connues. Certains de ces microrobots n'entrent pas dans la définition que nous avons faite en introduction. C'est le cas entre autre du microrobot "Microfourmi" de Tokyo qui se déplace sur une surface participant à sa locomotion. Néanmoins, il nous a paru intéressant de le citer, pour ses dimensions et pour les techniques de réalisation mises en œuvre, également pour montrer que le développement d'un microrobot à pattes de type insecte, autonome dans ses déplacements, comportant deux degrés de liberté par patte et ne se déplaçant pas en stick-slip n'est à l'heure actuelle pas encore bien maîtrisé. Nous pouvons constater que seulement quatre de ces microrobots réalisés fonctionnent à ce jour. Le "Gnat" robot de Boston n'a à notre connaissance jamais été réalisé, dans le microrobot "articulé" de Berkeley, les actionneurs n'ont pas encore été intégrés à la structure mécanique, et le microrobot "sans fil" de Lille est en cours de réalisation. La durée de développement pour arriver au robot fini est encore très longue (de plusieurs années). Seuls deux de ces microrobots sont opérationnels à ce jour, et correspondent à la définition que nous avons donnée en introduction. Il s'agit des microrobots de "micropositionnement" du Colorado et du "marcheur" de Stockholm. En effet, le "marcheur omnidirectionnel" de Washington est un microrobot hybride qui n'est pas entièrement réalisé par microfabrication.

C'est donc dans ce créneau que se situent nos travaux. Notre microrobot a été entièrement réalisé par microfabrication pour intégrer les micro-actionneurs dans sa structure qui est de petite dimension, inférieure à un cube de 1 cm de côté. Son mode d'actionnement est choisi pour répondre au mieux aux exigences que nous avons fixées à savoir :

- une charge portée importante pour pouvoir embarquer à long terme son énergie et sa commande,
- une puissance consommée faible pour la même raison,
- six pattes a priori.

Dans un premier temps, son énergie et sa commande sont extérieures.

4 Conclusion

La microrobotique étant fondamentalement pluridisciplinaire, le développement d'un microrobot requiert la prise en compte d'un grand nombre de paramètres. Le développement d'un microrobot à pattes de type insecte ne déroge pas à cette règle.

La connaissance des différents microrobots à pattes existants à travers le monde montre la difficulté de réaliser à l'heure actuelle un microrobot monolithique, intégrant ses actionneurs et possédant deux degrés de liberté par patte. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas pour le moment de méthodologie de conception spécifique à la microrobotique.

L'étude des insectes et du biomimétisme permet de connaître le fonctionnement de la patte d'un insecte, ainsi que le degré d'inspiration désiré pour notre microrobot. L'intérêt des pattes par rapport aux roues pour un microrobot est de lui permettre de franchir des obstacles. Pour cela le microrobot doit être autonome dans ses déplacements, c'est à dire que le support sur lequel il marche ne participe pas à son déplacement.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure des insectes, ainsi qu'un état de l'art des microrobot à pattes de type insecte. Ces connaissances nous ont permis de définir des objectifs pour notre microrobot. Dans le chapitre suivant, après avoir défini ces objectifs, nous nous intéresseront au choix de son mode d'actionnement, ainsi qu'au développement des actionneurs correspondants.

5 Références bibliographiques

[1] Patrice Leraut "Les insectes dans leur milieu", Ecoguide, Bordas, 1976.
[2] Wolfgang Dierl; Werner Ring, trad. fr. Michel Cuisin "Guide des insectes", Delachaux et Niestlé ; ISBN 2-603-00847-1, 1992.
[3] Jiri Zahradnik et Milan Chvala, adaptation française de Michel Cuisin "La grande encyclopédie des insectes", collection Grande encyclopédies, édition Gründ.
[4] P.J. Gullan ; P.S. Cranston "The insects : an outline of entomology", Chapman & Hall, 1996.
[5] Guido Grandi "Introduzione allo studio dell'entomologia", Ed Esopterigoti, vol. I, 1951.
[6] Holk Cruse ; "What Mechanisms Coordinate Leg Movement in Walking Arthropods ?" ; TINS ; Vol. 13 ; N° 1 ; pp 15-21 ;1990
[7] Hirofumi Miura, Takashi Yasuda, Yayoi Kubo Fujisawa, Isao Shimoyama ; "Insect Model Based Microrobot" ; The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX; Stockholm Sweden ; pp 392-395 ; 1996.
[8] Isao Shimoyama, Takashi Yasuda, Hirofumi Miura, Yayoi Kubo Fujisawa, Yuichi Ezura ; "Mobile Microrobots" ; Robotica ; Vol. 14 ; pp 469-476 ; 1996.
[9] Takashi Yasuda, Isao Shimoyama, Hirofumi Miura ; "Microrobot Actuated by a Vibration Energy Field" ; The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators ; pp 42-45 ; 1996.
[10] Jan G. Smits ; "Is Micromecanics Becoming a New Subject for Academic Courses or the Design of a Piezoelectric on Silicon Microrobot" ; Industrie Symposium ; IEEE ; 1989.
[11] Jan G. Smits ; "Design Considerations of a Piezoelectric-on -Silicon Microrobot" ; Sensors and Actuators ; A 35 ; pp 129-135 ; 1992.
[12] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Towards an Articulated Silicon Microrobot" ; Proc. ASME Winter Mtg. ; Chicago ; November 1994.
[13] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Micro Mechanical Components for Microrobotics" ; Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm ; Sweden ; June 1995.
[14] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Surface-micromachined components for articulated microrobots" ; Journal of microelctromechanical systems ; Vol. 5 ; N°1 ; pp 10-17 ; march 1996.
[15] P.E. Kladitis, V.M. Bright ; "Prototype Microrobots for Micro Positionning and Micro Unmanned Vehicles" ; Sensors and Actuators 80 ; pp 132-137 ; 2000.
[16] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "3D micromachined devices based on Polyimide Joint technologie", SPIE Conference on Devices and Process Technologies for MEMS and Microelectronics, vol. 3892, pp 118-132, 27-29 october 1999, Queensland, Australia.
[17] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "A Robust Micro Conveyer Realized by Arrayed Polyimide Joint Actuators", IEEE MEMS'99, 17-21 january 1999, Orlando, USA.
[18] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "A Robust Micro Conveyer Realized by Arrayed Polyimide Joint Actuators", J. Micromech. Microeng., Vol. 10, pp 1-13, 2000.
[19] Randall D. Beer ; Roger D. Quinn, Hillel J. Chiel and Roy E. Ritzmann ; "Biologically inspired approaches to robotics" ; 1997 ; Communication of the ACM ; vol.40 n°3 ; pp 31-38.
[20] P Basset, A Kaiser, P Bigotte, D Collard, L Buchaillot ; "A large stepwise motion electrostatic actuator for a wireless microrobot" ; Proceeding of MEMS'02, pp 606-609.
[21] http://www.isen.fr/recherche/microsystem/microrobot.htm.

[22] Matthew H. Mohebbi, Mason L. Terry, Karl F. Böhringer ; "Omnidirectional Walking Microrobot Realized by Thermal Microactuator Arrays" ; Proceeding of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition ; New York ; November 11-16 2001.
[23] Uwe Müller-Wilm, Jeffrey Dean, Holk Cruse, Hans-Jürgen Weidemann, Jürgen Eltze, Friederich Pfeiffer ; "Kinematic Model of a Stick Insect as an Example of a Six-Legged Walking System" ; Adaptive Behavior ; Vol. 1, Number 2 ; pp 155-169 ; 1992.
[24] H Cruse ; "Which Parameters Control the Leg Movement of a Walking Insect ? 1. Velocity Control During the Stance Phase" ; J. Exp. Biol. ; N° 116 ; pp 343-355 ; 1985.
[25] Holk Cruse ; "Coordination of Leg Movement in Walking Animals" ; pp 105-119.
[26] H Cruse, J Dean, M Suilmann ; "The Contributions of Diverse Sense Organs to the Control of Leg Movement by a Walking Insect" ; J. Comp. Physiol. ; A 154 ; pp 695-705 ; 1984.
[27] J Dean ; "A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Caurusius Morosius : 1. A Geometrical Consideration of Contralateral and Ipsilateral Coordination Mechanisms Between Two Adjacent Legs" ; Biol. Cybern. ; N° 64 ; pp 393-402 ; 1991.
[28] J Dean ; "A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Caurusius Morosius : 2. Description of the Kinematic Model and simulation of Normal Step Patterns" ; Biol. Cybern. ; N° 64 ; pp 403-411 ; 1991.
[29] Fred Delcomyn ; "Factors Regulating Insect Walking" ; Ann. Rev. Entomol. ; N° 30 ; pp 239-256 ; 1985.
[30] Fred Delcomyn ; Nelson ME ; Cocatre-Zilgien JH "Sense organs of insect legs and the selection of sensors for agile walking robots", 1996, The International Journal of Robotics Research, vol. 15, pp 113-127.
[31] D Graham ; "Simulation of a Model for the Coordination of Leg Movement inFree Walking Insects" ; Biol. Cybernetics ; N°26 ; pp 187-198 ; 1977.
[32] D Graham ; "Pattern and Control of Walking in Insects" ; Advances in Insect Physiology ; Vol. 18 ; pp 31-140 ; 1985.
[33] Wilson D "Insect walking", 1966, Annual Review of Entomology, vol. 11, pp 103-122.
[34] Massood Tabib-Azar "Microactuators : Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical and Smart Structures", 1998, Series Editor : Harry L. Tuller, Kluwer Academic Publishers.

Chapitre 2
Etude, réalisation et caractérisation d'actionneurs piézo-électriques et thermiques

1 Introduction

Les microrobots nécessitent le développement de nouveaux actionneurs de dimensions très petites, réalisés par des moyens maitrisés, et de grande fiabilité. Ces micro-actionneurs sont en plein développement, et les problèmes de conception, de commande et d'intégration ne sont pas toujours résolus.

Le micro-actionneur est l'élément qui détermine, mais parfois aussi limite, les performances du microrobot. La pertinence d'un micro-actionneur dépend étroitement de l'application visée, de la course nécessaire, des forces et du temps de réponse requis, du type d'énergie disponible, des contraintes de température ou encore de l'encombrement. A l'évidence, le micro-actionneur "universel" capable de satisfaire toutes les exigences potentielles n'existe pas plus à l'échelle du micromonde qu'à l'échelle macroscopique. En conséquence, il ne faut condamner a priori aucune alternative, ainsi qu'en témoigne la diversité des réalisations.

Ce chapitre est consacré à la description des différents modes d'actionnement, à la définition des objectifs pour notre microrobot, au choix du mode d'actionnement des pattes du microrobot, ainsi qu'au dimensionnement des actionneurs retenus. La première partie concerne l'état de l'art des micro-actionneurs, qui sont classés par type de fonctionnement. Leur mode de fonctionnement est expliqué brièvement, et quelques exemples sont donnés. Cette connaissance est nécessaire pour définir le mode d'actionnement le plus approprié pour les pattes de notre microrobot. Dans une deuxième partie, nous exposerons l'objectif dans lequel notre microrobot a été développé, et les critères qui ont guidé notre choix pour le mode d'actionnement de ses pattes. Une troisième partie présente les différents actionneurs développés, leur comparaison ainsi que les applications pour lesquelles ils sont utilisés.

2 Les micro-actionneurs

Dans la littérature, le terme "micro-actionneur" est généralement utilisé pour des actionneurs dont les dimensions sont micrométriques, voire millimétriques, montrant des difficultés de classification de ce nouveau domaine. Dans la suite, nous qualifierons de micro-actionneur des éléments ayant au moins une de leur dimension micrométrique.

Un environnement constitué d'éléments de dimensions inférieures au millimètre est communément appelé micromonde. Il est connu que le micromonde est gouverné par des forces négligeables à l'échelle humaine : tension superficielle, effets électrostatiques, forces de Van der Waals sont prépondérants à cette échelle, alors qu'ils sont faibles ou négligeables à l'échelle macroscopique. Du fait des réductions d'échelle, les actionneurs utilisés en robotique traditionnelle perdent de leur intérêt dans les faibles dimensions. D'autre voies pour l'actionnement doivent donc être explorées.

Avec l'utilisation d'une transformation énergétique appropriée, les micro-actionneurs doivent être capables de générer une énergie compatible avec les applications du micromonde, et ce avec une résolution appropriée. Dans un micro-actionneur, la génération de l'énergie mécanique peut-être fondée sur un principe conventionnel (fluidique, thermique ou chimique par exemple), ou sur un principe étudié plus spécialement pour les micromachines, les microrobots et les microsystèmes (les matériaux actifs par exemple) et pour l'ensemble du micromonde.

Les modes d'actionnement peuvent être énumérés comme suit :

- électrostatique,
- électromagnétique,

- magnétostrictif,
- piézo-électrique,
- fluidique,
- expansion thermique,
- matériaux à mémoire de forme (alliages, polymères),
- chimique.

Il existe donc une grande variété de principe d'actionnement, mais la solution idéale n'existe pas. Chacun des principes avec ses avantages et ses inconvénients sera propre à un type d'application nécessitant certaines propriétés ou performances. Les critères de choix sont issus de l'analyse du cahier des charges de l'application.
Dans les paragraphes suivants, les types d'actionnement abordés sont décrits brièvement, des exemples de réalisation sont donnés, ainsi que leurs applications les plus courantes.

2.1 Les micro-actionneurs électrostatiques

Le surplus ou le déficit d'électrons libres à la surface d'une structure crée des charges électrostatiques. Ces charges exercent des forces d'attraction ou de répulsion respectivement pour des objets de charges opposées ou identiques.
Une force électrostatique est créée par l'application d'une tension entre deux électrodes capacitives séparées par un isolant (de l'air par exemple). Des charges opposées sont accumulées sur les deux électrodes et génèrent ainsi une force attractive entre elles, comme le schématise la Figure 2.1. Cette force est appelée force électrostatique et est donnée par l'équation suivante :

$$F = -\nabla Ue$$

Ainsi dans le cas du condensateur plan : $Ue = \frac{1}{2}.C.V^2 = \frac{1}{2}.\frac{\varepsilon.S}{d}.V^2$ donc $|F| = \frac{\partial Ue}{\partial d} = \frac{\varepsilon.S.V^2}{2.d^2}$.

Ue : énergie emmagasinée
F : force électrostatique (N)
ε : constante diélectrique ($C^2.N^{-1}.m^{-2}$)
S : surface d'une électrode (m^2)
V : différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes (V)
d : distance entre les deux électrodes (m)

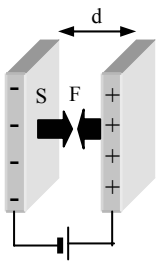


Figure 2.1 : génération d'une force électrostatique

Ainsi, plus la distance entre les électrodes est petite, plus la force d'actionnement est importante, à tension appliquée, surface et matériau égaux. Et grâce aux microfabrications, des actionneurs peuvent être réalisés avec de très petites distances. Ces actionneurs peuvent donc être facilement miniaturisés. Leur intérêt grandissant lorsque l'on diminue les dimensions, c'est certainement le type d'actionnement le plus utilisé dans les microsystèmes.

Les micro-actionneurs électrostatiques trouvent de nombreuses applications dans les micromoteurs linéaires ([3] et [4]) ou rotatifs ([5], [7] à [9]).
D'autre types plus spécifiques ont été développés ; ainsi que le montre les exemples qui suivent. Le micro-actionneur électrostatique distribué est un micro-actionneur constitué de plusieurs unités élémentaires (Figure 2.2). Chaque élément est une électrode en forme de vague. La distance entre les électrodes est la plus grande au centre de la vague, et la plus faible sur les bords. Une tension appliquée entre les électrodes génère des forces plus importantes sur les bords, qui donc se rapprochent et diminue la distance au centre. L'empilement de plusieurs éléments permet une amplification du mouvement [6].

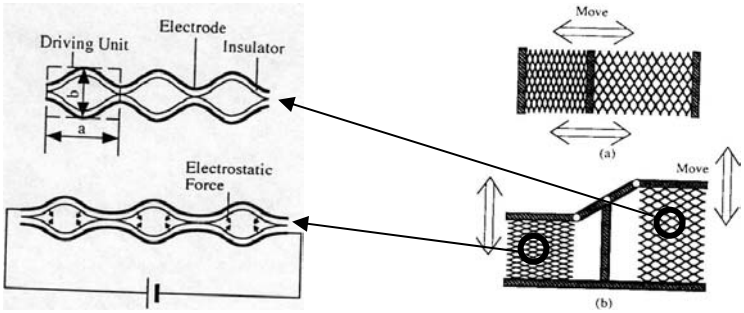


Figure 2.2: schéma du micro-actionneur électrostatique distribué

Le micro-actionneur électrostatique à large déflexion de la Figure 2.3 est composé de plusieurs poutres connectées en série [10]. Les force électrostatiques sont les plus grandes, là où les distances sont les plus faibles entre le support et les poutres. Lorsque les premières poutres entrent en contact avec le support, les poutres les plus éloignées se rapprochent, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la poutre la plus éloignée soit en contact avec le support.

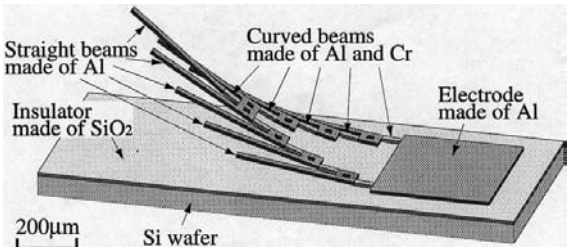


Figure 2.3 : schéma du micro-actionneur électrostatique à large déflexion

Le micro-actionneur du type anémone de mer (Figure 2.4) est un micro-actionneur qui associe deux types d'actionnement, électrostatique et thermique. Le principe électrostatique est utilisé pour plaquer le microbras sur le support, et l'effet thermique pour "ouvrir" le microbras. Ce micro-actionneur ressemble à une "cage", qui est fermée au repos, et qui ouvre ses "barreaux" telle une anémone de mer lorsqu'elle est actionnée. Ce type de micro-actionneur peut être utilisé dans l'air ou en milieu liquide pour capturer des objets [11].

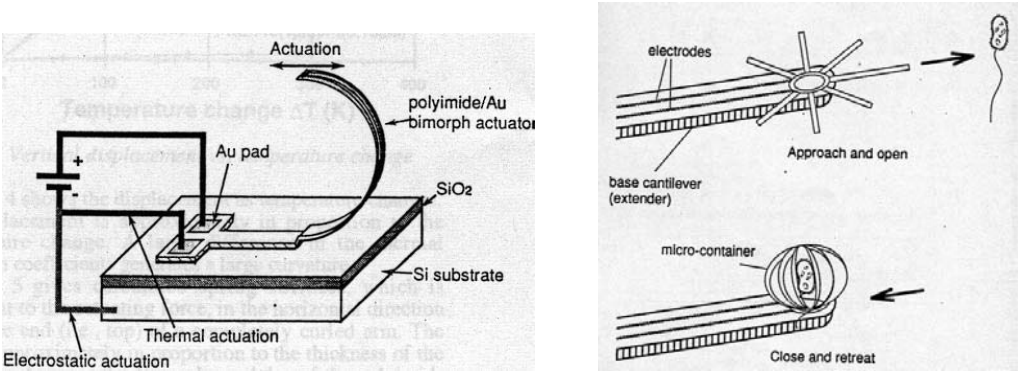


Figure 2.4 : schéma et fonctionnement du micro-actionneur de type anémone de mer

2.2 Les micro-actionneurs électromagnétiques

Une force électromagnétique est créée par l'application d'un courant dans une bobine. Quand un objet ferromagnétique est amené dans le champ, il y a attraction de l'objet par la bobine (Figure 2.5). Cette force est appelée force électromagnétique et est donnée par l'équation suivante :

$$F = \frac{S.B_0}{2.\mu_0}$$

S : section de la bobine
B_0 : Champ magnétique
μ_0 : perméabilité magnétique du vide

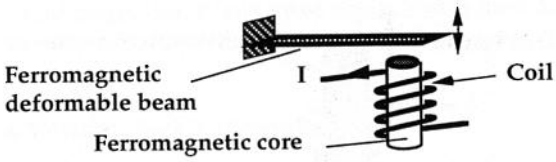


Figure 2.5 : schéma de fonctionnement d'un actionneur électromagnétique

Les micro-actionneurs électromagnétiques trouvent de nombreuses applications eux aussi dans les micromoteurs [12] à [14].

D'autres types plus spécifiques ont été développés, tels que les exemples qui suivent. La mise en cascade de plusieurs éléments permet d'amplifier les mouvements. C'est cette idée qui est à l'origine du micro-actionneur électromagnétique cascadable (Figure 2.6) [15].

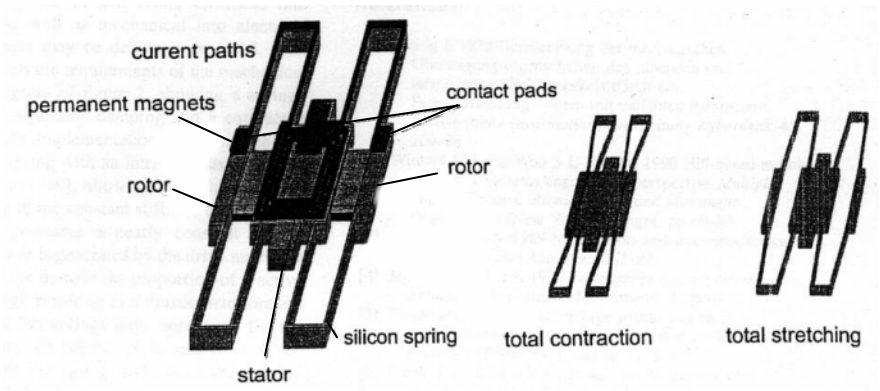


Figure 2.6 : structure d'un actionneur électromagnétique cascadable

Un micro-actionneur électromagnétique linéaire intégrant un capteur de position a aussi été développé (Figure 2.7). Ce micro-actionneur génère une grande force (15 mN) et un grand déplacement (plusieurs centaines de microns). La mesure de la variation d'inductance lors du mouvement offre une méthode simple pour connaître la position de l'actionneur [16].

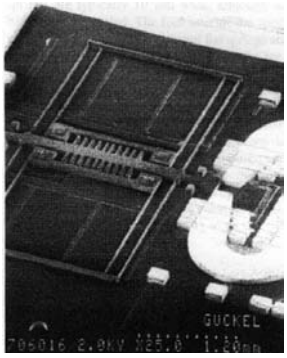


Figure 2.7 : structure du micro-actionneur électromagnétique linéaire avec capteur de position intégré

2.3 Les micro-actionneurs magnétostrictifs

Les matériaux magnétostrictifs possèdent des domaines magnétiques orientés aléatoirement. En appliquant un champ magnétique externe, ces domaines s'orientent suivant la direction du champ, ce qui entraîne une élongation du matériau dans cette direction. Les déformations relatives sont très faibles, mais l'intérêt principal de ces matériaux est que l'on peut les commander à distance, il n'y a pas de connexion électrique à établir. En revanche, l'importance de la chaleur dégagée par effet Joule rend leur intégration délicate.
La magnétostriction est une modification des dimensions d'un matériau ferromagnétique appliqué à un champ magnétique. Le micro-actionneur magnétostrictif le plus courant est un unimorphe constitué d'une poutre en silicium recouverte d'un film fin en matériau magnétostrictif. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué, le matériau magnétostrictif s'allonge et fait fléchir la poutre comme indiqué Figure 2.8. L'alliage TbDyFe, aussi appelé Terfenol D, possède de très bonnes propriétés magnétostrictives.

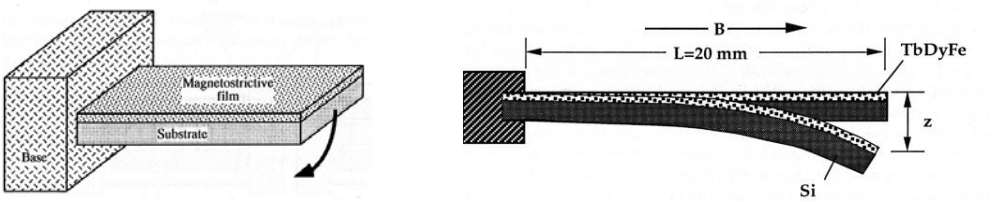


Figure 2.8 : schéma de fonctionnement d'un actionneur magnétostrictif de type bilame

Les développements de ce type d'actionneurs semblent pour le moment assez peu nombreux. En microrobotique, une application en est faite pour déplacer un microrobot d'inspection intra tubulaire (Figure 2.9). L'application d'un champ magnétique alternatif à l'extérieur du tube, fait vibrer les pattes et avancer le microrobot [14].

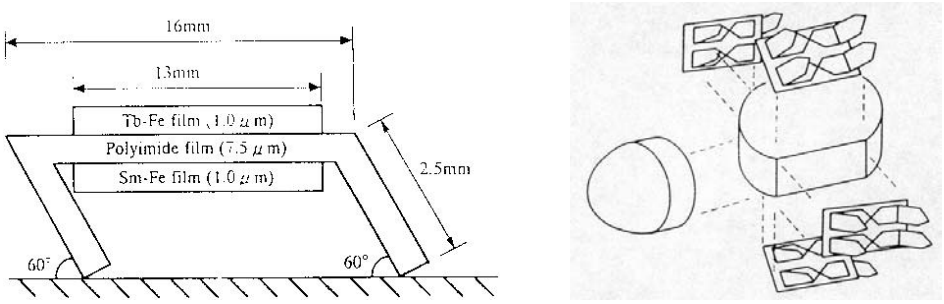


Figure 2.9 : structures du micro-actionneur et du microrobot

2.4 Les micro-actionneurs piézo-électriques

Les matériaux piézo-électriques peuvent transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique. Quand une pression est appliquée sur un matériau piézo-électrique, une différence de potentiel apparaît entre les surfaces du cristal. L'effet inverse transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Une différence de potentiel appliquée sur les faces d'un cristal génère une déformation du matériau dans une certaine direction (Figure 2.10).

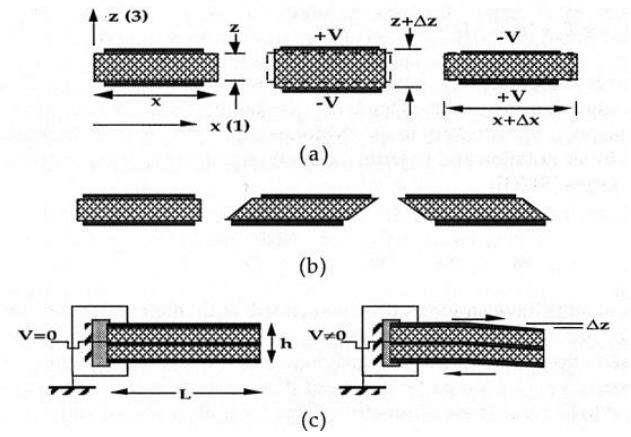


Figure 2.10 : différents modes d'excitation d'un élément piézo-électrique. (a) expansion suivant z (b) cisaillement (c) structure bilame composée de deux modes

Les matériaux piézo-électriques trouvent de nombreuses applications pour la réalisation de micro-actionneurs [17] et [18].

Une micropoutre parallèle a par exemple été développée (Figure 2.11), intégrant un actionneur et un capteur dans la même élément de base. Plusieurs éléments pouvant être associés pour obtenir des degrés de liberté suivant différents axes [20].

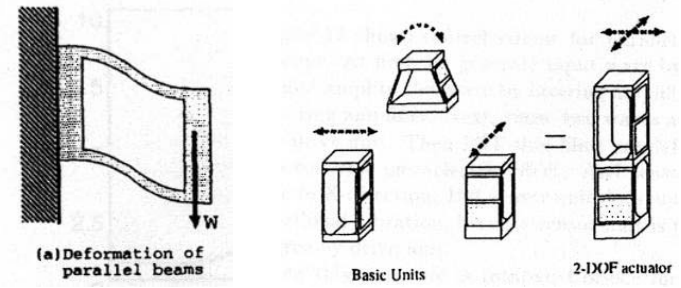


Figure 2.11 : structure de la micropoutre parallèle et ses degrés de liberté possibles

Ces micro-actionneurs peuvent par exemple être utilisés dans des applications optiques, comme ce micro-actionneur présenté en Figure 2.12 et développé pour actionner une série de micromiroirs [21].

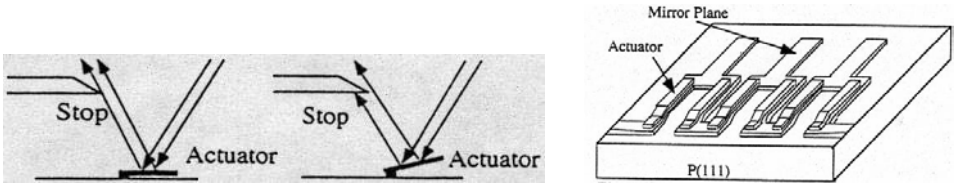


Figure 2.12 : schéma du mouvement du micro-actionneur et de l'ensemble miroirs et micro-actionneurs

2.5 Les micro-actionneurs fluidiques

Les micro-actionneurs fluidiques sont commandés par une pression hydraulique ou pneumatique (Figure 2.13). Le fluide peut par exemple être enfermé dans une chambre et contrôlé par des valves. Il peut également être poussé par un piston.

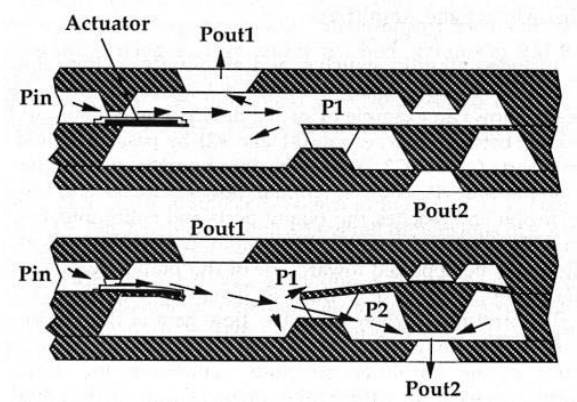


Figure 2.13 : schéma de fonctionnement d'un micro-actionneur fluidique

Très peu d'applications sont faites de ce type d'actionnement dans les micro-actionneurs. Même dans les microsystèmes fluidiques, les valves et autres systèmes sont souvent commandés par d'autres types d'actionnement. Les actionneurs fluidiques sont utilisés à des dimensions centimétriques, mais encore très peu en deçà.

Néanmoins, quelques micro-actionneurs fluidiques sont développés, comme le micro-actionneur pneumatique flexible. Il s'agit d'un tube de 15 mm de long et de 4,8 mm de diamètre, comportant trois chambres [22]. Suivant les pressions imposées dans chacune des chambres, le micro-actionneur va fléchir dans une direction comme l'indique la Figure 2.14. Ce type de micro-actionneurs a été utilisé pour la réalisation d'un microrobot d'inspection intra tubulaire, d'un micropréhenseur, d'un microrobot marcheur, ainsi que d'un microconvoyeur.

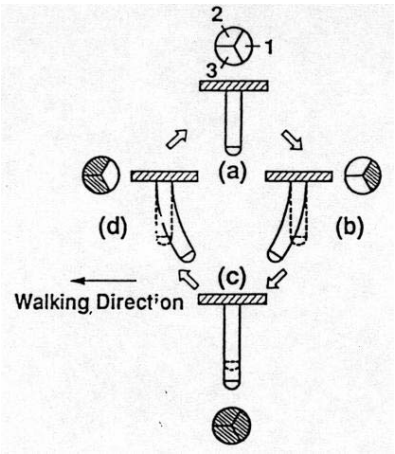


Figure 2.14 : schéma du mouvement du micro-actionneur en fonction de la pression dans les trois chambres

2.6 Les micro-actionneurs à expansion thermique

Les micro-actionneurs à expansion thermique sont fondés sur le principe de changement de volume d'un matériau soumis à des variations de température. Ce principe montre davantage d'efficacité à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique, car les variations de température sont plus rapides pour de faibles volumes. Ce type d'actionnement est assez utilisé dans deux configurations différentes essentiellement. La première configuration est le bilame thermique. Il est formé de deux couches de matériaux dont le coefficient d'expansion thermique est différent. Chauffés à la même température, l'un des matériaux s'allongera plus que l'autre, ce qui entraînera une flexion (Figure 2.15) de la structure. Il trouve de multiples applications telles que le positionnement de micromiroirs [23], l'actionnement de micromembranes [24], ou la réalisation de micromoteurs [25].

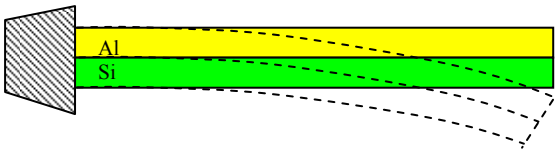


Figure 2.15 : déformation d'un bilame thermique Si/Al

La deuxième configuration est le micro-actionneur thermique travaillant dans son plan [26] à [28]. Il s'agit d'une structure généralement constituée de deux bras de résistance électrique différente (Figure 2.16). Ainsi, une différence de température s'établit entre les deux bras, l'un s'allonge plus que l'autre et fait fléchir la structure dans le plan (Figure 2.17).

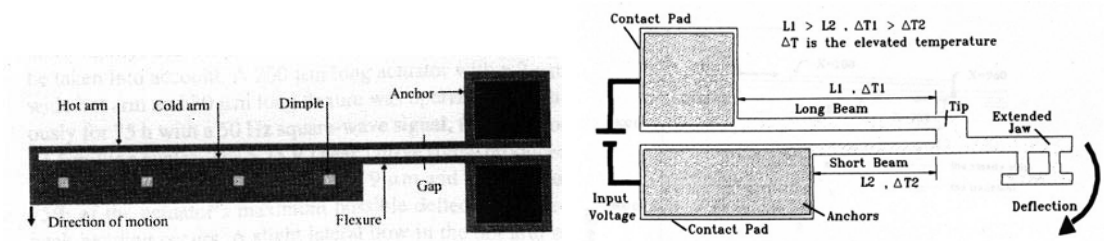


Figure 2.16 : schéma d'un actionneur thermique se déformant dans le plan par une différence de géométrie des deux bras

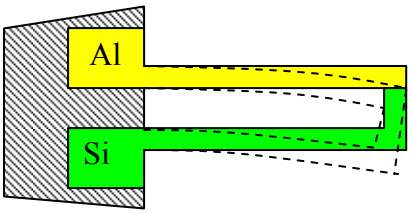


Figure 2.17 : schéma d'un actionneur thermique se déformant dans le plan par une différence de matériau des deux bras

2.7 Les micro-actionneurs à Alliage à Mémoire de Forme (AMF)

Parmi les matériaux actifs, les alliages à mémoire de forme (AMF) désignent une classe de matériaux qui, après déformation permanente à basse température retrouvent leur forme initiale non déformée (mémorisée) par chauffage. Cette propriété est désignée par le terme "effet mémoire de forme" et est illustrée par la Figure 2.18. C'est lors d'un retour contrarié à sa forme initiale, par chauffage, que l'AMF est capable de générer un travail mécanique et donc d'entraîner une charge. C'est cet effet de transduction thermomécanique que l'on exploite lorsqu'on utilise un AMF en tant qu'actionneur. La propriété de mémoire de forme est due à une transformation de phase dans le matériau. Cette transformation entre deux phases solides, appelée "transformation martensitique" a lieu entre une phase haute température, appelée phase mère ou austénite, et une phase basse température, appelée phase produite ou martensite. Une telle transformation peut être induite par une simple variation de température ou par l'application d'une contrainte mécanique dans une plage de température adéquate. La phase austénitique correspond à la forme mémorisée de l'AMF.

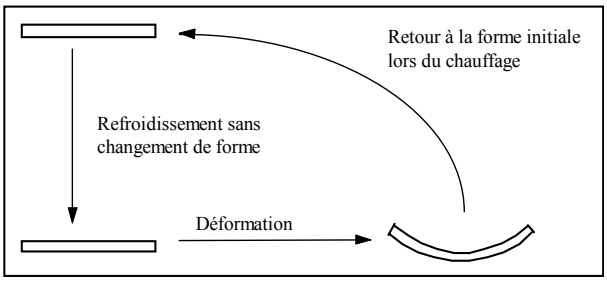


Figure 2.18 : transformation de phase des AMF

Pour utiliser ce type d'actionnement, il est nécessaire de lui adjoindre un élément mécanique de rappel ou que le matériau à mémoire de forme soit éduqué (effort mémoire double sens). En effet, pour qu'un élément AMF puisse reprendre sa forme initiale par chauffage, il faut qu'il ait subi une déformation mécanique préalable (Figure 2.19) [35]. Jusqu'à ces dernières années, ce type d'actionneur était intégré par assemblage dans les microsystèmes (étape très délicate), ce qui rendait difficile la miniaturisation. Aujourd'hui, il est possible de déposer des matériaux AMF par microfabrication, ce qui facilite leur intégration. Les AMF ont été utilisés pour réaliser par exemple une micropince (Figure 2.20).

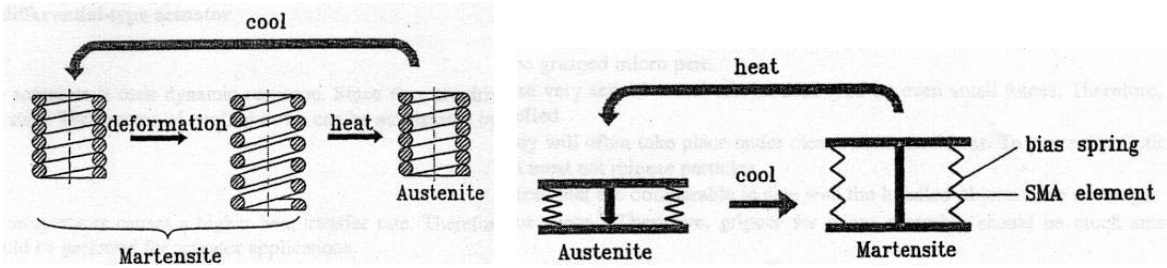


Figure 2.19 : principe de fonctionnement d'un AMF

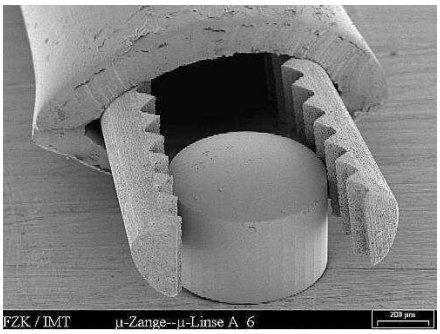


Figure 2.20 : micropince neuro-chirurugicale (Institut für Mikrostrukturtechnik Karlsruhe, Allemagne)

Notons que l'on trouve également des polymères à mémoire de forme (PMF), dont les déformations maximales sont cette fois-ci bien plus importantes, mais avec une force motrice moindre. Les Polymères à Mémoire de Forme (PMF) suscitent actuellement d'importantes études. On peut notamment citer les travaux récents de A. Lendlein et al [33]. Ces polymères, développés à l'origine, il y a une dizaine d'années, au Centre R&D Mitsubishi Heavy Industries de Nagoya, sont des thermoplastiques à base de polyuréthane. Ils fonctionnent de façon similaire aux AMF, sur une transition vitreuse. Leurs avantages sont :

- faible masse,
- peu coûteux,
- déformations très importantes (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de %),
- possibilité de moulage par injection, autorisant des formes très diverses et complexes,
- réglage par leur composition des températures de transition de -30°C à 70°C.

Par ailleurs, à l'instar des AMF, la biocompatibilité de ces polymères leur ouvre le champ des applications biomédicales. Ainsi, au delà des seuls AMF, les matériaux à mémoire de forme d'une manière générale sont certainement appelés à être de plus en plus utilisés à l'avenir [32].

2.8 Les micro-actionneurs chimiques

Dans les micro-actionneurs chimiques, une réaction électrochimique réversible peut être utilisée pour générer des variations de pression et produire un travail. L'application d'une tension de polarisation variable sur l'actionneur génère par réaction des variations de pression. De nombreuses réactions chimiques produisent des gaz qui peuvent être utilisés pour créer des hautes pressions dans une chambre.

Le micro-actionneur électrochimique présenté en Figure 2.21 est constitué d'une chambre enfermant une solution d'électrolyse [34]. Cette chambre est fermée par une membrane. La pression du gaz généré par l'électrolyse est commandée électriquement. La membrane va donc gonfler ou réduire en fonction de la pression à l'intérieur de la chambre.

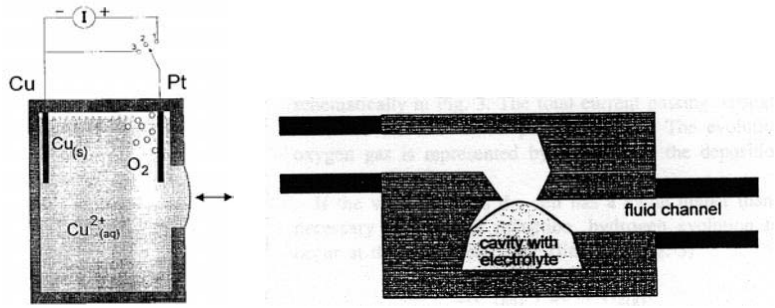


Figure 2.21 : schéma de l'actionneur électrochimique

Les gels polymères sont des substances intéressantes dans les micro-actionneurs chimiques. Ils utilisent le gonflement d'un gel comme principe d'actionnement. Un polymère dopé a la propriété d'augmenter son volume par des méthodes optiques, thermiques, électriques et chimiques. Il est de plus assez simple à obtenir. Le gel est un intermédiaire entre un solide et un liquide.

A notre connaissance, assez peu d'applications de ce type d'actionnement ont été développées. On trouve essentiellement des micro-actionneurs utilisant les gels polymères. A titre d'exemple, les micro-actionneurs ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film) sont constitués d'un polymère pris entre deux électrodes [31]. L'application d'une faible tension entre ses électrodes provoque une déformation. Ce micro-actionneur ne fonctionne qu'en milieu humide, il a par exemple été utilisé pour la réalisation d'un microrobot nageur [39] présenté en Figure 2.22.

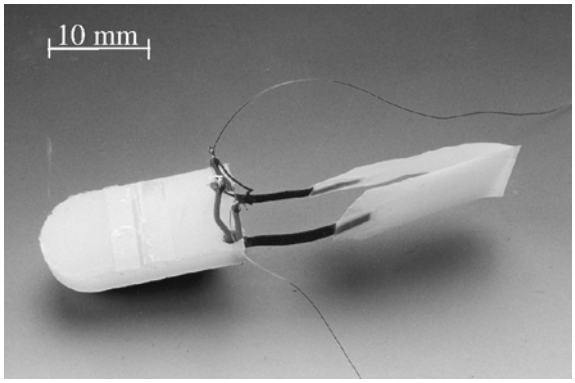


Figure 2.22 : photo du microrobot nageur du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB)

2.9 Conclusion

Ce panorama des micro-actionneurs a brièvement rappelé les modes de fonctionnement des principaux types de micro-actionneurs, ainsi que quelques applications pour chacun des différents types. Beaucoup d'autres micro-actionneurs sont développés, qui ne permettent pas de donner un état de l'art exhaustif dans ce chapitre.

C'est parmi les modes présentés ici que nous avons choisi celui répondant le mieux aux exigences de la mise en mouvement des pattes de notre microrobot. Ce choix est traité en détail au paragraphe suivant.

3 Choix du mode d'actionnement

Le choix du principe d'actionnement le plus approprié dépend de nombreux facteurs. Il est lié d'une part à l'application à laquelle il est destiné, et d'autre part aux contraintes d'intégration

dans le système global. L'intégration du micro-actionneur par microfabrication a aussi des avantages :

- elle permet de minimiser les problèmes de connectique,
- elle permet de minimiser l'énergie mécanique consommée dans les transmissions du fait que le micro-actionneur est en contact direct avec la charge mise en mouvement.

3.1 Performances des micro-actionneurs

Pour évaluer les performances d'un type d'actionneur, plusieurs critères sont établis. Les principaux critères qui peuvent être utilisés pour sélectionner un actionneur, et qui sont pertinents pour l'utilisation que l'on souhaite en faire sont :

- *la précision* : c'est l'exactitude avec laquelle la valeur de la sortie est atteinte,
- *la répétabilité* : c'est la fidélité à reproduire la sortie (position ou force) à plusieurs reprises pour une même excitation,
- *la course* : c'est l'écart entre la valeur minimale et la valeur maximale que peut atteindre la sortie,
- *le temps de réponse* : en général on définit le temps de réponse comme le temps que met la sortie pour atteindre un certain pourcentage de la valeur correspondant à un échelon appliqué à l'entrée,
- *l'effort développé* : c'est l'effort que peut générer l'actionneur,
- *le rendement* : c'est le rapport de la quantité d'énergie mécanique utile sur la quantité d'énergie fournie,
- *l'effet d'échelle* : c'est l'amélioration ou la dégradation des performances due aux réductions des dimensions,
- *la réalisabilité* : c'est la facilité de réalisation de l'actionneur par des techniques de fabrications maîtrisées et répétables,
- *l'intégrabilité* : c'est la possibilité d'intégrer par microfabrication l'actionneur dans un microsystème.

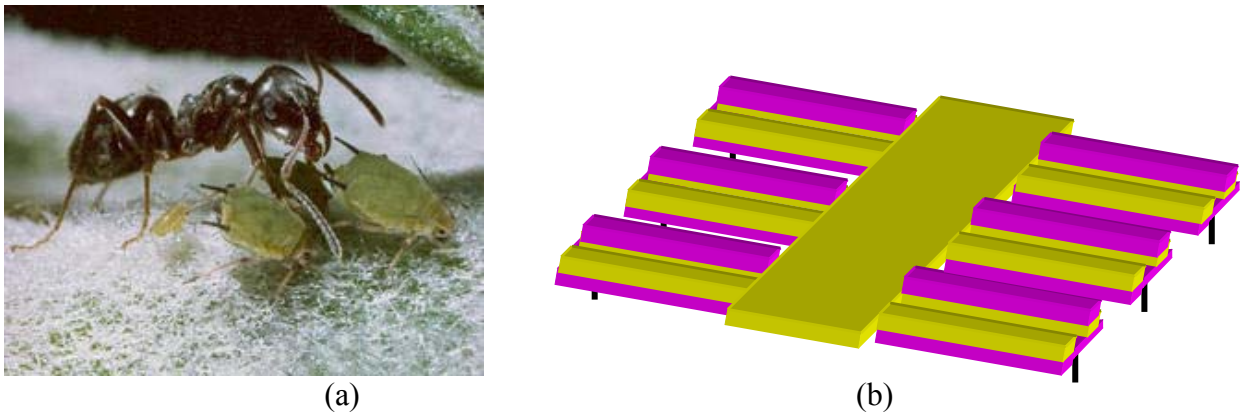
Parmi ces critères, et suivant le cahier des charges de l'application, certains d'entre eux sont prépondérants par rapport aux autres.

3.2 Objectif de notre microrobot

L'objectif de notre microrobot est :

- d'être a titre de comparaison un microrobot de type "fourmi" (Figure 2.23 a) [41],
- d'être un microsystème, il est fabriqué de manière collective par microfabrication et ses dimensions sont très inférieures à un cube de 1 cm de côté,
- d'avoir une structure mécanique monolithique, intégrant son actionnement,
- d'avoir plusieurs pattes permettant son déplacement, a priori six pour conserver en permanence l'équilibre statique du robot lors du déplacement des pattes,
- d'avoir des pattes à deux degrés de liberté chacune pour permettre au microrobot de se déplacer sur un sol de rugosité variable, voire de franchir des obstacles.

La commande dans un premier temps sera relativement simple et extérieure au microrobot, elle consiste à piloter le déplacement de chaque patte, et à synchroniser ces déplacements pour permettre au robot d'avancer. L'autonomie énergétique et de commande du microrobot sera un objectif à plus long terme.



(a) (b)

Figure 2.23 : (a) photo d'une fourmi, (b) schéma du microrobot attendu

Le premier objectif à atteindre est le développement des pattes et de leur actionnement, pour réaliser la locomotion du microrobot.

3.3 Sélection du principe d'actionnement

Générer des mouvements de très haute résolution dans le micromonde est l'un des défis de la microrobotique. Les solutions peuvent être trouvées dans l'exploration de différents modes d'actionnement, notamment en modélisant leur comportement.
Parmi les moyens utilisables dans le micromonde, les matériaux dits "actifs" constituent de bons candidats pour le micro-actionnement. Ce terme désigne des matériaux capables de se déformer et de produire un travail mécanique sous l'action d'une grandeur physique correspondant au principe actif du matériau, de type champ électrique (exemples : piézo-électricité, électrostriction), champ magnétique (exemple : magnétostriction), par chauffage (exemples : alliages à mémoire de forme, expansion thermique), chimique (exemple : polymère ionique) ou lumineux (exemple : certains bio-polymères).
Au laboratoire d'Automatique de Besançon, le fonctionnement de certains d'entre eux était bien connu, comme les Alliage à Mémoire de Forme (AMF). D'autres en revanche étaient assez peu connus, et leur comportement demandait à être caractérisé et modélisé en vue d'optimiser leur utilisation en tant qu'actionneurs dans les microrobots.

Les critères de mesure des performances des micro-actionneurs nous ont conduit à établir des choix compte tenu des éléments suivants :

- du fait de ses dimensions, le microrobot devra être réalisé par microfabrication,
- le microrobot devra se déplacer sur un sol de rugosité et de topographie variables,
- son encombrement devra être faible, de l'ordre de celui d'un gros insecte (au maximum un cube de 1 cm de côté),
- de la possibilité d'autonomie énergétique.

Parmi les critères de mesure des performances des micro-actionneurs, ceux qui sont les plus significatifs et qui guident notre choix sont :

- la course,
- les efforts développés,
- l'effet d'échelle,

- le type d'énergie utilisée (en vue de l'autonomie),
- la facilité de réalisation et d'intégration par microfabrication,
- la consommation d'énergie.

L'exigence d'une course la plus grande possible (une centaine de microns), d'efforts développés importants (plusieurs dizaines de millinewton), tout en minimisant la consommation énergétique et en conservant la possibilité au microrobot de se déplacer sur une surface ne participant pas à sa locomotion, rend l'utilisation des modes d'actionnement électrostatique et magnétique peu adéquat. La possibilité de réalisation et d'intégration dans de petites dimensions à l'Institut des Microtechniques de Franche Comté, (IMFC) exclut les modes d'actionnement à alliage à mémoire de forme, magnétostrictif et chimique.
Les deux modes d'actionnement parmi ceux décrits au chapitre précédent répondant le mieux aux critères donnés ci-dessus sont : le principe piézo-électrique d'une part, et le principe d'expansion thermique d'autre part.
Le principe piézo-électrique est fondé sur un matériau actif, dont le temps de réponse est faible et le principe de fonctionnement réversible. En contrepartie, c'est un principe qui génère des déplacements faibles, et dont les procédés de fabrication n'étaient pas maîtrisés sur place.
Le principe d'expansion thermique, quant à lui, permet de générer des déplacements et des efforts importants avec une relative facilité de réalisation pour ce type d'actionneurs. En contrepartie, son rendement est faible, et il n'a pas un temps de réponse qui lui est très favorable.
Nous avons réalisé, caractérisé et comparé des actionneurs utilisant chacun des principes précités, pour n'en retenir qu'un pour l'actionnement des pattes du microrobot. Ce sont des actionneurs tests, de dimensions plus importantes que celles requises par le microrobot final, mais ils nous ont permis d'obtenir des résultats assez rapidement pour effectuer le choix du principe d'actionnement du microrobot. Les travaux menés au laboratoire concernant les actionneurs (caractérisation, modélisation et commande) s'intègrent dans une démarche de compréhension et de maîtrise des phénomènes physiques utilisables pour l'actionnement, mais aussi une démarche volontariste de maîtrise des moyens technologiques nécessaires à leur réalisation.

4 Etude et caractérisation des actionneurs piézo-électriques

Parmi les actionneurs présentant des potentialités intéressantes, les actionneurs piézo-électriques, capables de transformer une énergie électrique en un travail mécanique, et ce avec des temps de réponse très faibles. Dans le domaine des matériaux actifs, nous pouvons donc utiliser ce type de matériau pour mettre les pattes du microrobot en mouvement.
L'effet piézo-électrique est un effet réversible, il peut également être utilisé pour la conception de capteurs, ce qui le rend très attractif pour les microsystèmes.

4.1 Principe de fonctionnement et propriétés

Le principe de ces matériaux a été très brièvement décrit au premier chapitre. Nous allons décrire ici leur fonctionnement et leurs propriétés.
Les matériaux piézo-électriques peuvent transformer de manière réversible l'énergie mécanique en énergie électrique. L'effet piézo-électrique direct a été décrit pour la première fois par les frères Curie en 1880. L'effet piézo-électrique inverse a été découvert quelques années plus tard. Ces actionneurs sont très efficaces, environ 50 % de l'énergie électrique appliquée est directement transformée en énergie mécanique. De plus, les actionneurs piézo-

électriques peuvent exercer des forces importantes. L'inconvénient de ces matériaux est que le déplacement obtenu est relativement faible. Un élément piézo-électrique peut s'étendre de 0,1 à 0,2 % dans une direction [2]. Les micro-actionneurs piézo-électriques sont souvent constitués d'empilements pour diminuer les tensions d'alimentation. En effet, dans un empilement de n éléments, chaque élément est soumis à une tension n fois plus faible que le même actionneur constitué d'un seul élément, pour un déplacement identique.
Les actionneurs que nous avons développés sont des actionneurs de type poutre. Les paragraphes suivants vont décrire la structure, le modèle analytique statique, la réalisation et les expérimentations de ces différents actionneurs.

4.2 Modèle statique des actionneurs piézo-électriques

Les matériaux piézo-électriques étant anisotropes, les effets sont différents suivant l'axe choisi. Ces matériaux sont des monocristaux naturels comme le quartz par exemple ou de synthèse comme les céramiques. Les céramiques sont obtenues par frittage de poudres comme le PZT (Plomb Zirconium Titane). L'orientation des monocristaux est alors aléatoire, et le matériau ne présente pas d'effet piézo-électrique. Il faudra polariser ce matériau pour qu'il devienne piézo-électrique. La polarisation consiste à soumettre la céramique à un champ électrique intense de quelques kilovolts par millimètres pour aligner les polarisation du matériau dans une direction voulue, comme le montre la Figure 2.24.

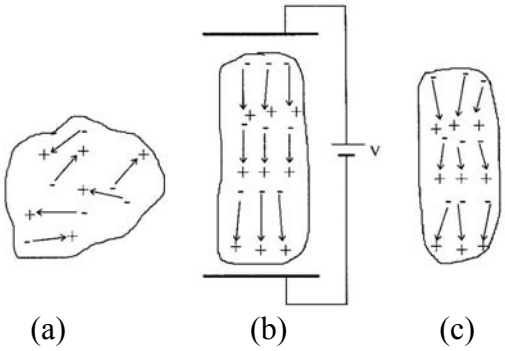


Figure 2.24 : schéma de principe de la polarisation d'une céramique piézo-électrique : (a) céramique non polarisée, (b) polarisation de la céramique et (c) céramique polarisée

Les céramiques se caractérisent par leur forte piézo-électricité par rapport au quartz, néanmoins, elles présentent quelques limitations :

- une faible résistance à la traction,
- une température critique au-delà de laquelle elles perdent leur effet piézo-électrique, cette température est appelée température de Curie et est notée Tc,
- une perte de polarisation liée à l'application d'un champ électrique opposé à sa polarisation, ce champ électrique est appelé champ critique et est noté Ec.

La direction de déformation est fonction de la direction de polarisation. La convention généralement utilisée définit un repère dont l'axe z correspond à la direction et au sens de polarisation du matériau, comme l'indique la Figure 2.25.

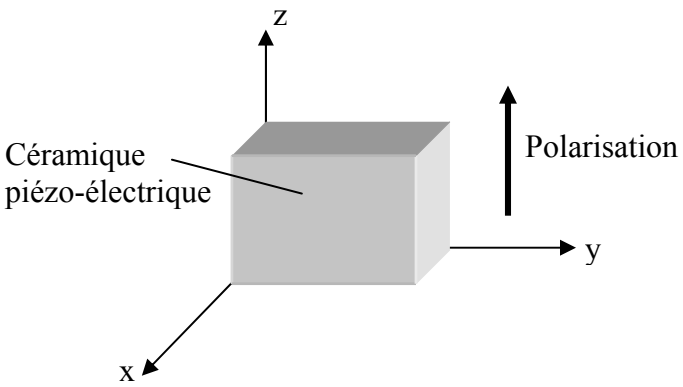


Figure 2.25 : système orthogonal décrivant les propriétés d'un matériau piézo-électrique polarisé

La flexion d'une poutre est le moyen le plus employé pour obtenir des déplacements pouvant atteindre une fraction de millimètre.

Les relations caractérisant le comportement statique d'un matériau piézo-électrique peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^E.T_j + d_{mi}.E_m \\ D_m = d_{mj}.T_j + \varepsilon_{mn}^T.E_n \end{cases} \qquad \text{(i, j de 1 à 6) et (m, n de 1 à 3)}$$

S_i est la déformation, T_j est la contrainte, E_m est le champ électrique, D_m est le déplacement, s_{ij}^E est la compliance à champ électrique constant, d_{mi} la constante piézo-électrique, et ε_{mn}^T est la permittivité à contrainte constante. Les indices i et j représentent les six degrés de liberté dans l'espace, et les indices m et n représentent les trois translations suivant les axes d'un repère dans l'espace.

Les actionneurs piézo-électriques auxquels nous nous sommes intéressés sont des poutres travaillant en flexion, qui peuvent être unimorphe ou bimorphe, comme vont le décrire les paragraphes suivants. Dans les deux cas, ils exploitent l'effet bilame pour générer des déplacements.

4.2.1 Les actionneurs unimorphes

Un unimorphe est constitué d'une couche de matériau piézo-électrique solidaire d'une couche de matériau passif (métallique ou autre), comme le montre la Figure 2.26. L'application d'une différence de potentiel sur les faces du matériau piézo-électrique provoque une déformation de celui-ci, qui mécaniquement lié au matériau passif non déformé, provoquera une flexion de la poutre, comme l'indique la Figure 2.27. Le sens de déformation sera fonction des sens relatifs de la polarisation et du champ électrique.

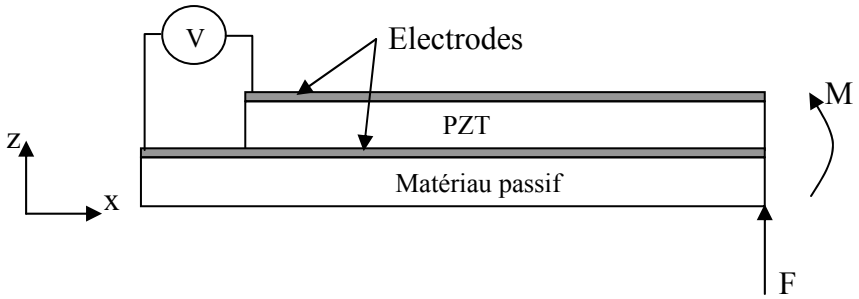


Figure 2.26 : unimorphe piézo-électrique non déformé

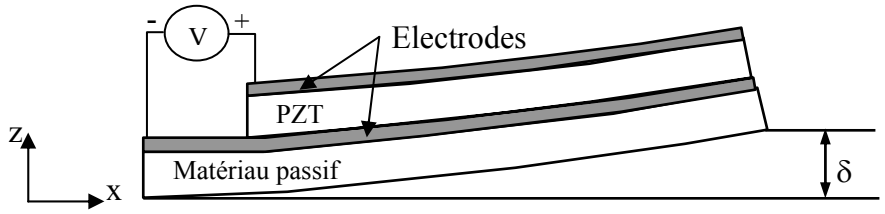


Figure 2.27 : unimorphe piézo-électrique déformé

Lorsqu'une tension externe V est appliquée entre les électrodes de l'actionneur représenté en Figure 2.27, si le champ électrique est dans le même sens que la polarisation du cristal piézo-électrique (conformément à la convention qui a été donnée précédemment), le matériau piézo-électrique va s'étendre dans le plan perpendiculaire au champ électrique, et se contracter dans sa direction, si les coefficients piézo-électriques d_{31}et d_{33} du matériau sont tels que $d_{31} < 0$ et $d_{33} > 0$, comme c'est communément le cas. Le PZT étant solidaire du matériau passif, la poutre va fléchir. En changeant la polarité de la tension externe, la poutre va fléchir dans la direction opposée.

Les poutres unimorphes piézo-électriques ont déjà été largement étudiées ; notamment par Smits et Choi [46]. Les équations modélisant le comportement des unimorphes proposées dans ces travaux, sont fonctions de la force extérieure F appliqués à l'extrémité de la poutre et perpendiculaire à celle-ci, du moment extérieur M et de la tension entre les électrodes V. Ces équations permettent entre autre de déterminer la déflexion à l'extrémité de la poutre.

Ces équations, qui sont une approximation linéaire, peuvent être écrites sous forme matricielle [46] :

$$\begin{pmatrix} \delta \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} M \\ F \\ V \end{pmatrix} \qquad (1)$$

- δ est la déflexion à l'extrémité (Figure 2.27),
- Q est la quantité des charges électriques qui apparaissent sur les électrodes du matériau piézo-électrique,
- les e_{ij} sont des coefficients constants calculés à partir des propriétés et des dimensions de l'unimorphe,

- M et F sont respectivement le moment et la force externes appliqués à l'extrémité de l'unimorphe (Figure 2.26),
- V est la tension électrique externe appliquée entre les électrodes.

Les coefficients e_{ij} qui caractérisent l'unimorphe peuvent s'exprimer par l'équation matricielle qui est donnée pour un unimorphe piézo-électrique dont les indices p et mp symbolisent respectivement le matériau piézo-électrique et le matériau passif [46] :

$$\begin{pmatrix} \delta \\ Q \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \dfrac{6.L^2}{K.w} & \dfrac{4.L^3}{K.w} & \dfrac{-3.d_{31}.B.L^2}{K} \\ \dfrac{-6.d_{31}.B.L}{K} & \dfrac{-3.d_{31}.B.L^2}{K} & \dfrac{L.w}{A.h_p}.\left(\varepsilon_{33}^T - \dfrac{d_{31}^2.h_{mp}.\left(S_{11}^{mp}.h_3^p + S_{11}^p.h_3^{mp}\right)}{K}\right) \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} M \\ F \\ V \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Avec :

$$A = S_{11}^{mp}.S_{11}^p.\left(S_{11}^p.h_{mp} + S_{11}^{mp}.h_{Al}\right)$$

$$B = \frac{h_{mp}.\left(h_{mp} + h_p\right)}{\left(S_{11}^p.h_{mp} + S_{11}^{mp}.h_p\right)}$$

$$K = \left(S_{11}^{mp}\right)^2.\left(h_p\right)^4 + 4.S_{11}^{mp}.S_{11}^p.h_{mp}.\left(h_p\right)^3 + 6.S_{11}^{mp}.S_{11}^p.\left(h_{mp}\right)^2.\left(h_p\right)^2 + 4.S_{11}^{mp}.S_{11}^p.h_p.\left(h_{mp}\right)^3 + \left(S_{11}^p\right)^2.\left(h_{mp}\right)^4$$

Dans ces équations, L est la longueur, w la largeur et h l'épaisseur de l'actionneur.

4.2.2 Les actionneurs bimorphes

Le bimorphe quant à lui est constitué de deux couches de matériaux piézo-électriques associées soit en parallèle comme le montre la Figure 2.28, lorsque les deux couches sont polarisées dans le même sens, soit en série comme l'indique la Figure 2.29, lorsque les deux couches sont polarisées en opposition. L'application d'une tension sur les deux faces des couches piézo-électriques provoque dans les deux cas l'allongement de l'une et la contraction de l'autre couche, ce qui entraîne une flexion comme l'indique les pointillés des Figure 2.28 et Figure 2.29.

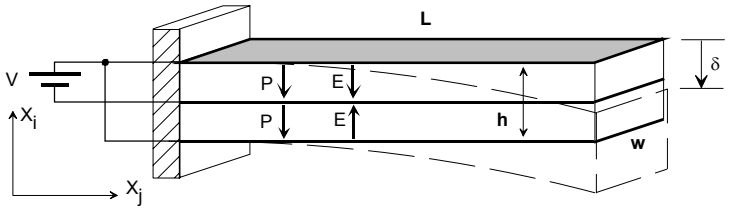


Figure 2.28 : schéma d'un bimorphe parallèle au repos avec sa déformation en pointillés

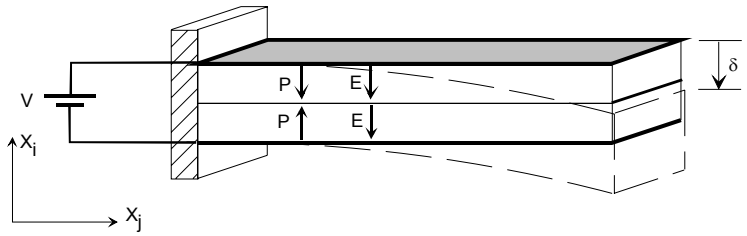


Figure 2.29 : schéma d'un bimorphe série au repos avec sa déformation en pointillés

Outre les unimorphes, Smits et Dalke ont également modélisé les bimorphes piézo-électriques [44]. Les équations pour le bimorphe parallèle sont données par :

$$\begin{pmatrix} \delta \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{3.S_{11}^{p}.L^2}{4.w.h_p^3} & \dfrac{S_{11}^{p}.L^3}{2.w.h_p^3} & \dfrac{3.d_{31}.L^2}{8.h_p^2} \\ \dfrac{-3.d_{31}.L}{4.h_p^2} & \dfrac{-3.d_{31}.L^2}{8.h^2} & \dfrac{\varepsilon_{33}^{T}.L.w}{2.h}.\left(1-\dfrac{k_{31}^2}{4}\right) \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} M \\ F \\ V \end{pmatrix} \qquad (3)$$

avec : $k_{31}^2 = \dfrac{d_{31}^2}{S_{11}^{E}.\varepsilon_{33}^{T}}$

A tension V constante, le champ électrique dans le cas du bimorphe série étant divisé par deux, par rapport au cas du bimorphe parallèle, la déflexion est elle aussi divisée par deux.

4.3 Dimensionnement des actionneurs piézo-électriques

Les actionneurs développés au Laboratoire d'Automatique de Besançon sont de chacun des types décrits ici : unimorphe, bimorphe parallèle et bimorphe série [30]. Nous avons choisi du PZT de référence PIC151 de la société Polytech Physike Instrumente (voir les caractéristiques en annexe 1) dont les coefficients utiles fournis par le constructeur sont :

$$S_{11}^{E} = 15.10^{-12}\, m^2 / N$$
$$d_{31} = -210.10^{-12}\, m / V$$

Les dimensions des premiers actionneurs piézo-électriques ont été déterminées de manière à être réalisable par un usinage plus conventionnel (scie à wafer, découpe laser). En effet, l'usinage par microfabrication du PZT étant encore mal maîtrisé au plan international, il nous est donc apparu trop ambitieux, n'ayant lors du début de cette recherche aucune compétence en microfabrication, de se lancer dans ce type de réalisation.

Les dimensions choisies pour les actionneurs piézo-électriques sont (Figure 2.30) :

- L = 10 mm,
- l = 1 mm,
- e = 0,5 mm.

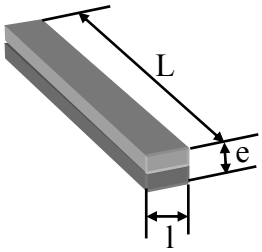


Figure 2.30 : dimensions de l'actionneur piézo-électrique de type poutre

4.4 Réalisation des actionneurs piézo-électriques

Nous avons fabriqué ces actionneurs piézo-électriques à l'Institut des Microtechniques de Mayence (IMM) dans le cadre d'un contrat européen "Training and Mobility of Researchers (TMR), access to Large Scale Facilities" (contrat N° ERB FM GE CT-98 0138 de décembre 1998 à mars 2000).

Les unimorphes piézo-électriques sont réalisés à partir d'un wafer de PZT de 250 µm d'épaisseur et d'une feuille de laiton de 100 µm d'épaisseur. Ces deux éléments sont collés entre eux à l'aide d'une colle conductrice époxy. Les actionneurs sont ensuite découpés à la scie à wafer aux dimensions souhaitées.

Les bimorphes piézo-électriques sont constitués de deux wafers de PZT métallisés de 250 µm d'épaisseur. Comme pour les unimorphes, ils sont collés ensemble et découpés à la scie à wafer.

La Figure 2.31 montre des photos des actionneurs piézo-électriques unimorphe et bimorphe réalisés à l'IMM.

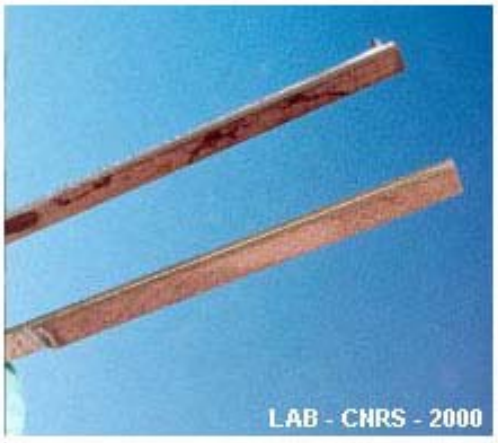


Figure 2.31 : photo des actionneurs piézo-électriques réalisés à l'IMM : unimorphe en haut et bimorphe en bas

4.5 Expérimentation des actionneurs piézo-électriques

L'expérimentation des actionneurs piézo-électriques nous a permis de valider les résultats de simulation obtenus à partir des modèles statiques analytiques présentés au paragraphe 3.2. La Figure 2.32 montre le principe de l'une des expérimentations qui ont été faites pour mesurer la déflexion en bout de l'actionneur en fonction de la tension appliquée entre les électrodes. La Figure 2.33 montre le principe des expérimentations qui permetent de mesurer la déflexion correspondant à une force appliquée en bout de l'actionneur.

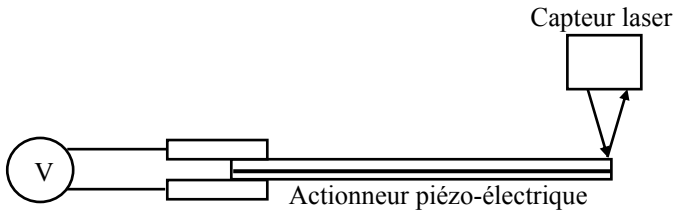


Figure 2.32 : schéma de mesure de la déflexion des actionneurs piézo-électriques soumis à une tension

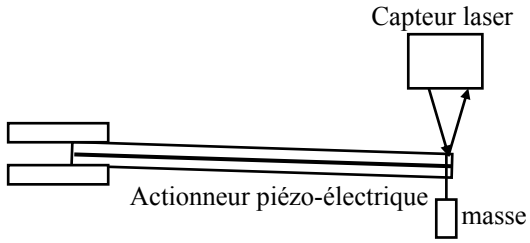


Figure 2.33 : schéma de l'expérimentation de la déflexion due à une force appliquée en bout de la poutre

Pour leur expérimentation, les actionneurs sont commandés en tension. La déflexion de la poutre est mesurée à vide par un capteur laser. Une deuxième expérimentation est faite avec une excitation électrique extérieure nulle de l'actionneur, qui est laissé en circuit ouvert. La déflexion correspondant à l'application d'une masse connue à l'extrémité de la poutre est mesurée.

Les résultats des expérimentations permettent de tracer :

- la déflexion de l'unimorphe en fonction de la tension appliquée à force nulle, comparée aux résultats théoriques obtenus avec le modèle analytique de l'équation (2) : Figure 2.34,

- la déflexion de l'unimorphe en fonction de la force appliquée à l'extrémité de l'actionneur comparée aux résultats théoriques obtenus avec le modèle analytique de l'équation (2) : Figure 2.35.

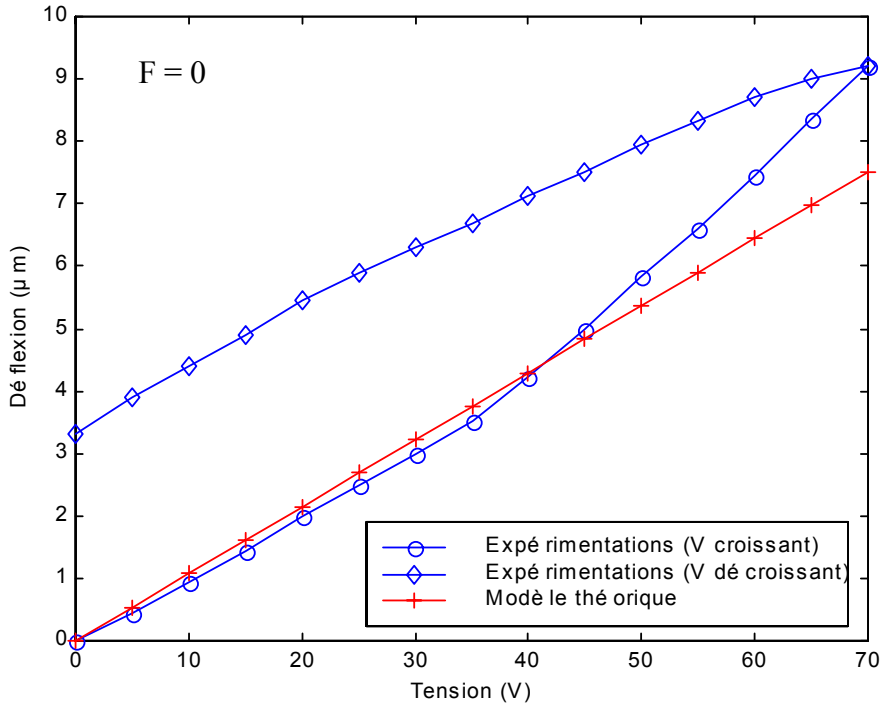


Figure 2.34 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion d'un unimorphe en fonction de la tension appliquée

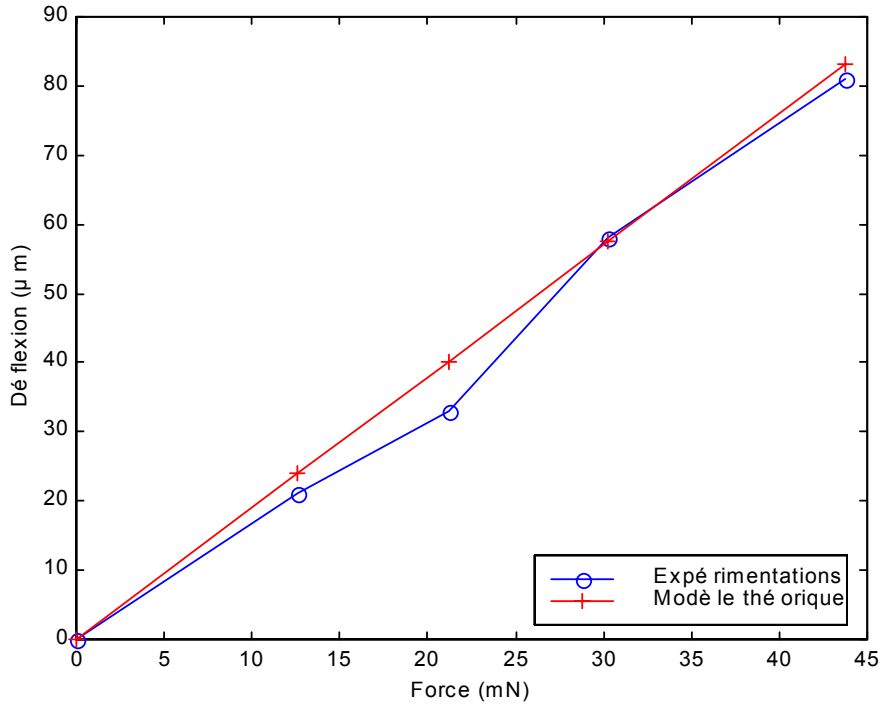


Figure 2.35 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion de l'unimorphe en fonction de la force appliquée à l'extrémité de l'actionneur

Les mêmes expérimentations sont réalisées sur un actionneur bimorphe parallèle. Les résultats sont présentés sur les Figure 2.36 et Figure 2.37.

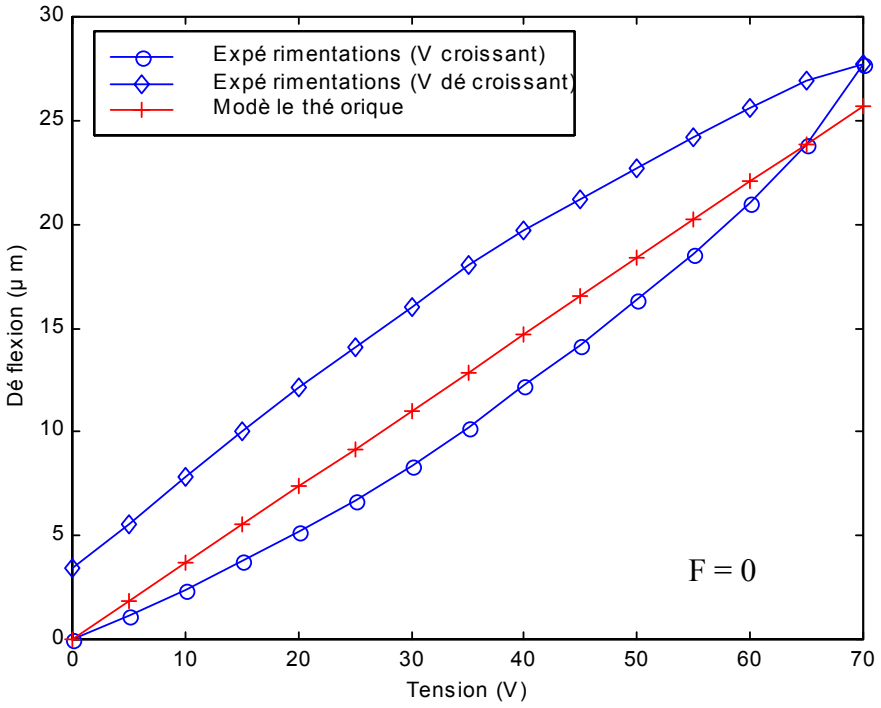


Figure 2.36 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion du bimorphe parallèle en fonction de la tension appliquée

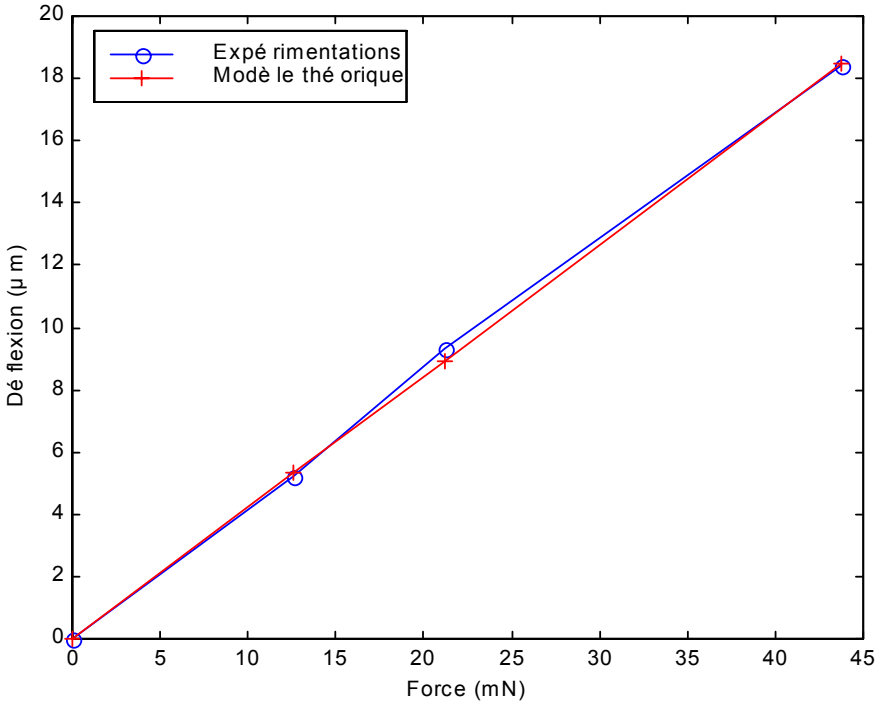


Figure 2.37 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion du bimorphe parallèle en fonction de la force appliquée à l'extrémité de l'actionneur

Enfin, les résultats des expérimentations du bimorphe série sont donnés aux Figure 2.38 et Figure 2.39.

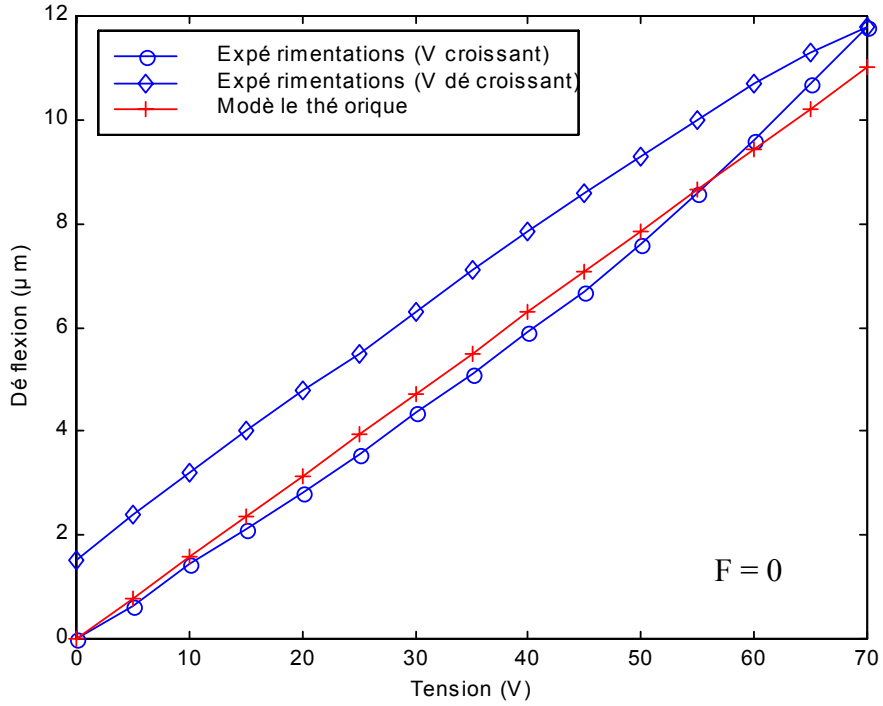


Figure 2.38 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion du bimorphe série en fonction de la tension appliquée

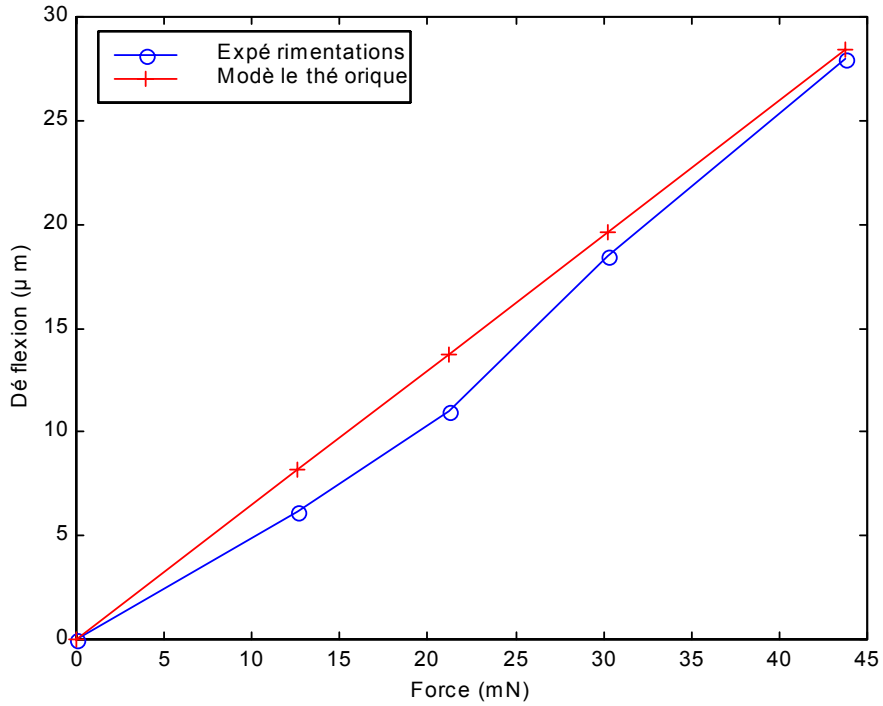


Figure 2.39 : courbes théorique et expérimentale de la déflexion du bimorphe série en fonction de la force appliquée à l'extrémité de l'actionneur

Les courbes de déflexion des actionneurs piézo-électriques font apparaître un net effet d'hystérésis (de l'ordre de 20 %), alors que les modèles décrits précédemment établissent des relations parfaitement linéaires. Cependant, les modèles précédents constituent une approximation tout à fait satisfaisante pour notre étude du comportement des actionneurs piézo-électriques.
D'autre part, les déflexions obtenues avec les actionneurs piézo-électriques sont assez faibles, de l'ordre de quelques dizaines de microns, et une diminution des dimensions de l'actionneur n'est pas favorable à la déflexion. Une comparaison sera faite avec les actionneurs thermiques au paragraphe 6. Ces déflexions nécessitent d'envisager une amplification pour ne pas limiter le déplacement du microrobot à des surfaces parfaitement lisses. Enfin les tensions d'alimentation sont assez élevées, de l'ordre de plusieurs dizaines de volts, ce qui permetait difficilement d'envisager l'autonomie énergétique du microrobot, du fait des dimensions des composants haute tension.

5 Etude et caractérisation des actionneurs thermiques

Parmi les actionneurs présentant des potentialités intéressantes, les actionneurs thermiques sont capables de transformer par expansion thermique une énergie thermique en un travail mécanique. Nous pouvons donc potentiellement utiliser ce principe pour actionner les pattes de notre microrobot.
Les actionneurs que nous avons développés utilisent le principe d'expansion thermique, et sont caractérisés par des mouvements d'amplitude importante à des vitesses faibles. Parmi les différents modes d'actionnement fondés sur les matériaux actifs, l'expansion thermique fait partie de ceux pour lesquels la réduction d'échelle est favorable. En effet, une réduction du volume d'un actionneur à expansion thermique entraîne une diminution de l'énergie nécessaire pour élever sa température, et permet d'augmenter les fréquences de fonctionnement du fait de la diminution du temps de refroidissement, ceci sans diminuer ses performances relatives en ce qui concerne le déplacement et la force développée. Pour les microsystèmes, cette technologie est intéressante, car elle permet à de très petits actionneurs de générer un mouvement et d'exercer des forces importantes. De plus la réalisation des actionneurs thermiques ne nécessite pas d'étape délicate autre que celles couramment utilisées en microfabrication, contrairement aux actionneurs piézo-électriques ou magnétiques qui requièrent des dépôts de matériaux plus délicats à mettre en œuvre. Enfin, leur structure est très simple, et elle permet une grande liberté dans la conception. En contre partie, ces actionneurs ont un rendement assez faible, et leur température de fonctionnement n'est pas toujours compatible avec certaines applications, notamment dans les contacts avec des organismes vivants par exemple.
Les actionneurs thermiques sont peu utilisés à l'échelle macroscopique du fait de leur temps de réponse assez long et de leur consommation énergétique importante. Néanmoins, ces actionneurs peuvent développer des efforts et des déplacements importants.
A l'échelle microscopique, l'intérêt de ces actionneurs grandit. En effet, certaines grandeurs varient plus rapidement que d'autres, et certains paramètres deviennent prépondérants par rapport aux autres. C'est le cas pour les actionneurs thermiques, la réduction d'échelle leur confère des temps de réponse plus faibles, le volume à chauffer étant plus faible, et la convection étant plus importante (des précisions sur la convection seront données au paragraphe 5.1.2 et 5.1.4).
Les actionneurs thermiques décrits ici sont de deux types : bilame thermique et actionneur thermique en U. Ce dernier est un actionneur qui utilise l'expansion thermique pour générer

un déplacement dans le plan, contrairement au bilame plus "classique" qui génère un déplacement perpendiculaire au plan.

5.1 Actionneurs thermiques de type bilame

5.1.1 Principe de fonctionnement et propriétés

Le principe d'un bilame thermique est bien connu. Il s'agit d'une poutre composée de deux matériaux dont les coefficients d'expansion linéaires sont différents. Lorsque l'on chauffe le bilame, l'un des matériaux s'étend plus que l'autre, ce qui produit une déflexion de la poutre comme le montre la Figure 2.40. Cette expansion étant isotropique, la longueur de l'actionneur est choisie suffisamment grande devant la largeur (un rapport 10 par exemple) pour que la flexion ne soit pas contrariée par des déformations latérales.

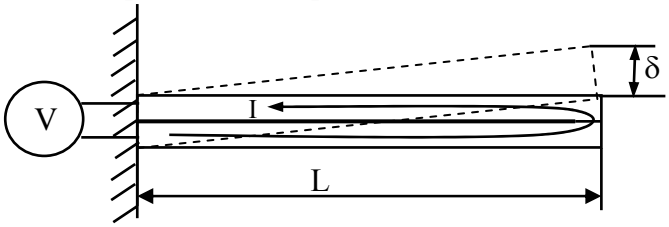


Figure 2.40 : schéma du bilame thermique droit encastré - libre, au repos (en traits continus) et actionné (en traits pointillés)

Deux impératifs guident le choix des constituants :

- la différence de dilatation, qui doit être la plus grande possible pour maximiser la déflexion,
- l'exigence de l'application envisagée (température d'utilisation, effort à développer, résistivité désirée, résistance à la corrosion, etc.).

Etant donné que les caractéristiques physiques des constituants dépendent de la température (coefficient d'expansion thermique, résistance électrique, convection, conduction thermique), la déflexion d'un bilame ne croît pas d'une façon linéaire avec l'augmentation de la température, mais suivant une courbe ayant en général l'allure de celle représentée à la Figure 2. 41.

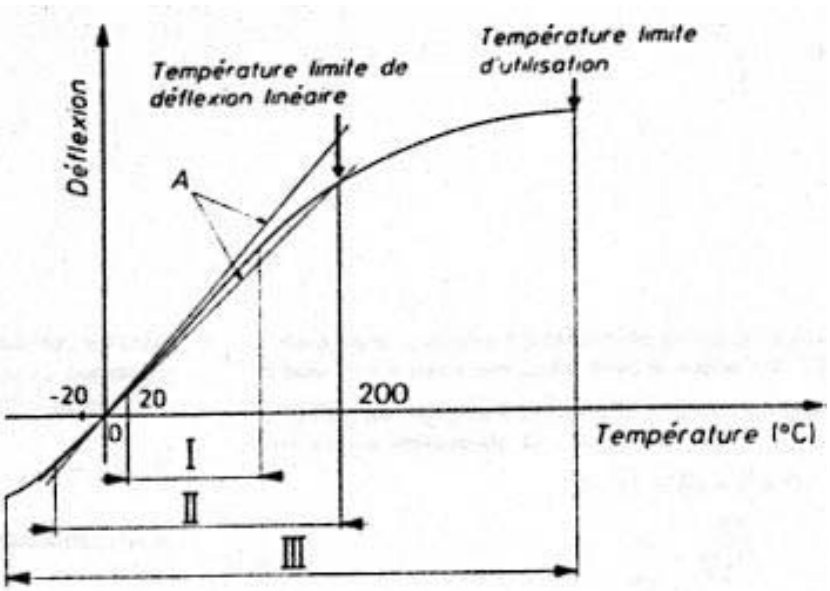


Figure 2. 41 : températures limites de déflexion

Sur cette courbe [47], sont précisés le domaine d'utilisation (III), le domaine de linéarité ou de sensibilité constante (II) et le domaine de mesure de la courbure spécifique (I), qui sera définie au paragraphe 5.1.3.
Il est avantageux, dans de nombreuses utilisations pratiques, que la différence des coefficients de dilatation de deux constituants du bilame (α_1 - α_2) soit constante dans un intervalle de température pour obtenir une sensibilité de bilame constante dans cet intervalle, c'est à dire une déflexion linéaire en fonction de la température. Cette condition peut être remplie dans un certain domaine appelé domaine de linéarité, dont l'étendue dépend de la nature des constituants du bilame. En général, c'est le domaine dans lequel la déflexion ne s'écarte pas de plus de 5 % de la valeur nominale de déflexion spécifique. Ce domaine est délimité par les droites notées A sur la Figure 2. 41. Comme la limite inférieure de ce domaine varie très peu d'un bilame à l'autre, on ne mentionne habituellement que la borne supérieure appelée température limite de déflexion linéaire.
En dehors du domaine de déflexion linéaire, il existe bien des intervalles où la déflexion croit moins vite, mais néanmoins suffisamment pour un bon nombre d'applications. C'est pourquoi le domaine d'utilisation peut être sensiblement plus étendu que le domaine strict de déflexion linéaire.
Enfin, si l'on élève encore la température d'utilisation, on finit par atteindre une température à laquelle la limite d'élasticité de l'un des constituants est dépassée, ce qui provoque une déformation permanente et interdit donc l'emploi ultérieur du bilame. Cette température est appelée température limite d'utilisation. Elle est légèrement inférieure à la plus basse des températures de recristallisation des deux constituants.
Les bilames sont le siège de nombreuses contraintes d'origines diverses : contraintes résiduelles inhérentes à la fabrication, contraintes apparaissant au cours de l'utilisation, et qui peuvent être d'origine thermique ou mécanique. Ces contraintes sont génératrices d'instabilité de la déflexion, et lors des premières utilisations, la déflexion pour une température donnée n'est pas constante. En effet, le chauffage relaxe les contraintes résiduelles, et les écarts de déflexion s'atténuent peu à peu pour finalement disparaître. Pour obtenir un retour rigoureux à la position initiale et la conservation intégrale de la sensibilité, il faut éliminer les contraintes de fabrication par un traitement thermique à température modérée, dépendante des matériaux constituants.

5.1.2 Etude thermique

Les domaines d'application de la thermique sont très variés, ils s'étendent du plus petit phénomène élémentaire au plus vaste ensemble industriel. Les résultats des études et calculs thermiques sont aussi variés et peuvent avoir trait à :

- des calculs d'ordre de grandeur,
- l'évaluation de l'évolution des performances due à une modification technologique,
- la prédiction de l'influence d'un paramètre,
- l'optimisation d'un réglage, d'un matériau, etc.

De tels résultats peuvent être des éléments importants dans la démarche générale de maîtrise des procédés.

Dans le cas du bilame thermique, nous nous intéressons à l'évolution de la température dans l'actionneur. La chaleur dans le bilame est produite par effet Joule. Or, d'une manière générale, lorsque deux points de l'espace sont à des températures différentes, il y a

systématiquement transfert de chaleur selon trois modes illustrés par la Figure 2.42, et décrits ci-dessous.

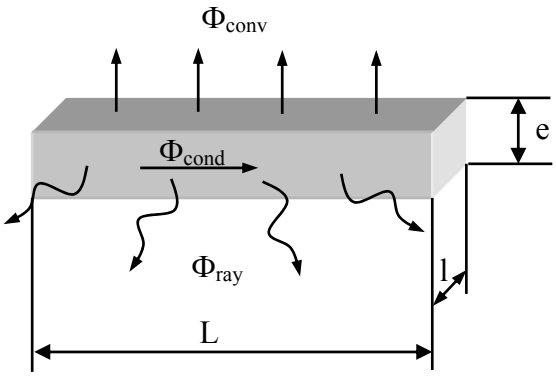


Figure 2.42 : schéma des différents flux de chaleur dans un corps dont les deux extrémités sont à des températures différentes (la convection et le rayonnement ont lieu sur toutes les surfaces du corps)

Les modes de transfert de chaleur sont :

- la conduction,
- la convection,
- le rayonnement.

5.1.2.1 La conduction

Dans un solide ou un liquide immobile, la conduction est l'échange de chaleur entre deux points notés 1 et 2, ayant des températures T_1 et T_2 différentes ($T_1 > T_2$).

Elle correspond à un flux thermique Φ_{cond} de 1 vers 2, qui s'écrit : $\Phi_{cond} = \frac{\lambda.S_{cond}}{e}.(T_1 - T_2)$,

où :

- λ est la conductivité thermique du matériau,
- S_{cond} est la surface de conduction,
- e est la distance entre les deux points.

5.1.2.2 La convection

La convection est l'échange de chaleur entre une surface et un fluide en mouvement.
Elle correspond à un flux thermique Φ_{conv}, qui s'écrit : $\Phi_{conv} = h.S_{conv}.(T_1 - T_2)$, où :

- S_{conv} est la surface de convection,
- h est le coefficient d'échange thermique entre la paroi et le fluide,
- T_1 et T_2 sont respectivement les températures de la surface et celle du fluide (la surface étant plus chaude que le fluide).

5.1.2.3 Le rayonnement

Le rayonnement est l'échange de chaleur entre deux surfaces séparées par un milieu transparent.
Il correspond à un flux thermique Φ_{ray}, qui s'écrit : $\Phi_{ray} = \varepsilon_{12}.\sigma.S_{ray}.(T_1^4 - T_2^4)$, où :

- S_{ray} est la surface de rayonnement,

- ε_{12} est le facteur d'émission,
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann,
- T_1 et T_2 sont les températures des surfaces ($T_1 > T_2$).

Les méthodes utilisées pour l'étude théorique des problèmes de transfert de chaleur peuvent être classées en deux catégories : les méthodes analytiques et les méthodes numériques.
Les méthodes analytiques sont de façon générale restreintes à des problèmes à géométrie et conditions aux limites relativement simples, à moins d'introduire des hypothèses simplificatrices dont le bien fondé est parfois difficile à justifier. En outre, si le problème est non linéaire dans l'équation de la chaleur, ou dans l'une des conditions aux limites, comme par exemple dans le cas où le rayonnement thermique intervient, le problème est difficilement soluble.
Les méthodes numériques permettent d'étudier, de façon certes approchée, la plupart des problèmes thermiques, qu'ils soient stationnaires ou non. Les logiciels de simulation thermique du commerce sont fondés sur la programmation des méthodes numériques telles que celles des éléments finis. Ils sont développés pour étudier les systèmes en englobant à la fois les aspects fluidiques et les aspects thermiques. Le maillage des structures offre la possibilité de choisir la précision de la résolution du problème, mais aussi d'aborder des problèmes à géométrie complexe et permet d'adopter des conditions aux limites variables.
Compte tenu de ces remarques, et puisque le problème thermique du bilame est un problème de composite avec production de chaleur interne par effet Joule en régime établi, difficile à modéliser par les méthodes analytiques, une méthode numérique est préférable pour résoudre les différents problèmes de conduction et de convection posés par notre étude.
La simulation du bilame thermique est effectuée sous Ansys 5.6, un outil de développement utilisant la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet la modélisation de structures, produits, composants ou systèmes et d'étudier leurs réponses à des sollicitations physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de températures ou l'effet de champs électromagnétiques.
Les résultats de la simulation numérique du bilame thermique seront donnés après son dimensionnement au paragraphe 5.1.4.3.

5.1.3 Modèle statique d'un actionneur thermique de type bilame

Ce paragraphe donne le modèle statique d'un bilame thermique, qui nous permettra de prédire ses déplacements, et de les confronter aux expérimentations.
Les déformations et efforts développés peuvent être calculés à partir des paramètres de chaque constituant et de l'élévation de la température comme le montre le modèle établi par Jouanneau [47].

La déflexion d'un bilame encastré-libre est donnée par l'équation suivante :

$$\delta = \frac{\left(V.L^2.\Delta T\right)}{2.e} \qquad (4)$$

- δ est la déflexion du bilame (en m),
- V est la courbure spécifique définie plus loin (en K^{-1}),
- L est la longueur du bilame (en m),
- ΔT est l'élévation de la température, c'est à dire la différence entre la température du matériau et celle du milieu environnant (en K),

- e est l'épaisseur du bilame (en m).

L'effort moteur à l'extrémité d'un bilame est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{\left(V.E.l.e^2.\Delta T\right)}{8.L} \qquad (5)$$

- P est l'effort appliqué en bout du bilame et qui annule la déflexion (en N),
- E est le module d'élasticité moyen des deux constituants (en Pa),
- l est la largeur du bilame (en m).

La courbure spécifique V, ou coefficient de Villarceau, est un coefficient issu de l'étude d'un bilame droit en appui sur deux couteaux [48]. V et est donné par l'équation suivante :

$$V = \frac{2}{3}.\frac{\alpha_2 - a_1}{1 + \frac{\left(E_1.e_1^2 - E_2.e_2^2\right)^2}{4.E_1.e_1.E_2.e_2.e^2}} \qquad (6)$$

- V est la courbure spécifique en (K^{-1}),
- E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité des deux constituants dans l'intervalle de température considéré (en Pa),
- α_1 et α_2 sont les coefficients d'expansion thermique de chaque matériau en (K^{-1}),
- e est l'épaisseur totale du bilame (en m),
- e_1 et e_2 sont les épaisseurs de chacun des matériaux constituant le bilame(en m).

Les indices 1 sont utilisés pour le matériau le moins dilatable, et les indices 2 pour le matériau le plus dilatable.

Si l'on se reporte à cette équation, il apparaît que le coefficient V passe par une valeur maximale si : $E_1.e_1^2 - E_2.e_2^2 = 0$, soit :

$$\frac{e_1}{e_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \qquad (7)$$

Ce rapport permet alors d'optimiser l'épaisseur des matériaux constituant le bilame, pour obtenir des déflexions et des effort générés maximums (à e, E, l, L et ΔT donnés).

5.1.4 Dimensionnement de l'actionneur thermique de type bilame

Le modèle précédent permet de déduire les dimensions optimales pour l'actionneur : les matériaux utilisés, le rapport des épaisseurs.

Dans notre cas, les matériaux doivent être choisis en fonction :
- de leur possible utilisation en microfabrication,
- de leur qualité de conducteur électrique de manière à être chauffés par effet Joule,

- de leur écart de coefficient d'expansion thermique le plus grand possible.

Dans les dimensions macrométriques, les matériaux habituellement utilisés sont :

- pour le moins dilatable : l'invar (alliage fer nickel à 36 % de nickel) : $\alpha = 0{,}5.10^{-6}\ K^{-1}$
- pour le plus dilatable : des alliages tels que fer-nickel-manganèse : $\alpha = 20{,}4.10^{-6}\ K^{-1}$, fer-nickel-chrome : $\alpha = 19{,}4.10^{-6}\ K^{-1}$, manganèse-nickel-cuivre : $\alpha = 28.10^{-6}\ K^{-1}$.

Avec la nécessité d'utiliser les techniques de microfabrications en salle blanche, ces matériaux ne peuvent pas être utilisés. Le premier matériau choisi est le silicium, et le deuxième matériau est l'aluminium. Parmi les matériaux les plus utilisés en microfabrication, l'aluminium est en effet le matériau qui a le plus grand écart de coefficient d'expansion thermique avec le silicium, comme le montre le Tableau 2.1.

Matériau	α ($10^{-6}\ K^{-1}$)	ρ ($\mu\Omega$.cm)	E (Gpa)
Aluminium	23,5	2,67	70
Nickel	13,3	6,9	199
Cuivre	17	1,69	129
Chrome	6,5	13,2	279
Or	14,1	2,2	78
Titane	8,9	54	120
Silicium	6,2	23.10^{10}	113
Argent	19,1	1,63	82,7

Tableau 2.1 : différents matériaux utilisables en microfabrication

Le rapport optimal des épaisseurs pour une force et une déflexion maximales d'après l'équation (7) est obtenu à partir des modules d'Young des matériaux choisis. Dans le cas du silicium et de l'aluminium, les modules d'Young ont les valeurs suivantes :

E_{Al} = 70 GPa et E_{si} = 113 Gpa

Le rapport optimal des épaisseurs est donc :

$$\frac{e_{Al}}{e_{Si}} = \sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{Al}}} \qquad (8)$$

soit :

$$e_{Al} = e_{Si} \cdot \sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{Al}}} \qquad (9)$$

D'où : $\boxed{e_{Al} = 1{,}27.e_{Si}}$ (10)

Pour respecter au mieux ce rapport, nous choisissons dans les éléments commercialisés : un wafer de silicium de 200 µm d'épaisseur et une feuille d'aluminium de 250 µm. En effet, d'après la relation (10), l'épaisseur optimale d'aluminium est alors de 200 x 1,27 = 254 µm.

Enfin, pour ces premiers échantillons de bilames, les dimensions ont été déterminées de manière à être identiques à celles des actionneurs piézo-électriques présentés au paragraphe précédent pour pouvoir être comparés.

Les dimensions choisies pour les actionneurs thermiques sont (Figure 2.43) :

- L = 10 mm,
- l = 1 mm,
- e = 0,5 mm.

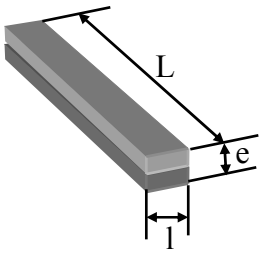


Figure 2.43 : dimensions de l'actionneur thermique de type bilame

Les dimensions du bilame étant définies, l'étude thermique appliquée à celui-ci permet de définir les écarts de température dans sa section.

5.1.4.1 Coefficient de convection du bilame

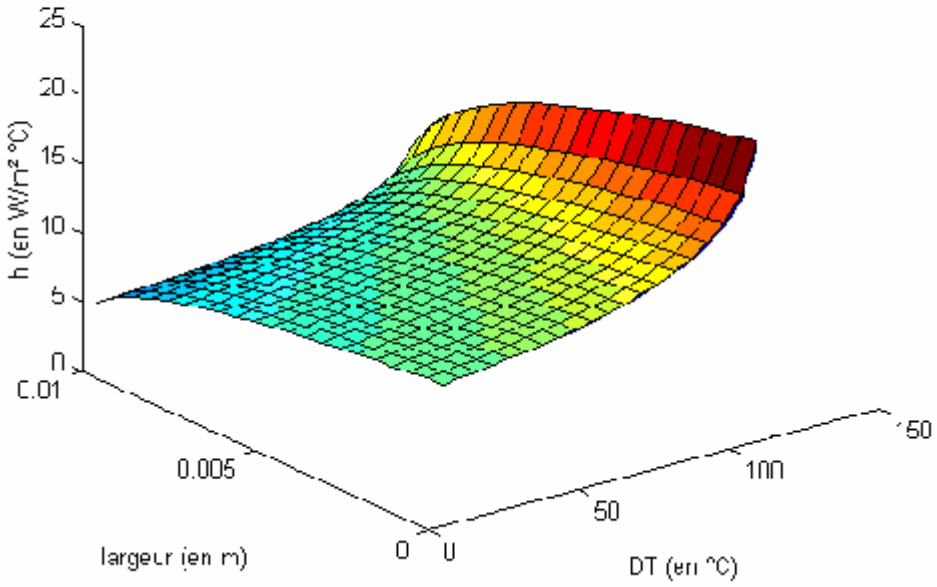


Figure 2.44 : valeur du coefficient de convection en fonction de l'écart de température et de la largeur du bilame

Le coefficient de convection h peut s'écrire [58] :

$$h = 0,99.\left(\frac{\Delta T}{l}\right)^{0,25}$$

Cette relation montre que h est fonction d'une part de l'écart de température ΔT entre le bilame et son environnement, et d'autre part de la largeur du bilame l. Nous pouvons tracer h en fonction de chacun de ces deux paramètres à la Figure 2.44.

5.1.4.2 Calcul des flux de convection et de rayonnement du bilame

Plusieurs modes de transfert de chaleur se produisant à la fois, il ne faut pas en négliger un a priori.
Dans le cas du bilame thermique, la conduction est présente du fait de la génération de chaleur par effet Joule. La convection est présente sous la forme de l'échange de chaleur avec l'air ambiant. Nous allons montrer l'importance du rayonnement qui semble moins intuitif.

Dans l'équation du rayonnement, ε_{12} est le facteur d'émission qui vaut :

- pour un corps gris : $0 < \varepsilon_{12} < 1$,
- pour un corps noir : $\varepsilon_{12} = 1$,
- pour l'aluminium : $\varepsilon_{12} = 0,1$,
- pour le silicium : $\varepsilon_{12} = 0,38$.

σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut : $\sigma = 5,67.10^{-8} W/m^2.K^4$.
Si l'on prend S = 10 mm² ; T_1 = 20 °C et T_2 = 100 °C, on peut calculer pour le silicium : $\Phi_{ray} = 0,38 \times 5,67.10^{-8} \times 10.10^{-6} \times (100^4 - 20^4) = 2,15.10^{-5} W$

Par ailleurs, h vaut :

$$h = 0,99.\left(\frac{\Delta T}{l}\right)^{0,25}$$

Si l'on prend S = 10 mm² pour l = 1 mm ; T_2 = 20 °C et T_1 = 100 °C, on peut calculer : $\Phi_{conv} = 16,7 \times 2 \times 10.10^{-6}(80) = 2,67.10^{-2} W$.

En comparant $\Phi_{ray} = 2,15.10^{-5} W$ et $\Phi_{conv} = 2,67.10^{-2} W$, on constate que le rayonnement est négligeable devant la convection. Les surfaces de convection et de rayonnement étant les mêmes, le fait que le rayonnement soit négligeable devant la convection est encore vrai pour des actionneurs plus petits. Dans la suite, nous négligerons donc le rayonnement.

5.1.4.3 Simulation numérique thermique du bilame

La simulation numérique par la méthode des éléments finis effectuée sous Ansys permet notamment de connaître l'évolution de la température le long du bilame. Ces résultats sont présentés en Figure 2.45, où la température est donnée en kelvin. Le fichier programme écrit pour la modélisation de ce bilame est donné en annexe 2.

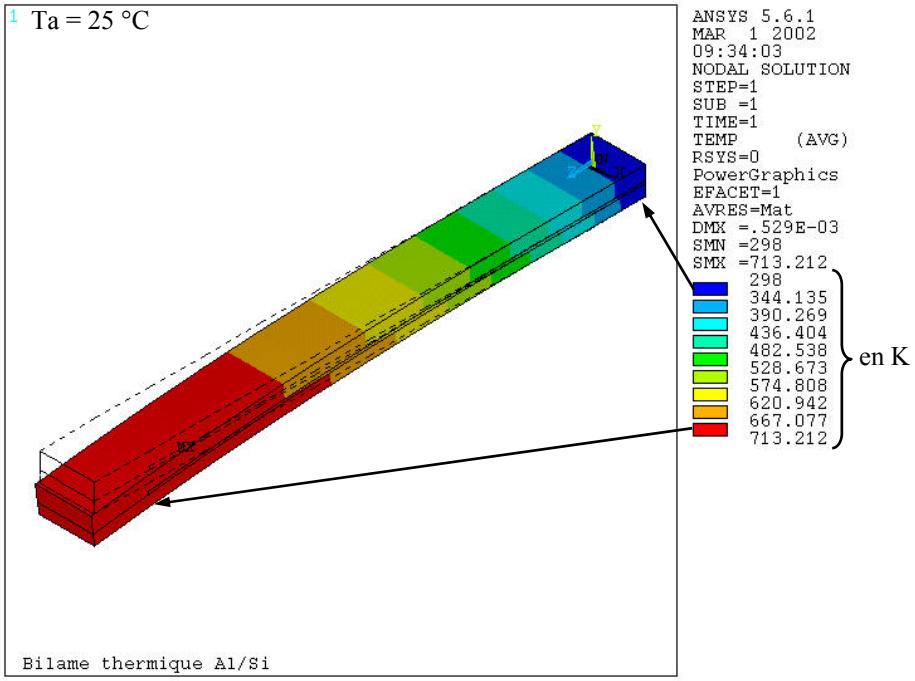


Figure 2.45 : simulation de la température dans le bilame encastré-libre

Cette simulation donne aussi la température des nœuds choisis lors du maillage de l'actionneur. C'est ainsi que l'on peut connaître la température à différents points d'une section du bilame.
La Figure 2.46 repère le numéro des différents nœuds de la section à la moitié de la longueur (L/2).

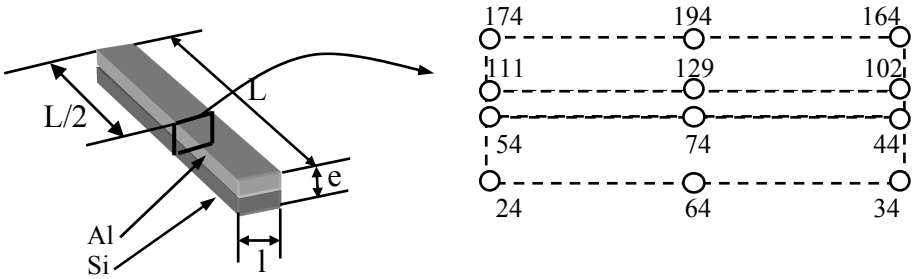


Figure 2.46 : schéma de la section du bilame avec le numéro des nœuds

Le Tableau 2.2 donne la valeur de la température des différents nœuds repérés sur la Figure 2.46.
Ces résultats nous permettent de considérer par la suite que la température dans une section du bilame est homogène dans chaque matériau. La mauvaise conduction thermique de la colle induit un écart de température de 24 °C entre les deux matériaux, qui reste néanmoins faible pour une élévation de température de 344 °C, de l'ordre de 7 %.

numéro du noeud	température (en K)
24	642,81
34	642,81
44	642,28
54	642,28
64	642,83
74	642,31
102	618,82
111	618,82
129	618,83
164	618,50
174	618,50
194	618,51

Tableau 2.2 : correspondance des températures à chaque nœud

5.1.4.4 Détermination de la température dans un matériau d'une section du bilame

L'écart de température entre la surface et le cœur d'un matériau du bilame peut également être évalué par une méthode analytique simple pour évaluer son importance. Le calcul analytique étant complexe comme nous l'avons précisé précédemment, une hypothèse simplificatrice est posée : le matériau est soumis à la convection sur une seule de ses faces. Sur l'autre face, on considère qu'il n'y a aucun transfert de chaleur.

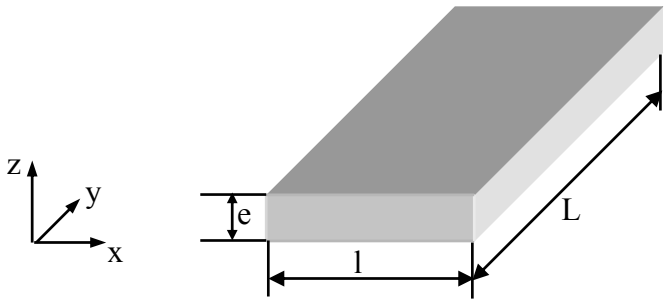


Figure 2.47 : schéma du barreau

En régime permanent constant, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\frac{R.i^2}{V} = \frac{h.S}{V}\left(Te - Ta\right) - \lambda.\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

R est la résistance du barreau,
i est le courant traversant le barreau,
V est le volume du barreau,
h est le coefficient de convection,
S est la section du barreau,
Te est la température de la surface de convection du barreau,
Ta est la température ambiante,

λ est la conductivité thermique du matériau.

On ne considère que $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$; $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ et $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ sont négligeables compte tenu que l'effet Joule est considéré homogène dans les directions x et y.

D'où, si T ne dépend que de z : $R.i^2 \square h.S.(Te-Ta)-\lambda.V.\frac{d^2T}{dz^2}$

En régime permanent, Te et Ta sont constants, d'où :

$$\frac{d^2T}{dz^2}=-\frac{1}{\lambda.V}.\left(R.i^2-h.S.(Te-Ta)\right)=-\alpha$$

$$\frac{dT}{dz}=-\alpha z+T_0 \Rightarrow T(z)=-\frac{1}{2}.\alpha.z^2+T_0.z+T_1$$

Les conditions aux limites sont :

$$T(z=0)=Te=T(z=e)$$

$$d'où : T_1=Te=-\frac{1}{2}.\alpha.e^2+T_0.e+Te$$

$$T_0=\frac{1}{2}.\alpha.e$$

$$T(z)=\frac{1}{2}.\alpha.z.(e-z)+Te$$

La température au cœur du matériau peut donc être calculée :

$$T(z=\frac{e}{2})=Tc=\frac{\alpha.e^2}{8}+Te$$

L'écart de température dans la section est :

$$Tc-Te=\frac{e^2}{8.\lambda.V}.\left[R.i^2-h.S.(Te-Ta)\right]$$

$$Tc-Te=\Delta T=\frac{R.i^2.e^2}{8.\lambda.V}-\underbrace{\frac{e^2.h.S}{8.\lambda.V}.(Te-Ta)}_{>0}$$

ΔT est donc majoré par : $\frac{R.i^2.e^2}{8.\lambda.V}$

$$V=e.l.L \Rightarrow \Delta T \leq \frac{R.i^2.e}{8.\lambda.l.L}$$

Les dimensions et grandeurs physiques du silicium sont :

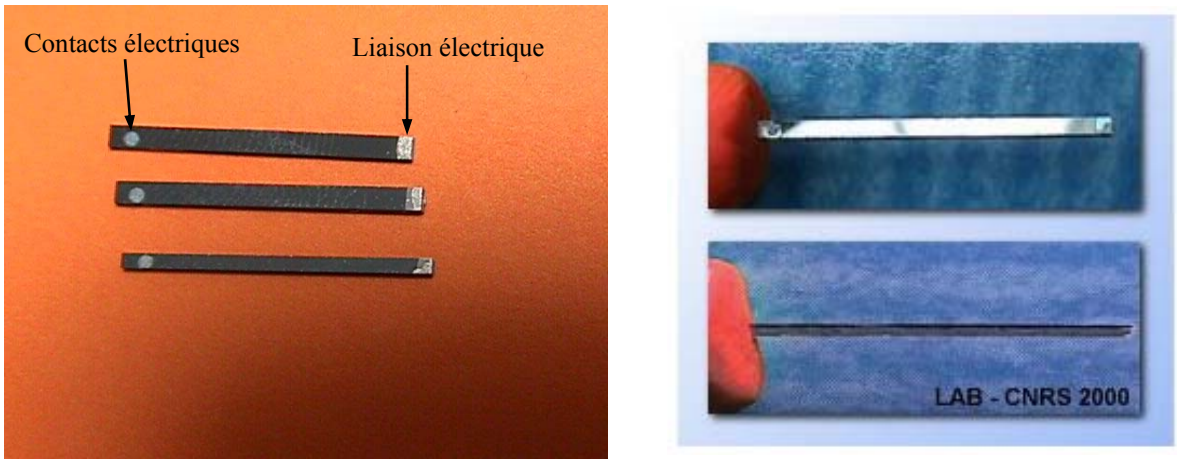
$R = 1000\ \Omega$
$i = 100$ mA
$e = 200.10^{-6}$ m
$l = 1.10^{-3}$ m
$L = 10.10^{-3}$ m
$\lambda = 115$ ° W/m.K

d'où : $\Delta T \leq 0{,}22$ °C

L'écart de température entre la surface et le cœur du silicium est donc au maximum de 0,22 °C, pour une élévation de température du bilame de près de 400 °C par rapport à la température ambiante. Cet écart de température est donc négligeable. L'hypothèse qu'il n'y a pas de flux thermique (ici la conduction) sur une des faces du matériau engendre l'écart entre le résultat analytique (0,22) et le résultat de simulation numérique (0,52).

5.1.5 Réalisation des bilames thermiques

Nous avons fabriqué les actionneurs thermiques à l'Institut des Microtechniques de Mayence (IMM) dans le cadre d'un contrat européen Training and Mobility of Researchers (TMR), access to Large Scale Facilities : Contrat N° ERB FM GE CT-98 0138 de décembre 1998 à mars 2000.
Leur réalisation est très proche de celle des actionneurs piézo-électriques. Un wafer de silicium de 200 µm d'épaisseur a été collé à l'aide d'une colle isolante du type mélange époxy/durcisseur sur une feuille d'aluminium de 250 µm d'épaisseur. Le tout a été découpé aux dimensions voulues à l'aide d'une scie à wafer.
Pour l'expérimentation, les contacts électriques ont été réalisés sur le silicium, par dépôt d'aluminium par pulvérisation d'un côté de l'actionneur (Figure 2.48 (a)), et la liaison électrique entre les deux matériaux a été effectuée à l'aide d'une colle conductrice.



(a) (b)

Figure 2.48 : photos des actionneurs bilames réalisés à l'IMM

5.1.6 Expérimentation des bilames thermiques

Pour son expérimentation, l'actionneur est commandé en tension. La déflexion de l'actionneur est mesurée à vide par un capteur laser. La Figure 2. 49 montre le schéma de l'expérimentation.

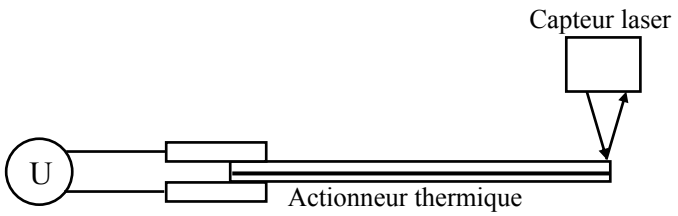


Figure 2. 49 : schéma de l'expérimentation des actionneurs thermiques

La Figure 2.50 présente sur le même graphique :

- la déflexion théorique (équation (4) au paragraphe 5.1.3),
- la déflexion déterminée par simulation numérique,
- la déflexion expérimentale du bilame,

en fonction de la tension appliquée.

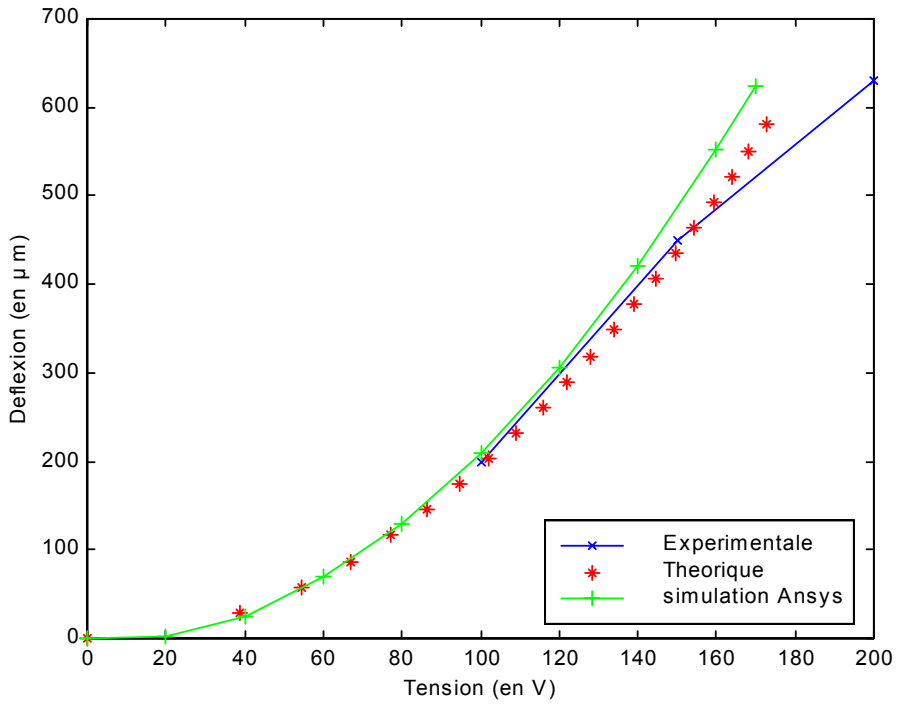


Figure 2.50 : déflexion théorique et expérimentale du bilame en fonction de la tension appliquée

La Figure 2.50 montre que le modèle statique établi au paragraphe 5.1.3 est correct pour de faibles tensions d'alimentation, et plus la tension est élevée, plus les courbes s'écartent. Ceci s'explique par :

- la résistivité du silicium qui varie avec la température de manière non négligeable ;
- la colle qui n'est pas prise en compte dans le modèle et qui se détériore avec la température ;

- le capteur laser qui mesure la déflexion par réflexion d'un rayon. Lorsque la déflexion est importante, le rayon laser peut être incomplètement réfléchi, et la mesure s'en trouve moins précise.

Une simulation numérique nous permet de retrouver les déflexions de l'actionneur thermique bilame comme l'indique la Figure 2.51, pour une élévation de température donnée.

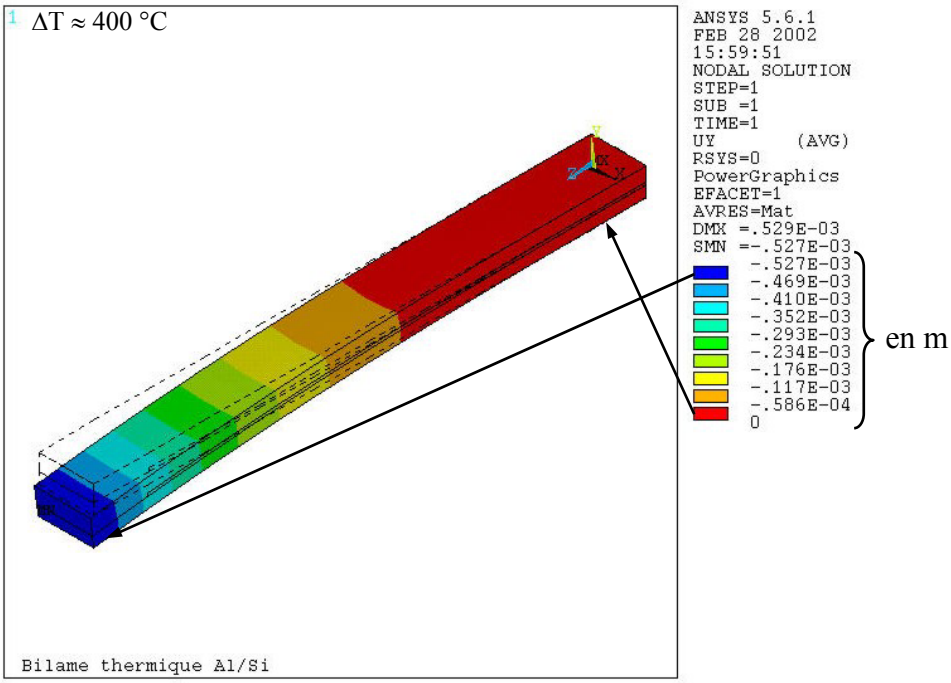


Figure 2.51 : simulation de la déflexion de l'actionneur bilame thermique suivant y (axe normal à la surface du bilame)

Par ailleurs, rappelons que la relation entre une force extérieur exercé à l'extrémité de la poutre normalement à sa surface et la déflexion (Figure 2.52) qui en résulte est :

$$\delta = \frac{F.L^3}{3.E.I} \qquad \text{avec : } I = \frac{l.e^3}{12} \qquad (11)$$

- E est le module d'Young de la poutre,
- I est le moment d'inertie de la poutre,
- L, l et e sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de la poutre.

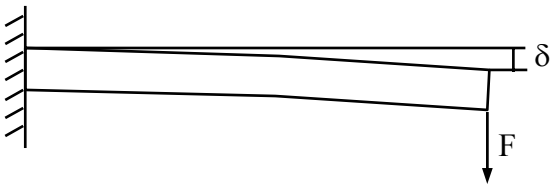


Figure 2.52 : schéma de la déflexion du bilame sous l'action d'une force extérieure

Cette force F est aussi appelée force de blocage lorsqu'elle est maximum, c'est à dire pour la déflexion maximale. Dans ce cas, elle annule la déflexion de la poutre.

La courbe présentée en Figure 2.53 donne la déflexion du bilame lorsqu'il est alimenté, en fonction de l'effort extérieur exercé à l'extrémité de la poutre normalement à sa surface, et s'opposant au déplacement de celle-ci, déterminé par l'équation (11) ci-dessus.

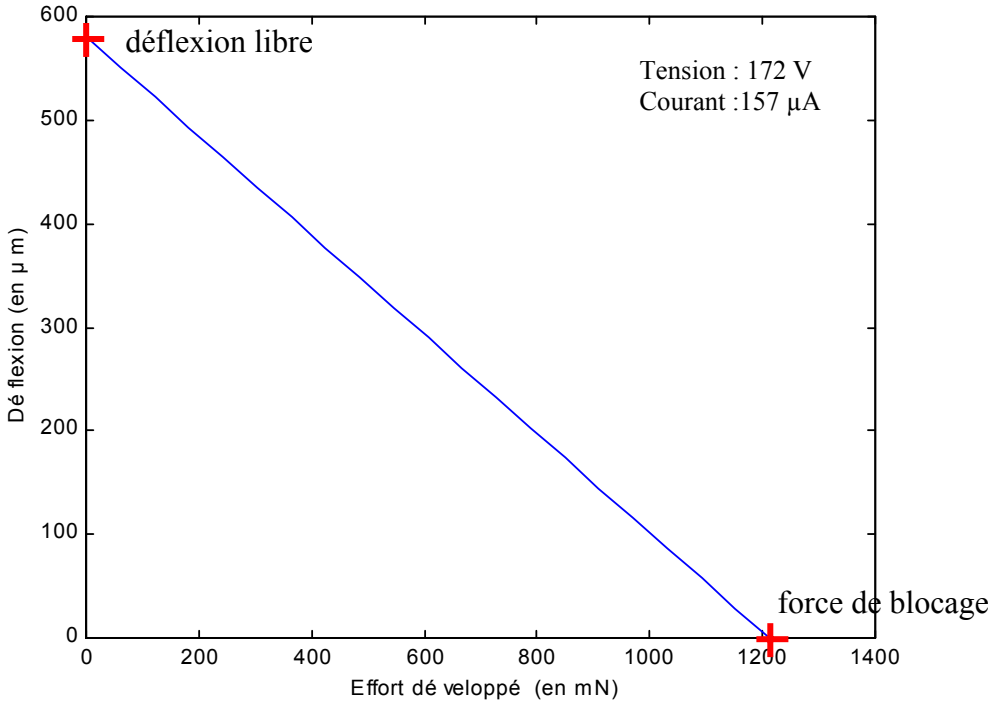


Figure 2.53 : déflexion du bilame en fonction de la force appliquée à l'extrémité du bilame

Sur la Figure 2.53 est indiquée la déflexion libre (environ 570 µm) et la force de blocage (environ 1,2 N).

5.1.7 Conclusion

Les déflexions obtenues avec le bilame thermique sont cinquante fois plus importantes qu'avec les actionneurs piézo-électriques, de l'ordre de plusieurs centaines de microns. Ces déflexions permettent d'envisager la mise en mouvement des pattes du microrobot, et qui peut ainsi se déplacer sur des surface rugueuses (dont le degré de rugosité sera défini par la trajectoire de déplacement du pied). Enfin les tensions d'alimentation sont assez élevées, de l'ordre de plusieurs dizaines de volts, avec des courants de plusieurs dizaines de milli-ampères, qui permettent difficilement d'envisager l'autonomie énergétique du microrobot. Toutefois, la réduction d'échelle induit une diminution de l'énergie nécessaire à l'élévation de température, due à une diminution du volume, qui minimise cet inconvénient.

5.2 Les actionneurs thermique en U

5.2.1 Principe de fonctionnement et propriétés

Outre les bilames thermiques à mouvement hors plan, nous avons également envisagé d'autres micro-actionneurs, fondés sur la dilatation thermique. Ces micro-actionneurs ne fonctionnent pas comme les précédents, sur la différence de dilatation thermique entre deux matériaux différents, mais sur un différentiel de dilatation d'un même matériau à gradient de température.

Le principe est illustré sur la Figure 2. 54. Une découpe appropriée dans un matériau conducteur ou semi-conducteur permet de disposer de deux branches parcourues par un même courant électrique. Du fait de leur géométrie, ces deux branches ont des résistances électriques

différentes, d'où un échauffement différent, provoquant ainsi un différentiel de dilatation et donc une déflexion.
L'actionneur thermique en U permet d'effectuer des mouvements plans, contrairement au bilame "classique" qui effectue ses déplacements hors plan. Les géométries de ces types d'actionneurs sont assez variées [49] et [53] à [56], comme le présente la Figure 2. 54.

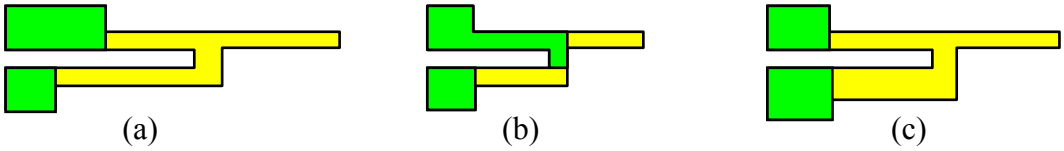


Figure 2. 54 : différentes géométries pour l'actionneur thermique en U : (a) longueur des bras différente ; (b) matériau différent déposé sur un des bras ; (c) section des bras différente.

5.2.2 Etude thermique

Compte tenu des remarques faites pour les études thermiques au paragraphe 5.1.2, et puisque en posant comme hypothèse qu'il n'y a pas de conduction thermique entre le bras chaud et le bras froid, le problème thermique de l'actionneur en U est un cas plus simple à modéliser que le bilame, par les méthodes analytiques, nous pouvons modéliser ce cas par les deux méthodes, analytique et numérique.

5.2.2.1 Modélisation thermique analytique

L'équation de la chaleur en régime permanent s'écrit :

conduction + effet Joule + pertes par convection = 0

Pour la modélisation analytique de cet actionneur, sans retomber dans le cas complexe du composite avec production de chaleur interne, nous devons faire l'hypothèse que le bras froid reste froid, c'est à dire à température ambiante, et que seule la température dans le bras chaud varie. Cette hypothèse sera justifiée avec les équations (22) et (23) données plus loin. Ce problème peut être schématisé comme le montre la Figure 2.55, en considérant que la distance entre les deux bras est suffisamment importante pour qu'il n'y ait pas d'influence de la température de l'un sur l'autre, à travers la zone d'air les séparant.

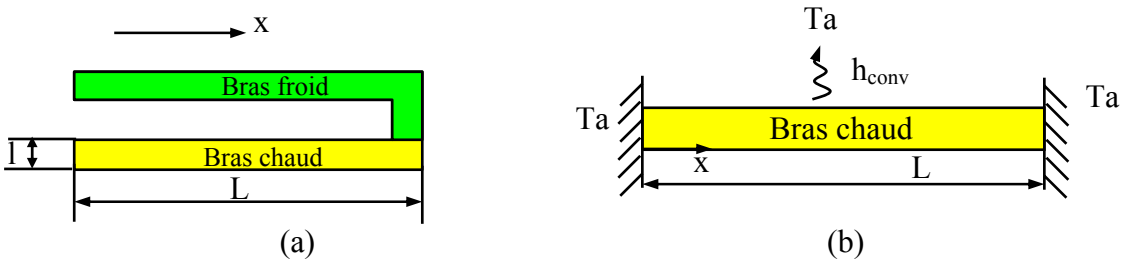


Figure 2.55 : (a) schéma de l'actionneur (b) schéma équivalent pour la modélisation thermique

On ne considère que $\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2}$; $\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2}$ et $\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2}$ sont négligeables compte tenu que l'effet Joule est considéré homogène dans les directions y et z.

La chaleur absorbée est nulle en régime permanent. On peut alors écrire :

$$\underbrace{\lambda.\frac{d^2\Delta T}{dx^2}}_{conduction}+\underbrace{\rho.\frac{I^2}{S^2}}_{effet\ Joule}-\underbrace{\frac{2.h.l}{S}.(\Delta T)}_{convection}=0 \qquad (12)$$

$\Delta T = T-T_A$: différence de température entre le bras (T) et la température ambiante (T_A),
λ : coefficient de conduction du matériau,
ρ : résistivité du matériau,
I : courant parcourant l'actionneur,
S : section de l'actionneur,
h : coefficient de convection,
l : largeur de l'actionneur.

On a une équation différentielle du type :

$$T''-a.T+b=0$$

Avec : $a=\frac{2.h.l}{\lambda.S}$ et $b=\frac{\rho.I^2}{\lambda.S^2}+\frac{2.h.l}{\lambda.S}.Ta$

La solution est : $T(x)=C1.e^{r_1x}+C2.e^{-r_1x}+\frac{b}{a}$

avec : $r_1=\pm\sqrt{a}$

C1 et C2 étant déterminés par les conditions aux limites qui sont : $\Delta T(0)=0$ et $\Delta T(L)=0$.

$$T(x)=\left[\frac{b}{a}+\left(\frac{a.Ta-b}{a.\left(e^{-L.\sqrt{a}}+1\right)}\right).\left(e^{-L.\sqrt{a}}.e^{\sqrt{a}.x}+e^{\left(-\sqrt{a}.x\right)}\right)\right] \qquad (13)$$

5.2.2.2 Détermination de la température le long du bras chaud de l'actionneur en U

L'équation (13) permet de calculer l'élévation de température ΔT dans le bras chaud de l'actionneur en fonction de la position x. $\Delta T(x)$ est présenté en Figure 2.56.
L'élévation de température est faible, de l'ordre de 8 °C. Ceci est dû à l'hypothèse qui impose le bras froid à température ambiante, et donc les deux extrémités du bras chaud à température ambiante aussi.

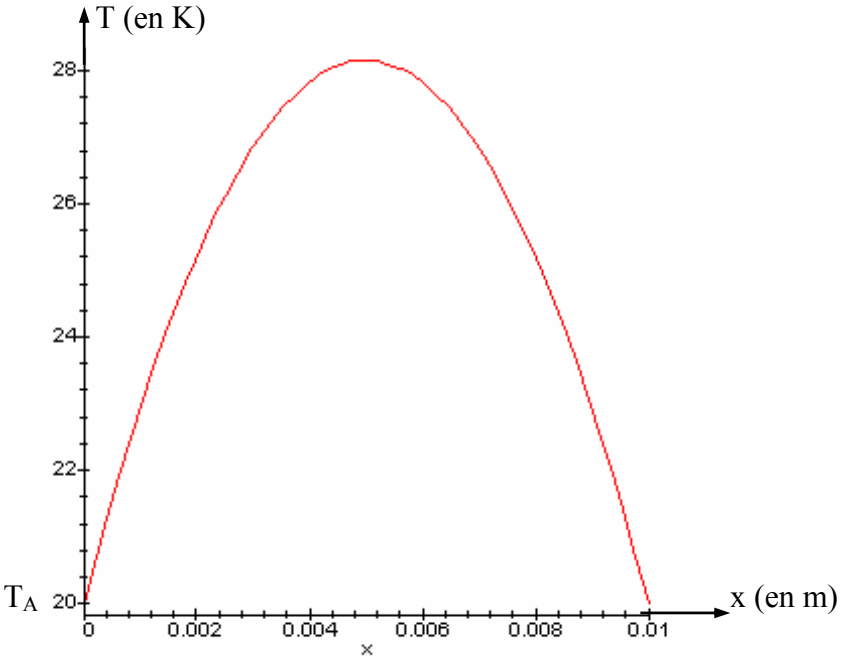


Figure 2.56 : valeur de la température le long de l'actionneur en U

5.2.2.3 Modélisation thermique numérique de l'actionneur en U

Le fichier programme de cette modélisation est donné à l'annexe 3.
La Figure 2.57 montre l'évolution de la température le long de l'actionneur, et montre que la température dans une section de l'actionneur peut être considérée comme homogène.

Le résultat de la méthode analytique donne une élévation de la température d'environ 28 °C dans le bras chaud, avec l'hypothèse du bras froid sans élévation de température. Le résultat de la méthode numérique donne une élévation de température d'environ 20 °C dans le bras chaud, avec une élévation de température d'environ 8 °C dans le bras froid. Il est clair que l'hypothèse du bras froid sans élévation de température revient à supposer la conduction thermique du bras chaud vers le bras froid nulle, ce qui n'est pas le cas.

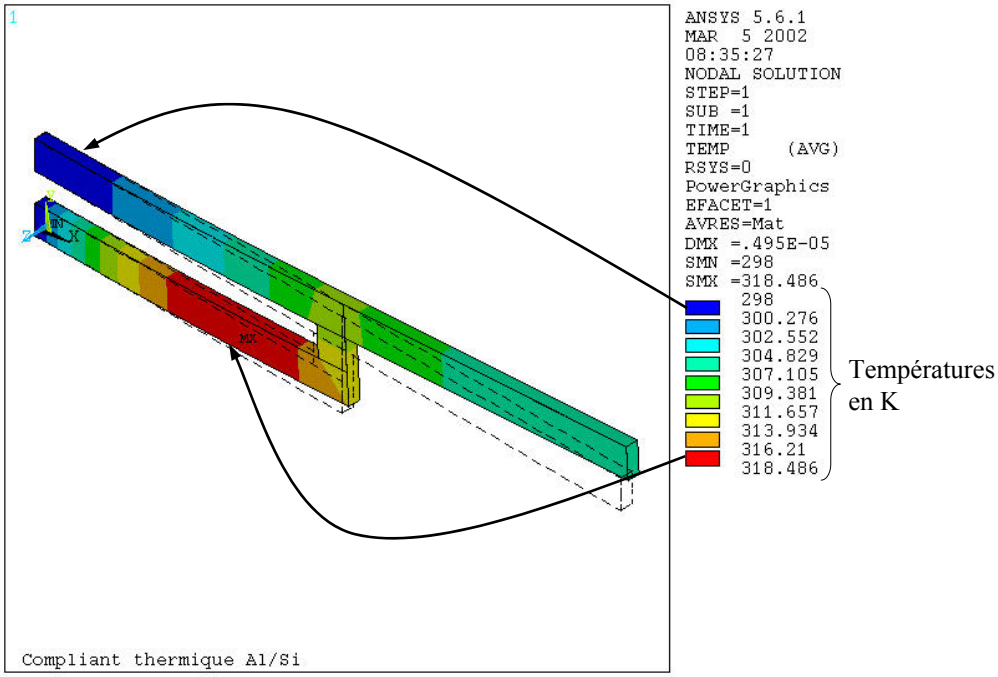


Figure 2.57 : simulation de la température dans l'actionneur

5.2.3 Modèle statique de l'actionneur thermique en U

Ce paragraphe donne le modèle statique des actionneurs, qui nous permettra de prédire leurs déplacements, et de les confirmer par des expérimentations.

Considérons l'actionneur que nous avons développé, en silicium avec de l'aluminium déposé sur l'un des deux bras, comme le montre la Figure 2.58 (a). La Figure 2.58 (b) montre ce même actionneur alimenté, avec les bras repérés 1 et 2.

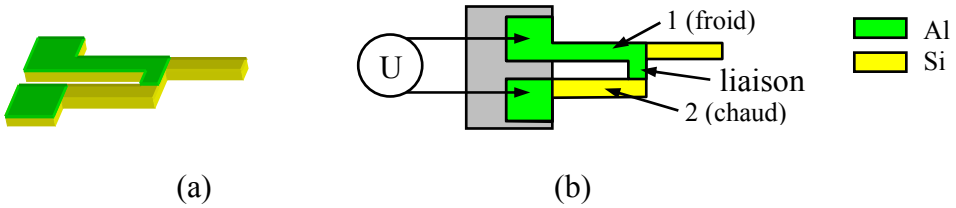


Figure 2.58 : schéma de l'actionneur : (a) schéma 3D, (b) schéma de l'actionneur alimenté

Cet actionneur est constitué : du bras 2 en silicium, du bras 1 et de la liaison en silicium recouvert d'une fine couche d'aluminium. Lorsque l'on alimente l'actionneur, le courant traverse le bras 1 et la liaison par l'aluminium, et revient par le bras 2 par le silicium. La résistance de l'aluminium étant négligeable devant celle du silicium, le bras 1 ne s'échauffe donc pas par effet Joule. Dans la pratique, il chauffe par conduction thermique dans le matériau, comme le montre la simulation de la Figure 2.57.

La résistance de chacun des bras peut s'écrire :

$$R_1 = \rho_{Al} . \frac{L_1}{S_1} \qquad (14) \qquad \text{avec : } S_1 = l_1 . e_{Al}$$

$$R_2 = \rho_{Si}.\frac{L_2}{S_2} \qquad (15) \qquad \text{avec : } S_2 = l_2.e_{Si}$$

$$R_3 = \rho_{Al}.\frac{L_3}{S_3} \qquad (16) \qquad \text{avec : } S_3 = l_3.e_{Al}$$

La résistance totale est alors :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \qquad (17)$$

Dans les équations (14), (15) et (16), les indices 1 et 2 repèrent le bras de l'actionneur auxquels ils se réfèrent (Figure 2.58). R_1 représente la résistance électrique du bras 1, R_2 la résistance électrique du bras 2, R_3 la résistance électrique de la liaison (qui est négligeable devant R_1 et R_2) et R la résistance totale traversée par le courant I. ρ_{Al} et ρ_{Si} sont respectivement la résistivité de l'aluminium et du silicium. Les sections des bras sont notées S_1, S_2 et S_3. l_1, l_2 et l_3 sont les largeurs respectivement des bras 1, 2 et de la liaison, et e_{Al} et e_{Si} sont les épaisseurs des couches d'aluminium et de silicium.
De même les surfaces de convection de chacun des bras peuvent s'écrire :

$$A_1 \approx 2.L_1.l_1 \qquad (18)$$

$$A_2 \approx 2.L_2.l_1 \qquad (19)$$

Le courant s'exprime par :

$$I = \sqrt{\frac{A_1.h.\Delta T_1}{R_1}} \qquad (20) \qquad \text{avec : } h = 0,99.\left(\frac{\Delta T}{l}\right)^{0,25}$$

Et la tension par :

$$U = R.I \qquad (21)$$

Les écarts de température sont exprimés par :

$$\Delta T_2 = T - T_A \qquad (22)$$

$$\Delta T_1 = \frac{I^2.R_1}{A_1.h} \qquad (23)$$

L'allongement de chaque bras est alors :

$$\Delta L_1 = L.\alpha_{Al}.\Delta T_1 \qquad (24)$$

$$\Delta L_2 = L.a_{Si}.\Delta T_2 \qquad (25)$$

La Figure 2.59 donne le repérage des différents paramètres utilisés pour la détermination de la déflexion δ de l'actionneur thermique en U [57] :

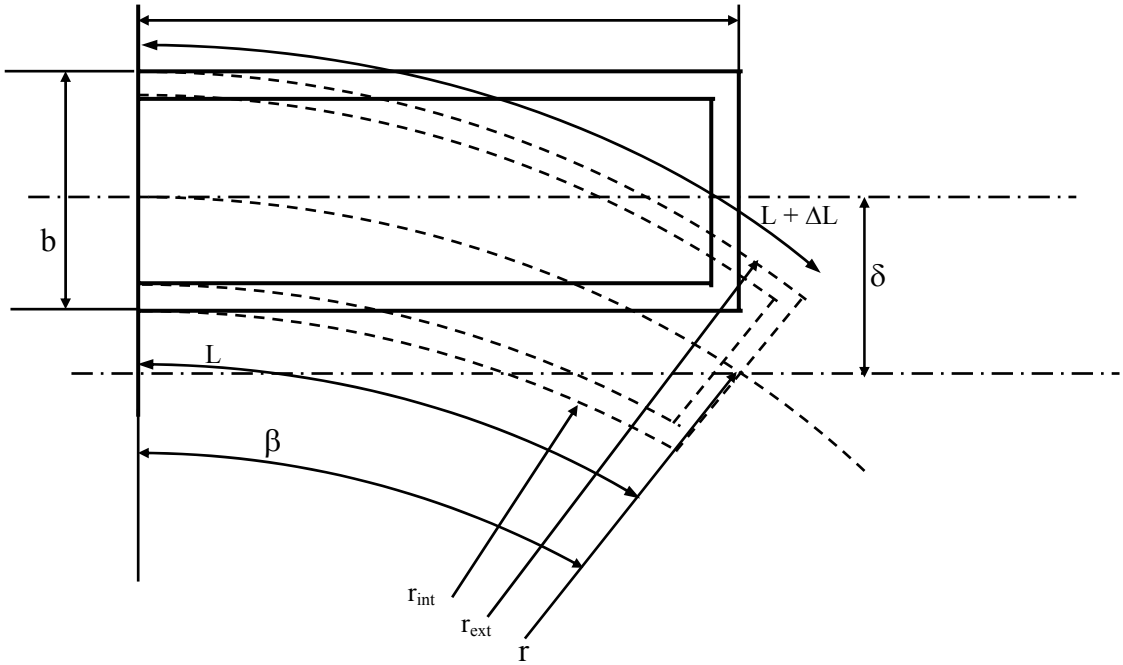


Figure 2.59 : schéma pour le calcul de la déflexion de l'actionneur en U

$$\left.\begin{array}{l} L+\Delta L=\beta.r_{ext} \\ L=\beta.r_{\text{int}} \end{array}\right\} \Rightarrow \Delta L=\beta.b \qquad \text{d'où : } \beta=\frac{\Delta L}{b}$$

$$r=\frac{r_{ext}+r_{\text{int}}}{2}=\frac{(L+\Delta L)+L}{\frac{2.\Delta L}{b}}=b.\left(\frac{L}{\Delta L}+\frac{1}{2}\right)$$

Or : $\Delta L=\alpha.L.\Delta T \Rightarrow \frac{L}{\Delta L}=\frac{1}{\alpha.\Delta T} \square \frac{1}{2} \Rightarrow r \approx \frac{b}{\alpha.\Delta T}$

$$\delta=r-r.\cos\beta=r.(1-\cos\beta)$$

Pour β petit, on peut écrire :

$$\cos\beta=1-\frac{\beta^2}{2}=1-\frac{\Delta L^2}{2.b^2}$$

$$\delta=r.\left(\frac{\Delta L^2}{2.b^2}\right)=\frac{b}{\alpha.\Delta T}.\left(\frac{\alpha^2.L^2.\Delta T^2}{2.b^2}\right)$$

d'où : $\boxed{\delta=\frac{\alpha.L^2.\Delta T}{2.b}}$ (26)

5.2.4 Dimensionnement des actionneurs thermiques en U

Les dimensions des actionneurs réalisés sont choisies du même ordre de grandeur que celles des actionneurs bilames précédents, pour obtenir à une même échelle un ordre de grandeur des déplacements. Le schéma de l'actionneur ainsi que ses dimensions sont données à la Figure 2.60.

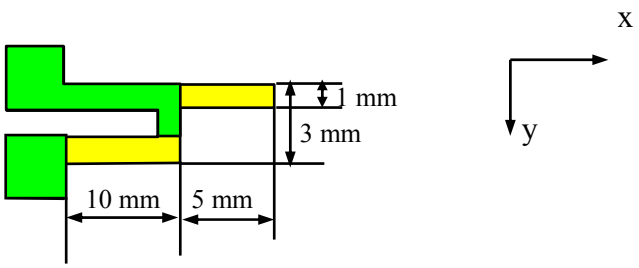


Figure 2.60 : schéma et dimensions de l'actionneur en U

Détermination des allongements dans l'actionneur en U

Avec les équations (14) à (25), on peut calculer l'élévation de température dans le bras froid, en prenant les dimensions de notre actionneur : L = 10 mm, l = 1 mm, h = 12, R_{Al} = 0,13 Ω, et I = 30 mA.

Ces valeurs nous donnent :

ΔT_2 = 20 °C : élévation de température dans le bras chaud,
ΔT_1 = 0,5 °C : élévation de température dans le bras froid,
$\Delta L_1 = 0{,}12.10^{-6}$ m : allongement du bras froid,
$\Delta L_2 = 1{,}2.10^{-6}$ m : allongement du bras chaud.

Enfin, l'équation (26) permet de tracer la déflexion de l'actionneur en fonction de l'élévation de la température pour les dimensions de l'actionneur données précédemment, comme le montre la Figure 2.61.

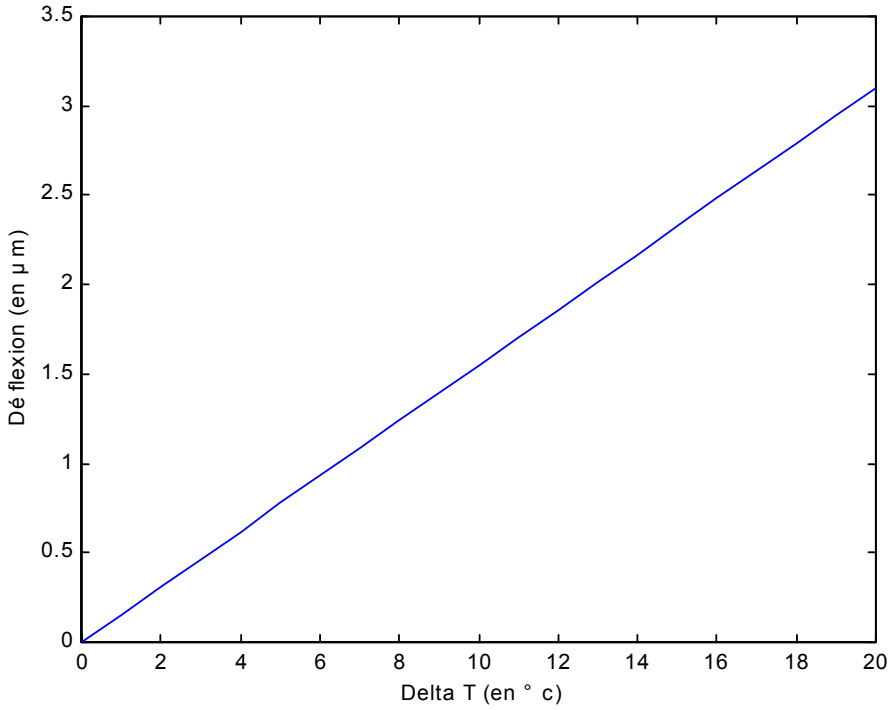


Figure 2.61 : déflexion de l'actionneur en U en fonction de la température

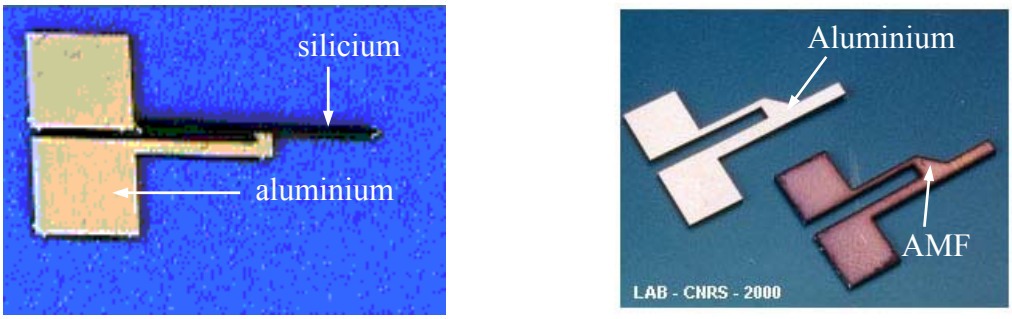
Cette figure montre que l'allongement est faible, d'autant que l'écart de température entre le bras chaud et le bras froid a été défini plus haut (Figure 2.56) à 8 °C.

5.2.5 Réalisation des actionneurs thermiques en U

Nous avons réalisé les actionneurs thermiques en U à l'Institut des Microtechniques de Mayence (IMM).

Nous avons exploré deux voies pour la réalisation de ces actionneurs. Une première est celle des microfabrications en salle blanche. Un exemple est présenté en Figure 2.62 (a). La seconde est la découpe laser pour réaliser des actionneurs à deux bras de section différente dans un même matériau comme le montre la Figure 2.62 (b). Ces derniers ont été exploités dans le cadre d'un projet concernant l'éducation des AMF.

Le procédé de fabrication des actionneurs en U réalisés par microfabrication sera précisément décrit au chapitre 4. Il consiste, à partir d'un wafer de silicium oxydé, à ouvrir des contacts électriques dans l'oxyde. L'aluminium est déposé par évaporation puis gravé après photolithographie. Enfin une RIE profonde permet de libérer les structures.



(a) (b)

Figure 2.62 : photos d'actionneurs en U réalisés à l'IMM (a) par microfabrication, (b) par découpe laser

5.2.6 Expérimentation des actionneurs thermiques en U

L'expérimentation des actionneurs en U a été réalisée sous microscope optique. Les déplacements ont été mesurés par le biais d'une camera vidéo, qui ne nous permet pas de mesurer des déplacements inférieurs à 0,5 µm. Ceci entraîne une évolution des mesures par paliers de 0,5 µm. Cette mesure est moins précise qu'avec le capteur laser précédemment utilisé pour l'expérimentation des bilames, qui a une résolution de 10 nanomètres, mais les déformations ayant lieu dans les trois directions, le faisceau laser n'est que partiellement réfléchi, et son utilisation aurait donné des résultats erronés.

Les résultats d'expérimentation de l'actionneur en U précédemment dimensionné permet de relever :

- le déplacement de l'extrémité de l'actionneur suivant l'axe x,
- le déplacement de l'extrémité de l'actionneur suivant l'axe y (axes donnés en Figure 2.60),

U(V)	I(mA)	Déplacement y (en µm)	Déplacement x (en µm)
4	30,7	0,5	0
5	37,2	1	0
6	41,5	1	0
7	44,5	1	0
8	48,1	1,5	0,5
9	51,6	1,5	0,5
10	54,1	1,5	0,5
11	56,2	2	0,5
12	59	2	0,5
13	59,8	2	0,5
14	61,6	2	1
15	64,9	2,5	1
16	68,1	2,5	1
17	68,2	3	1
18	69	3,5	1
19	69,4	4	1
20	71,4	4	1,5

Tableau 2.3 : résultats des expérimentations de l'actionneur en U

Les résultats donnés dans le Tableau 2.3 montrent que la déflexion reste très faible et varie peu lorsque l'on augmente la puissance électrique d'alimentation. Ceci est dû au fait que la température augmente dans les deux bras par conduction thermique, et l'écart de température reste constant.

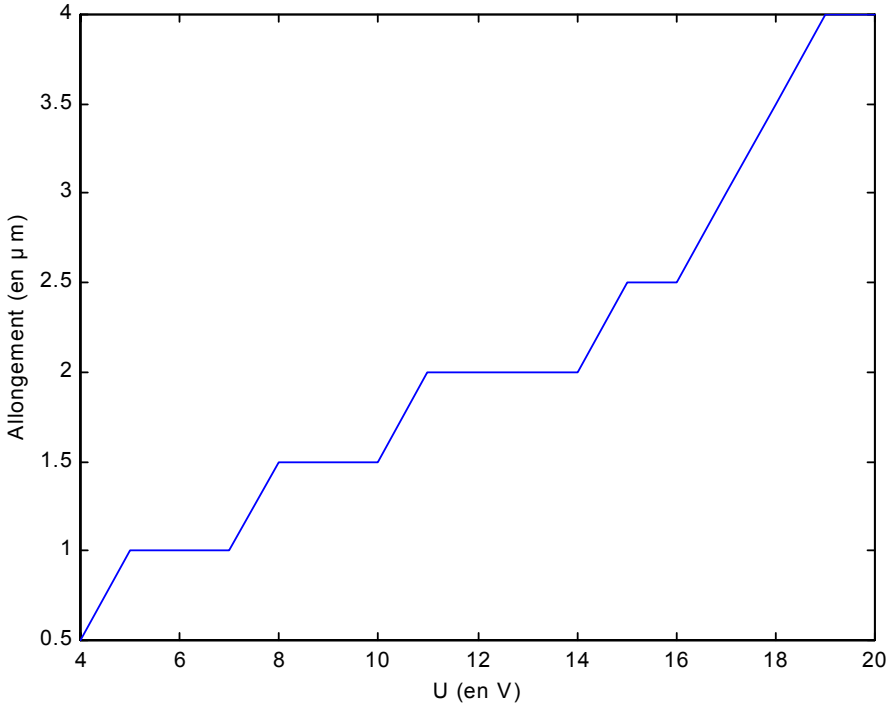


Figure 2.63 : allongement expérimental de l'actionneur suivant x

Les résultats des expérimentations nous permettent de tracer les courbes présentées en Figure 2.63 et Figure 2.64 des déplacements en x et en y de l'extrémité de l'actionneur en fonction de la tension appliquée (voir Figure 2.60 pour la définition des axes x et y).

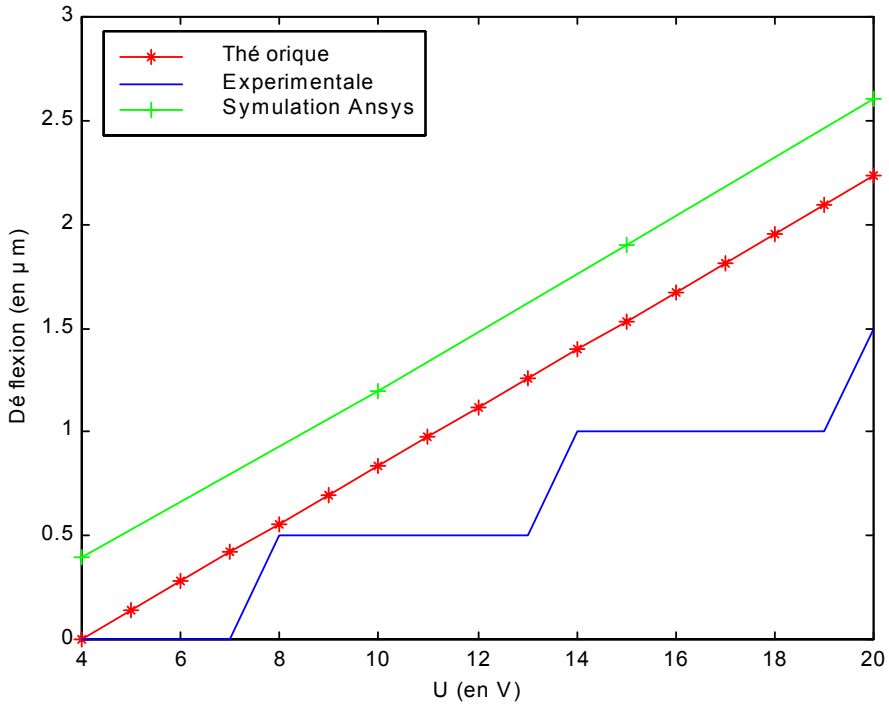


Figure 2.64 : déflexions théorique et expérimentale de l'actionneur suivant y

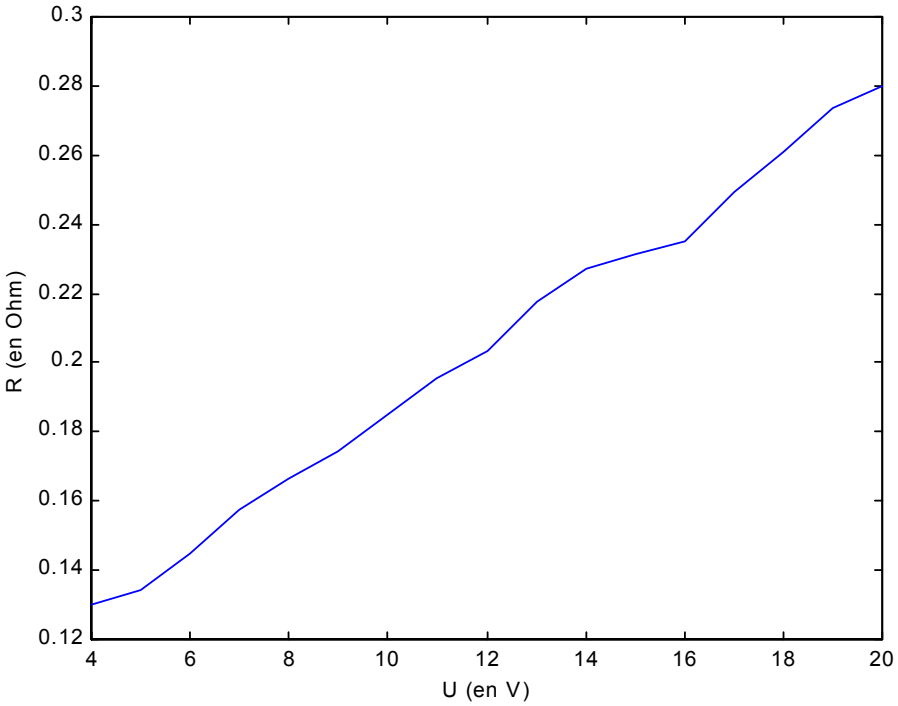


Figure 2.65 : résistance de l'actionneur en fonction de la tension appliquée

Lors des expérimentations, le courant et la tension ont été relevés, ce qui permet de tracer la résistance de l'actionneur en fonction de la tension (Figure 2.65), ainsi que l'évolution de la résistivité du silicium (Figure 2.66).

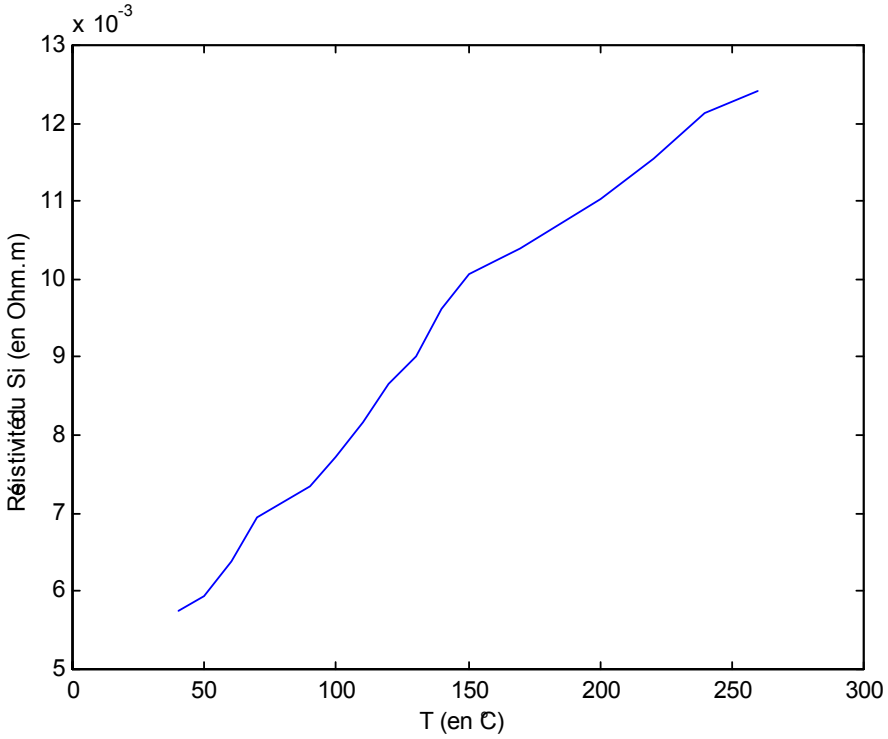


Figure 2.66 : résistivité de l'actionneur en fonction de la température

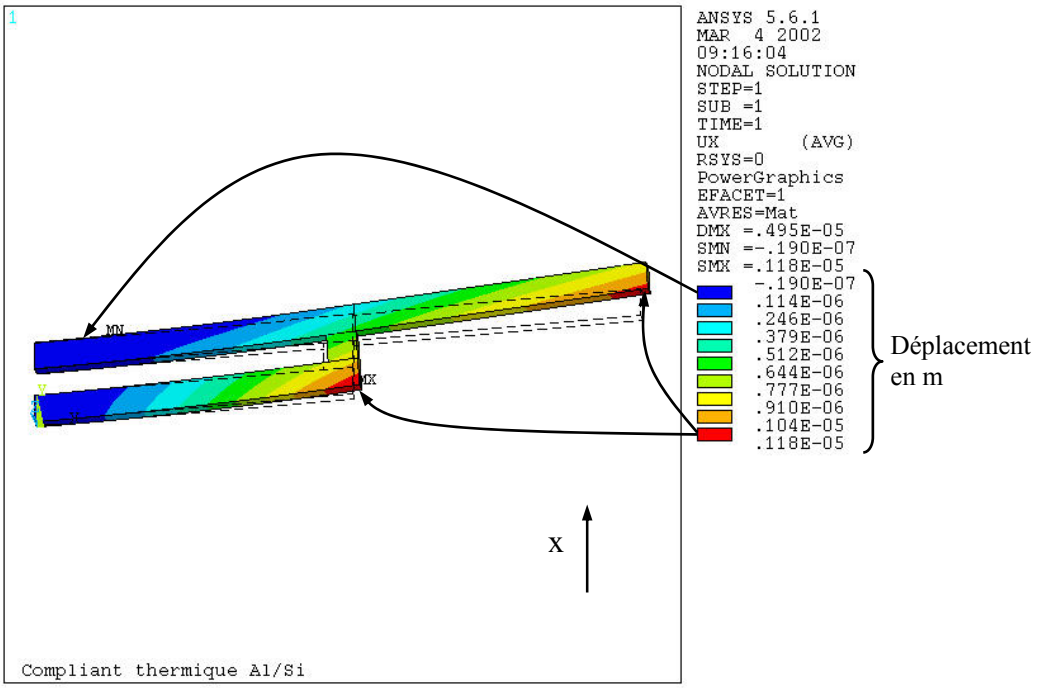


Figure 2.67 : simulation de l'actionneur en U : déplacement suivant x

Les simulations numériques présentées en Figure 2.67 à Figure 2.69 donnent des résultats identiques aux résultats théoriques, et assez proche des résultats expérimentaux. Elle montre par ailleurs que la déflexion suivant z est négligeable (Figure 2.69).

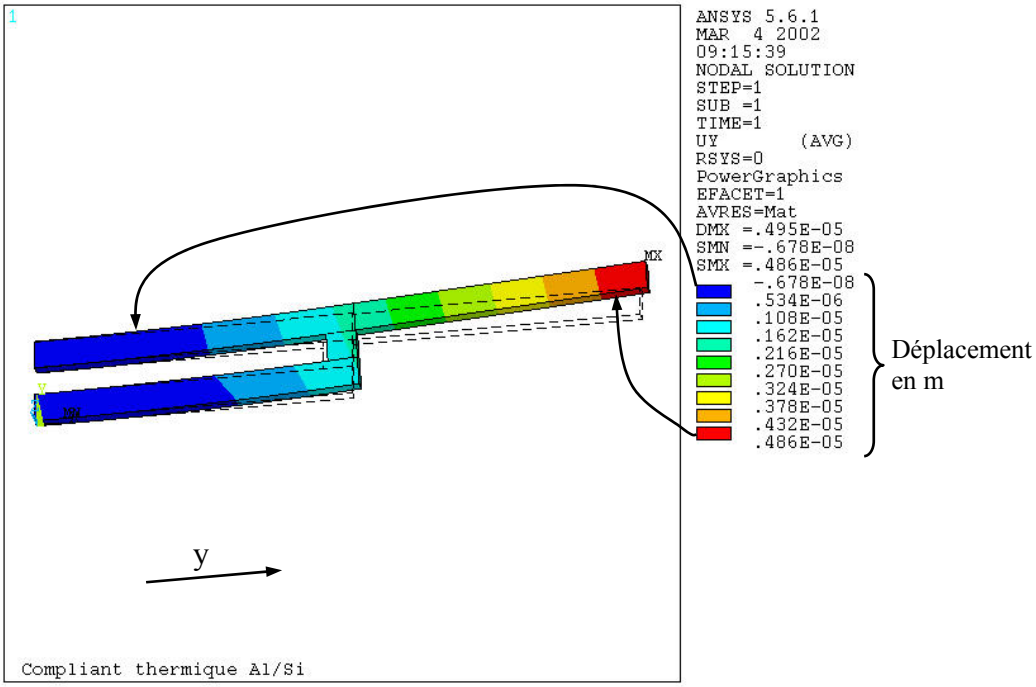


Figure 2.68 : simulation de l'actionneur en U : déplacement suivant y

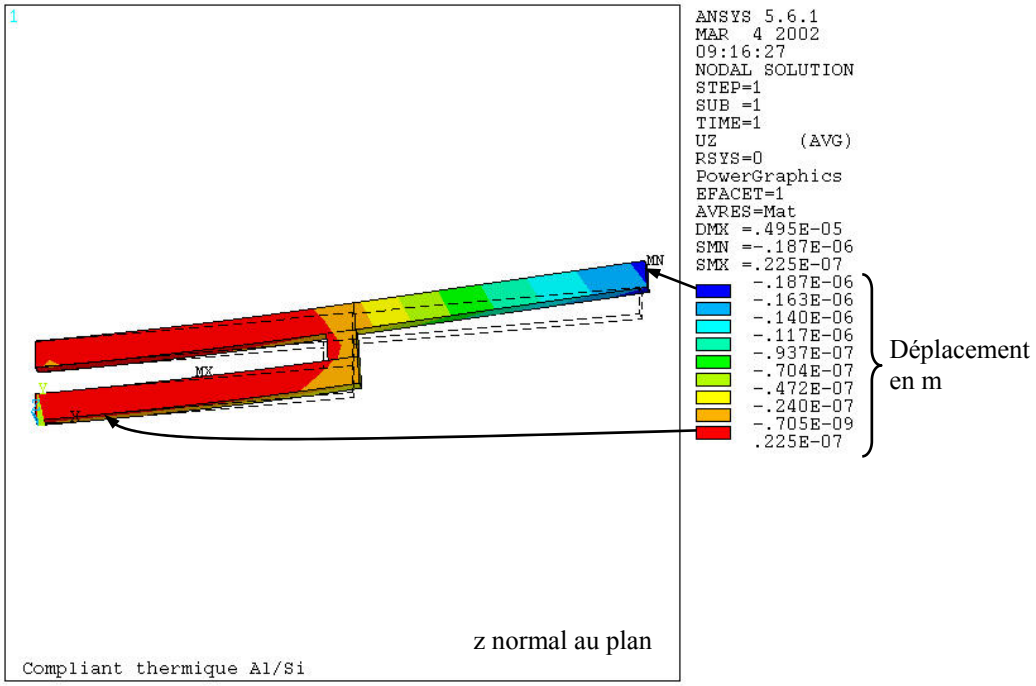


Figure 2.69 : simulation de l'actionneur en U : déplacement suivant z

Les résultats expérimentaux nous permettent de valider le modèle statique développé au paragraphe 5.2.3, les résultats étant très proches, qu'ils soient établis par le modèle statique, par la simulation numérique ou par l'expérimentation.

5.2.7 Conclusion

Les actionneurs thermiques en U nous semblaient de bons candidats pour la réalisation des pattes de notre microrobot, du fait des formes très variées qui pouvaient être envisagées. Mais les courses sont trop faibles pour l'application aux pattes d'un microrobot.
Dans le cas de l'actionneur en U, une réduction d'échelle réduit du même facteur la déflexion. En effet, d'après l'équation (26), pour un matériau donné, α et ΔT étant constants, si l'on diminue d'un facteur 10 par exemple la longueur et l'écart entre les bras, la déflexion sera elle aussi divisée par 10. Néanmoins, c'est un actionneur intéressant pour de très faibles déplacements dans le plan.

5.3 Les actionneurs thermiques de type patte

Lors de la réalisation à l'IMM des actionneurs thermiques en U (Figure 2.70 élément A), nous avons imaginé des géométries différentes pour fabriquer des actionneurs à deux degrés de liberté, qui sont les éléments B et C de la Figure 2.70.

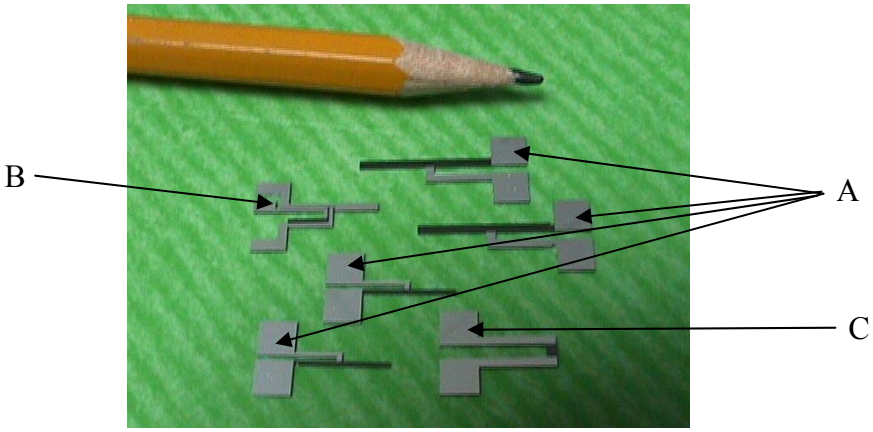


Figure 2.70 : photos des différents actionneurs compliants en U et de type "patte" fabriqués à l'IMM

En concevant l'élément B, nous avions imaginé positionner des électrodes judicieusement pour alimenter : d'une part un bras ou l'autre pour obtenir un déplacement dans le plan dans les deux sens ; et d'autre part associer un effet bilame hors plan pour coupler à ce déplacement un déplacement hors plan. Une commande appropriée aurait pu permettre la réalisation d'un pas. Cette réalisation n'a pas aboutie suite à une erreur de fabrication. Néanmoins, après expérimentation des actionneurs de type A de la Figure 2.70, nous pouvons penser que les déplacements auraient été très faibles :

- d'une part parce que l'épaisseur d'aluminium déposée était trop faible pour obtenir un effet bilame important,
- d'autre part parce que les déplacements dans le plan sont aussi très faibles.

L'élément C de la Figure 2.70 quant à lui est constitué de deux bilames thermiques (de 10 mm de long et 1 mm de large) en silicium de 400 µm d'épaisseur recouverts de 0,5 µm d'aluminium, reliés entre eux par une poutre de liaison en silicium. Pour les mêmes raisons que celles données pour l'actionneur précédent, les déflexions étaient très faibles. Une nouvelle fabrication a alors été réalisée à l'IMFC. Cette fois, l'actionneur (Figure 2.71) de mêmes dimensions était constitué de 320 µm de silicium recouvert de 20 µm de nickel. Les procédés de fabrication utilisés pour ces actionneurs sont détaillés au chapitre 4.

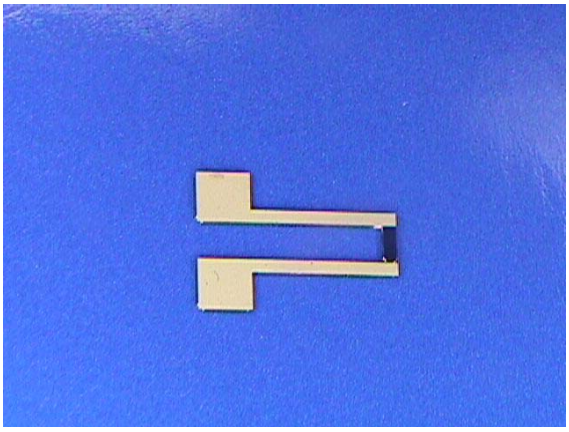


Figure 2.71 : photo d'un actionneur de type patte fabriqué à l'IMFC

Cet actionneur est constitué de deux bilames en nickel (20 µm) sur silicium (320 µm). Si les deux bilames sont actionnés en même temps, l'actionneur va fléchir. Si un seul des deux bilames est actionné, la flexion sera moins importante, puisqu'un seul actionneur devra déplacer l'actionneur complet. De plus dans ce cas, il risque d'y avoir une déformation de la liaison qui sera fonction de sa rigidité. Les expérimentations de cet actionneur ont permis de tracer la déflexion à vide en fonction de la puissance consommée à la Figure 2.72, et la force développée par l'actionneur pour déplacer une charge à la Figure 2.73, lorsque les deux bilames sont actionnés. Cette dernière courbe montre, que les bilames thermiques sont susceptibles de porter des charges importantes.

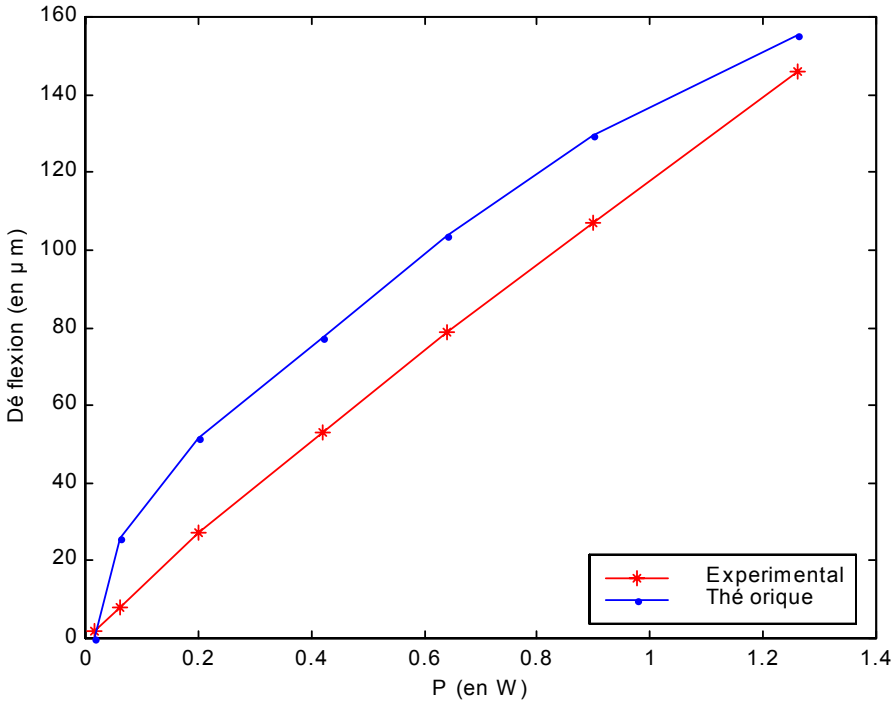


Figure 2.72 : déflexion expérimentale et théorique de l'actionneur à vide en fonction de la puissance électrique appliquée

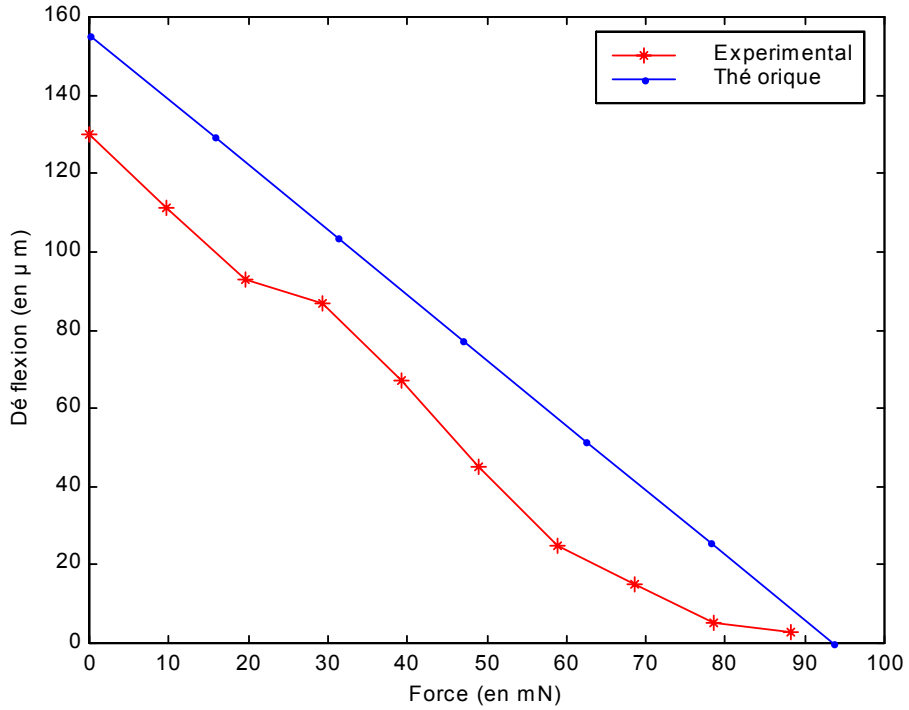


Figure 2.73 : déflexion de l'actionneur en fonction de la force appliquée à son extrémité

L'actionneur de la Figure 2.71 pèse 46 mg. La charge pour une déflexion nulle est de 9 g, ces actionneurs sont donc capables de porter plus de 400 fois leur propre poids.
Dans ces expérimentations, un seul degré de liberté a été mis en évidence (lorsque les deux bilames sont actionnés), le deuxième sera explicité dans le chapitre suivant. C'est sur la forme de ces derniers actionneurs que sera basée la conception des pattes du microrobot.

6 Comparaison des actionneurs de type poutre piézo-électrique et thermique

Les actionneurs piézo-électriques et bilame thermiques ayant été fabriqués avec les mêmes dimensions, il est aisé de comparer leurs caractéristiques. Le Tableau 2.4 récapitule les différents résultats pour chacun d'entre eux [49], et la Figure 2.74 présente pour chaque actionneur la caractéristique de la déflexion en fonction de l'effort.

Caractéristiques	Actionneur thermique	Actionneurs piézo-électriques		
		Unimorphe	Bimorphe série	Bimorphe parallèle
Déflexion (µm)	630	7,5	11	26
Effort développé (mN)	1200	7,5	22	40
Masse propre : Mpp (mg)	11,43	28	39	39
Masse portée : Mpt (g)	122	0,76	2,2	4,1
Rapport des masses Mpt/Mpp	10674	27,1	56,4	105
Tension (V)	200	70	70	70

Tableau 2.4 : tableau récapitulatif des caractéristiques des actionneurs piézo-électriques et thermiques

Les actionneurs fondés sur la dilatation thermique des matériaux présentent une densité d'énergie mécanique bien plus importante que celle des actionneurs piézo-électriques, donc des déformations et des efforts moteurs plus importants. D'autre part, ils présentent un avantage technologique lié à la relative facilité de leur réalisation, en usinage chimique ou conventionnel. Par ailleurs, la modélisation analytique de leur comportement statique apparaît dans la plupart des cas moins délicate que pour les actionneurs piézo-électriques. En revanche, leur rendement énergétique et leur temps de réponse sont faibles.

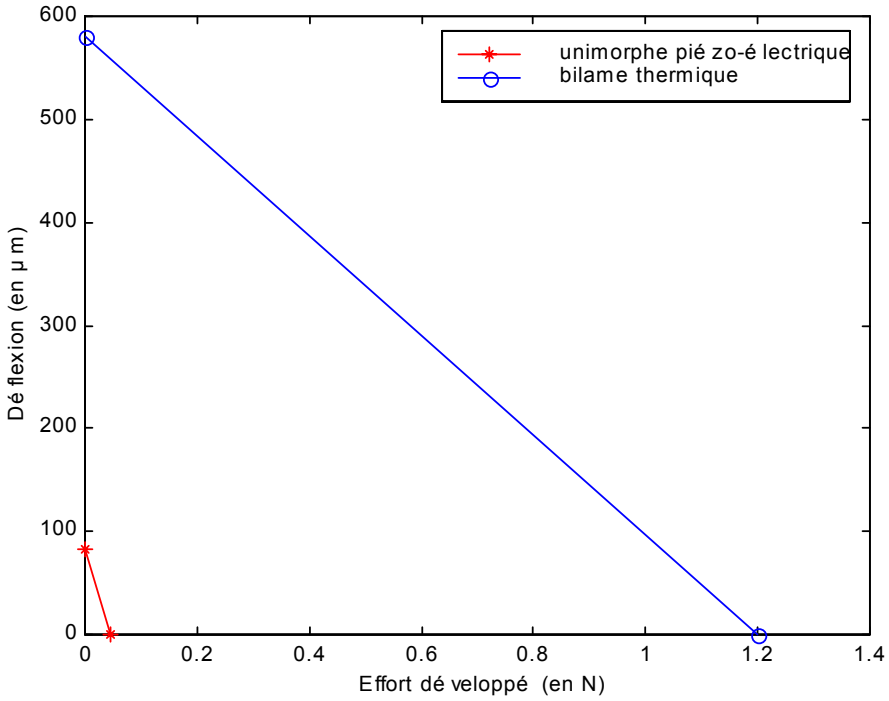


Figure 2.74 : comparaison des actionneurs bimorphe piézo-électrique et bilame thermique

7 Applications des actionneurs étudiés

En ce qui concerne la comparaison entre les actionneurs thermiques et les actionneurs piézo-électriques, le Tableau 2.4 montre l'intérêt des bilames thermiques pour l'application des pattes du microrobot au vu des déflexions et des efforts générés. Néanmoins, leur température élevée peut être un inconvénient pour la surface sur laquelle le microrobot se déplace.

A la suite des premières réalisations présentées ici, les actionneurs piézo-électriques ont été utilisés dans des applications de micromanipulation. La première micropince développée au LAB en 2000 est en effet constituée de deux unimorphes piézo-électriques [50]. D'autres applications d'actionneurs piézo-électriques sont en cours au LAB, aussi dans le domaine de la micromanipulation.

Les actionneurs thermiques ont été intégrés dans diveres applications.
Le bilame nous a permis de développer les pattes du microrobot comme le décrira le chapitre suivant. Il est à noter que les déplacements des bilames thermiques hors plan ont des amplitudes plus intéressantes que ceux des actionneurs thermiques en U.

Les actionneurs thermiques en U ont été utilisés par le Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs (LPMO) pour des systèmes optiques.
La première application concerne le positionnement de fibres optiques pour en réaliser la connexion [51]. La seconde concerne le positionnement d'une lentille par rapport à une fibre optique, en vue de réaliser un spectromètre [52].

8 Conclusion

Ces travaux menés au laboratoire concernant les actionneurs ont permis leur caractérisation, leur modélisation ainsi que leur réalisation. Ces travaux nous semblaient nécessaires pour la compréhension et la maîtrise des phénomènes physiques utilisables pour l'actionnement de microrobots.
Comme nous l'avons mentionné en introduction, la pertinence d'un actionneur dépend étroitement de l'application visée. Dans le choix du mode d'actionnement, nous avons toujours gardé en vue l'idée de la miniaturisation, qui n'est pas favorable à certains principes d'actionnement. Le choix du mode d'actionnement a donc mis en évidence deux principes utilisant l'activation des matériaux potentiellement intéressants à mettre en œuvre pour l'actionnement des pattes de notre microrobot. Les actionneurs piézo-électriques réalisés nous ont permis, outre de maîtriser les phénomènes physiques mis en jeu, aussi de quantifier les forces et déplacements générés pour des dimensions données, et d'aboutir à des applications en micromanipulation. Enfin, les déplacements et les efforts engendrés par les actionneurs thermiques nous ont convaincus que ce mode d'actionnement pouvait répondre aux besoins de notre application.
Dans ce chapitre, nous avons justifié le choix du mode d'actionnement des pattes de notre microrobot. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons au développement de pattes actionnées thermiquement, à deux degrés de liberté, pour notre microrobot.

9 Références bibliographiques

[1] Massood Tabib-Azar "Microactuators : Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical and Smart Structures", 1998, Series Editor : Harry L. Tuller, Kluwer Academic Publishers.
[2] Sergej Fatikow, Ulrich Rembold "Mycrosystem Technology and Microrobotics", 1997, Springer.
[3] Niels Tas, Jeroen Wissink, Louis Sander, Theo Lammerink, Miko Elwenspoek "Modeling, design and testing of the electrostatic shuffle motor", Sensors and Actuators, A70, 1998, pp 171-178.
[4] N.R. Tas, A.H.Sonnenberg, A.F.M. Sander and M.C. Elwenspoek "Surface Micromachined Linear Electrostatic Stepper Motor",
[5] W.S.N. Trimmer and K.J. Gabriel "Design Consideration for a Practical Electrostatic Micromotor", Sensors and Actuators, 11, 1987, pp 189-206.
[6] Motoharu Yamaguchi, Shuji Kawamura, Kazuyuki Minami and Masayoshi Esashi "Distributed Electrostatic Micro-Actuator", pp 18-23, 1993.
[7] T Akiyama, D Collard, H Fujita "Scratch drive actuator with mechanical links for self assembly of three dimensional MEMS", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, n°1, pp 10-17, 1997.
[8] P Minotti, P Langelt, G Bourbon, T Masuzawa "Design and characterisation of high torque/low speed silicon based electrostatic micromotors using stator/rotor contact interactions", Japanese Journal of Applied Physics, vol.37, part 2, n°3B, 1998.

[9] L.S. Fan, Y.C. Tai, R.S. Muller "IC – processed electrostatic micromotors", IEEE International Electronic Devices Meeting, pp 666-669, 1988.
[10] Takashi Yasuda, Isao Shimoyama and Hirofumi Miura "CMOS drivable electrostatic micro-actuator with large deflection",
[11] G. Lin, C.J. Kim, S. Konishi and H. Fujita "Design, Fabrication, and Testing of a C-Shape Actuator", 8th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensor IX, Stockholm, Sweden, june 25-29, 1995.
[12] C.H. Ahn, Y.J. Kim and M.G. Allen "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils", Proc. IEEE MEMS, pp 1-6, 1993.
[13] H. Guckel, T.R. Christensen, J.K. Skrobis, T.S.Jung, J. Klein, K.V. Hartojo and I. Widjaja "A first fonctionnal current excited planar rotationnal magnetic micormotor", Proc. IEEE MEMS, pp 7, 1993.
[14] K.I. Arai and T. Honda "Micromagnetic actuators", Robotica, vol.14, pp 477-481, 1996.
[15] Thomas Frank and Cornelius Schilling "The development of cascadable microdrives with muscle-like operating behaviour", J. of Micromech. Microeng., vol. 8, pp 222-229, 1998.
[16] H Guckel, T Earles, J Klein, J.D Zook, T Ohnstein "Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing", Sensors and Actuators, A53, pp 386-391, 1996.
[17] Anita M. Flynn, Lee S. Tavrow, Stephen F. Bart, Rodney A. Brooks, Daniel J. Ehrlich, K.R. Udayakumar and L. Eric Cross "Piezoelectric micromotors for microrobots", Ultrasonics symposium, pp 1163-117, 1990.
[18] P. Murlat, M. Kohli, T. Maeder, A. Kholkin, K. Brooks, N. Setter, R. Luthier "Fabrication and characterisation of PZT thin-film vibrtors for micromotors", Sensors and Actuators, A48, pp 157-165, 1995.
[19] Nikhil A. Koratkar and Inderjit Chopra "Analysis and Testing of a Froude Scaled Helicopter Rotor with Piezoelectric Bender Actuated Trailing Edge Flaps", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 8, pp 555-570, july 1997.
[20] Toshio Fukuda, Hiroshi Sato, Fumihito Arai, Hitoshi Iwata, Kouichi Itoigawa, Furo Cho, Chikusa Ku "Parallel Beam Micro Sensor/Actuator Unit Using PZT Thin Film and its Application Examples", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1498-1503, Leuven, Belgium, may 1998.
[21] Yongli Huang, Hong Zhang, Eun Sok Kim, Sang Gook Kim and Yong Bae Jeon "Piezoelectrically Actuated Microcantilever for Actuated Mirror Array Application", Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp 191-195, Hilton Head, South Carolina, june 2-6 1996.
[22] Koichi Suzumori, Akihiro Koga, Fumika Kondo and Riyoko Haneda "Integrated flexible microactuator systems", Robotica, Vol. 14, pp 493-498, 1996.
[23] S. Schweizer, S. Calmes, M.Laudon, Ph. Renaud "Thermally actuated optical microscanner with large angle and low consumption", Sensors and Actuators, 1999.
[24] Wensyang Hsu, Zhen-Peng Xu "An Electro-thermally Driven Micro Membranes Actuator with Two-way Deflection", Microsystem Technologies 98, 6th International conference on Micro Electro Opto Mechanical Systems and Components, pp 319-324, Potsdam, December 1-3, 1998.
[25] Murat Okyar, Xi-Qing Sun and William N. Carr "Thermally excited inchworm actuators and stepwise micromotors : Analysis and fabrication", SPIE vol 3224, pp 372-379, 1997.
[26] Qing-An Huang and Neville Ka Shek Lee "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator", J. Micromech. Microeng., vol. 9, pp 64-70, 1999.
[27] John H. Comtois, Victor M. Bright "Application for surface-micromachined polysilicon thermal actuators", Sensors and Actuators A 58, pp 19-25, 1997.

[28] Chi Shiang Pan and Wensyang Hsu "An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator", J. Micromech. Microeng., vol. 7, pp 7-13, 1997.
[29] Ph Lech, C Kara Slimane, B Romanowicz and Ph Renaud "Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuator", J. Micromech. Microeng., vol. 6, pp 134-137, 1996.
[30] J. Agnus, A. Bonvilain, G. Cabodevila, N. Chaillet, Y. Haddab, P. Rougeot "Study and Development of a Station for Manipulation Tasks in the Microworld", SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, Vol. 3834, pp 141-152,Boston, September 1999.
[31] Ryu Kanno, Satoshi Tadokoro, Toshi Takamori and Motofumi Hattori "Linear Approximate Dynamic Model of ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film) Actuator", International Conference on Robotics and Automation, pp 219-225, Mineapolis, April 1996.
[32] N. Chaillet, L. Buchaillot, J. Abadie, I. Roch, Ch. Lexcellent ; "Micro-actionneurs électroactifs" ; Chapitre 5 : Micro-actionneurs en Alliages à Mémoire de Forme ; Collection EGEM, Ed. Hermès Sciences et Publications, ISBN : 2-7462-0364-2, 2002.
[33] A. Lendlein et al : Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 98, 842, 2001.
[34] Cristina R. Neagu, Johannes G. E. Gardeniers, Miko Elwenspoek and John J. Kelly "An Electrochemical Microactuator : Principle and First Results", Journal of Microelectromechanical systems, Vol. 5, n°1, March 1996.
[35] Stephanus Buttgenbach and Jurgen Hesselbach "Shape memory alloy microactuator system", SPIE vol. 3202, pp 20-28, 1998.
[36] Mihai Calin, Nicolas Chaillet, Alain Bourjault, Arnaud Bertsch, Sophie Zissy "Design and Control of Compliant Microrobot", IEEE 1996, pp 489-492.
[37] Mohamed Touaibia, Nicolas Chaillet and Alain Bourjault "In-Pipe Microrobot System based on Shape Memoty Alloy Actuators", Mechatronics'98, Kitakyushu, pp 272-277, 1998.
[38] William Daniau "Micro-Technologies de Salle Blanche à l'IMFC", formation salle blanche IMFC, 1998.
[39] Guillaume Laurent, Emmanuel Piat, "Efficiency of Swimming Microrobots using Ionic Polymer Metal Composite Actuators", IEEE International Conference of Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
[40] http://www.lapinville.net/anim_fourmi.htm
[41] A. Bonvilain, N. Chaillet "Etude et réalisation d'un microrobot de type insecte", Actes des Journées Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'13), 4 pages, 28-29 septembre 2000, IRISA-Rennes.
[42] Yassine Haddab, "Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique", Thèse de doctorat n° 847, université de Franche Comté, 2000.
[43] Alain Bourjault, Nicolas Chaillet, "La microrobotique", Systèmes Automatisés IC2, Information Commande et Communication, Editions Hermès Lavoisier, Hermès Science publication, ISBN 2-7462-0352-9, 2002.
[44] Jan G. Smits and Susan I. Dalke, "The Constituent Equations of Piezoelectric Bimorphs", IEEE Ultrasonic symposium, pp 781-784, 1989.
[45] D.A.Berlincourt, D.R.Curran, H.Jaffe, "Piezoelectric and Piezomagnetic Materials", Physical Acoustics Vol IA Academic Press New-York 1964.
[46] Jan G. Smits and Wai-Shing Choi, "The Constituent Equations of Piezoelectric Heterogeneous Bimorphs", IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 38, n°3, pp 256-270, may 1991.

[47] Jocelyne Jouanneau, "Pyromètres à bilames", Collection des techniques de l'ingénieur, R 2 540, 1985.
[48] Norme ASTM B 106-78 précise les modalités exactes d'essai pour la détermination de la courbure spécifique de Villarceau.
[49] A. Bonvilain, J. Agnus, N. Chaillet, A. Bourjault "Etude des microactionneurs bilames piézo-électriques et thermiques en vue de la locomotion d'un microrobot à pattes", Actes des Deuxièmes Journées du Pôle Microrobotique, pp. 29-34, 4-5 février 1999, Futuroscope, Poitiers.
[50] Yassine Haddab, Nicolas Chaillet, Alain Bourjault, "A Microgripper Using Smart Piezoelectric Actuators", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2000, 30 octobre au 5 novembre 2000, Kagawa University, Takamatsu, Japon.
[51] Cédrick Chappaz, Thèse en cours au LPMO (Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs).
[52] Emmanuelle Gallois-Pichonat, Jean Claude Jeannot, Michel de Labachelerie, "A micromechanical focusing device for artificial vision", 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Antibes – Juan les pins, 15-18 octobre 2001, .
[53] Quing-An Huang, Neville Ka Shek Lee, "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°9, pp 64-70, 1999.
[54] Ph. Lerch, C Kara Slimane, B Romanowicz, and Ph. Renaud, "Modelisation and charactérisation of asymmetrical thermal micro-actuators", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°6, pp 134-137, 1996.
[55] John H. Comtois, Victor M. Bright, "Applications for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and array", Sensors and Actuators A58, pp 19-25, 1997.
[56] Chi Shiang Pan and Wensyang Hsu, "An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°7, pp 7-13, 1997.
[57] Martin Hoffmann, Peter Kopka, Edgar Voges, "Bistable micromechanical fiber-optic switches on silicon with thermal actuators", Sensors and Actuators, n° 78, pp 28-35, 1999.
[58] Bernard Eyglument, "Manuel de thermique : théorie et pratique", 2ème édition, Hermes.

Chapitre 3 :
Développement des pattes du microrobot

1 Introduction

Compte tenu de la diversité et de la complexité des problèmes soulevés par la réalisation d'un microrobot de type insecte, nous avons choisi de nous intéresser dans un premier temps à la fonction locomotion, c'est à dire à l'étude et la réalisation de pattes. nous nous sommes limités à une locomotion sur un sol plan et horizontal, ou de faible inclinaison, et nous déterminerons la rugosité maximale sur laquelle le microrobot peut se déplacer.
Les micro-actionneurs sont des composants fondamentaux des microrobots. Il s'agit également d'envisager le microrobot d'une manière plus globale, en intégrant dans les pattes leur actionnement, et la connectique nécessaire à leur alimentation. Pour ce faire, le type d'actionnement a été choisi au chapitre 2, et nous utiliserons donc des micro-actionneurs thermiques.
Ce chapitre est consacré au développement des pattes, depuis leur conception jusqu'à leur réalisation, avec un retour sur conception pour l'amélioration des performances. Dans la première partie, nous présenterons la conception des pattes, ainsi que leur dimensionnement. Dans la deuxième partie, nous présenterons les pattes constituées de bilames thermiques en nickel sur silicium. Dans la troisième partie, nous présenterons les pattes constituées de bilames thermiques en résine SU-8 sur silicium.

2 Conception des pattes

2.1 Structure des pattes

Au premier chapitre, nous avons noté que la biologie nous apportait des réponses techniques pour la conception de la structure du microrobot et que la bio-inspiration apportait une expérience dans le domaine, à savoir quel degré de fidélité devait avoir le microrobot par rapport à l'insecte. Finalement, notre microrobot est assez éloigné de l'insecte, il n'est encore qu'un compromis entre bio-inspiration et contraintes technologiques.
L'objectif de notre microrobot a été donné au chapitre précédent, et c'est sur les derniers actionneurs développés que nous avons basé la conception de ses pattes.
Des micro-actionneurs bilames thermiques sont intégrés dans les pattes. Nous avons choisi d'intégrer deux micro-actionneurs bilames thermiques afin d'obtenir deux degrés de liberté par patte. La structure de la patte est présentée à la Figure 3.1.

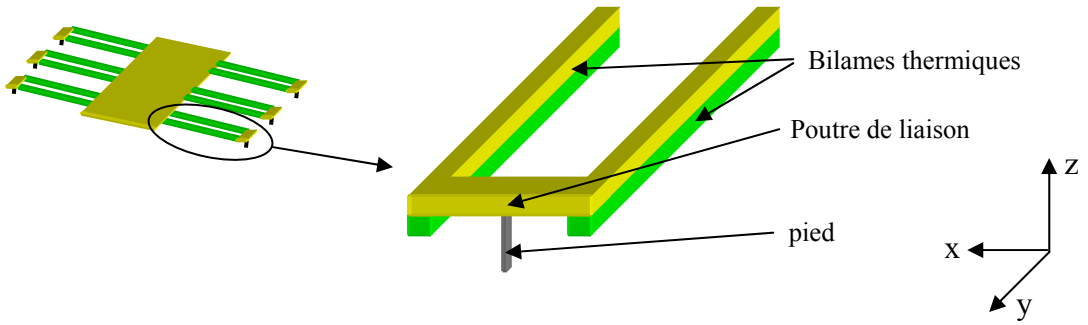


Figure 3.1: schéma de la structure d'une patte du microrobot

2.2 Principe de fonctionnement

Les deux micro-actionneurs bilames thermiques ainsi positionnés nous permettent d'obtenir deux degrés de liberté par patte. Ces deux degrés de liberté sont indépendants, ils permettent

la marche en avant et en arrière. Le cycle de fonctionnement prévu de la patte est présenté en Figure 3.2, la patte étant vue en bout.

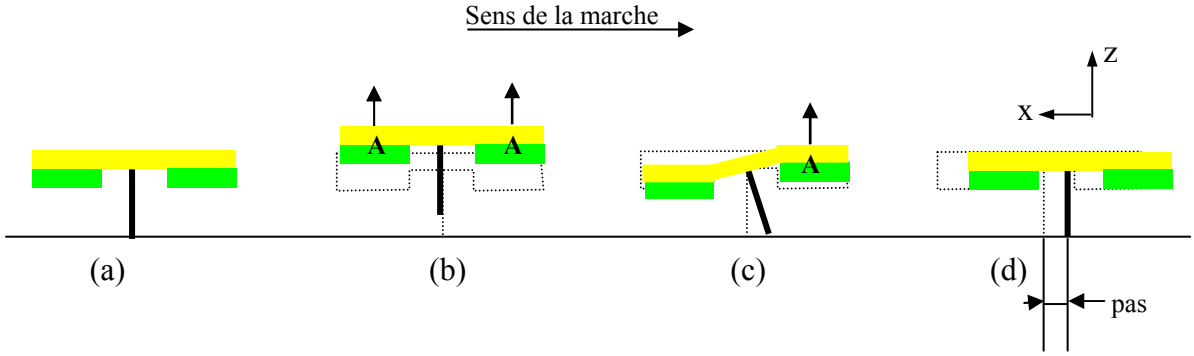


Figure 3.2 : schéma du cycle de fonctionnement de la patte : les bilames actionnés sont repérés par la lettre A, et la position de la patte au repos est tracée en pointillés
(a) position de la patte au repos,
(b) les deux bilames sont actionnés et la patte se lève,
(c) un seul bilame est alimenté, l'autre tend à reprendre sa position initiale et incline la patte,
(d) l'actionnement est relâché et la patte revient dans sa position initiale par élasticité de la structure en effectuant un pas

2.3 Etude mécanique des pattes

2.3.1 Etude mécanique statique

L'étude statique de la patte a pour objet de définir ses déformations à l'état repos, c'est à dire hors alimentation. Pour ce faire, nous allons étudier quelles sont les forces mises en jeu dans la pattes. Ces résultats permettront de la dimensionner ainsi que ses actionneurs en vue de réaliser le microrobot complet.
Pour simplifier les problèmes, nous supposerons que les forces de contact sont ponctuelles.
Pour effectuer l'étude statique de la patte, nous allons isoler chaque partie de celle-ci, et étudier son équilibre. En d'autres termes, nous allons étudier successivement les bilames, la poutre de liaison et le pied. Le schéma de la Figure 3.3 montre les différents éléments qui constituent la patte.

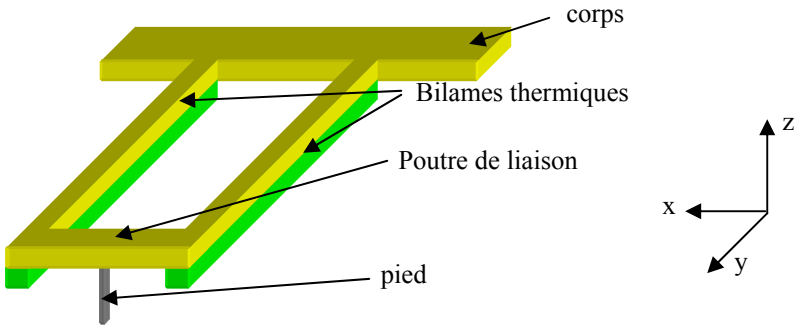


Figure 3.3 : schéma de la patte avec les éléments la constituant

2.3.1.1 Les bilames thermiques

La Figure 3.4 présente le schéma d'un bilame thermique seul non alimenté, avec les forces mises en jeu. Il est soumis :

- aux forces de liaison avec le corps, F_c,
- à son poids propre P_b,

- aux forces de liaison avec la poutre de liaison F_l.

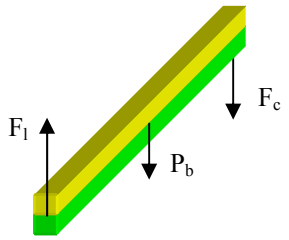


Figure 3.4 : schéma d'un bilame thermique de la patte isolé avec les forces mises en jeu dans l'équilibre

Nous considèrerons négligeable le poids propre du bilame devant celui du corps du microrobot. En effet, comme l'a montré l'étude des actionneurs bilames au chapitre 2, ceux-ci peuvent porter plusieurs centaines de fois leur propre poids, ce dernier devient donc négligeable, et dans ce cas, $F_l = F_c$. Si nous considérons que la poutre de liaison et le pied sont parfaitement rigides, il est possible de déterminer la flèche du bilame thermique en fonction du poids du microrobot. Cela revient à dire que le bilame est encastré à une extrémité, et soumis à l'autre extrémité à une force : $F = \frac{P}{2.N}$ avec :

P : poids du microrobot (en N),
N : nombre de pattes,
2.N : nombre de bilames thermiques.

La déflexion du bilame soumis à son extrémité à la force F est :

$$\delta = \frac{F.L^3}{3.E.I} \qquad \text{avec :} \quad I = \frac{l.e^3}{12}$$

F : force appliquée en bout de la poutre,
L : longueur de la poutre,
E : module d'Young de la poutre calculé par : $E = \frac{e_1.E_1 + e_2.E_2}{e}$,
I : moment quadratique de la poutre,
l : largeur de la poutre,
e_1 et e_2 : épaisseur de chacun des matériaux constituant le bilame,
e : épaisseur de la poutre.

Donc, pour $F = \frac{P}{2.N}$, $\qquad \delta = \frac{P.L^3}{6.N.E.I}$

Si l'on prend les dimensions des pattes en nickel sur silicium (qui seront données au paragraphe 4) et du corps (qui sera donné au chapitre 5) :

$l = 100.10^{-6}$ m
$e = 40.10^{-6}$ m

donc : $I = 5{,}3.10^{-19}$ m^4

P = 19,6 µN (poids d'un corps de silicium de 2 mm x 3,5 mm x 0,12 mm)

E = 156 GPa

On obtient : $\delta = 52{,}6.10^{-9}$ m = 52,6 nm.

Cette déflexion de l'actionneur de la patte est négligeable, la déflexion maximum de l'actionneur est de plus de 100 µm, soit près de 2000 fois la déflexion due au poids du corps. Ceci montre que les actionneurs pourront très largement supporter leur corps.

2.3.1.2 La poutre de liaison

La Figure 3.5 présente le schéma de la poutre de liaison seule, les bilames n'étant pas alimentés, avec les forces mises en jeu. Elle est soumise :

- aux forces de liaison avec les bilames F_b,
- à son poids propre P_l,
- aux forces de liaison avec le pied F_p.

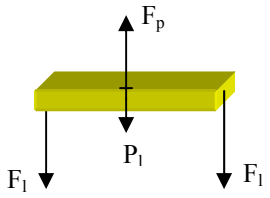


Figure 3.5 : schéma de la poutre de liaison isolée avec les forces mises en jeu dans l'équilibre

De même que pour les bilames, le poids propre de la poutre de liaison est négligé. Si l'on considère que le pied est parfaitement rigide, la flèche de chaque côté de la poutre de liaison (Figure 3.6) est donnée par :

$$\delta = \frac{F_l.L^3}{24.E.I}$$

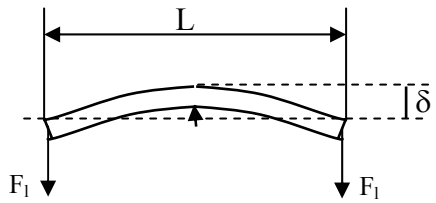


Figure 3.6 : schéma d'une poutre en appui au centre, soumise à une force à chaque extrémité

Si l'on prend les valeurs des variables données au paragraphe précédent, on trouve :

$\delta = 78{,}9.10^{-9}$ m = 78,9 nm.

De même que précédemment, cette déflexion de la poutre de liaison est négligeable.

2.3.1.3 Le pied

La Figure 3.7 présente le schéma du pied seul, avec les forces mises en jeu. Il est soumis :

- aux forces de liaison avec la poutre de liaison F_l,
- à son poids propre P_p,
- aux forces de contact avec le sol F_s.

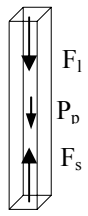


Figure 3.7 : schéma du pied isolé avec les forces mises en jeu dans l'équilibre

De même que pour les bilames, le poids propre du pied est négligé. Le pied travaille en compression dont la contrainte s'exprime par :

$$\sigma = \frac{F_l}{S_0}$$

et la compression s'écrit : $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

d'où : $\varepsilon = \frac{F_l}{E.S_0}$

σ : contrainte de compression normale,
F_l : force de compression,
S_0 : section de l'élément en compression,
E : module d'Young du matériau,
ε : compression relative.

Si l'on prend les valeurs des variables données au paragraphe précédent, et une section du pied de 50 x 100 µm², on obtient : $\varepsilon = 980.10^{-9}$ m = 0,98 µm.
De même que précédemment, ce tassement du pied est négligeable, le pied ayant une hauteur de 120 à 150 µm.

2.3.2 Etude mécanique dynamique

Cette étude montre que la patte une fois déformée permet au microrobot d'effectuer un pas, c'est à dire qu'elle est suffisamment rigide.
La Figure 3.8 présente la patte vue en bout déformée, avec les forces en présence lorsque l'alimentation est arrêtée et que les trois autres pattes se lèvent.

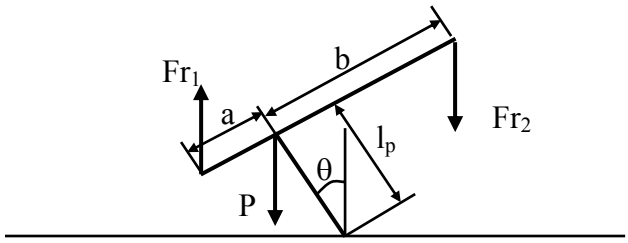


Figure 3.8 : schéma de la patte en fin d'actionnement avec les forces mises en jeu

D'après la Figure 3.8 on peut écrire au point de contact entre le sol et le pied (qui est le centre de rotation de la patte) :

$$J\ddot{\theta} = (a.\cos\theta + l_p \sin\theta).Fr_1 + (b.\cos\theta - l_p \sin\theta).Fr_2 - P.l_p.\sin\theta$$

avec :

$$Fr_1 = k.\delta_1$$

$$Fr_2 = k.\delta_2$$

$$k = \frac{3.E.I}{L^3}$$

$$P = cste$$

Il y a mouvement si :

$$(a.\cos\theta + l_p \sin\theta).Fr_1 + (b.\cos\theta - l_p \sin\theta).Fr_2 > P.l_p.\sin\theta$$

Dans notre cas :
l_p = 120 µm
a = 175 µm
b = 325 µm
θ = 14°
k = 49,5 N/m
δ_1 = 42 µm
δ_2 = 78 µm
Fr_1 = 2,1 mN
Fr_2 = 3,9 mN

Ceci donne : $P < 52,7\ g$, or le poids total du microrobot est de 2,33 mg. Chaque patte supportera environ un tier du poids soit : 0,78 mg. La patte est donc suffisamment rigide pour faire avancer le microrobot.

2.3.3 Conclusion

L'objectif était de montrer que la patte est viable. Cette étude mécanique nous permettra au chapitre 5 de dimensionner le corps plus précisément, en fonction des dimensions des pattes et des déflexions possibles, pour qu'elles puissent supporter le corps et maintenir le microrobot en équilibre au repos. Dans ce même chapitre 5, l'étude dynamique sera complétée pour valider la possibilité de déplacement du microrobot avec ses pattes, elle montrera que les déplacements et les efforts développés par les pattes lui permettent de se déplacer.

3 Dimensionnement des pattes

Sachant qu'il est relativement facile de réaliser des micro-actionneurs bilames thermiques par microfabrication, et que le microrobot doit avoir un volume maximum entrant dans un cube de 1 cm de côté, les actionneurs bilames thermiques qui seront intégrés dans les pattes auront des dimensions réduites par rapport aux actionneurs décrits au chapitre 2.
Les dimensions sont choisies en fonction du volume final du microrobot, des contraintes de dimensionnement d'un bilame, ainsi que des contraintes de fabrication et sont données à la Figure 3.9. Pour avoir un volume inférieur à un cube de 1 cm de côté, la longueur des actionneurs est fixée à 2 millimètres. Les contraintes de dimensionnement du bilame (données au chapitre 2) nous amènent à fixer une largeur de 100 µm, et une épaisseur de 40 µm. Les contraintes de fabrication qui seront précisées au paragraphe 4 conduisent à des épaisseurs identiques pour chaque matériaux, de 20 µm chacun.

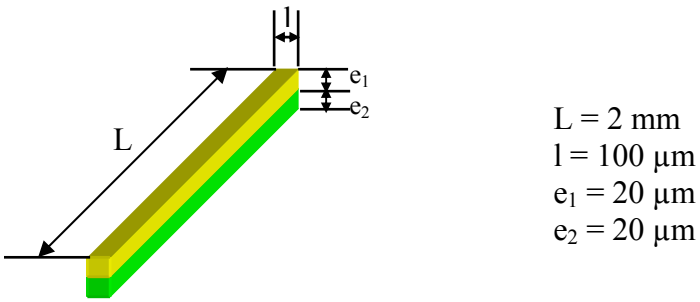


Figure 3.9 : schéma des dimensions d'un bilame de la patte

Les pattes telles qu'elles vont être fabriquées, auront plusieurs dimensions submillimétriques ; nous les qualifierons donc de micropattes.

4 Micropattes en nickel sur silicium : type 1

Le choix des matériaux est très limité. En effet, dans le chapitre 2 il a été montré que les matériaux couramment utilisés en microfabrication et ayant le plus grand écart entre les coefficients d'expansion thermique, sont le silicium et l'aluminium. Mais pour obtenir des déflexions importantes, il faut une épaisseur qui nécessite un électroformage (méthode disponible pour obtenir une épaisseur de 20 µm). Or, ne disposant alors d'aucune expérience en électroformage, et n'ayant accès qu'à un bain de nickel, les premières micropattes sont réalisées en nickel sur silicium, bien que les performance soient moins bonnes qu'avec de l'aluminium sur du silicium. En effet, le coefficient d'expansion thermique du nickel est de $13{,}3.10^{-6}$ K^{-1}, et celui de l'aluminium de $23{,}5.10^{-6}$ K^{-1}. Rappelons que celui du silicium est de $6{,}2.10^{-6}$ K^{-1}.

La structure de la micropatte ainsi que ses dimensions sont donnés à la Figure 3.10.

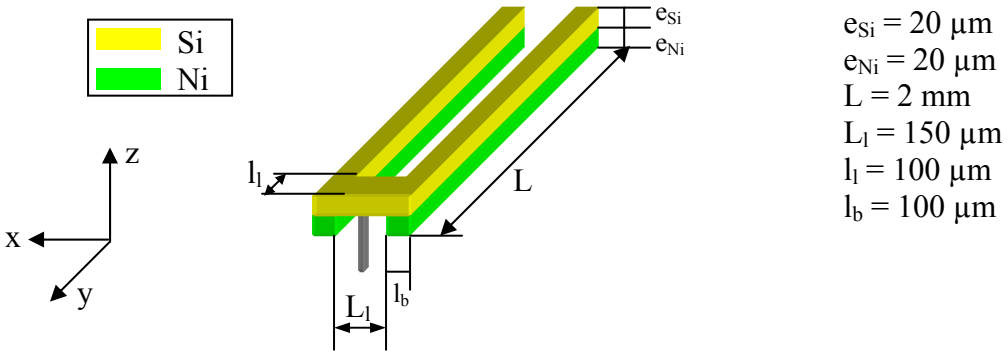


Figure 3.10 : schéma de dimensionnement de la micropatte

A partir de la relation (7) (chapitre 2, paragraphe 5.1.3) donnant l'optimisation des épaisseurs des deux constituants d'un bilame, on obtient :

$$\frac{e_{Ni}}{e_{Si}} = \sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{Ni}}} \quad \text{d'où : } e_{Ni} = e_{Si}.\sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{Ni}}}$$

Or E_{Si} = 113 GPa et E_{Ni} = 199,5 GPa, ce qui nous donne : $e_{Ni} = 0{,}75.e_{Si}$.

Nous avons choisi de prendre deux épaisseurs identiques pour améliorer l'effort maximum sans sacrifier une grande déflexion. Sur la Figure 3.11, nous avons tracé l'évolution de la déflexion et celle de la force de blocage d'un bilame constitué d'une épaisseur de silicium de 20 µm, en fonction d'une épaisseur de nickel variant de 10 à 20 µm. La déflexion varie de 104 à 112 µm, alors que la force développée varie de 1,5 à 3,3 mN. Nous sacrifions donc 8 µm de déflexion pour doubler l'effort maximum.

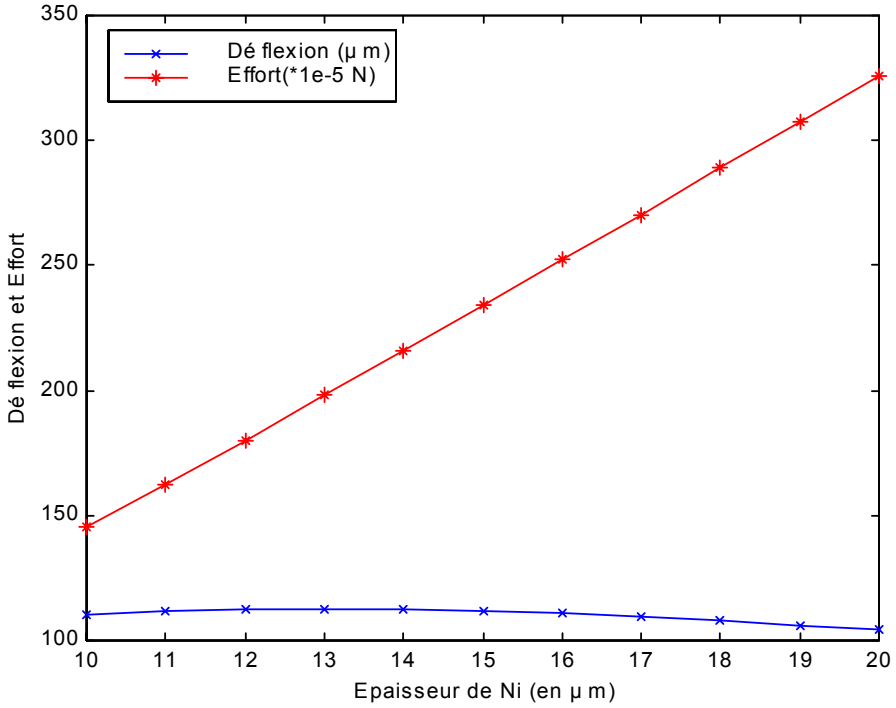


Figure 3.11 : évolution de la déflexion et de la force développée par un bilame Ni/Si pour une épaisseur de nickel variant de 10 à 20 µm sur 20 µm de silicium

4.1 Simulations numériques des températures et des déformations

A partir des bilames Ni/Si précédemment décrits, des simulations numériques ont été réalisées sous Ansys, afin de déterminer les températures et les déflexions pour les positions (b) et (c) de la Figure 3.2. La répartition de la température pour la position (b) lorsque les deux bilames sont actionnés est présenté en Figure 3.12.

L'élévation de température est de 300°C, ce qui est tout à fait cohérent avec les mesures effectuées à l'aide de microthermocouples sur les actionneurs thermiques en U du paragraphe 5.2 du chapitre 2. En effet, lors de l'expérimentation des actionneurs thermiques en U, nous avons mesuré la température de chaque bras à l'aide de microthermocouples. Ces derniers sont constitués de deux fils de 25 µm en chromel pour l'un et en alumel pour l'autre. Ces deux fils sont soudés par décharge capacitive, puis collés sur chacun des bras de l'actionneur. Un circuit intégré AD595 permet de transcrire la tension aux bornes du microthermocouple en une tension proportionnelle à la température mesurée. Ceci nous a permis de vérifier les résultats obtenus par simulation numérique.

L'évolution de la température pour la position (c) lorsqu'un seul bilame est actionné est présenté en Figure 3.13. Sur cette dernière, on peut noter la différence de température entre les extrémités des deux bilames, ce qui induira une différence de déflexion et donc une inclinaison de la poutre de liaison.

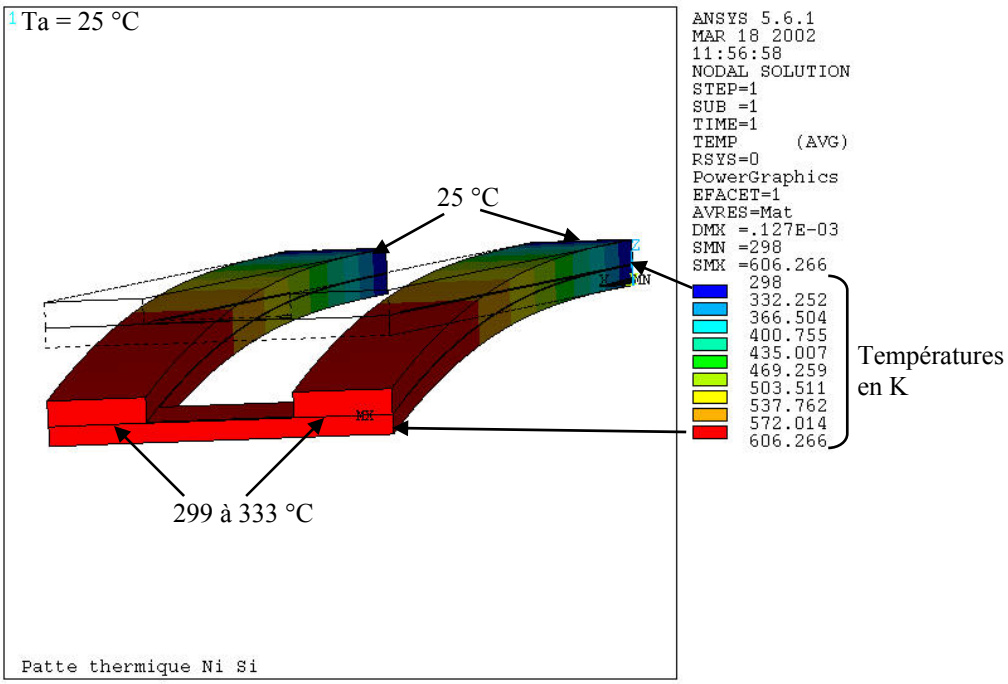


Figure 3.12 : températures le long de la micropatte lorsque les deux bilames sont actionnés

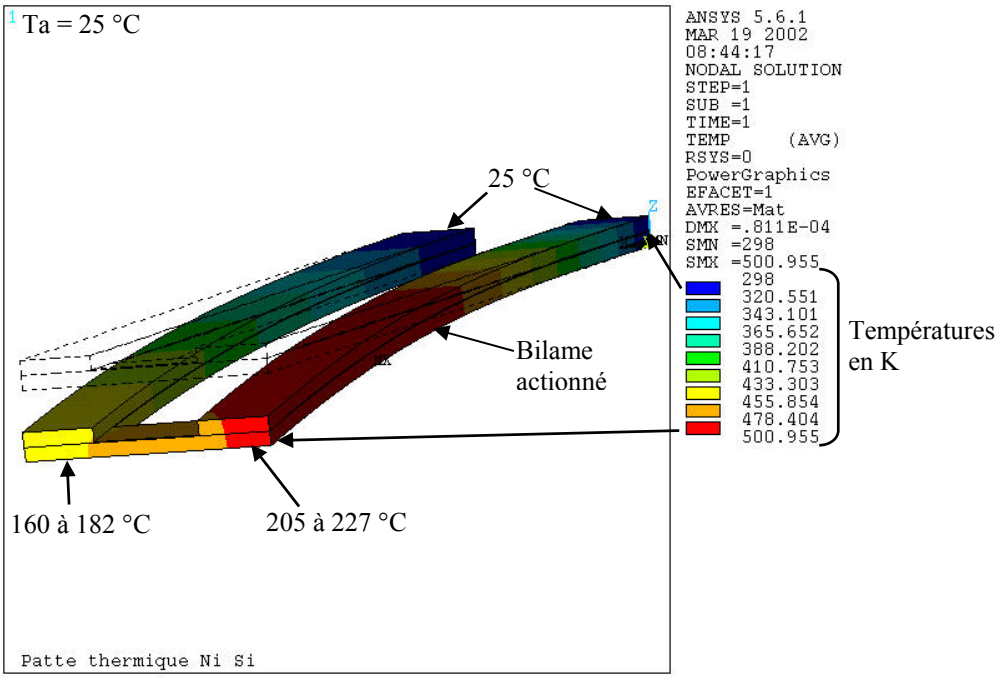


Figure 3.13 : températures le long de la micropatte lorsqu'un seul bilame est actionné

La Figure 3.14 montre la déflexion de la micropatte lorsque les deux bilames sont actionnés. La déflexion maximale est de 127 µm à l'extrémité de la poutre. Lorsque l'on effectue cette même simulation pour un seul bilame actionné, les résultats sont similaires (Figure 3.15). En effet, l'extrémité de la micropatte représente en fait une déflexion entre 71 et 80 µm. Ceci nous permet d'en déduire que l'inclinaison de la poutre de liaison sera faible, au maximum, les deux bilames auront une différence de déflexion de 9 µm. La longueur du pied permet alors d'en déduire la longueur du pas, ce calcul sera fait après l'expérimentation, dans l'évaluation des performances au paragraphe 4.4.

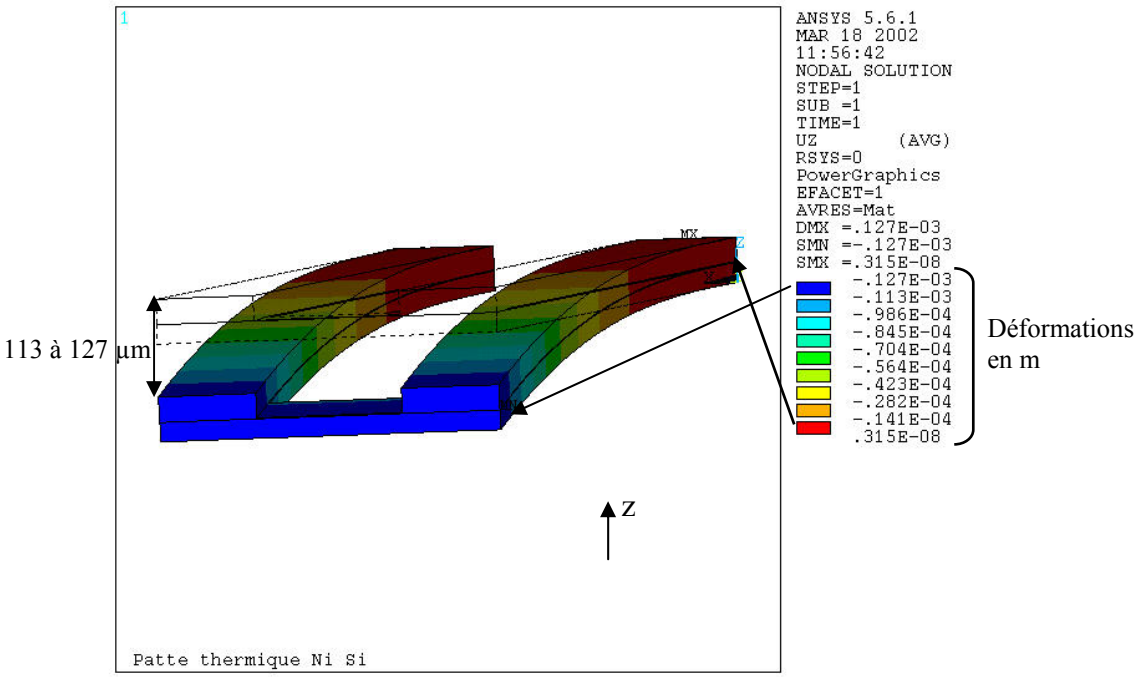


Figure 3.14 : déformations suivant l'axe z lorsque les deux bilames sont actionnés

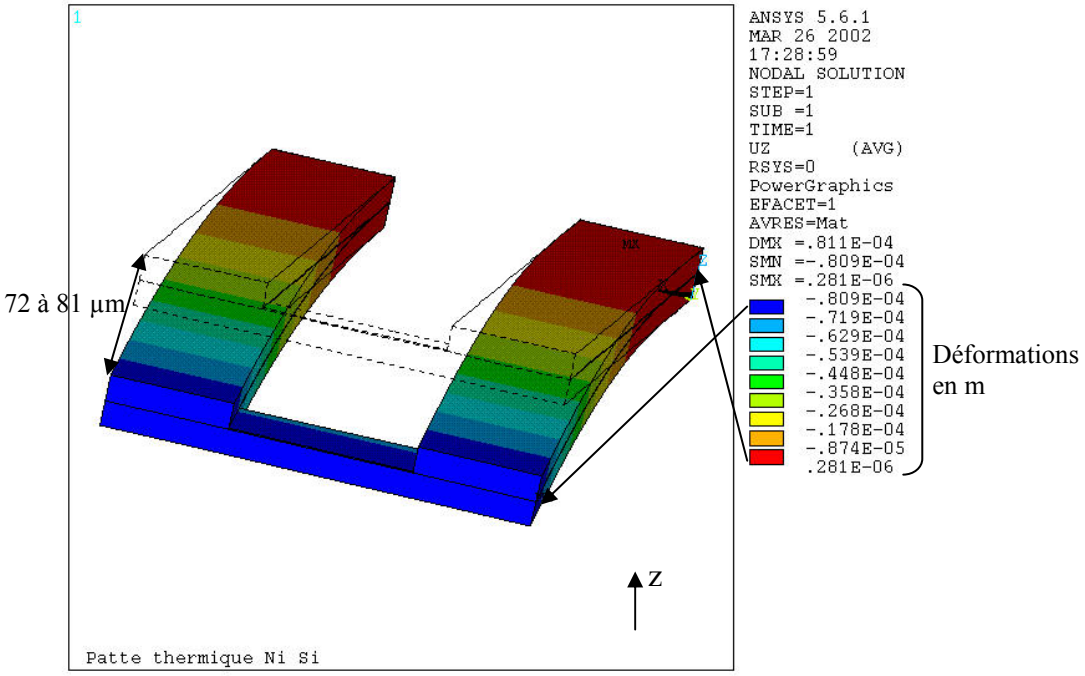


Figure 3.15 : déformations suivant l'axe z lorsque un seul bilame est actionné

Les déformations "parasites" sur les deux autres axes sont représentées aux Figure 3.16 et Figure 3.17. Elles montrent que les déformations sont très faibles, et qu'elles n'influeront pas sur le fonctionnement en flexion des bilames.

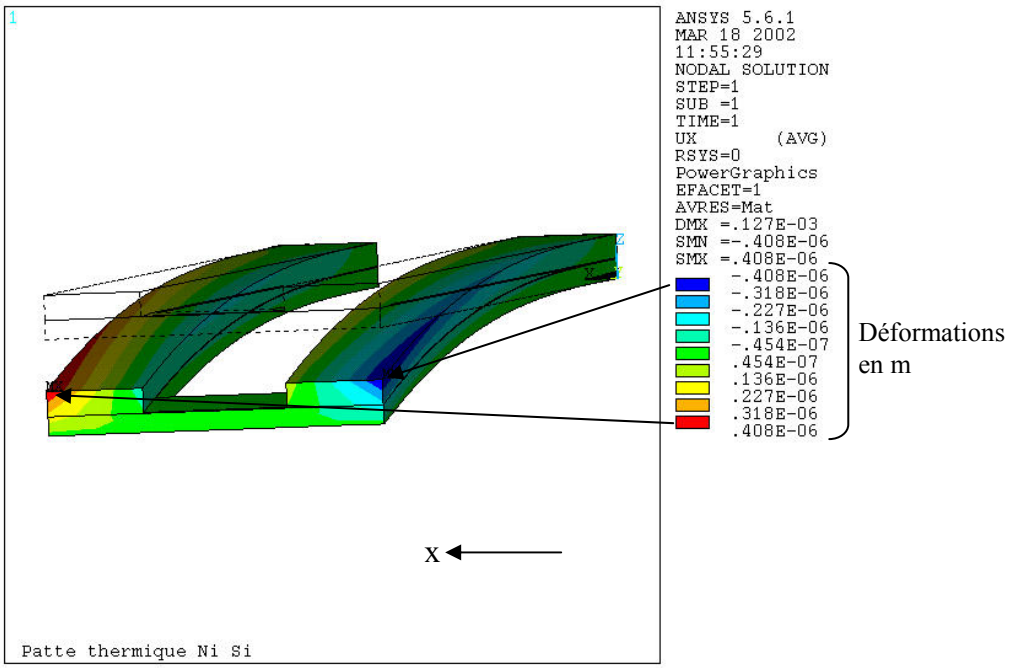


Figure 3.16 : déformations suivant l'axe x lorsque les deux bilames sont actionnés

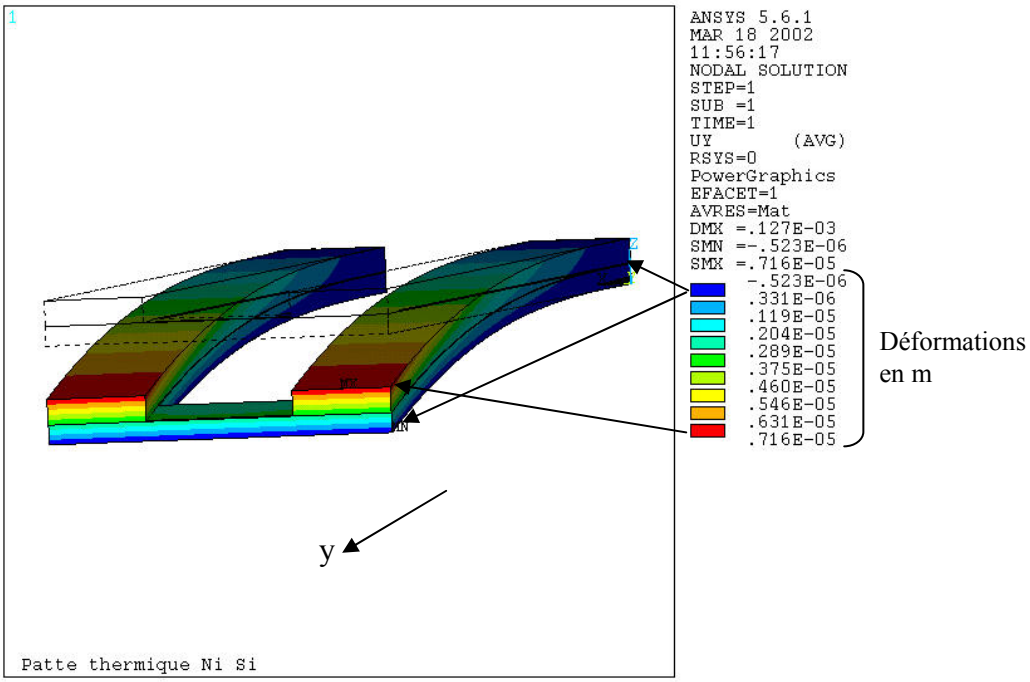


Figure 3.17 : déformations suivant l'axe y lorsque les deux bilames sont actionnés

Ces simulations numériques sont une première approche pour prédire les températures de fonctionnement et les déflexions induites, mais aussi pour évaluer l'importance des déformations suivant les autres axes pour s'assurer qu'elles ne perturberont pas le fonctionnement attendu.

4.2 Réalisation des micropattes en nickel sur silicium

Les micropattes telles qu'elles ont été conçues et dimensionnées sont réalisées selon le procédé qui sera décrit plus précisément au chapitre 4. Les micropattes après fabrication

restent solidaires du wafer de silicium. Les photos de ces réalisations sont présentées en Figure 3.18 et Figure 3.19.

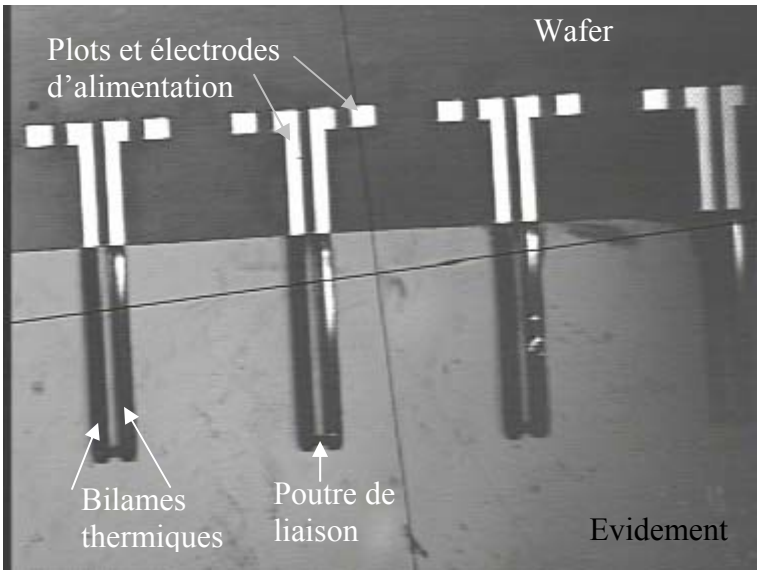


Figure 3.18 : photo des micropattes solidaires du wafer

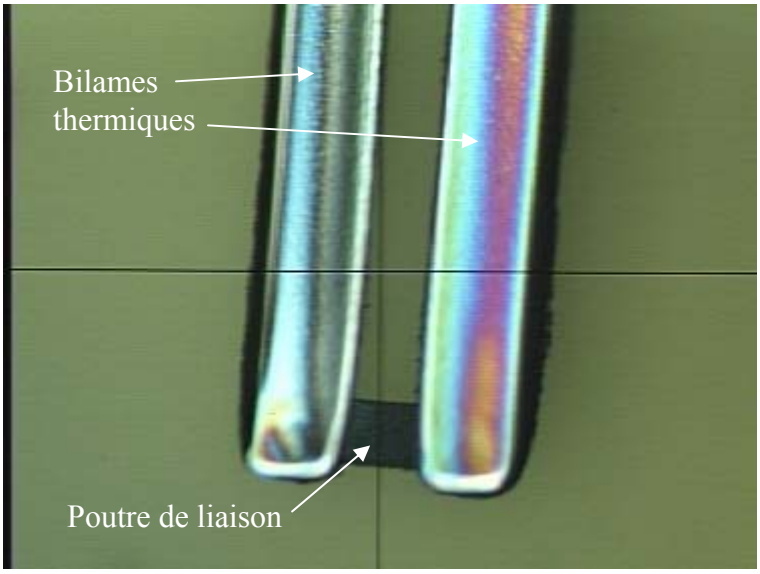


Figure 3.19 : photo de l'extrémité de la micropatte

Le dépôt de nickel est obtenu par électroformage. La photo de la Figure 3.19 montre que les flans de nickel sont bombés, ceci est dû à la révélation de la résine épaisse. La partie nickel des bilames thermiques s'en trouve élargie et l'écart entre les deux actionneurs de la micropatte est donc réduit.

4.3 Expérimentation des micropattes en nickel sur silicium

Pour expérimenter les micropattes, le wafer support des micropattes est collé sous un circuit imprimé (CI). Un bonding est effectué pour lier électriquement les plots d'alimentation des micropattes sur le wafer, avec les pistes du CI, comme le montre la Figure 3.20.

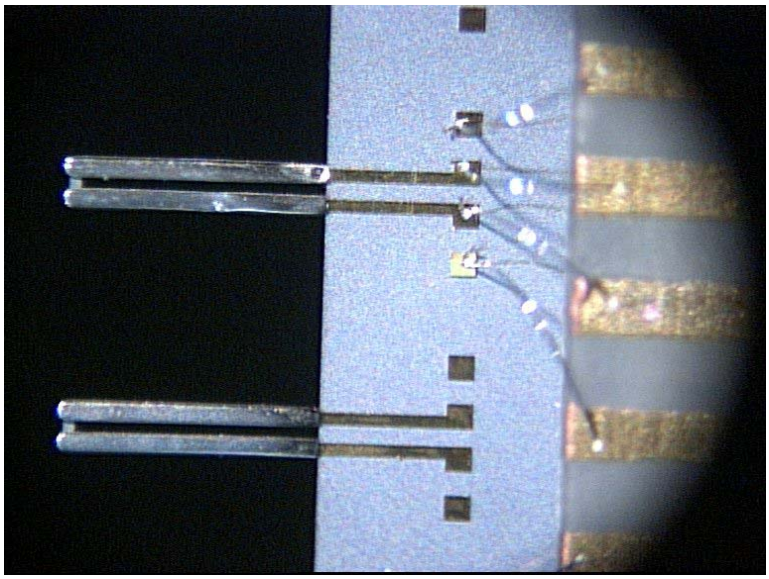


Figure 3.20 : photo du wafer support des micropattes collé sous un circuit imprimé, avec les fils de connexion

4.3.1 Mesure du comportement statique

Les micropattes sont alimentées sous des tensions continues de 1 à 4,5 volts. Le courant est mesuré, pour connaître la puissance électrique nécessaire à leur déflexion, et pour calculer leur résistance, qui est variable en fonction de la température. Le capteur utilisé dans les expérimentations est un capteur laser de 10 nanomètres de précision de mesure, sur une plage de mesure de 200 µm.

Dans un premier temps, les deux micro-actionneurs d'une micropatte sont alimentés simultanément pour mesurer son débattement maximal (correspondant à la Figure 3.2 b). La Figure 3.21 présente les résultats théoriques et expérimentaux qui sont proches l'un de l'autre.

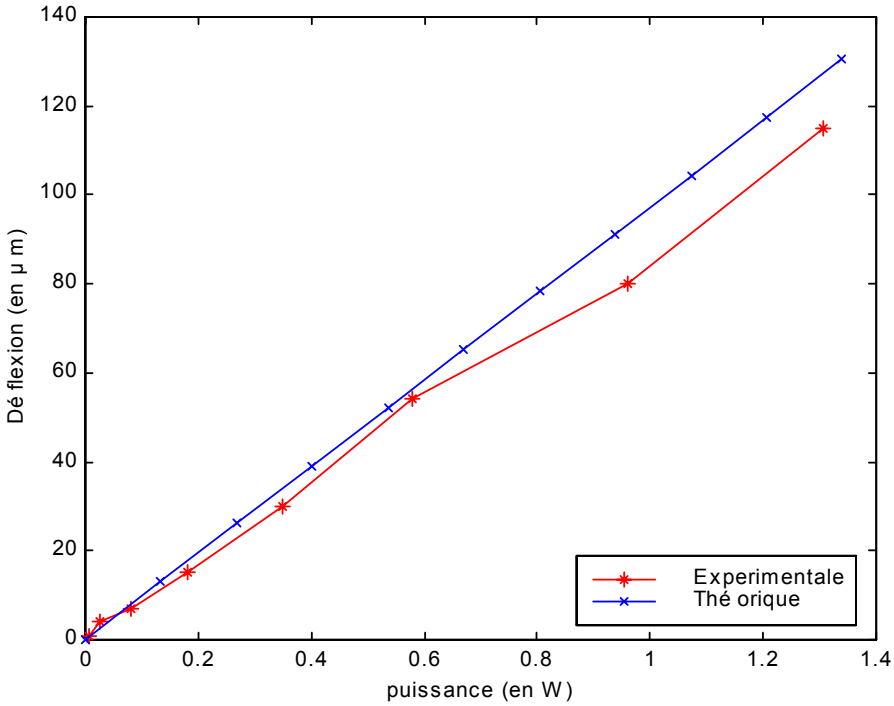


Figure 3.21 : déflexion de la micropatte en fonction de la puissance consommée

Cette expérimentation permet aussi de tracer la force développée (Figure 3. 22), connaissant la relation qui relie la force et la déflexion (déjà donnée au chapitre précédent), l'évolution de l'effort développé par un actionneur de la micropatte en fonction de la déflexion de celui-ci.

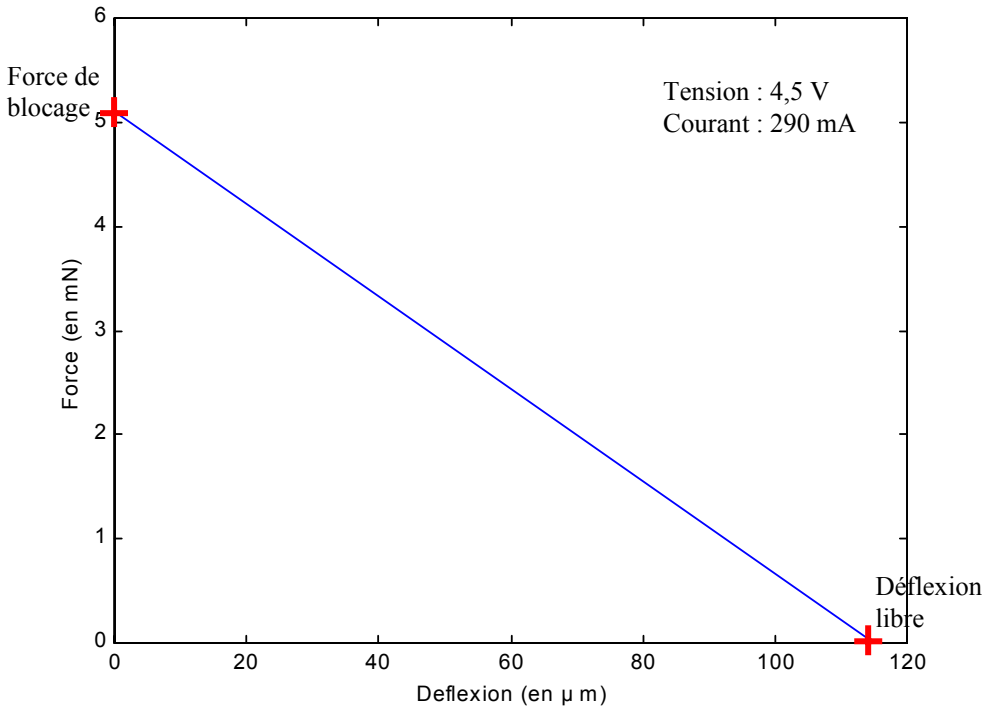


Figure 3. 22 : force développée par la micropatte en fonction de la déflexion

Dans un deuxième temps, un seul micro-actionneur est alimenté pour mesurer la pente maximale obtenue par la poutre de liaison (correspondant à la Figure 3.2 c). L'angle α que forme la poutre de liaison avec l'horizontal (Figure 3.23) est tracé Figure 3.24.

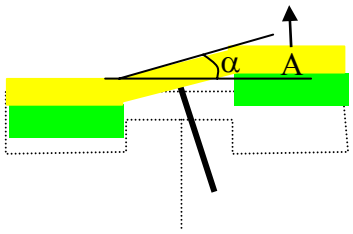


Figure 3.23 : schéma de l'angle α que forme la poutre de liaison avec l'horizontale

Les inclinaisons mesurées sont conformes aux résultats de simulation numérique, c'est à dire faibles. L'angle α est inférieur à 7°. Il faut noter ici que l'angle augmente avec la déflexion.

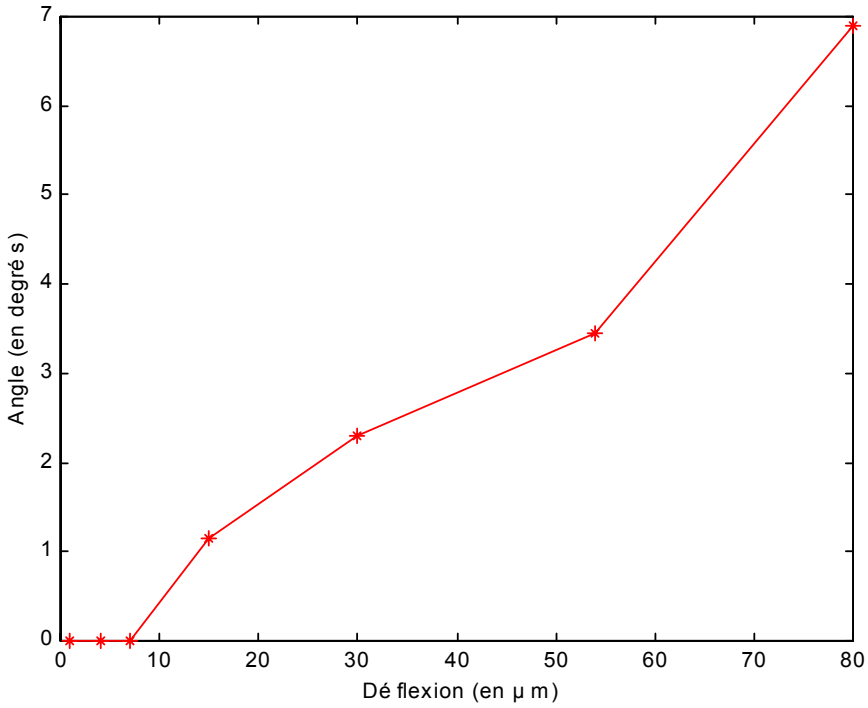


Figure 3.24 : angle α

La Figure 3.25 présente l'évolution de la résistance de l'actionneur en fonction de la puissance fournie. Cette puissance est directement proportionnelle à la température.

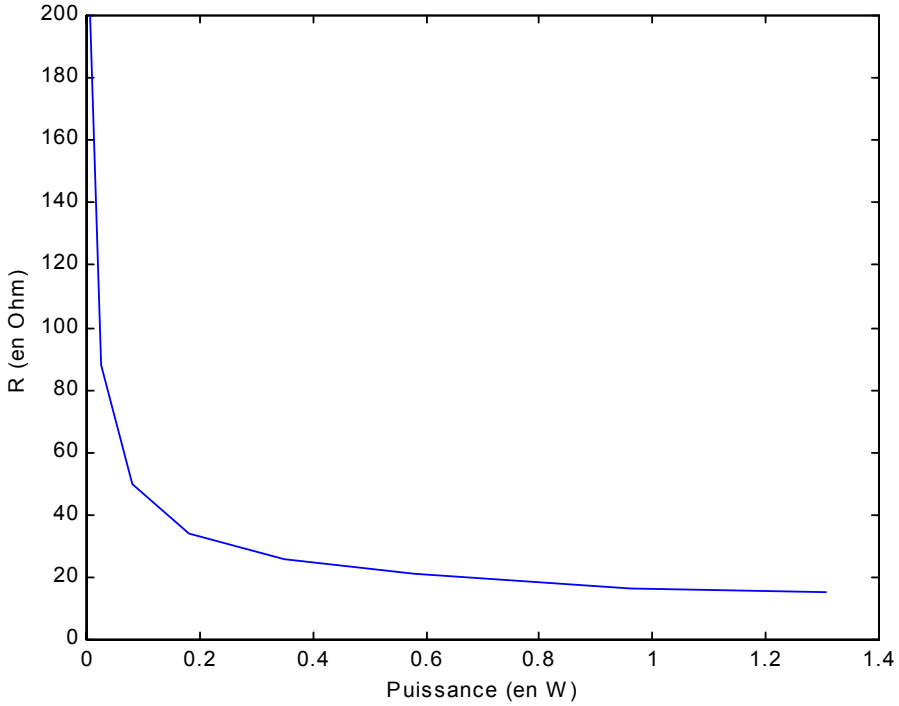


Figure 3.25 : évolution de la résistance de l'actionneur en fonction de la puissance électrique

La résistance d'un micro-actionneur diminue avec la température, ceci est certainement dû à la qualité de la liaison ohmique entre le nickel et le silicium, mais surtout au fait qu'un semi-conducteur comme le silicium voit sa résistivité diminuer avec l'élévation de la température.

En effet, la résistivité d'un semi-conducteur diminue pour des températures autour de 300 K en fonction du dopage de celui-ci.

4.3.2 Mesure du comportement dynamique

Des essais dynamiques (réponse à un échelon) nous ont permis de tracer les courbes de gain et de phase d'un bilame, dont les résultats sont présentés Figure 3.26 et Figure 3.27.

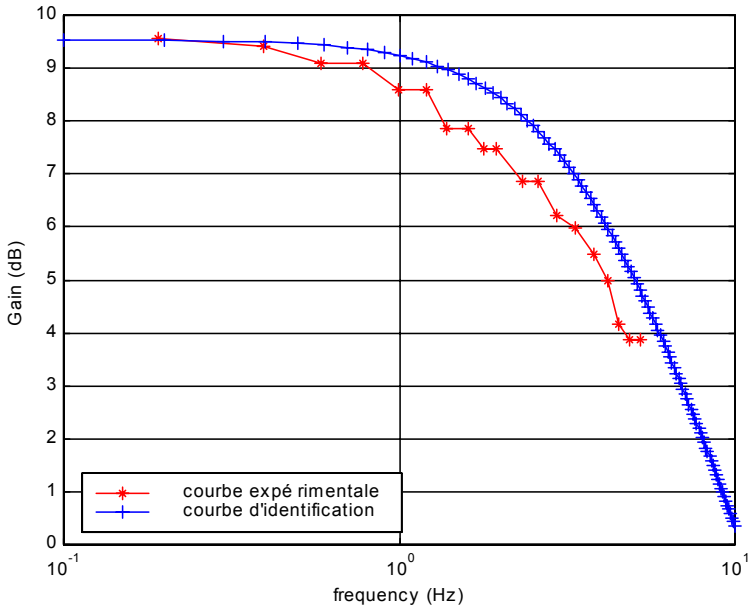


Figure 3.26 : courbe de gain du micro-actionneur en nickel sur silicium

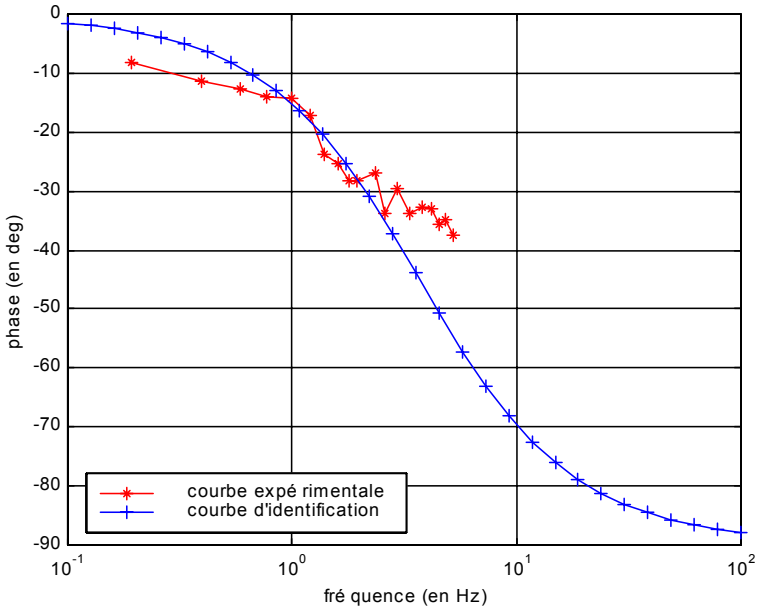


Figure 3.27 : courbe de phase du micro-actionneur en nickel sur silicium

Ces courbes montrent que le micro-actionneur se comporte en première approximation comme un système du premier ordre dont la fonction de transfert serait : $F(p) = \frac{K}{1+\tau p}$ avec K = 3 et τ = 43 ms. Les courbes de gain et de phase de cette fonction de transfert sont tracées Figure 3.26 et Figure 3.27 et appelées courbe d'identification.

Concernant la dynamique des micro-actionneurs, la fréquence de coupure mesurée est de 3,7 Hz (à 3dB d'atténuation).

4.4 Performances des micropattes en nickel sur silicium

A partir des expérimentations précédemment décrites de ces premières micropattes, il est possible de déduire les caractéristiques attendues pour le microrobot.
Concernant la consommation électrique, la mise en action des deux bilames thermiques d'une micropatte nécessite une puissance de 1,3 W pour un débattement de 120 µm. Pour marcher, le microrobot emploiera ses pattes trois par trois, il nécessitera donc 3,9 W par pas. L'énergie consommée par la micropatte, connaissant la fréquence maximale de fonctionnement du micro-actionneur qui est de 3,7 Hz, sera de E = P.t = 3,9 x 0,405 = 1,58 J.
Concernant la charge que le microrobot sera capable de porter et le poids du microrobot lui même (six micropattes et le corps), il est possible de les calculer.
Une micropatte est constituée de deux micro-actionneurs et d'une poutre de liaison.
Un micro-actionneur est constitué de :

- 2 mm x 0,1 mm x 0,02 mm de silicium
- 2 mm x 0,1 mm x 0,02 mm de nickel.

La poutre de liaison est constituée de :

- 0,1 mm x 0,15 mm x 0,02 mm de silicium.

Sachant que les densités sont :

- pour le silicium : $2,34 .10^{-3}$ g/mm^3
- pour le nickel : $8,9 .10^{-3}$ g/mm^3.

Un micro-actionneur a un poids de 45 µg.
La poutre de liaison a un poids de 0,7 µg.
Le poids d'une micropatte est donc de 90,6 µg.
Si nous considérons que le corps a un volume de silicium de 2 mm x 3,5 mm x 0,12 mm, son poids sera de 2 mg.
Finalement, le poids total du microrobot est de : 2,54 mg.
D'après la Figure 3. 22, l'effort que peut développer une micropatte pour une déflexion nulle est de 5mN, soit l'équivalent de 510 mg. La charge maximum du microrobot est de 510 x 6 mg c'est-à-dire 3,06 g ou encore 1200 fois son propre poids.

La Figure 3.28 permet de déduire l'équation suivante :

$L_{pas} = L_{pied} \times \sin\alpha \times \cos\alpha = 16,93$ µm

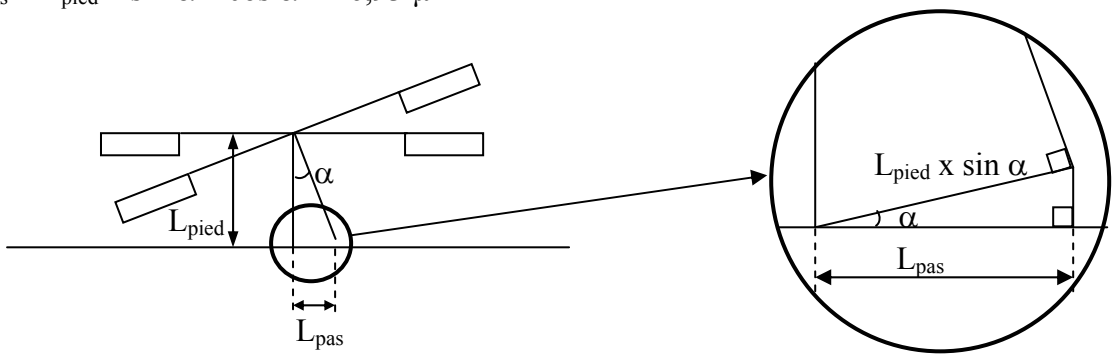


Figure 3.28 : schéma de détermination de la longueur du pas

La pente mesurée de la micropatte (7° max) et la longueur du pied (140 µm) permettent d'évaluer la longueur d'un pas à 17 µm.

Avec la fréquence de coupure mesurée d'un actionneur (2,46 Hz), la vitesse de notre microrobot sera d'environ 42 µm/s.

Le récapitulatif des performances attendues pour le microrobot avec des micropattes constituées de bilames en nickel sur silicium sont données dans le Tableau 3. 1.

Caractéristiques	**Micropattes type 1 Ni/Si**
Dimensions d'un actionneur	2 x 0,1 x 0.04 mm^3
Déflexion	120 µm
Charge portée	3,06 g
Poids propre du microrobot	2,54 mg
Puissance électrique par patte	1,3 W
Energie consommée par pas (pour trois pattes)	1,58 J
Longueur calculée du pas	17 µm
Fréquence d'actionnement de la patte	2,46 Hz
Vitesse attendue	42 µm/s

Tableau 3. 1: récapitulatif des performances attendues pour le microrobot

4.5 Conclusion

Les résultats des expérimentations de la déflexion (120 µm) sont tout à fait conformes aux résultats théoriques, qu'ils soient obtenus à partir du modèle défini au chapitre 2 (127 µm), ou par simulation numérique (132 µm). Néanmoins, force est de constater que la micropatte est très gourmande en énergie (1,58 J/pas pour trois patte).
Les meilleures piles au lithium ont actuellement une densité d'énergie massique de l'ordre de 140 à 160 Wh/kg, soit 600 Joules par gramme. Des densités de 190 à 200 Wh/kg sont escomptées vers 2003 [3].
Si l'on extrapole à un microrobot possédant six pattes fonctionnant trois par trois pour avancer et pouvant porter 3 g, le microrobot embarquera 1800 J, soit de quoi effectuer un peu plus de 1100 pas, ou encore un fonctionnement pendant 7 à 8 minutes.
Une amélioration s'impose pour obtenir une consommation énergétique moindre.

5 Micropattes en résine SU-8 sur silicium : type 2

Les constats faits à l'issue des expérimentations précédentes nous amènent à effectuer un retour sur conception. Il nous semble indispensable de diminuer la consommation énergétique. Pour ce faire, nous avons pensé remplacer le nickel par un matériau possédant un coefficient d'expansion thermique plus grand, pour obtenir des déflexions identiques avec des températures inférieures, ce qui entraînera une consommation énergétique moindre.
Les polymères ont alors été étudiés, notamment le polyimide qui a été employé dans les microrobots "microfourmi", "marcheur omnidirectionnel" et "marcheur" présenté au chapitre 1.
C'est un matériau qui a quelques inconvénients :

- il n'est pas disponible en petite quantité (250 gr mini),
- il est coûteux (environ 1400 € pour le produit, son solvant et son révélateur),
- il possède une durée d'utilisation faible (quelques mois),
- il se conserve à une température de –18 °C.

Le polyimide que nous envisagions d'utiliser est un polyimide photosensible. La résine SU-8 est une résine photosensible, couramment utilisée en microfabrication, et son plus gros inconvénient est la difficulté de la retirer après révélation. Or dans notre cas, nous souhaitons conserver cette résine, et si possible qu'elle ne se détériore pas lors des étapes de fabrication

finale, et notamment la RIE. Pour l'utilisation que nous souhaitons en faire, la résine SU-8 est donc un matériau qui possède de nombreux avantages :

- elle est disponible dans la salle blanche de l'IMFC,
- elle possède une durée d'utilisation très longue,
- elle se conserve à température ambiante.

Les propriétés physiques du polyimide et de la résine SU-8 sont assez proches, comme le montre le Tableau 3.2. Les propriétés physiques du nickel sont données à titre de comparaison.

Propriétés mécaniques	polyimide	résine SU-8	nickel
Module d'Young	2.5 GPa	4 GPa	199 GPa
Coefficient thermique d'expansion linéaire	45.10^{-6} K^{-1}	52.10^{-6} K^{-1}	$13,3.10^{-6}$ K^{-1}
Conductivité thermique	0,22 $W.m^{-1}.K^{-1}$	0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$	91 $W.m^{-1}.K^{-1}$

Tableau 3.2 : comparatif des propriétés mécaniques du polyimide et de la résine SU-8

Comparons les performances statiques de deux bilames de mêmes dimensions (L = 2 mm, l = 100 µm, e_{Si} = 20 µm et e_{SU-8} ou $e_{polyimide}$= 60 µm), pour une élévation de température de 50 °C, l'un constitué de SU-8/Si et l'autre de polyimide/Si. Les résultats donnés dans le Tableau 3.3 montrent que les résultats sont meilleurs dans le cas du bilame SU-8/Si tant pour la déflexion que pour l'effort généré.

bilame	polyimide/Si	SU-8/Si
déflexion (en µm)	126,4	160,8
effort généré (en mN)	6,1	8

Tableau 3.3 : résultats de comparaisons de deux bilames constituée de polyimide/Si et SU-8/Si

La Figure 3.29 présente l'évolution de la déflexion en fonction de l'élévation de température pour les deux bilames pris en exemple.

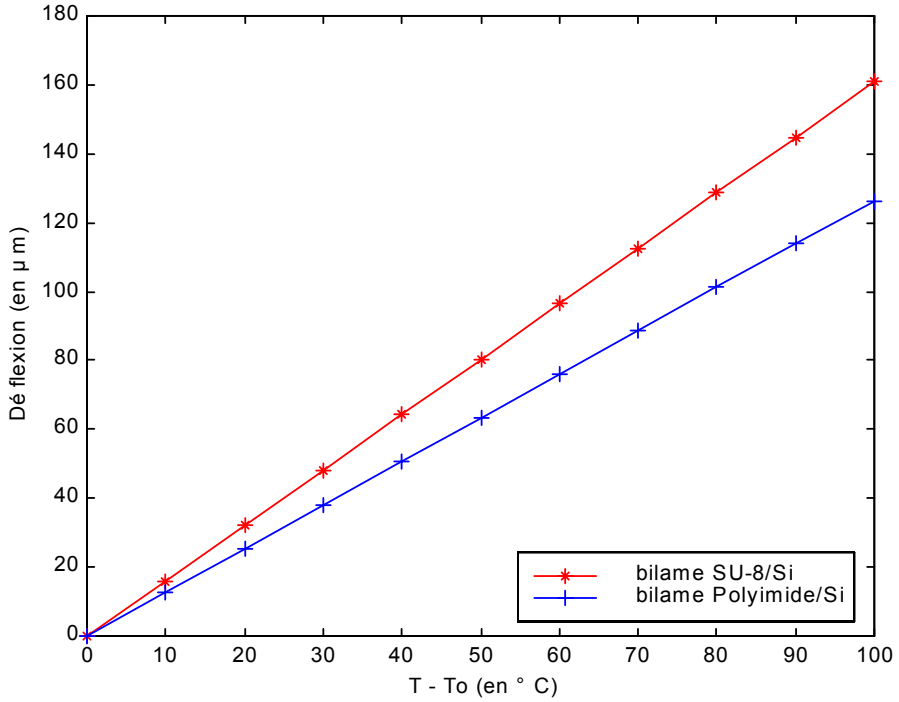


Figure 3.29 : comparaison de la déflexion d'un bilame en SU-8/Si et d'un bilame en Polyimide/Si

La Figure 3. 30 présente l'effort développé en fonction de l'élévation de température pour ces deux mêmes bilames.

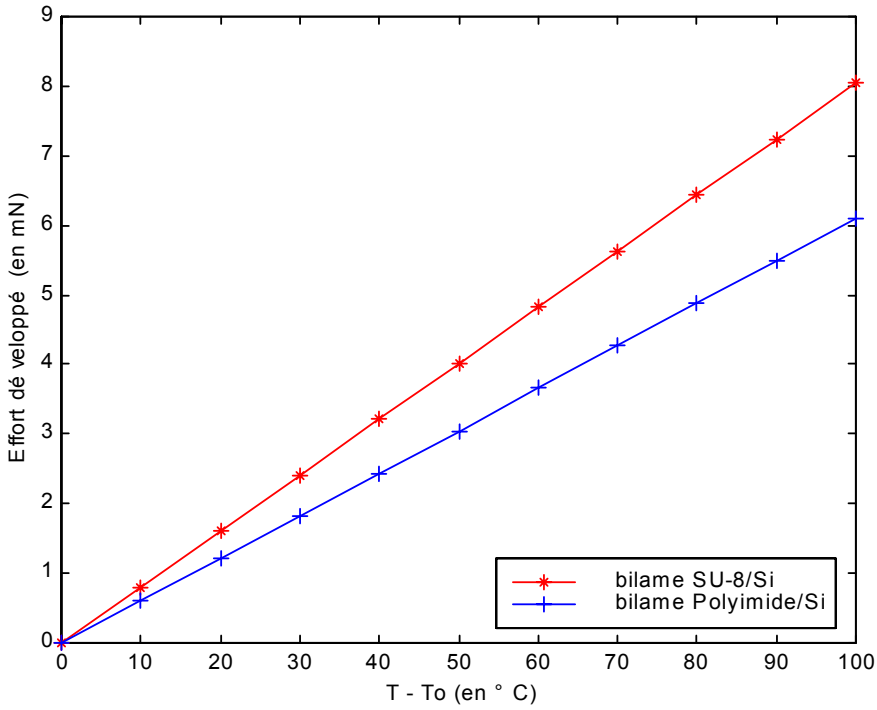


Figure 3. 30 : comparaison de l'effort développé par un bilame en SU-8/Si et d'un bilame en Polyimide/Si

Une nouvelle génération de micropattes a alors été étudiée, dans laquelle l'électroformage de nickel a été remplacé par de la résine SU-8. Les dimensions des micropattes sont les mêmes que précédemment. Le fonctionnement est différent des micro-actionneurs précédents. Le micro-actionneur est constitué, comme l'indique la Figure 3.31, d'un support de silicium, d'une couche isolante ouverte à une extrémité, d'une couche métallique et d'une couche de résine SU-8.

Figure 3.31 : schéma du micro-actionneur thermique SU-8 sur silicium

La partie silicium est chauffée par effet Joule avec la fine couche métallique (d'environ 1 µm), comme l'indique la Figure 3.32. La partie résine SU-8 est chauffée par conduction thermique.

Figure 3.32 : schéma de circulation du courant pour chauffer le micro-actionneur par effet Joule

Si l'on se réfère à l'optimisation des épaisseurs, elle s'écrit :

$$\frac{e_{SU-8}}{e_{Si}} = \sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{SU-8}}} \qquad \text{d'où : } e_{SU-8} = e_{Si} \cdot \sqrt{\frac{E_{Si}}{E_{SU-8}}}$$

Or E_{Si} = 113 GPa et E_{SU-8} = 4 GPa, ce qui nous donne : $e_{SU-8} = 5,3.e_{Si}$.

Dans le cas présent, du fait que la résine SU-8 est chauffée par conduction thermique, et que sa conductivité thermique est très mauvaise, 0,2 W/m.K (en comparaison, la conductivité thermique du Ni vaut 91 W/m.K), l'élévation de température de la SU-8 sera donc d'autant plus lente que l'épaisseur de résine SU-8 sera importante. Nous limiterons donc la couche de SU-8 à une épaisseur qu'il est possible de chauffer rapidement par conduction, pour optimiser la déflexion et la fréquence de fonctionnement. D'autre part, la résine SU-8 est une résine épaisse qu'il est difficile de déposer en couche fine, l'épaisseur, fixée à 60 µm, sera donc un compromis entre ces deux contraintes. Nous décrirons plus en détail le procédé de dépôt de cette résine au chapitre 4.

5.1 Simulations numériques des températures et des déformations

De même que pour les micropattes en nickel sur silicium, des simulations numériques ont été réalisées sous Ansys, pour déterminer les températures et les déflexions. L'évolution de la température pour la position (b) de la Figure 3.2 lorsque les deux bilames sont actionnés est présenté en Figure 3.33. L'élévation de température est d'une centaine de degrés, elle est trois fois plus faible qu'avec les micro-actionneurs en nickel sur silicium. L'évolution de la température pour la position (c) lorsqu'un seul bilame est actionné est présentée en Figure 3.34. Sur cette dernière, on peut noter la différence de température entre les extrémités des deux bilames, qui est faible. Ceci est dû à la conductivité thermique de la poutre de liaison en silicium.

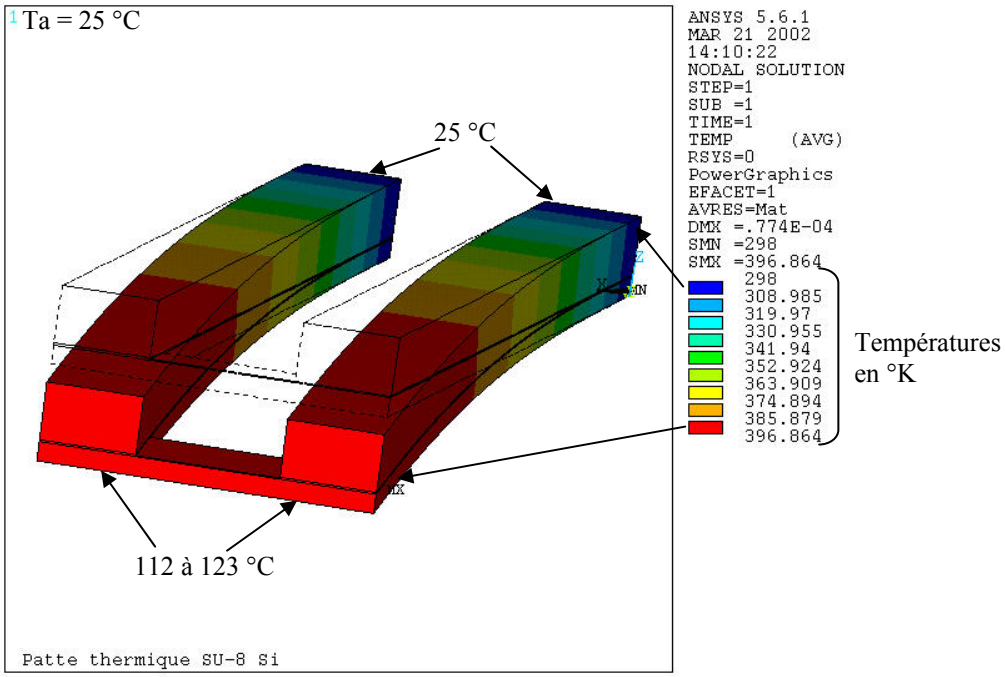


Figure 3.33 : températures le long de la micropatte lorsque les deux bilames sont actionnés

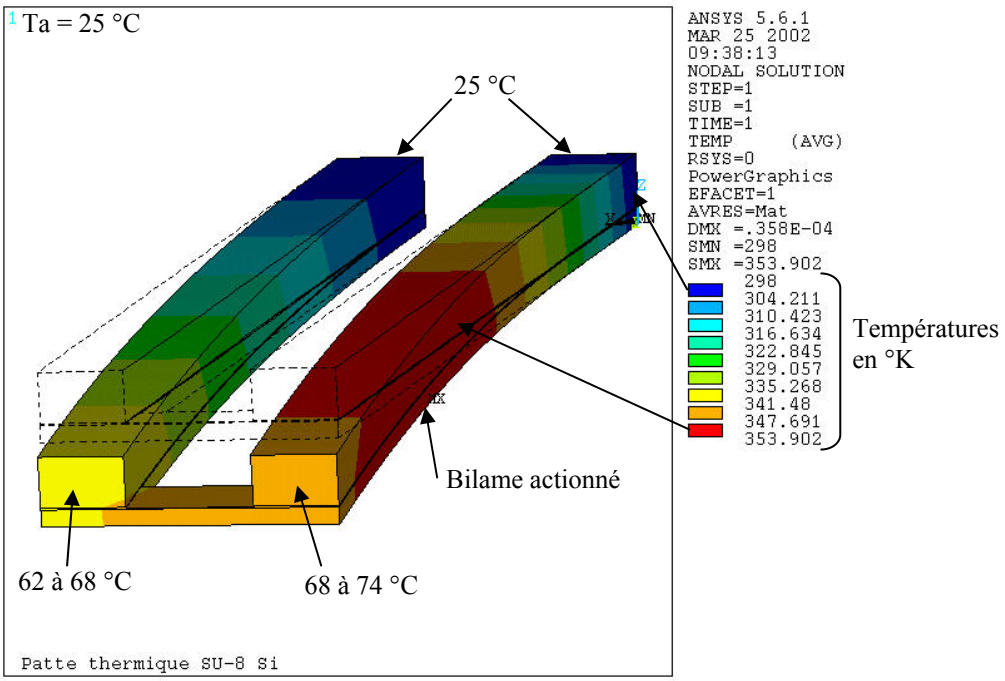


Figure 3.34 : températures le long de la micropatte lorsqu'un seul bilame est actionné

Les Figure 3.35 et Figure 3.36 montrent la déflexion en z de la micropatte respectivement si deux bilames sont alimentés ou un seul. La déflexion maximale est de 77 µm pour l'extrémité, pour une élévation de température de 98 °C. Les simulations pour le modèle de micropatte nickel sur silicium donnait une déflexion de 127 µm pour une élévation de température de 308 °C. L'économie de consommation énergétique sera donc notable.

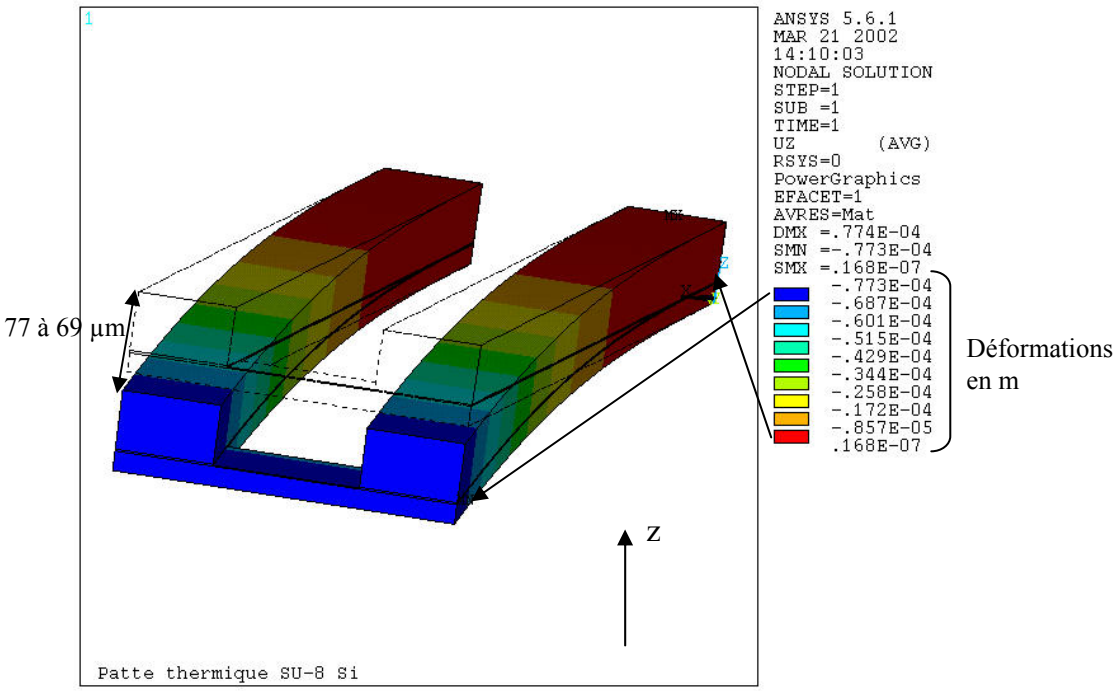


Figure 3.35 : déformations suivant l'axe z lorsque les deux bilames sont actionnés

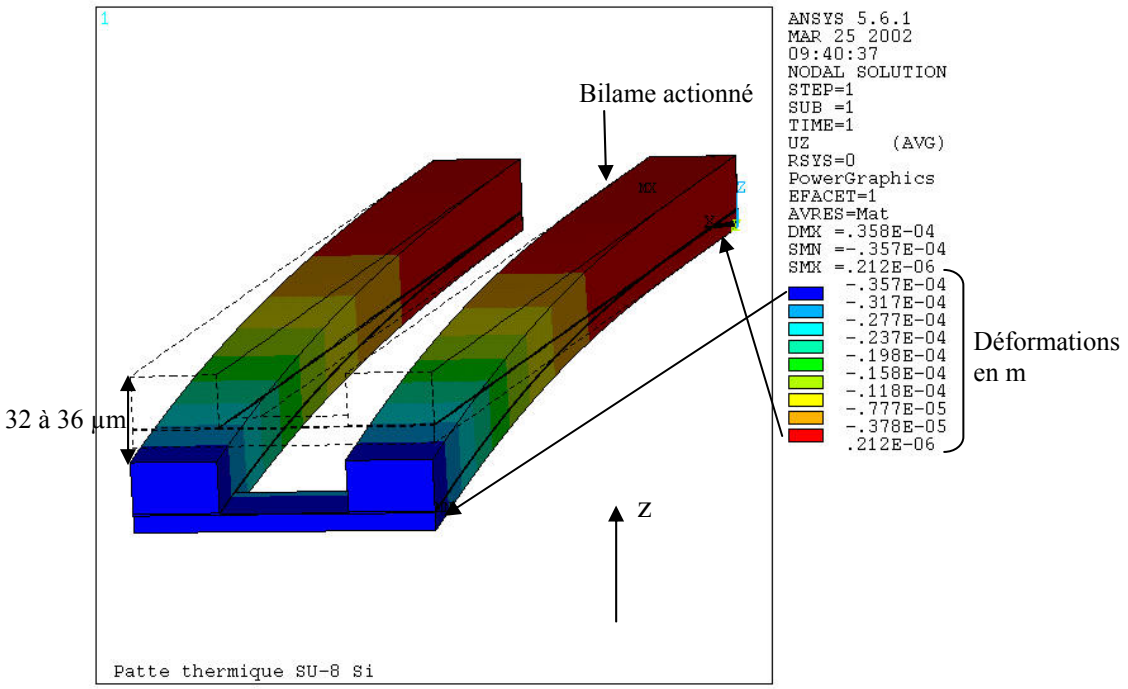


Figure 3.36 : déformations suivant l'axe z lorsque un seul bilame est actionné

De même qu'avec les simulations précédentes, celles-ci nous permettent de déduire que l'inclinaison de la poutre de liaison sera faible. Au maximum, les deux bilames auront une différence de déflexion de 12 µm, ce qui donne un angle maximum de 4,6°. La longueur du pied permet alors de calculer la longueur du pas, comme nous l'avons montré avec la Figure 3.28.

Les déformations sur les deux autres axes sont représentées aux Figure 3.37 et Figure 3.38. Elles montrent que les déformations sont très faibles, et qu'elles n'influeront pas sur le fonctionnement en flexion des bilames.

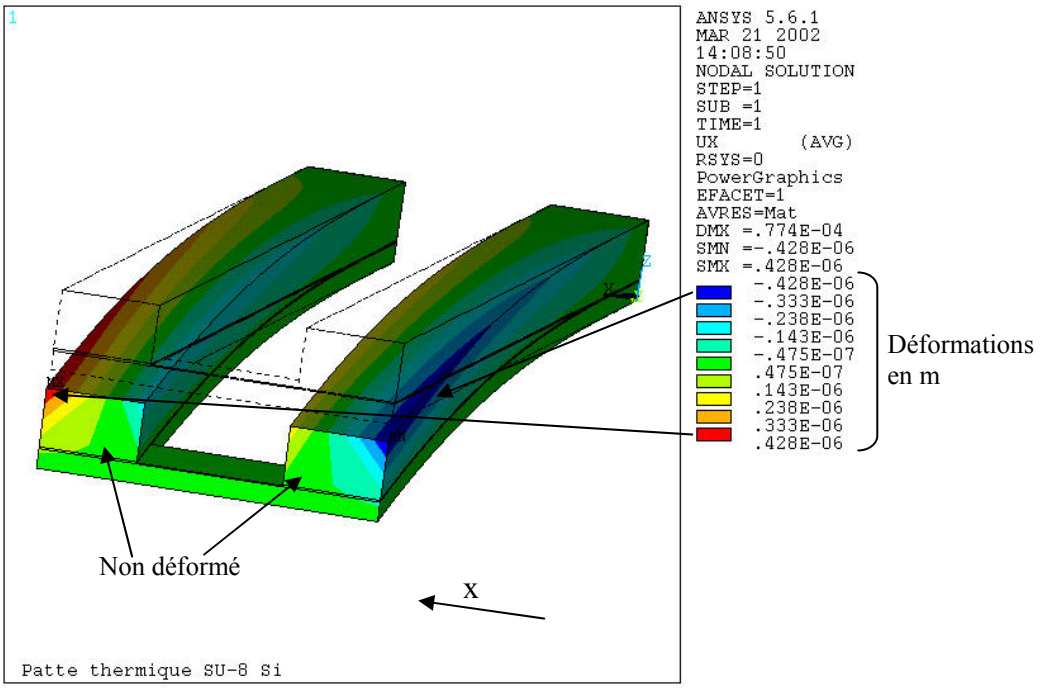


Figure 3.37 : déformations suivant l'axe x lorsque les deux bilames sont actionnés

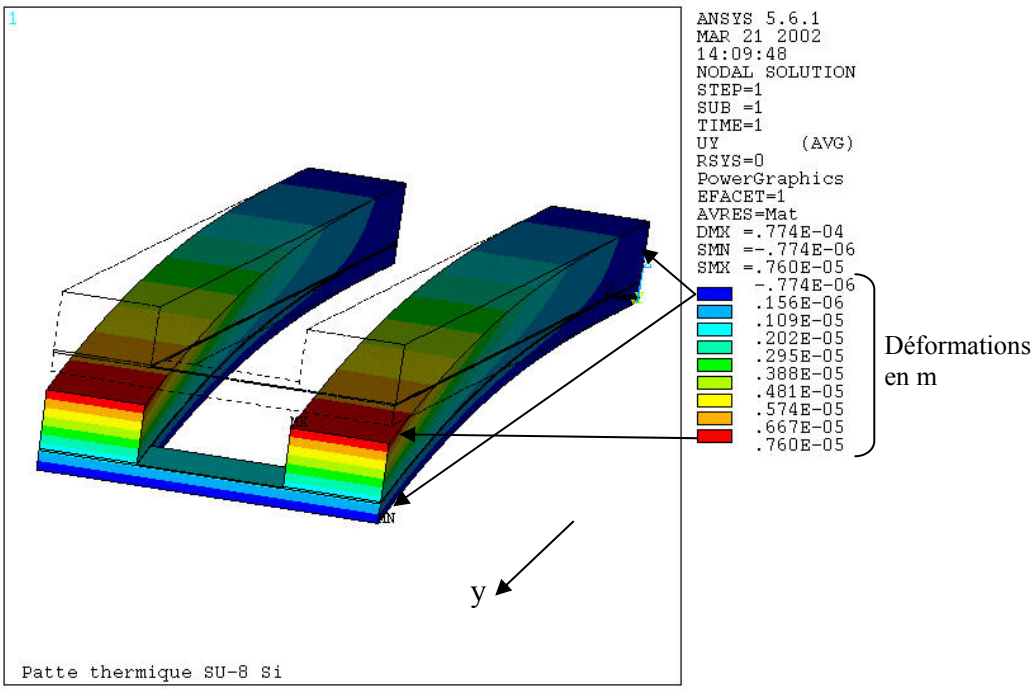


Figure 3.38 : déformations suivant l'axe y lorsque les deux bilames sont actionnés

Ces simulations numériques sont une première approche pour évaluer les températures de fonctionnement et l'importance des déflexions, mais aussi pour déduire les avantages qu'apportent l'utilisation de la résine SU-8 par rapport au Nickel, c'est à dire :

- des températures de fonctionnement inférieures qui entraînent une consommation d'énergie moindre (cette dernière sera calculée plus loin),
- des déflexions similaires.

5.2 Expérimentation des micropattes en résine SU-8 sur silicium

Ces micropattes, comme les précédentes sont réalisées par microfabrication. Les micropattes après fabrication restent solidaires du wafer. Les photos de ces réalisations sont données aux Figure 3.39 et Figure 3.40.

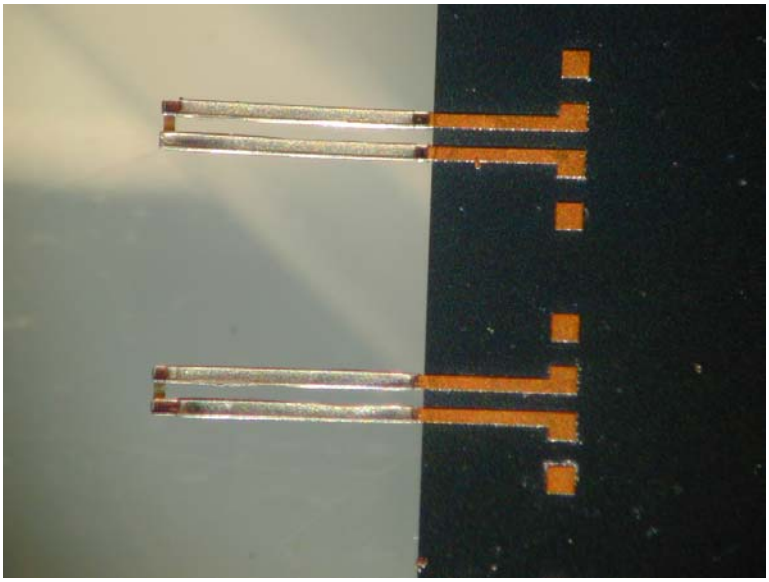


Figure 3.39 : photo des micropattes solidaires du wafer

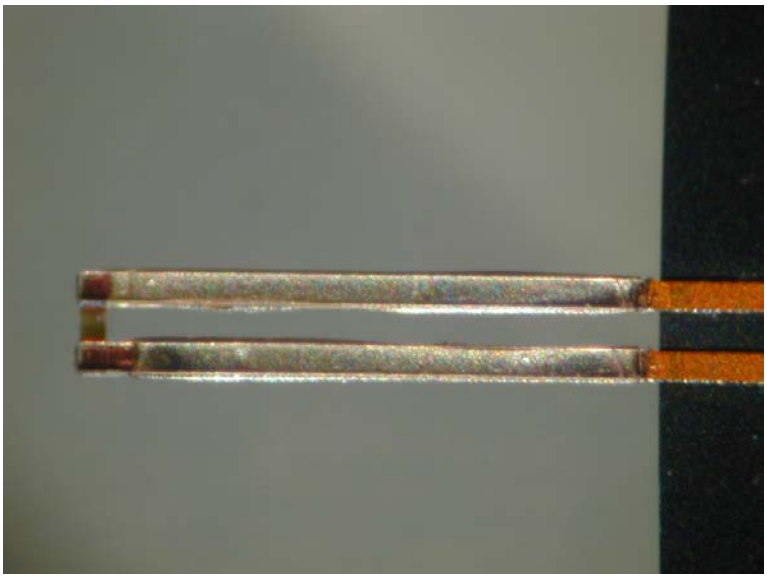


Figure 3.40 : photo d'une micropatte en SU-8 sur silicium

De même que pour les micropattes précédentes, pour leur expérimentation, le wafer support des micropattes est collé sous un circuit imprimé. Un bonding est effectué pour lier électriquement les plots d'alimentation des micropattes sur le wafer, avec les pistes du CI, comme le montre la Figure 3. 41.

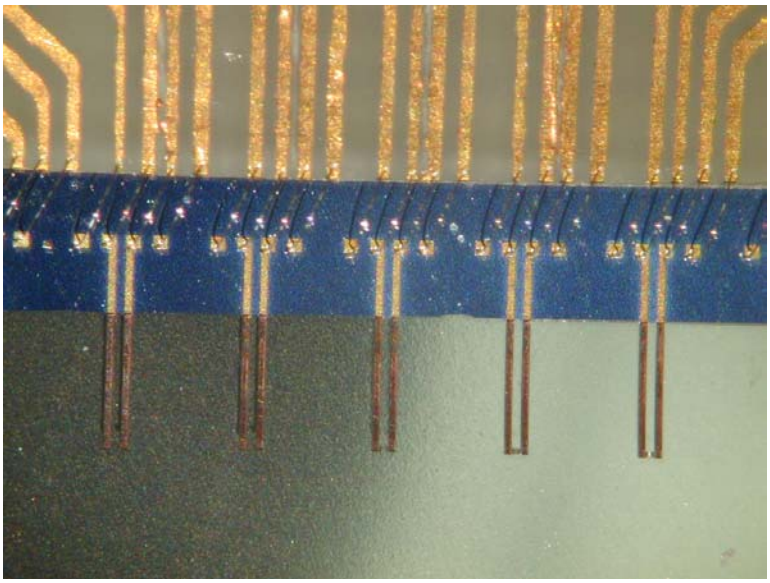


Figure 3. 41 : photo du wafer support des micropattes collé sous un circuit imprimé

5.2.1 Mesure du comportement statique

Chaque micropatte est alimentée par des tensions continues allant de 2,5 à 4 volts. Le courant est mesuré, pour connaître la puissance nécessaire à la déflexion d'une micropatte. La déflexion est mesurée par le capteur laser dont les caractéristiques ont été précédemment décrites.

Dans un premier temps, les deux micro-actionneurs de la micropatte sont alimentés simultanément pour mesurer son débattement maximal (correspondant à la Figure 3.2 b). La Figure 3.42 donne les résultats théoriques et expérimentaux.

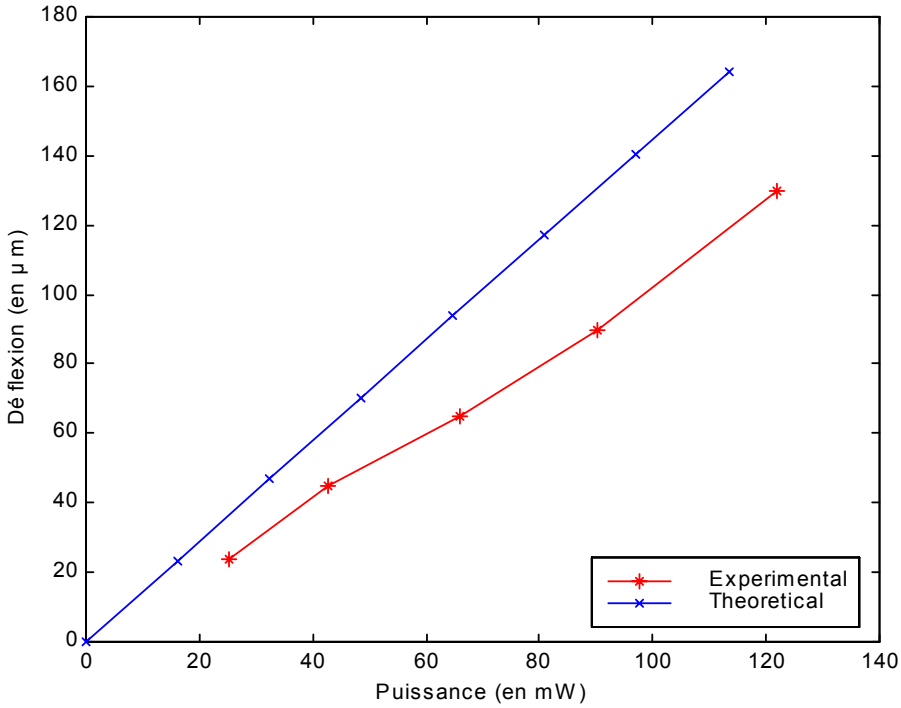


Figure 3.42 : déflexion théorique et expérimentale de la micropatte en fonction de la puissance consommée

Cette expérimentation permet aussi de tracer l'évolution de l'effort développé par l'actionneur en fonction de la déflexion de celui-ci.

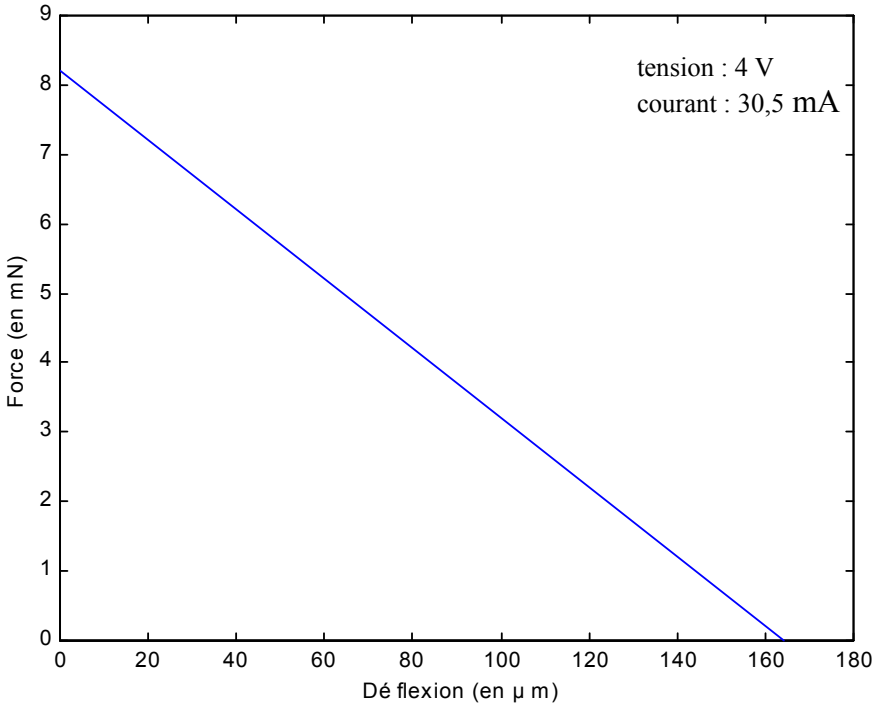


Figure 3.43 : force développée par la micropatte en fonction de la déflexion

Dans un deuxième temps, un seul micro-actionneur est alimenté pour mesurer la pente maximale obtenue par la micropoutre de liaison (correspondant à la Figure 3.2 c). Les inclinaisons mesurés sont conformes aux résultats de la simulation numérique.

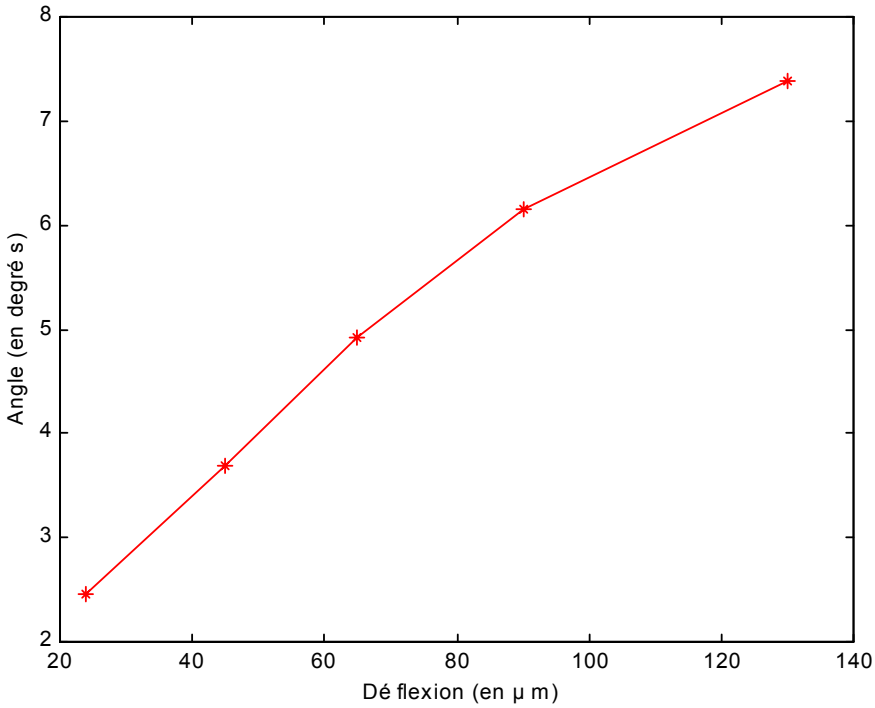


Figure 3.44 : angle α

La différence de déflexion entre les deux actionneurs est mesurée avec un capteur laser, et l'angle d'inclinaison de la poutre de liaison en est déduit. L'angle de la poutre de liaison est semblable à celle des micropattes précédentes, car les déflexions des micro-actionneurs SU-8/Si sont identiques à celles obtenues avec les micro-actionneurs Ni/Si.

5.2.2 Expérimentation dynamique

Des essais dynamiques (réponse à un échelon) nous ont permis de tracer les courbes de gain et de phase du micro-actionneur, dont les résultats sont donnés Figure 3.45 et Figure 3.46.

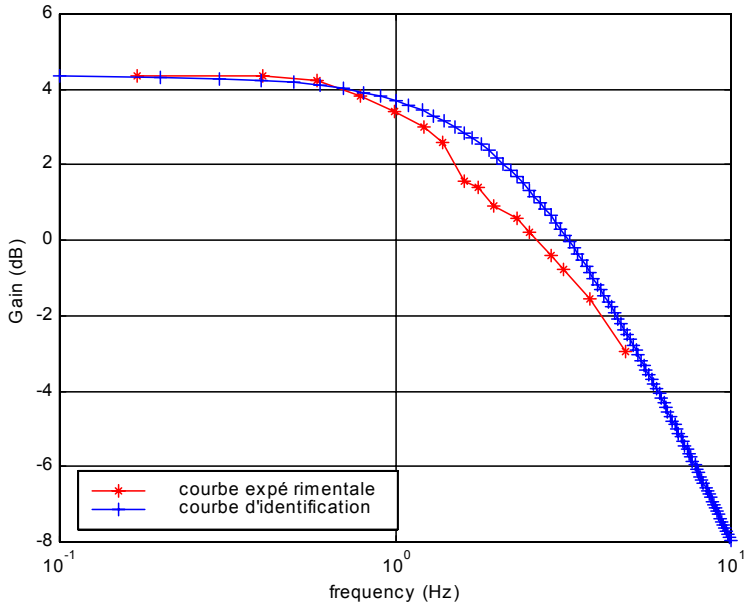


Figure 3.45 : courbe du gain du micro-actionneur en résine SU-8/Si

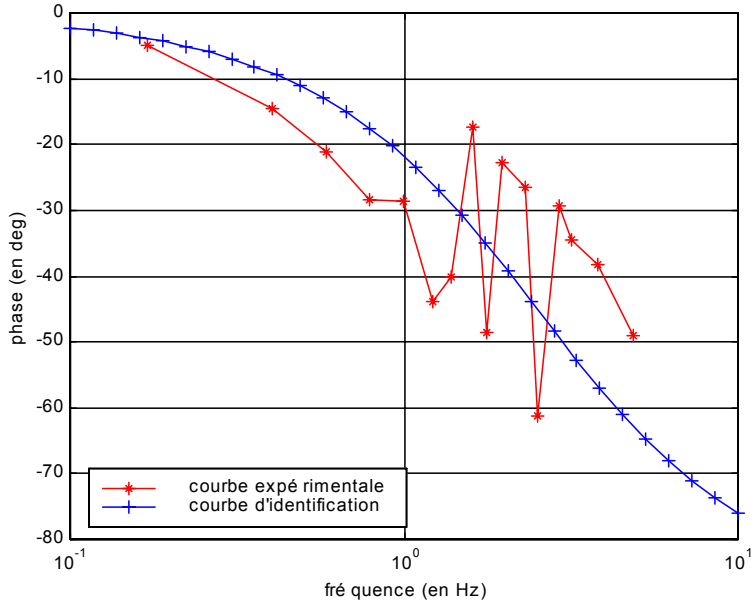


Figure 3.46 : courbe de phase du micro-actionneur en résine SU-8 sur silicium

Concernant la dynamique des micro-actionneurs, la fréquence de coupure mesurée est de 2,5 Hz (à 3dB d'atténuation).
Ces courbes montrent que le micro-actionneur se comporte en première approximation comme un système du premier ordre dont la fonction de transfert serait : $F(p) = \dfrac{K}{1+\tau p}$ avec K = 1,65 et τ = 63,6 ms. Les courbes de gain et de phase de cette fonction de transfert sont tracées Figure 3.45 et Figure 3.46 et appelées courbe d'identification.

La Figure 3.47 présente la comparaison des résultats expérimentaux et d'identification des micro-actionneurs Ni/Si et SU-8/Si.

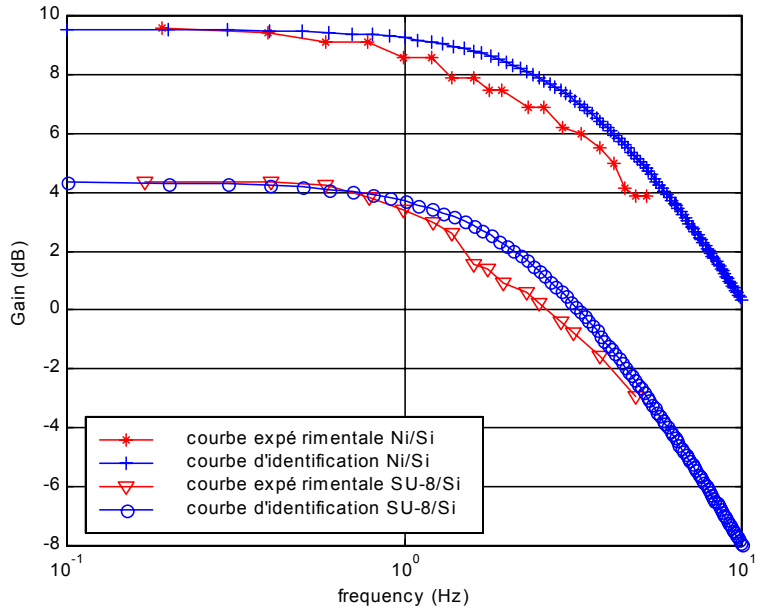


Figure 3.47 : comparaison des courbes de gain des micro-actionneurs Ni/Si et SU-8/Si

Les micro-actionneurs Ni/Si ont une fréquence de coupure de 3,7 Hz, et les micro-actionneurs en SU-8/Si ont une fréquence de coupure de 2,5 Hz. Cette différence est due au fait que la

résine SU-8 est chauffée par conduction, ce qui est plus lent que pour les micro-actionneurs en Ni/Si qui étaient directement chauffées par effet Joule.

5.3 Performances des micropattes en résine SU-8 sur silicium

A partir des expérimentations de ces micropattes, il est possible de déduire les caractéristiques attendues pour le microrobot [1] et [2].
Concernant la consommation électrique, la mise en action de deux bilames thermique d'une micropatte nécessite une puissance de 120 mW pour un débattement de 120 µm. Pour marcher, le microrobot emploiera ses pattes trois par trois, il nécessitera donc 360 mW par pas. L'énergie consommée par la micropatte, connaissant la fréquence de fonctionnement d'un micro-actionneur qui est de 2,5 Hz, sera de E = P.t = 0,36 x 0,6 = 0,216 J. Nous avons donc divisé la consommation énergétique par un peu plus de 7 par rapport aux micropattes en nickel sur silicium.

Concernant la charge que le microrobot sera capable de porter et le poids du microrobot lui même (six micropattes et le corps), il est possible de les calculer.
Une micropatte est constituée de deux micro-actionneurs et d'une poutre de liaison.
Un micro-actionneur est constitué de :

- 2 mm x 0,1 mm x 0,02 mm de silicium
- 2 mm x 0,1 mm x 0,06 mm de SU-8.

La poutre de liaison est constituée de :

- 0,1 mm x 0,15 mm x 0,02 mm de silicium.

Sachant que les densités sont :

- pour le silicium : $2,34 .10^{-3}$ g/mm^3
- pour la résine SU-8 : $1,42 .10^{-3}$ g/mm^3.

Un micro-actionneur a un poids de 26,4 µg.
La poutre de liaison a un poids de 0,7 µg.
Le poids d'une micropatte est donc de : 53,5 µg.
Si nous considérons que le corps a un volume de silicium de 2 mm x 3,5 mm x 0,12 mm, son poids sera de 2 mg.
Finalement, le poids total du microrobot est de : 2,32 mg.
D'après la Figure 3.43, l'effort que peut développer une micropatte pour une déflexion nulle est de 8mN, soit l'équivalent de 815 mg. La charge maximum du microrobot est de 815 x 6 mg c'est-à-dire 4,89 g ou encore 2000 fois son propre poids.
La pente mesurée de la micropatte (7° max) et la longueur du pied (140 µm) permettent d'évaluer la longueur d'un pas à 17 µm (Figure 3.28).
Avec la fréquence de coupure mesurée d'un actionneur (1,67 Hz), la vitesse de notre microrobot sera d'environ 28,4 µm/s.
Le récapitulatif des performances attendues pour le microrobot avec des micropattes constituées de bilames en résine SU-8 sur silicium sont données dans le Tableau 3.4, avec les résultats des micropattes en nickel sur silicium pour comparaison.

Caractéristiques	micropatte type 2 SU-8/Si	micropatte type 1 Ni/Si
Dimensions d'un actionneur	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0,04 mm^3
Déflexion	120 µm	120 µm
Charge portée	4,89 g	3,06 g
Poids propre du microrobot	2,32 mg	2,54 mg
Puissance électrique par patte	120 mW	1,3 W
Energie consommée par pas (pour trois pattes)	216 mJ	1,58 J
Longueur calculée du pas	17 µm	17 µm
Fréquence d'actionnement de la patte	1,67 Hz	2,46 Hz
Vitesse attendue	28,4 µm/s	42 µm/s

Tableau 3.4 : récapitulatif et comparatif des performances attendues pour le microrobot

5.4 Conclusion

Les résultats des expérimentations de la déflexion (120 µm) sont inférieurs aux résultats théoriques obtenus à partir du modèle défini au chapitre 2 (160 µm), et supérieurs aux résultats de simulation numérique (77µm, ceci est certainement dû à une température plus faible pour la simulation numérique que lors de l'expérimentation). Le Tableau 3.4 nous permet de comparer les résultats attendus des micropattes en Ni/Si avec les micropattes en SU-8/Si. Les dimensions sont similaires, et les déflexions aussi. Avec les micropattes en résine SU-8 sur silicium, la fréquence d'actionnement est plus faible, ceci est dû au chauffage par conduction thermique qui est plus lent que le chauffage par effet Joule. Par contre, la puissance consommée pour une micropatte pour effectuer un pas est divisée par un peu plus de 7, et la charge portée multipliée par 1,6.

Avec un microrobot possédant six pattes fonctionnant trois par trois pour avancer et pouvant porter 4,9 g, le microrobot embarquera 2940 J, soit de quoi effectuer un peu plus de 13000 pas, ou encore un fonctionnement pendant plus de 2 heures.

Néanmoins, la poutre de liaison a une inclinaison faible. L'augmentation de cette inclinaison permettrait d'améliorer la longueur du pas, et par conséquent la vitesse de déplacement du microrobot.

6 Micropattes à actionneurs en opposition et liaison de 60 µm : type 3

Les constats faits à l'issue des expérimentations des micropattes en résine SU-8 sur silicium précédentes, nous amènent à deux modifications essentielles pour augmenter l'inclinaison de la poutre de liaison. En effet, augmenter l'inclinaison de la poutre de liaison revient à améliorer la longueur du pas, et donc la vitesse de déplacement du microrobot. La première modification consiste à mettre les actionneurs en opposition. Lorsqu'un seul actionneur est alimenté, il entraîne la micropatte dans le sens de sa déflexion (l'inclinaison de la poutre de liaison étant faible), et lorsque les deux actionneurs sont alimentés, il défléchissent en sens opposé, et forcent de la poutre de liaison à s'incliner. Dans le cas précédent, c'est le retour dans la position initiale de l'un des deux actionneurs qui inclinait la poutre de liaison. Ceci nous oblige à repenser le cycle de fonctionnement de la micropatte. La deuxième modification consiste à remplacer le silicium de la poutre de liaison par de la résine SU-8 et à l'allonger pour augmenter sa souplesse. Pour cela, les actionneurs seront séparés non plus de 150 µm, mais de 500 µm.

6.1 Structure

La Figure 3.48 donne le schéma de la nouvelle structure de la micropatte avec ses dimensions. Les deux actionneurs sont positionnés en opposition, et les flèches à leur extrémité indiquent le sens dans lequel va s'opérer leur déflexion.
Le choix des épaisseurs de chacun des matériaux a été donné au paragraphe 5.

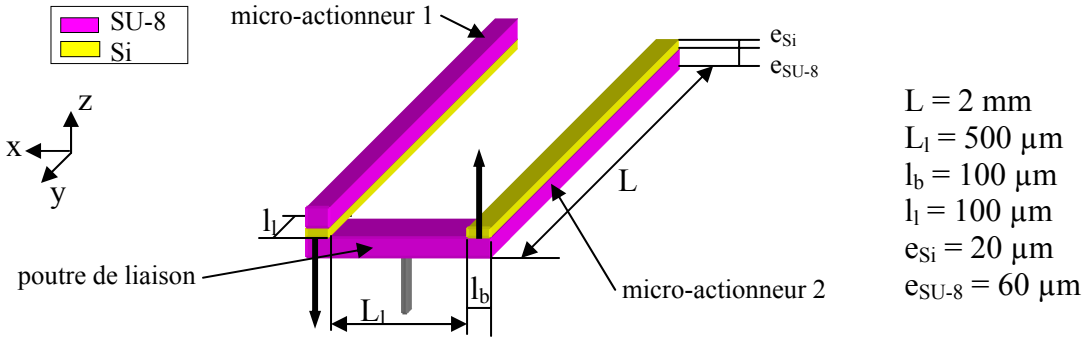


Figure 3.48 : schéma de la nouvelle structure de la micropatte

6.2 Principe de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement est un peu modifié par rapport au précédent. Les deux actionneurs nous permettent toujours d'obtenir deux degrés de liberté. C'est le cycle d'actionnement des bilames qui est changé, et une position du cycle supprimée.

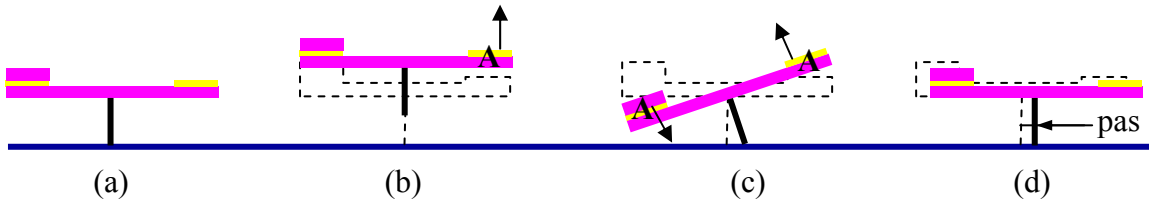


Figure 3.49 : schéma du cycle de fonctionnement
(a) position initiale de la micropatte,
(b) le bilame qui défléchit vers le haut est actionné et la micropatte se lève, la rigidité de la poutre de liaison est suffisante pour entraîner la micropatte complète,
(c) les deux bilames sont actionnés, la micropatte s'incline, et le pied repose au sol,
(d) l'actionnement des bilames est relâché, et la micropatte reprend sa forme initiale en effectuant un pas

Sur le schéma de la Figure 3.49, les bilames actionnés sont représentés par la lettre A, et des flèches indiquent leur sens de déplacement. D'autre part, la position initiale de la micropatte est tracée en pointillés.

6.3 Simulation numérique

Des simulations numériques ont été réalisées sous Ansys, pour déterminer les gradients de température et de déflexion. L'évolution de la température pour la position (b) de la Figure 3.49 lorsque un seul bilame est actionné, est donné à la Figure 3.50. Il est à noter sur cette figure la mauvaise conduction thermique que nous avons déjà évoquée, qui permet au bilame non alimenté de rester à température ambiante.

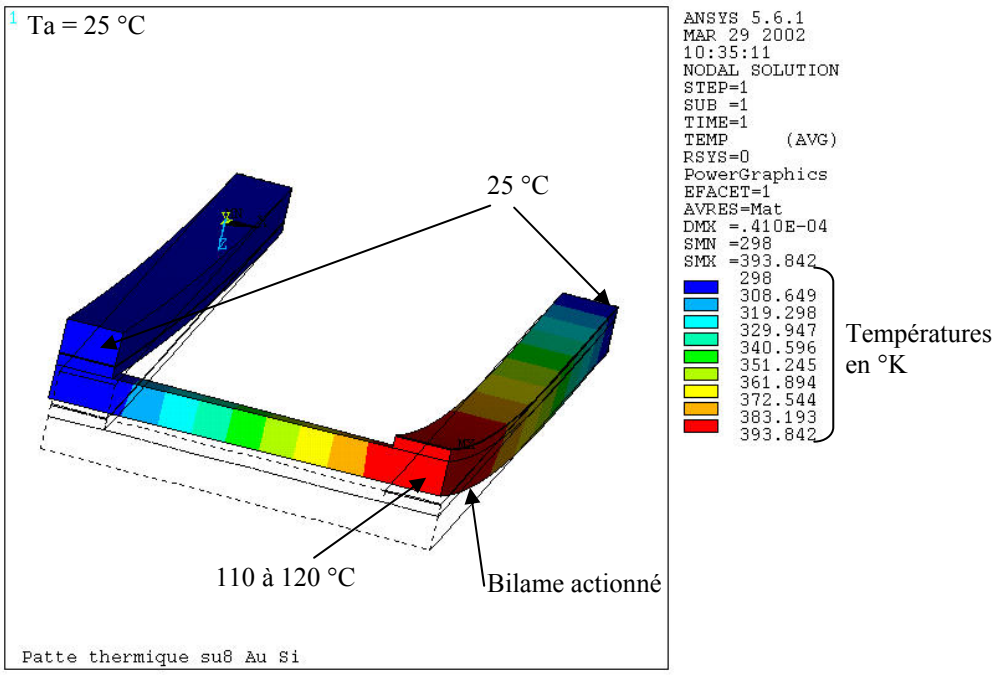


Figure 3.50 : températures le long de la micropatte lorsqu'un seul bilame est actionné

L'évolution de la température pour la position (c) de la Figure 3.49 lorsque les deux bilames sont actionnés, elle est donnée à la Figure 3.51.

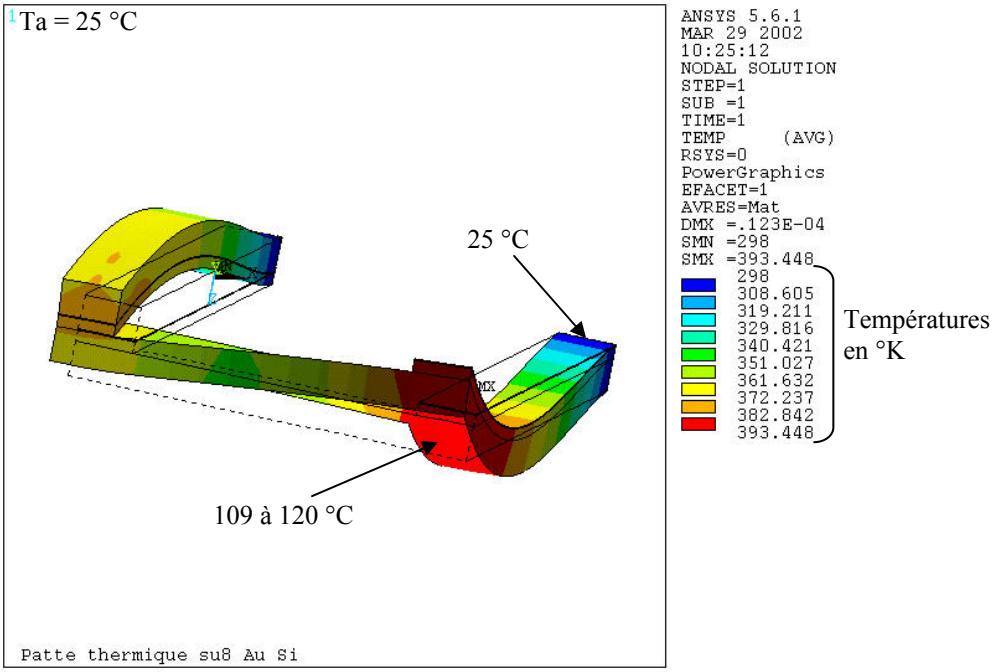


Figure 3.51 : températures le long de la micropatte lorsque les deux bilames sont actionnés

Les Figure 3.52 et Figure 3.53 présentent la déflexion en z de la micropatte respectivement si deux bilames sont alimentés ou un seul.

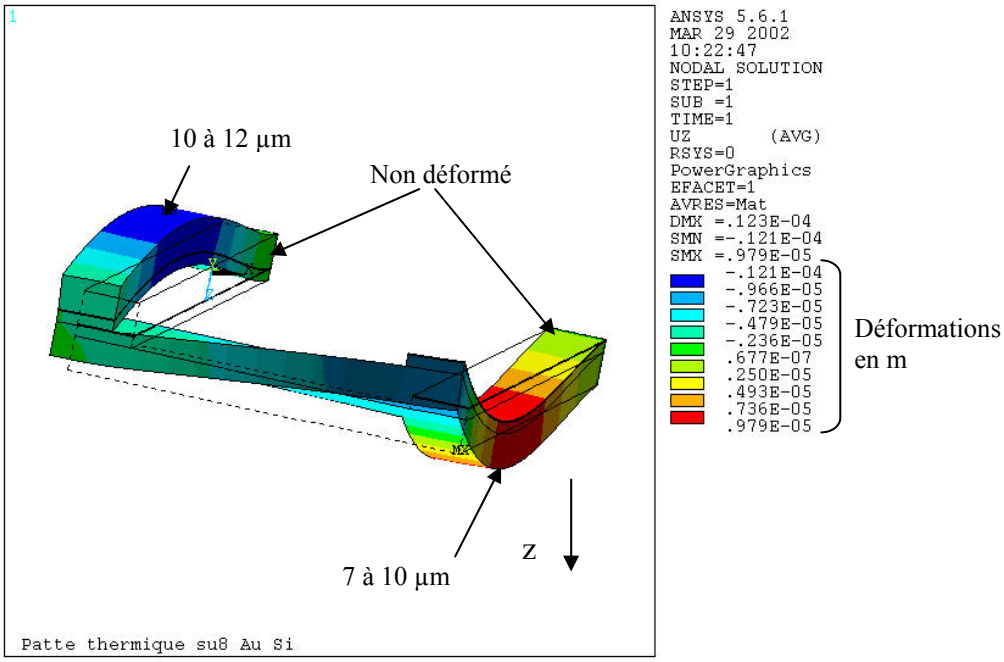


Figure 3.52 : déformations suivant l'axe z lorsque les deux bilames sont actionnés

La Figure 3.52 permet de déterminer l'inclinaison de la poutre de liaison qui sera supérieure à 1,6 degré, ce qui est très faible.

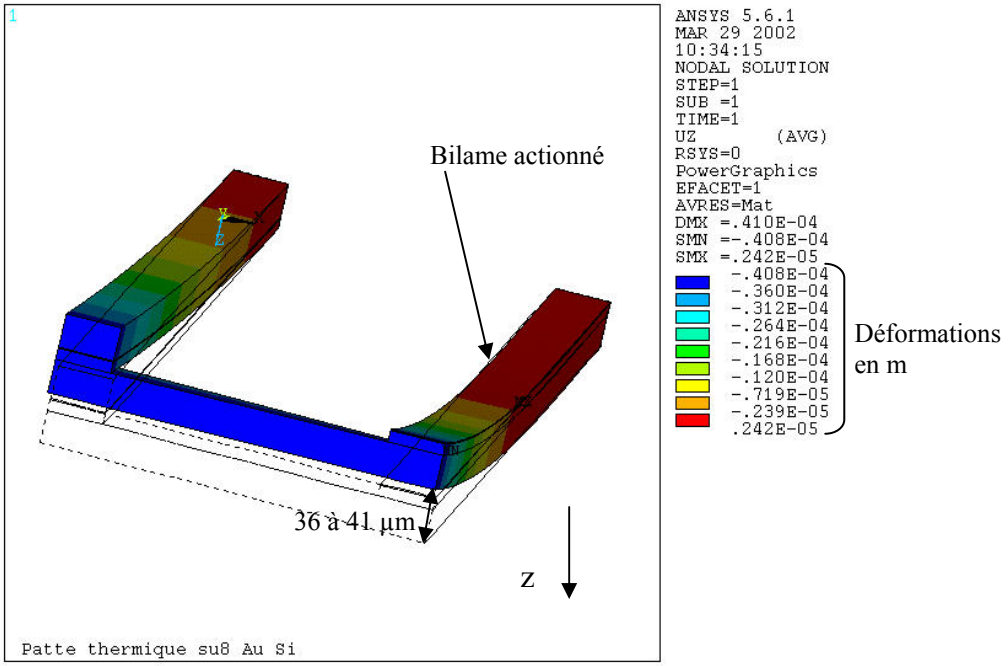


Figure 3.53 : déformations suivant l'axe z lorsqu'un seul bilame est actionné

Les Figure 3.54 et Figure 3.55 donnent les déformations suivant les axes x et y lorsque les deux bilames sont alimentés. Ces résultats montrent que les déformations en x et en y sont très faibles, de l'ordre de 5 µm, et ne perturberont pas le fonctionnement de la micropatte.

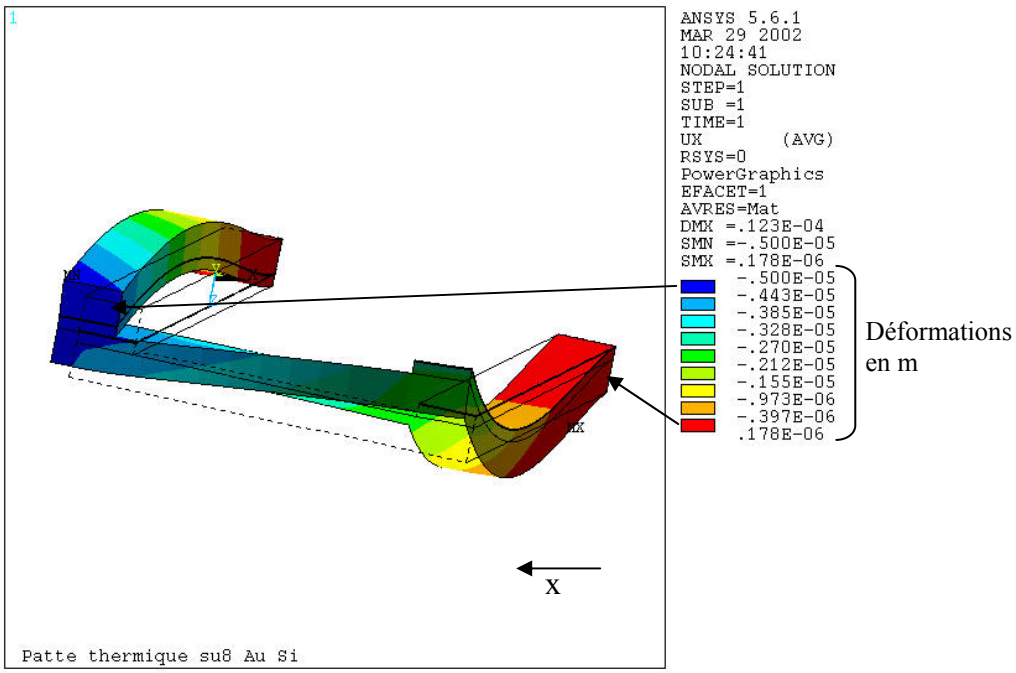


Figure 3.54 : déformations suivant l'axe x lorsque les deux bilames sont actionnés

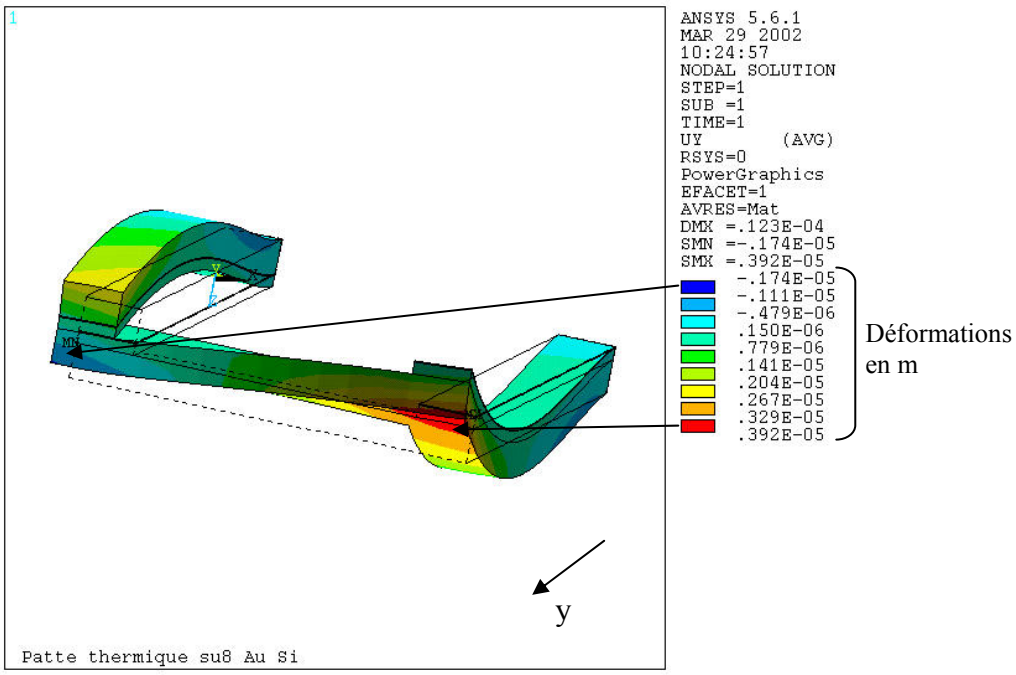


Figure 3.55 : déformations suivant l'axe y lorsque les deux bilames sont actionnés

Ces résultats de simulation numérique confirment que les modifications structurelles améliorent l'inclinaison de la poutre de liaison. Ces résultats montrent aussi un arc-boutement des micro-actionneurs.

6.4 Réalisation

Comme les précédentes, ces micropattes sont réalisées par microfabrication. Les micropattes après fabrication restent solidaires du wafer. Les photos de ces réalisations sont présentées aux Figure 3.56 et Figure 3.57.

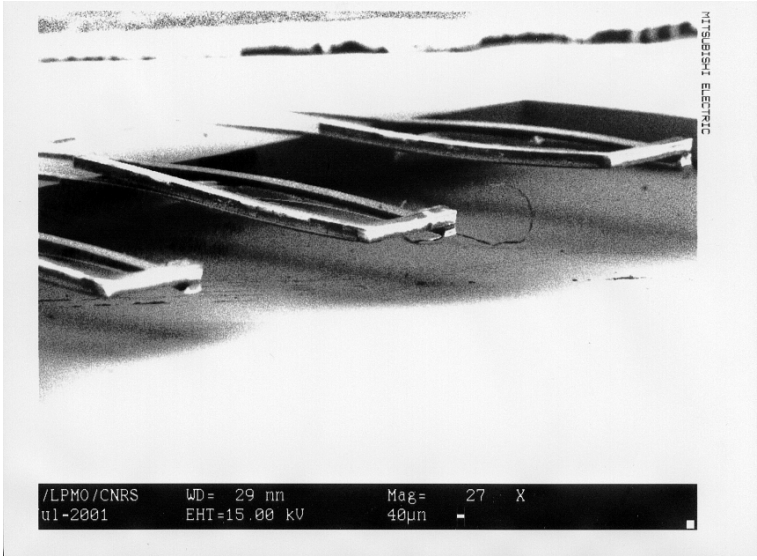


Figure 3.56 : photo Microscope Electronique à Balayage (MEB) des micropattes avec les actionneurs en opposition et la liaison en résine SU-8 de 60 µm

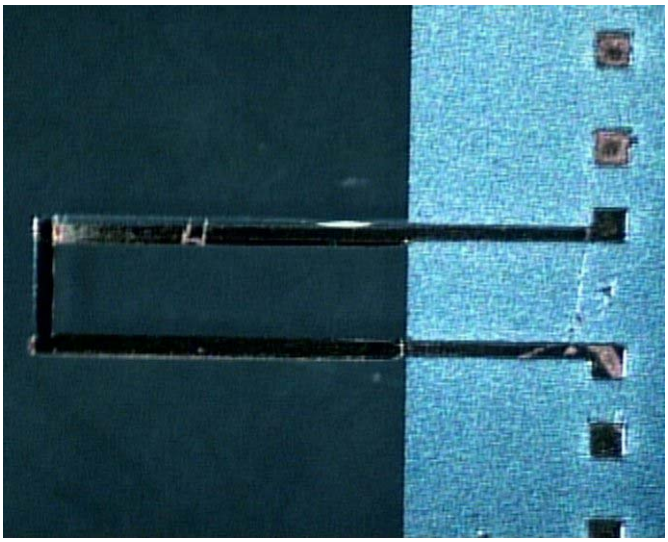


Figure 3.57 : vue de dessus des micropattes

6.5 Expérimentation

La micropatte est alimentée par des tensions continues allant de 1 à 4 volts. Le courant est mesuré, pour connaître la puissance nécessaire à la déflexion de la micropatte. La déflexion est mesurée par le capteur laser dont les caractéristiques ont été précédemment décrites.
Cette fois, les micropattes seront alimentées par des pointes d'alimentations, ce qui évite le collage et le bonding.
Dans un premier temps, seul le micro-actionneur qui lève la micropatte est alimenté pour mesurer le débattement maximum de la micropatte (correspondant à la Figure 3.49 b). La Figure 3.58 donne les résultats théoriques et expérimentaux.

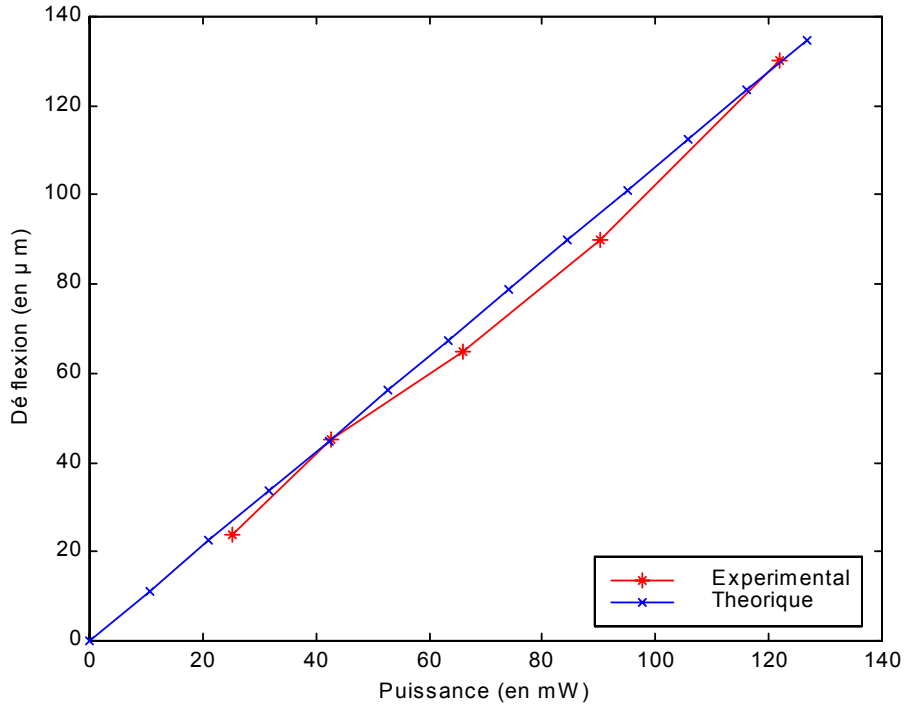


Figure 3.58 : déflexion de la micropatte en fonction de la puissance consommée

Cette expérimentation permet de déterminer l'effort maximum que pourra développer la micropatte en fonction de la déflexion, et qui est tracée à la Figure 3.59.

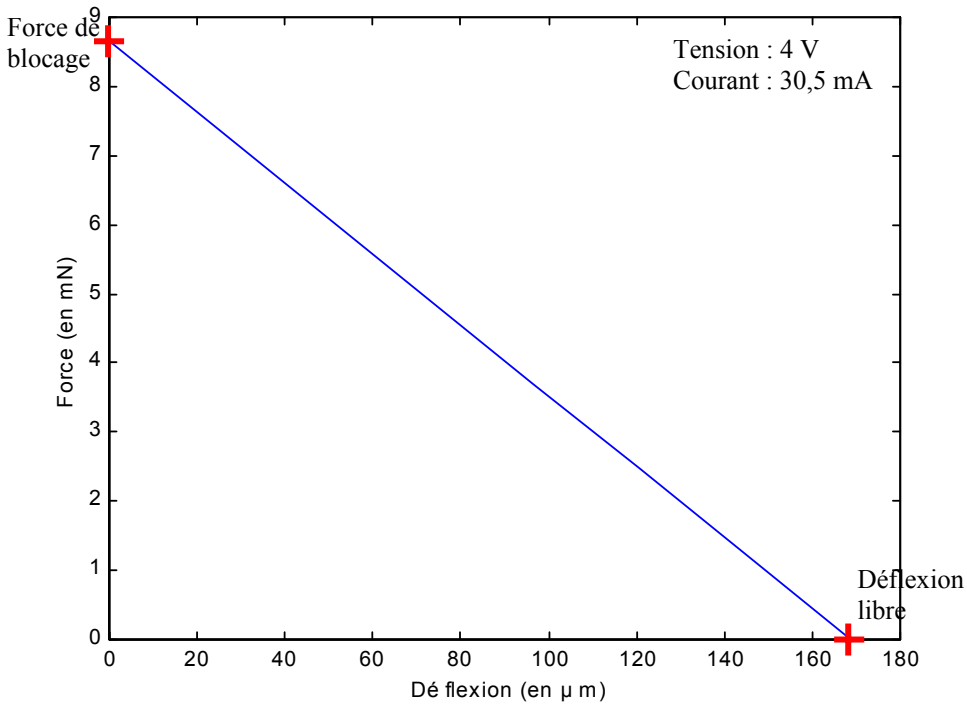


Figure 3.59 : force développée par la micropatte en fonction de la déflexion

Dans un deuxième temps, les deux actionneurs sont alimentés, ce qui permet de mesurer l'inclinaison de la poutre de liaison, et d'en déduire l'angle par rapport à l'horizontal, tracé à la Figure 3.60.

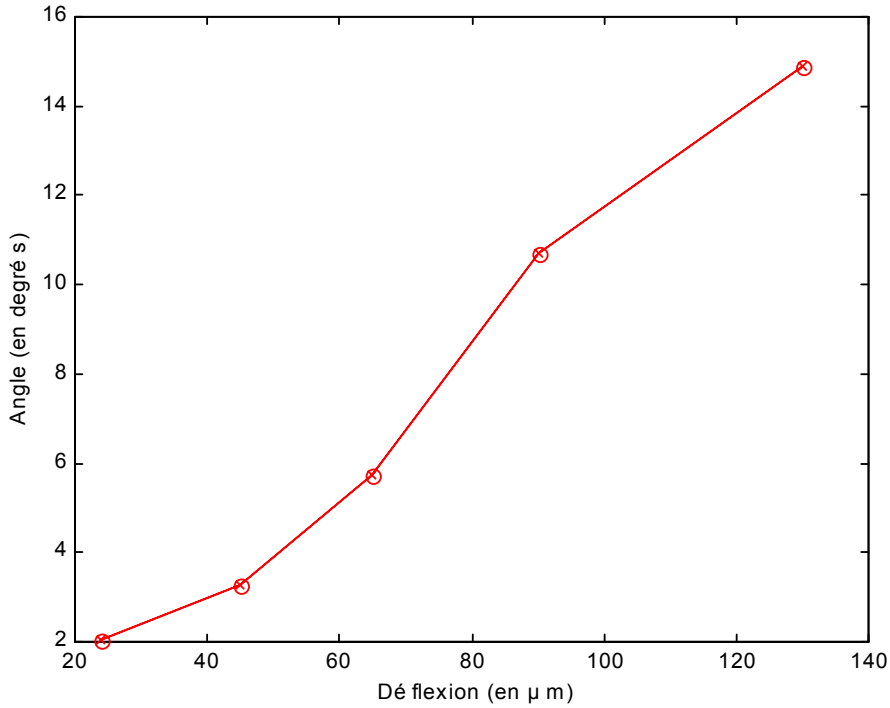


Figure 3.60 : angle que forme la poutre de liaison avec l'horizontale

L'angle maximum atteint par la poutre de liaison en SU-8 est supérieur à celui obtenu avec la liaison en silicium qui est plus rigide, et supérieur aussi aux valeurs obtenues par simulation numérique. Ce dernier point est certainement dû à l'épaisseur de résine qui n'est peut être pas exactement de 60 µm, et qui n'est pas régulière d'une micropatte à l'autre (suivant sa position sur le wafer).

L'expérimentation dynamique n'est pas nécessaire ici, les actionneurs étant identiques aux précédents, leur comportement dynamique sera le même.

6.6 Performances

A partir des expérimentations de ces micropattes, il est possible de déduire les caractéristiques attendues pour le microrobot.
Concernant la consommation électrique, la mise en action de deux bilames thermique d'une micropatte nécessite une puissance de 120 mW pour un débattement de 120 µm. Cette consommation est la même que précédemment, les bilames étant identiques.
Concernant la charge que le microrobot sera capable de porter et le poids du microrobot lui même (six micropattes et le corps), il est possible de les calculer.
Une micropatte est constituée de deux micro-actionneurs et d'une poutre de liaison.
Un micro-actionneur est constitué de :

- 2 mm x 0,1 mm x 0,02 mm de silicium
- 2 mm x 0,1 mm x 0,06 mm de SU-8.

La poutre de liaison est constituée de :

- 0,1 mm x 0,5 mm x 0,06 mm de résine SU-8.

Sachant que les densités sont :

- pour le silicium : 2,34 .10^{-3} g/mm^3
- pour la résine SU-8 : 1,42 .10^{-3} g/mm^3.

Un micro-actionneur a un poids de 26,4 µg.
La poutre de liaison a un poids de 4,26 µg.

Le poids d'une micropatte est donc de : 57,06 µg.
Si nous considérons que le corps a un volume de silicium de 2 mm x 3,5 mm x 0,12 mm, son poids sera de 2 mg.
Finalement, le poids total du microrobot est de : 2,34 mg.
D'après la Figure 3.59, l'effort que peut développer une micropatte pour une déflexion nulle est de 8,6 mN, soit l'équivalent de 877 mg. La charge maximum du microrobot est de 877 x 6 mg c'est-à-dire 5,26 g ou encore près de 2250 fois son propre poids.
La pente mesurée de la micropatte (15° max) et la longueur du pied (140 µm) permettent d'évaluer la longueur d'un pas à 35 µm (Figure 3.28).
Avec la fréquence de coupure mesurée d'un actionneur (1,67 Hz), la vitesse de notre microrobot sera d'environ 58,5 µm/s.

Le récapitulatif des performances attendues pour le microrobot avec des micropattes constituées de bilames en résine SU-8 sur silicium avec une liaison de 60 µm de résine SU-8 sont données dans le Tableau 3.5, avec les résultats des autres micropattes pour comparaison.

Caractéristiques	**micropatte type 3 SU-8/Si liaison 60 µm SU-8**	**micropatte type 2 SU-8/Si liaison 20 µm Si**	**micropatte type 1 Ni/Si**
Dimensions d'un actionneur	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0,04 mm^3
Déflexion	130 µm	120 µm	120 µm
Charge portée	5,26 g	4,89 g	3,06 g
Poids propre du microrobot	2,34 mg	2,32 mg	2,54 mg
Puissance électrique par patte	120 mW	120 mW	1,3 W
Energie consommée par pas (pour trois pattes)	216 mJ	216 mJ	1,58 J
Longueur calculée du pas	35 µm	17 µm	17 µm
Fréquence d'actionnement de la patte	1,67 Hz	1,67 Hz	2,46 Hz
Vitesse attendue	58,5 µm/s	28,4 µm/s	42 µm/s

Tableau 3.5 : récapitulatif des performance attendues pour le microrobot

6.7 Conclusion

Ces micropattes ne donnent pas encore entière satisfaction. L'inclinaison de la poutre de liaison a été améliorée, mais elle reste encore trop faible, comme le montrent les résultats des simulations numériques où les deux actionneurs sont alimentés (Figure 3.52), ces derniers s'arc-boutent. Ce sont les limitations technologiques, notamment la viscosité importante de la résine SU-8, qui ont imposé l'épaisseur de cette liaison, il faut explorer de nouvelles pistes pour diminuer cette épaisseur. D'autre part, des essais ont déjà été faits pour déposer un pied sur la liaison de la micropatte comme le montre la Figure 3.61. Les prochains échantillons seront réalisés complètement, avec leur pied.

Figure 3.61 : photo d'une micropatte vue en bout avec son pied en résine SU-8 (premier essai de dépôt du pied)

7 Micropattes à actionneurs en opposition et liaison de 20 µm : type 4

D'après les résultats obtenus lors des expérimentations précédentes, la poutre de liaison de 60 µm de résine SU-8 est trop rigide, ce qui perturbe le bon fonctionnement des micropattes. Une dernière modification est donc faite, pour amincir l'épaisseur de la poutre de liaison. Cette épaisseur est ramenée de 60 µm à 20 µm. La solution technologique choisie pour cela n'est pas parfaitement reproductible, comme nous l'expliquerons dans le chapitre 4. Nous positionnons aussi le pied de manière excentrée sur la poutre de liaison, pour obtenir l'inclinaison maximale de celui-ci. En effet, la liaison n'a pas une courbure constante sur sa longueur, et suivant la position du pied, celui-ci sera plus ou moins incliné comme le présente la Figure 3.63.

7.1 Simulations numériques

Des simulations numériques ont été réalisées sous Ansys, pour déterminer les températures et les déflexions. L'évolution de la température pour la position (b) de la Figure 3.49 lorsque un seul bilame est actionné est présenté en Figure 3.62. Cette figure souligne la mauvaise conduction thermique dans la poutre de liaison, que nous avons déjà évoquée, qui permet au bilame non alimenté de rester à température ambiante. L'évolution de la température pour la position (c) de la Figure 3.49 lorsque les deux bilames sont actionnés est présenté en Figure 3.63.

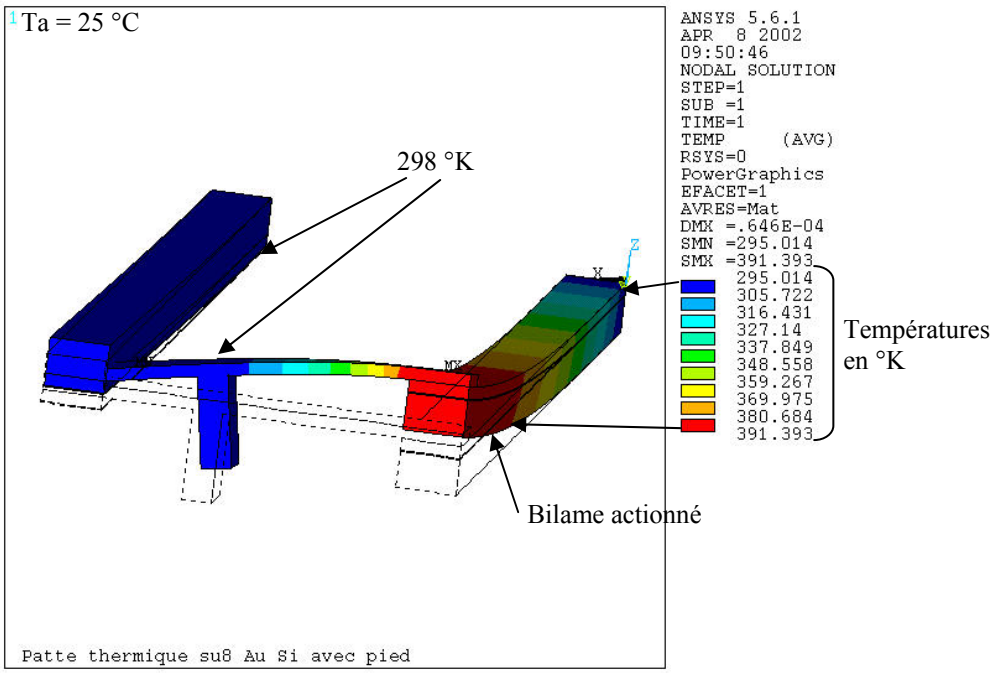


Figure 3.62 : températures le long de la micropatte lorsqu'un seul bilame est actionné

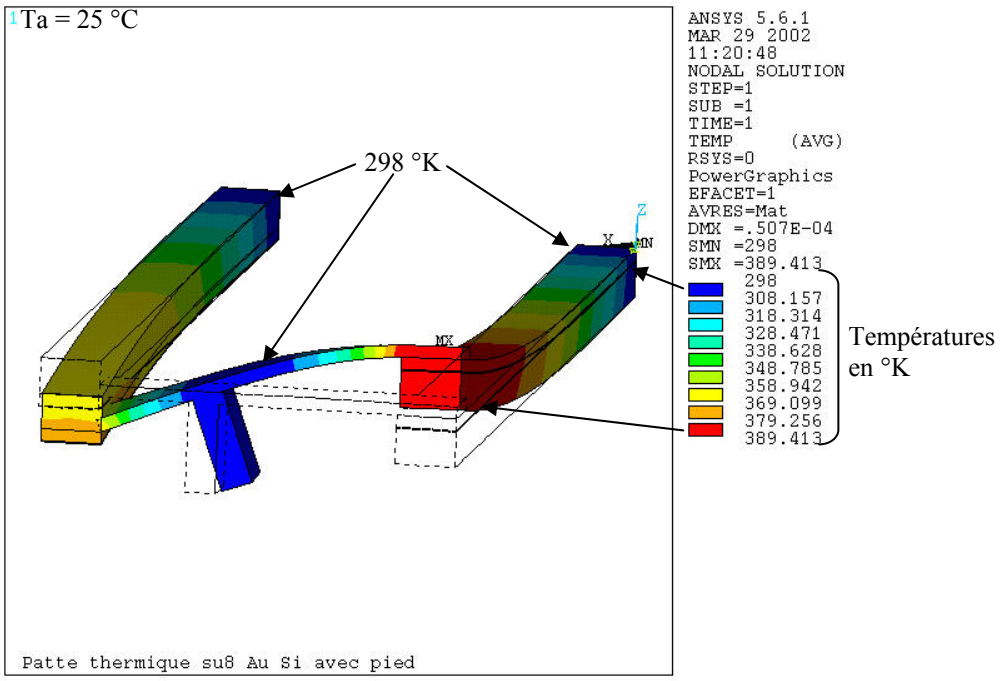


Figure 3.63 : températures le long de la micropatte lorsque les deux bilames sont actionnés

Il est à noter aux Figure 3.62 et Figure 3.63 que la température à l'extrémité du pied est la température ambiante, ce qui permettra au microrobot de se déplacer sur une surface sans risquer d'endommager cette dernière du fait de sa température. La température de fonctionnement des actionneurs thermiques n'est donc pas un inconvénient, contrairement à ce que l'on pouvait craindre en choisissant ce mode d'actionnement.

Les Figure 3.64 et Figure 3.65 présentent les simulation numériques des déflexions respectivement lorsque les deux actionneurs sont alimentés, et lorsqu'un seul est alimenté.

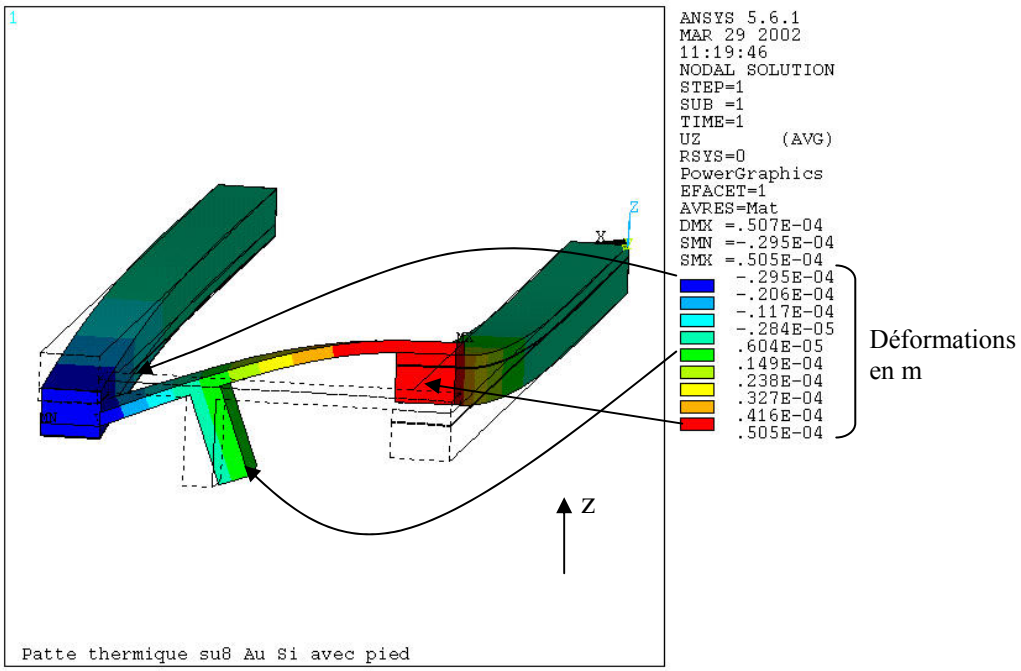


Figure 3.64 : déformations suivant l'axe z lorsque les deux bilames sont actionnés

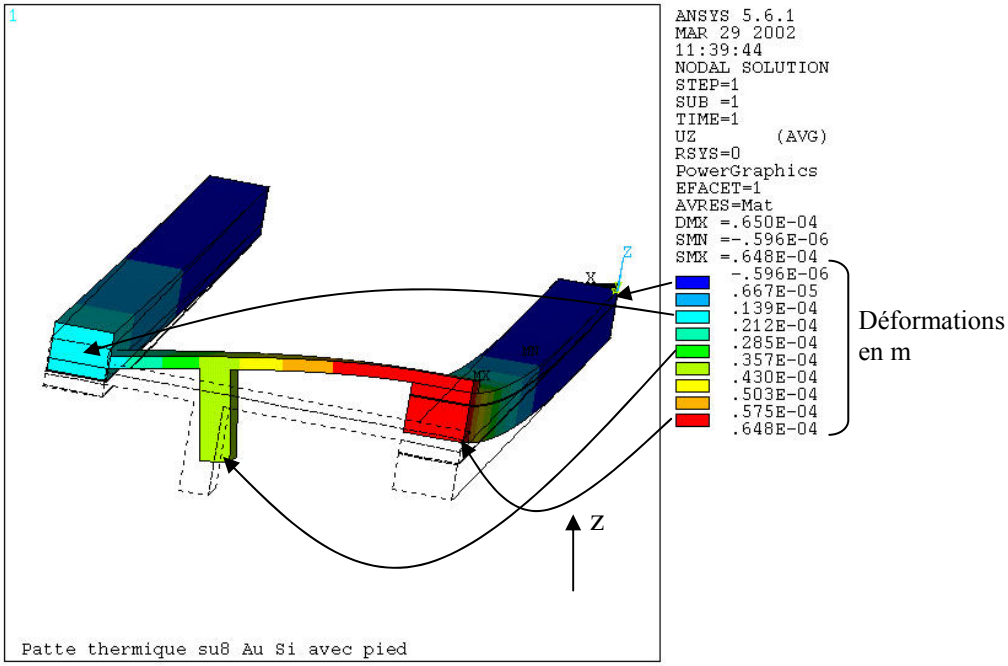


Figure 3.65 : déformations suivant l'axe z lorsqu'un seul bilame est actionné

On peut remarquer sur la Figure 3.64 que la position excentrée du pied sur la poutre de liaison est importante pour l'inclinaison de ce dernier, et par conséquent pour la longueur du pas.
Les Figure 3.66 et Figure 3.67 donnent les déformations respectivement suivant les axes x et y.

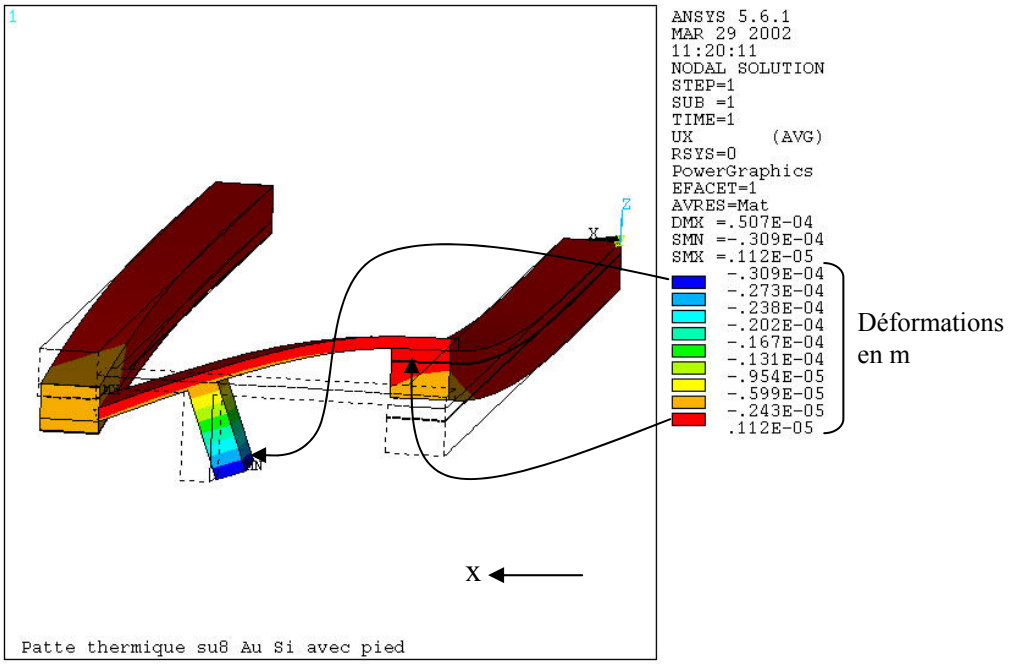


Figure 3.66 : déformations suivant l'axe x lorsque les deux bilames sont actionnés

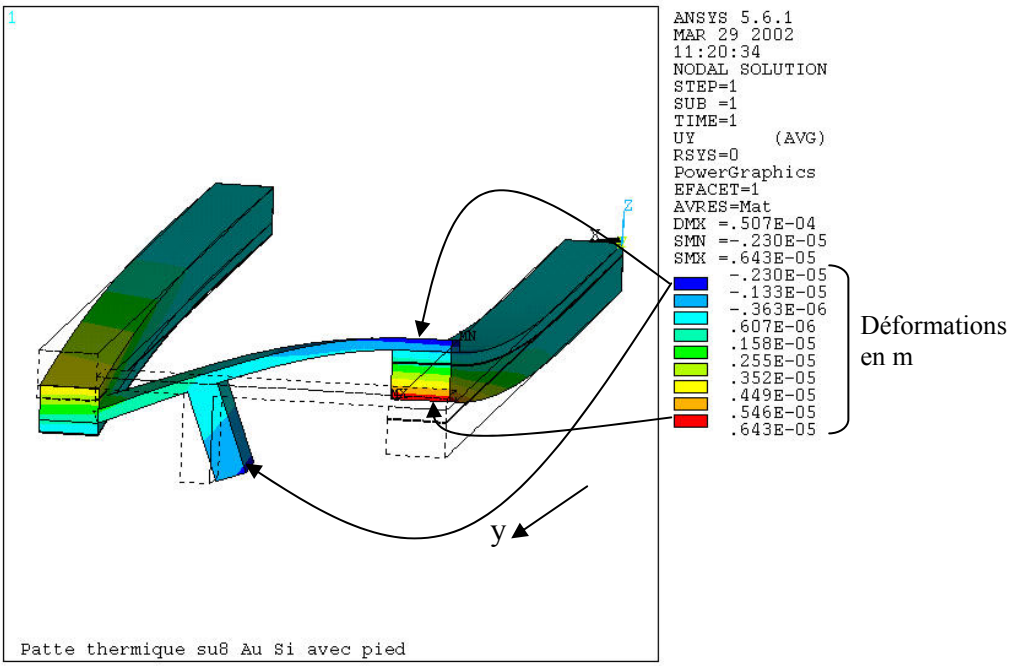


Figure 3.67 : déformations suivant l'axe y lorsque les deux bilames sont actionnés

La simulation de la Figure 3.66 permet de déterminer la longueur du pas qui sera de l'ordre d'une trentaine de microns.

7.2 Réalisations

Ces micropattes, comme les précédentes sont réalisées par microfabrication. Le procédé sera décrit plus précisément au chapitre 4. Les micropattes après fabrication restent solidaires du wafer. Les photos de ces réalisations sont présentées en Figure 3.68 et Figure 3.69.

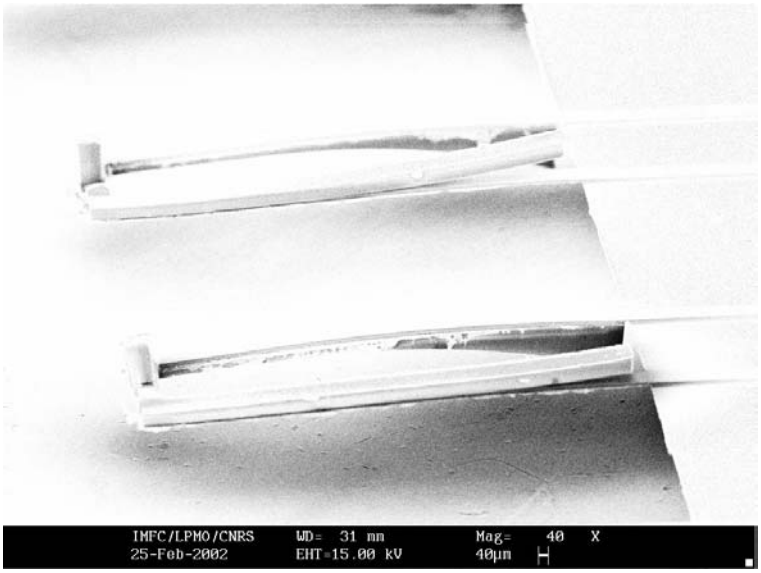


Figure 3.68 : photo MEB des dernières micropattes, on peut remarquer un décollement plus ou moins important de la résine sur certains actionneurs

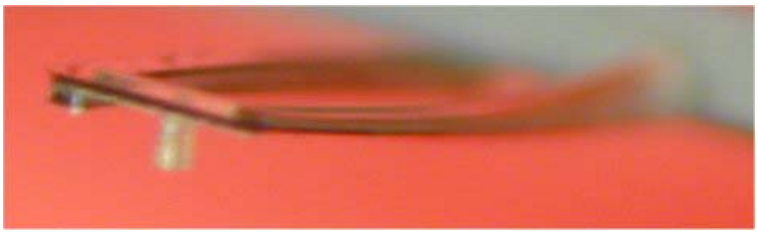
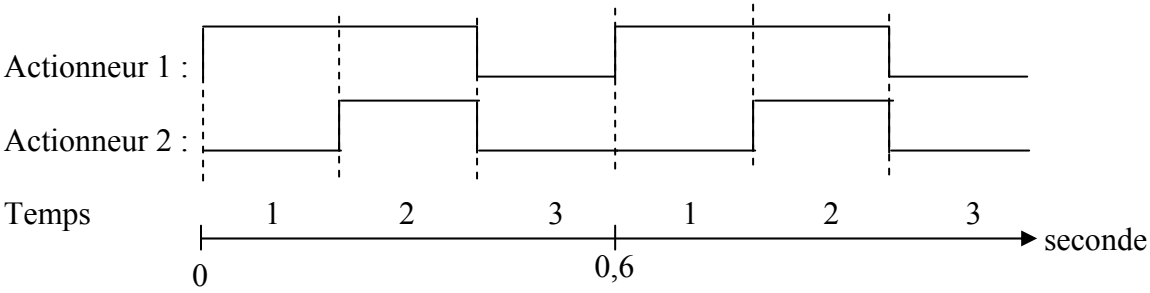


Figure 3.69 : photo de la micropatte SU-8 sur Si avec son pied

7.3 Expérimentations

La micropatte est alimentée par des tensions continues allant de 6 à 9 volts. La déflexion est mesurée par vidéo, les dimensions et l'encombrement des pointes d'alimentation ne permettent plus d'insérer le capteur au niveau de l'expérimentation.

A ce stade des expérimentations, les micropattes sont alimentées par pointes, comme pour les précédentes, et les signaux de commande sont les suivants :



L'actionneur 1 est celui qui permet à la micropatte de se lever, et l'actionneur 2 est celui qui incline la poutre de liaison. Au temps 1, seul l'actionneur 1 est alimenté (Figure 3.49 b) ; au temps 2, les deux actionneurs sont alimentés (Figure 3.49 c) ; et le temps 3 est le temps de retour de la micropatte dans sa position repos (Figure 3.49 d).
La Figure 3.70 montre les trois positions de la micropatte lors de son cycle de fonctionnement. Ces photos sont tirées d'une vidéo d'expérimentation qui est jointe en annexe sur CD Rom.

(a) (b) (c)

Figure 3.70 : photos des trois positions de la micropatte lors de son cycle de fonctionnement
(a) position repos de la micropatte (Figure 3.49 (a) et (d))
(b) l'actionneur qui permet la levée de la micropatte est alimenté (Figure 3.49 (b))
(c) les deux actionneurs de la micropatte sont alimentés (Figure 3.49 (c))

L'expérimentation dynamique n'est pas nécessaire ici, les actionneurs étant identiques à ceux du paragraphe 5, leur comportement dynamique sera le même.

7.4 Performances

A partir des expérimentations de ces dernières micropattes, il est possible de déduire les caractéristiques attendues pour le microrobot.
Concernant la consommation électrique d'une micropatte, le courant n'a pas été mesuré, mais les valeurs seront conformes aux micropattes précédentes, les actionneurs étant identiques.
Concernant la charge que le microrobot sera capable de porter et le poids du microrobot (six micropattes et le corps) il est possible de calculer le poids d'une micropatte.
Une micropatte est constituée de deux micro-actionneurs et d'une poutre de liaison.
Un micro-actionneur est constitué de :

- 2 mm x 0,1 mm x 0,02 mm de silicium
- 2 mm x 0,1 mm x 0,06 mm de résine SU-8.

La poutre de liaison est constituée de :

- 0,1 mm x 0,5 mm x 0,02 mm de résine SU-8.

Sachant que les densités sont :

- pour le silicium : $2,34 .10^{-3}$ g/mm^3
- pour la résine SU-8 : $1,42 .10^{-3}$ g/mm^3.

Un micro-actionneur a un poids de 26,4 µg.
La poutre de liaison a un poids de 1,42 µg.
Le poids d'une micropatte est donc de : 54,22 µg.
Si nous considérons que le corps a un volume de silicium de 2 mm x 3,5 mm x 0,12 mm, son poids sera de 2 mg.
Finalement, le poids total du microrobot est de 2,33 mg.
D'après la déflexion maximale, l'effort que peut développer une micropatte pour une déflexion nulle est de 8,7 mN, soit l'équivalent de 0,886 g.
La charge maximum du microrobot est de 0,886 x 6 mg c'est-à-dire 5,31 g ou encore 2200 fois son propre poids.
Les expérimentations réalisées ont permis de mesurer la longueur d'un pas à 60 µm. Avec la fréquence de fonctionnement d'une micropatte de 1,67 Hz, la vitesse de notre microrobot sera au minimum de 100 µm/s.

Le récapitulatif des performances attendues pour le microrobot avec les nouvelles micropattes constituées de bilames en résine SU-8 sur silicium avec une liaison de 20 µm de résine SU-8 sont données dans le Tableau 3.6, avec les résultats des autres micropattes pour comparaison.

Caractéristiques	micropatte type 4 SU-8/Si liaison 20 µm	micropatte type 3 SU-8/Si liaison 60 µm	micropatte type 2 SU-8/Si liaison Si	micropatte type 1 Ni/Si
Dimensions d'un actionneur	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0.08 mm^3	2 x 0,1 x 0,04 mm^3
Déflexion	175 µm	130 µm	120 µm	120 µm
Charge portée	5,31 g	5,26 g	4,89 g	3,06 g
Poids propre du microrobot	2,33 mg	2,34 mg	2,32 mg	2,54 mg
Puissance électrique par patte	Non mesuré	Non mesuré	120 mW	1,3 W
Energie consommée par pas (pour trois pattes)	Non mesuré	Non mesuré	216 mJ	1,58 J
Longueur calculée du pas	60 µm	35 µm	17 µm	17 µm
Fréquence d'actionnement de la patte	1,67 Hz	1,67 Hz	1,67 Hz	2,46 Hz
Vitesse attendue	100 µm/s	58,5 µm/s	28,4 µm/s	42 µm/s

Tableau 3.6 : récapitulatif des performances attendues pour le microrobot

7.5 Conclusion

Ces dernières micropattes nous permettent d'obtenir un cycle de fonctionnement tout à fait satisfaisant. Au niveau des performances, le Tableau 3.6 montre que ce sont avec ces dernières micropattes que les performances sont les meilleures. Il est à noter que par rapport au micropattes en nickel sur silicium, la consommation énergétique pour un pas a été divisée par un peu plus de 7, que la charge maximum transportée a été multipliée par près de 1,5, et que la vitesse de déplacement a été multipliée par 2,38.

8 Conclusion

Dans ce chapitre, la conception et l'expérimentation de différents types de micropattes ont été présentés. Les fabrications de ces différentes micropattes ont permis d'acquérir une bonne compétence dans le domaine des microfabrications, et par conséquent d'améliorer de façon notable les performances attendues. Ces résultats sont tout à fait satisfaisants, et vont nous permettre d'intégrer ces micropattes de manière monolithique sur un corps en silicium pour réaliser la structure complète du microrobot.

Dans le chapitre suivant, les microfabrications mises en œuvre seront présentées, et les différents procédés de fabrication décrits. Dans le dernier chapitre, le développement du microrobot dans sa structure complète sera présenté avec ses performances.

9 Références bibliographiques

[1] A. Bonvilain, N. Chaillet "Some prototypes of silicon-based thermal actuated microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of the 5th Franco-Japanese Congress & 3rd European-Asian Congress of MECHATRONICS, sur CD ROM, 6 pages, pp. 437-442, 9-11 octobre 2001, Besançon.

[2] A. Bonvilain, N. Chaillet "Fabrication and experiment of microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of SPIE, Microrobotics and Microassembly III, vol. 4568, pp. 163-174, 29-30 octobre 2001, Newton, USA.
[3] http://www.cea.fr/fr/institutions/Clefs44/fr-clefs44/clefs4470.html

Chapitre 4 :
Microfabrications mises en œuvre pour la réalisation du microrobot

1 Introduction

Avant ces travaux, il n'y avait aucune connaissance en microfabrication au laboratoire. Or la microrobotique nécessite la réalisation et l'intégration d'éléments de dimensions de plus en plus petites, ce qui nous a amené à maîtriser, mettre en œuvre et trouver les bons paramètres de ces techniques de fabrication.
Comme nous l'avons précisé au chapitre 2 pour les actionneurs thermiques en U, et au chapitre 3 pour les micropattes, toutes ces réalisations ont été effectuées en salle blanche, soit à l'IMM (Institut des Microtechniques de Mayence) pour les premiers actionneurs, soit à l'IMFC (Institut des Microtechniques de Franche-Comté) pour les actionneurs suivants, les micropattes et le microrobot complet qui sera décrit au chapitre 5.
L'intérêt et la description d'une salle blanche sont donnés en annexe 4. L'IMFC dispose d'une salle blanche de classe 100 sous les flux laminaires, et de classe 1000 ailleurs. Certaines étapes des différents procédés de fabrication ont été effectués au Centre de Transfert des Microtechniques (CTM) qui dispose d'une salle blanche de classe 10000.
Dans ce chapitre, nous allons décrire pour chaque réalisation son procédé de fabrication, et les différentes étapes, au fur et à mesure de leur apparition dans les différents procédés. Nous terminerons par le procédé de fabrication du microrobot dont la conception, les expérimentations et les caractéristiques seront données au chapitre 5.

2 Le substrat utilisé

Le substrat choisi est le silicium, pour trois raisons :

- c'est un semi-conducteur qui permet de chauffer les actionneurs par effet Joule,
- c'est un substrat couramment utilisé en microfabrication,
- il possède un coefficient d'expansion thermique faible, ce qui permet de l'utiliser comme matériau le moins dilatable dans les actionneurs bi-matériaux à expansion thermique.

Pour les réalisations à l'IMM, des wafers 5 pouces, de 400 µm d'épaisseur, d'orientation 1.0.0, deux faces polies, dont on ne connaît pas la résistivité ont été utilisés. Cette résistivité a été évaluée lors des expérimentations des actionneurs à 0,6 Ω.cm.
Pour les réalisations à l'IMFC, nous avons choisi des wafers avec une résistivité faible, afin de diminuer les tensions d'alimentation des actionneurs. D'autre part, la salle blanche de l'IMFC est équipée pour les procédés de fabrication sur des wafer 3 pouces. Les wafers utilisés sont donc des wafers 3 pouces, type N, orientation 1.0.0, deux faces polies, dopés à l'antimoine (Sb) avec une résistivité de 0,008 à 0,02 Ω.cm.
Les wafers sont reçus non oxydés, une étape de préparation est nécessaire : leur oxydation. Elle servira à isoler électriquement le silicium et le métal comme l'indique la figure 2.40 du chapitre 2. Cette oxydation est réalisée au CTM, qui possède un four d'oxydation. L'oxydation, comme nous l'avons décrit en annexe 4 consiste en un chauffage à 1050°C dans un four régulé en oxygène pendant plusieurs heures (6h50 dans notre cas). Il se produit une réaction chimique en surface, ce qui crée une fine couche d'oxyde (environ 1,2 à 1,4 µm). L'oxyde croît de manière logarithmique, et consomme du silicium. La croissance de l'oxyde se fait d'environ 40% à l'intérieur du wafer et de 60% à l'extérieur (Figure 4.1). Ceci est un avantage lorsque l'oxyde du wafer est gravée pour réaliser des contacts, la surface ainsi découverte est neuve et donc dépourvue d'impuretés.

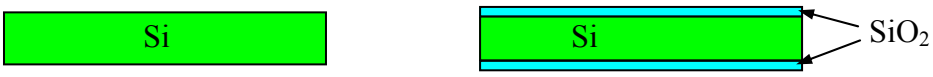


Figure 4.1: Schéma de l'oxydation du wafer

Le four d'oxydation de l'IMFC est présenté en Figure 4.2. Ce four à oxydation thermique possède un tube de 5 pouces de diamètre, permettant le traitement de substrats jusqu'à 4 pouces de diamètre. La température est programmable par palier et va jusqu'à environ 1200°C. Il permet l'oxydation sèche du silicium, sous O_2, et l'oxydation humide, sous O_2+H_2O vapeur. Une ligne d'azote est également présente.

Figure 4.2: Four d'oxydation thermique (salle blanche du CTM)

3 Procédé de fabrication des actionneurs thermiques en U

Les actionneurs thermiques en U ont été réalisés pour certains à l'IMM, et pour les autres à l'IMFC. Les procédés tiennent donc compte des machines disponibles dans les salles blanches respectives.
A l'IMM, le procédé de fabrication a été établi par des personnes compétentes, d'après la conception que nous avions faite des actionneurs. Les dimensions ont été volontairement choisies centimétriques pour apprendre les microtechnologies sans ajouter la difficulté des dimensions.
Les réalisations des actionneurs thermiques en U en salle blanche de l'IMFC ont été effectuées en autonomie. Nous avons déterminé le dessin des actionneur et des masques, le procédé de fabrication, ainsi que tous les paramètres de réalisation sur les différentes machines. La phase de mise au point a donc été relativement longue. C'est à l'issue de ces réalisations et des connaissances acquises que les différents types de pattes ont été conçues et réalisées.
Les procédés de fabrication de ces actionneurs thermiques en U sont donnés en détail en annexe 5.

Les différents types de pattes ont été présentés au chapitre 3, et dans les paragraphes suivants, leurs procédés de fabrication vont être successivement décrits.

4 Procédé de fabrication des micropattes en nickel sur silicium : type 1

Ces micropattes sont constituées de deux actionneurs bilames en nickel (20 µm) sur silicium (20 µm), reliés entre eux par une poutre de liaison de silicium de 20 µm d'épaisseur, comme

l'indique la Figure 4.3. Elles sont dotés pour leur alimentation en énergie d'électrodes, et de plot d'or pour le bonding. Dans un premier temps, les pattes sont réalisées sans pied, l'objectif étant de vérifier leur fonctionnement.

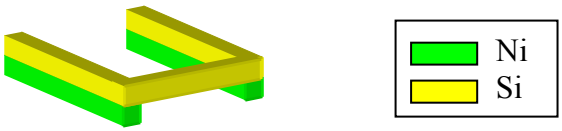
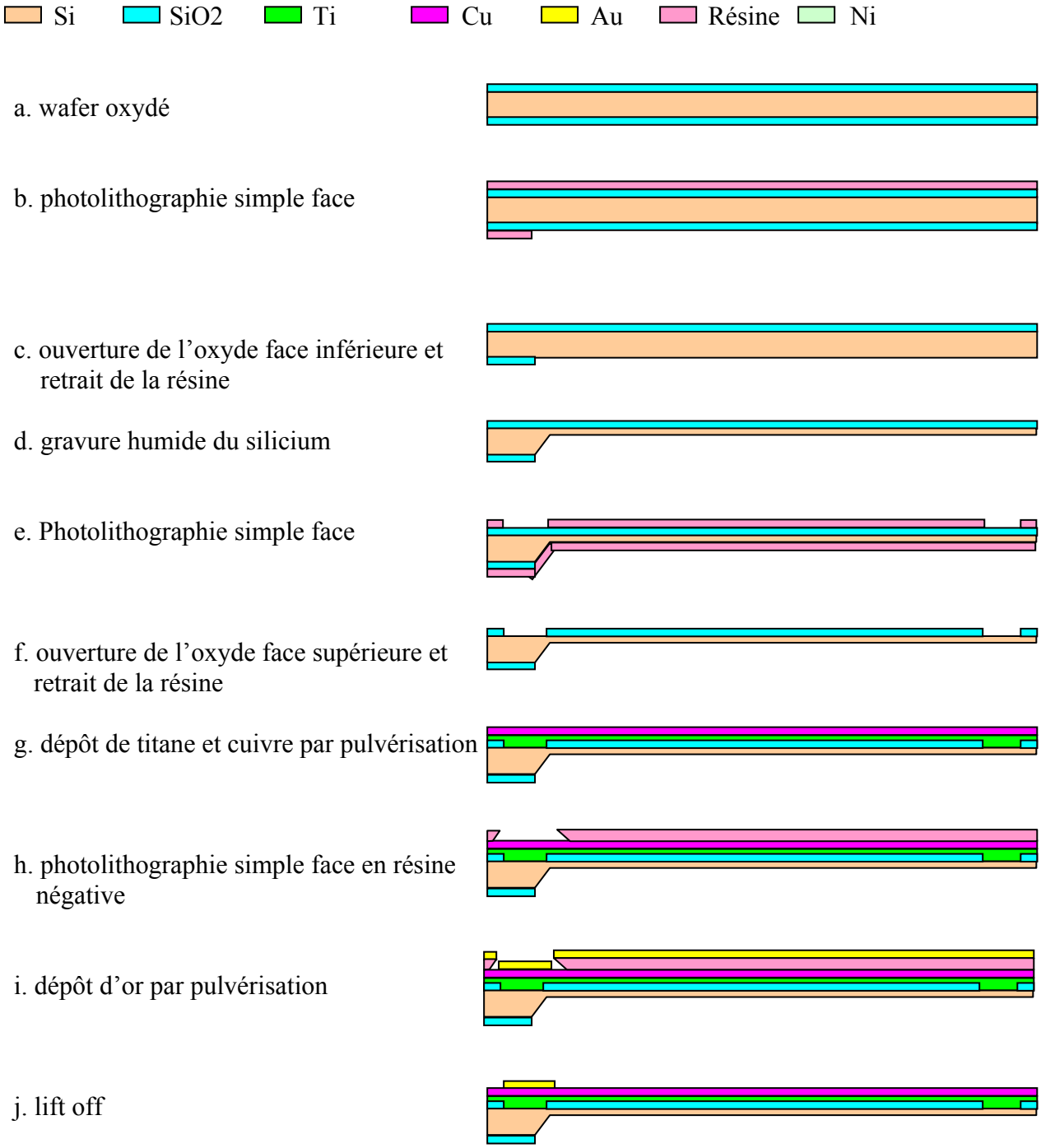
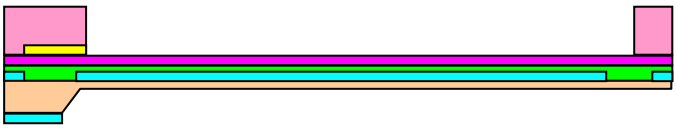


Figure 4.3 : Schéma de la micropatte en nickel sur silicium

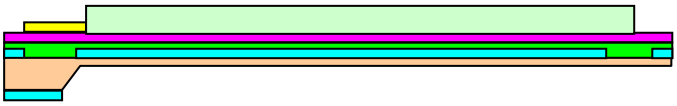
4.1 Description du procédé de fabrication



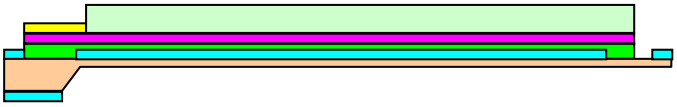
k. photolithographie simple face



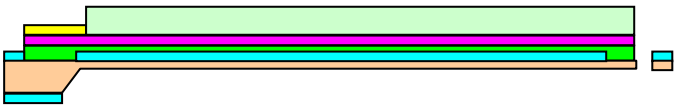
l. électrodéposition de nickel et retrait de la résine



m. gravure humide du cuivre et du titane



n. gravure sèche du silicium



4.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication

Seules les étapes du procédé qui n'ont pas été décrites dans les procédé de fabrication des actionneurs en annexe 5 seront décrites ici. Dans certains cas, seuls les paramètres qui sont modifiés seront mentionnés.
Quatre masques ont été nécessaires pour la réalisation de ces micropattes.

Photolithographie simple face (étape b)
La photolithographie est simple face, mais la résine est déposée sur les deux faces, pour ne pas endommager l'oxyde de la face supérieure.

Gravure humide du silicium (étape d)
Cette gravure est la même que celle décrite en annexe 5. Pour obtenir des membranes de 20 µm, la gravure dure 20 heures, le wafer ayant une épaisseur de 320 µm, l'oxyde quant à lui perdra environ 600 nm d'épaisseur. Il reste 0,6 à 0,8 µm d'oxyde, ce qui est suffisant pour la suite des opérations.

Photolithographie simple face (étape h à j)
Après le dépôt du cuivre et du titane, il faut déposer de l'or pour permettre la réalisation des liaison électriques par bonding (pour l'expérimentation) et éviter au cuivre de s'oxyder sur les électrodes. Pour cela, deux méthodes sont possibles. Elles sont présentées à la Figure 4.4 :

- déposer l'or, faire une photolithographie et graver,
- déposer l'or par lift off, c'est à dire faire une photolithographie, déposer l'or et retirer la résine et l'or qui est dessus.

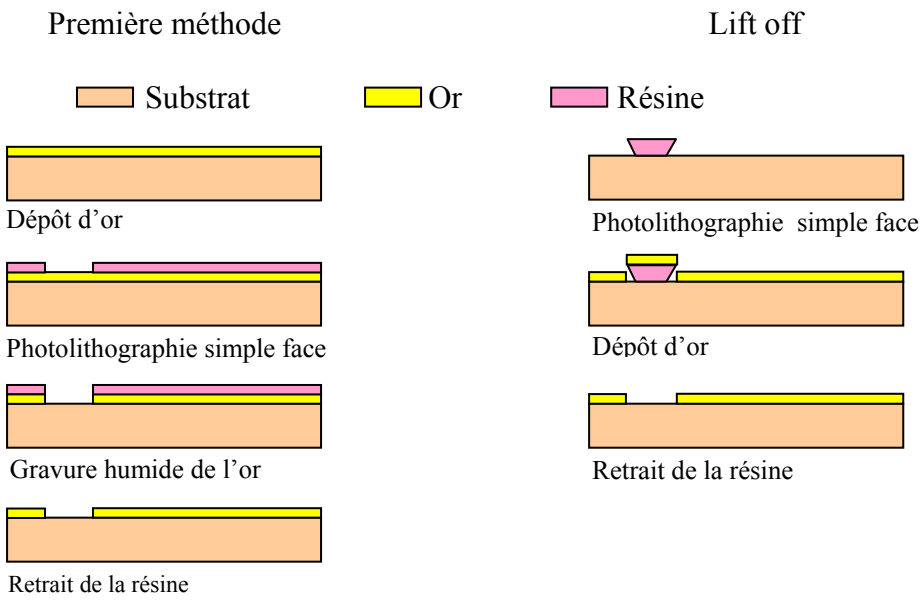


Figure 4.4 : Schéma des deux méthodes possibles pour effectuer un dépôt métallique sur un substrat

C'est la méthode lift off qui est utilisée, car elle évite de plonger le wafer dans un produit d'attaque de l'or qui va aussi graver le cuivre et donc poser des problèmes. Dans le cas du lift off, le cuivre n'est en contact qu'avec de l'acétone, qui ne risque pas de l'endommager.
Pour cette méthode, la résine utilisée doit être déposée en négatif (Figure 4.5 b), c'est ce qui permet d'obtenir des flans obliques comme le montre le schéma de la Figure 4.5 b et c. D'autre part l'épaisseur de résine doit être supérieure à la couche de métal déposée pour permettre de dissoudre ensuite la résine dans l'acétone, comme le montre la Figure 4.5 b.

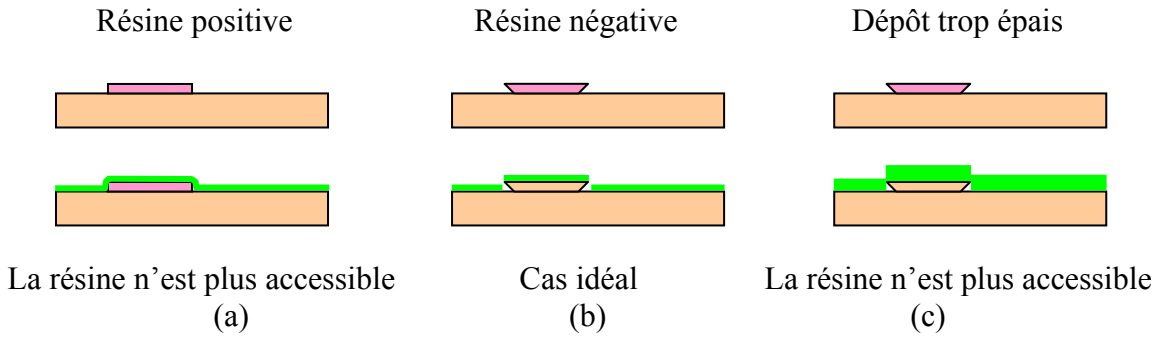


Figure 4.5 : Schéma des résultats d'un lift off suivant la résine utilisée : (a) résine positive, (b) résine négative, (c) dépôt trop épais avec de la résine négative

Electrodéposition de nickel (étape l)

L'électrodéposition est réalisée comme précédemment (voir annexe 5). Seul le courant appliqué va changer, car la surface à électrodéposer est modifiée. Le temps de dépôt est le même pour une épaisseur identique et une densité de courant donnée.

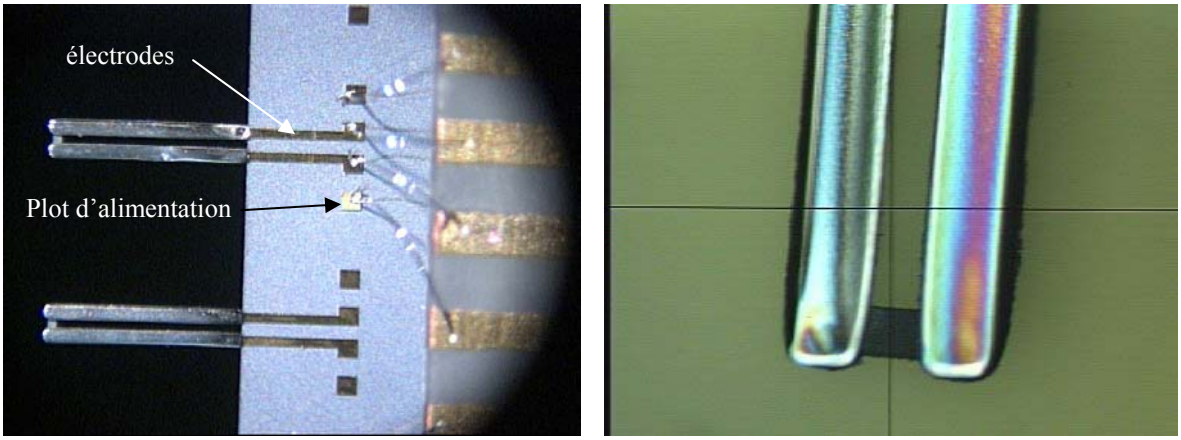
Gravure sèche du silicium (étape n)

Le gravure sèche du silicium est effectuée par RIE (Reactive Ion Etching) qui permet de graver le silicium par réaction gazeuse. Nous avons brièvement décrit ce principe de gravure de couches fines en annexe 4. Le bâti de RIE de l'IMFC est présenté en Figure 4.6. Ce bâti de RIE à gaz fluoré, permet la gravure sèche du silicium, de la silice, du nitrure de Silicium, du quartz, etc. Les gaz disponibles sont : SF6, C2F6, CHF3 et O2.

Dans cette opération, le vide est établi dans la chambre jusqu'à environ 7.10^{-5} mbar, la pression de travail appliquée est de 100 µbar, puis les gaz sont réglés à un débit donné. Nous utilisons simultanément le SF6 à 20 sccm (**s**tandard **c**ubic **c**entimeter per **m**inute : cm^3/min), l'O2 à 7 sccm et le CHF3 à 1 sccm. Le SF6 est celui qui grave le silicium, les deux autres sont utilisés pour faciliter la gravure et favoriser l'évacuation des particules gravées. Le plasma est alors établi avec une puissance de travail de 100 watts. Le temps de gravure est fonction (mais pas directement proportionnel) de la puissance appliquée, de la pression de travail et de la surface à graver. Dans ce procédé, il faut 1 heure 20 pour libérer les structures.

Figure 4.6 : Bâti deRIE à gaz fluoré Plassys (salle blanche de l'IMFC)

Les résultats des micropattes en nickel sur silicium réalisés à l'IMFC sont présenté en Figure 4.7.



(a) (b)

Figure 4.7 : Micropattes en nickel sur silicium réalisées à l'IMFC : (a) micropattes complètes (b) extrémité de la micropatte

Le procédé de fabrication que nous avons établi pour ces réalisations est donné en annexe 8.

5 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium : type 2

Les micropattes sont constituées de deux actionneurs bilames en résine SU-8 (60 µm) sur silicium (20 µm), reliés entre eux par une poutre de liaison de silicium de 20 µm d'épaisseur, comme l'indique la Figure 4.8. Comme les précédentes, elles sont dotées d'électrodes pour leur alimentation électrique, et de plots d'or pour le bonding.

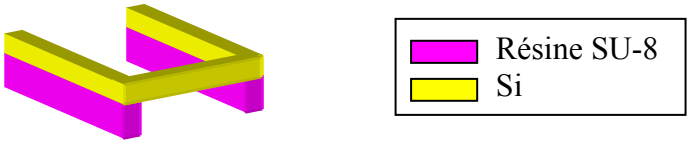
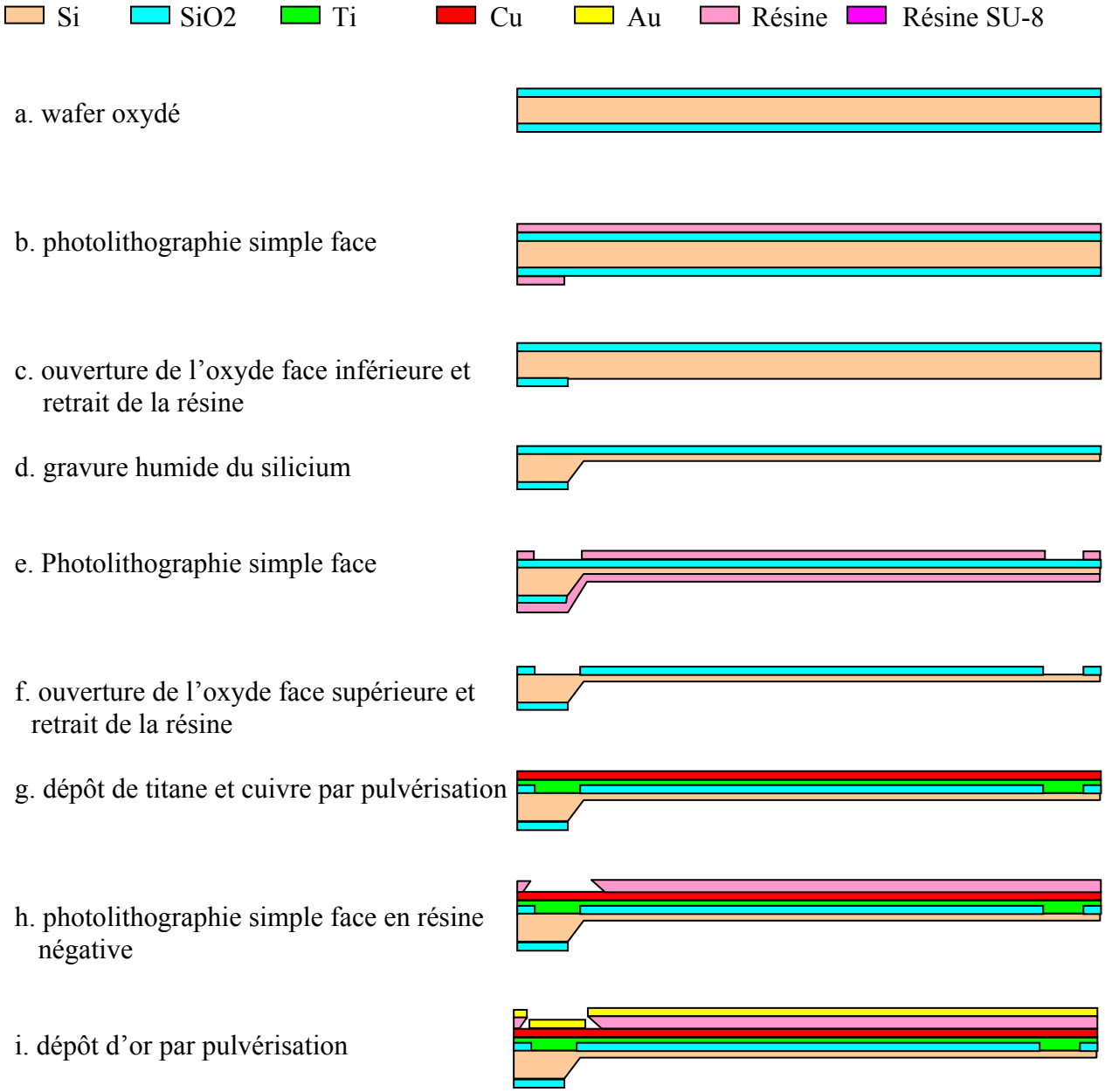


Figure 4.8 : Schéma de la micropatte en résine SU-8 sur silicium

5.1 Description du procédé de fabrication



j. lift off

l. photolithographie simple face de SU-8

m. gravure humide du cuivre et du titane

n. gravure sèche du silicium

5.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication

La seule modification de ce procédé par rapport au précédent réside dans le remplacement des étapes d'électrodéposition par l'étape de dépôt de résine SU-8 par enduction.
Aucun masque n'a été refait pour ces réalisations, ce sont les précédents qui ont été réutilisés.

photolithographie simple face de SU-8

Pour cette étape, nous avons dû mettre au point les paramètres de dépôt de la résine SU-8. En effet, les paramètres trouvés dans la littérature [1] ne nous donnaient pas les épaisseurs voulues. La raison étant certainement le vieillissement de la résine dont la bouteille n'avais pas été conservée dans les meilleures conditions.
Pour obtenir une couche de 60 µm d'épaisseur, la résine est enduite à une vitesse de 4000 tr/min avec une accélération 200 tr/min.s pendant 15 secondes. La résine est relaxée (pour éviter les contraintes internes) pendant 15 minutes sur une surface parfaitement plane. Elle est ensuite cuite pendant 30 minutes à 95°C. Elle est ensuite insolée, avec une puissance de 165 mJ/cm². La résine est alors recuite pendant 15 minutes sur plaque chauffante à 95°C. La révélation se fait dans le PGMEA (Propylene Glycol Monomethyl Ether Acetate) à température ambiante pendant 5 minutes. Un rinçage est fait à l'isopropanol. Si des traces blanches apparaissent lors du rinçage, le wafer est repassé dans le PGMEA à nouveau pendant 5 minutes, suivi d'un nouveau rinçage dans l'isopropanol. S'il n'y a plus de traces blanches, la révélation est terminée. Le nombre de passage dans le PGMEA dépend du nombre d'utilisation de celui-ci. Il est changé lorsqu'un troisième passage devient nécessaire.

Les résultats des micropattes en résine SU-8 sur silicium réalisés à l'IMFC sont montrés à la Figure 4.9.

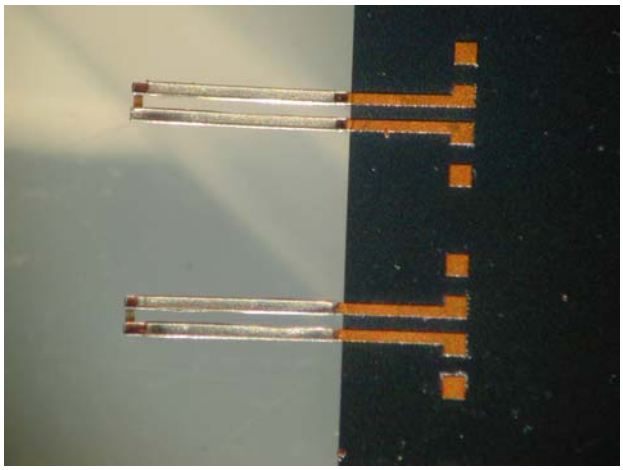


Figure 4.9 : Micropattes en résine SU-8 sur silicium réalisées à l'IMFC

Le procédé de fabrication que nous avons établi pour ces réalisations est donné en annexe 9.

6 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 60 µm : type 3

Les micropattes sont constituées de deux actionneurs bilames en SU-8 (60 µm) sur silicium (20 µm), reliés entre eux par une poutre de liaison de résine SU-8 de 60 µm d'épaisseur, comme l'indique la Figure 4.10 [2].

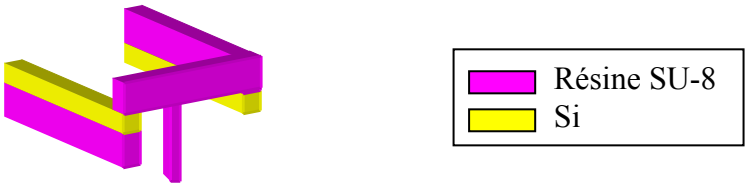
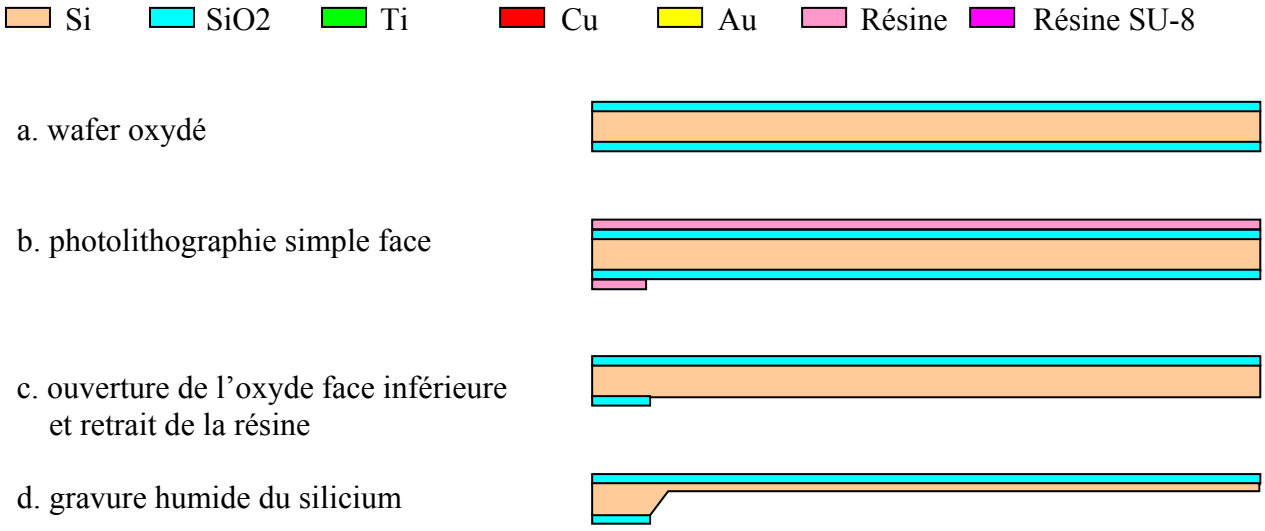


Figure 4.10 : Schéma de la micropatte en résine SU-8 sur silicium avec une liaison SU-8 de 60 µm

Ce sont sur ces micropattes que les premiers essais de dépôt du pied ont été effectués.

6.1 Description du procédé de fabrication



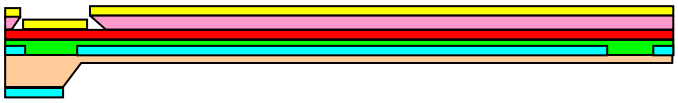
e. Photolithographie simple face

f. ouverture de l'oxyde face supérieure et retrait de la résine

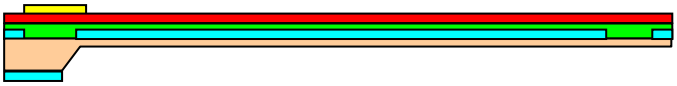
g. dépôt de titane et cuivre par pulvérisation

h. photolithographie simple face en résine négative

i. dépôt d'or par pulvérisation



j. lift off



k. photolithographie simple face

l. gravure humide du cuivre et du titane et retrait de la résine

m. photolithographie simple face de SU-8

n. photolithographie simple face de SU-8

o. gravure sèche de la liaison en silicium

p. photolithographie simple face de SU-8

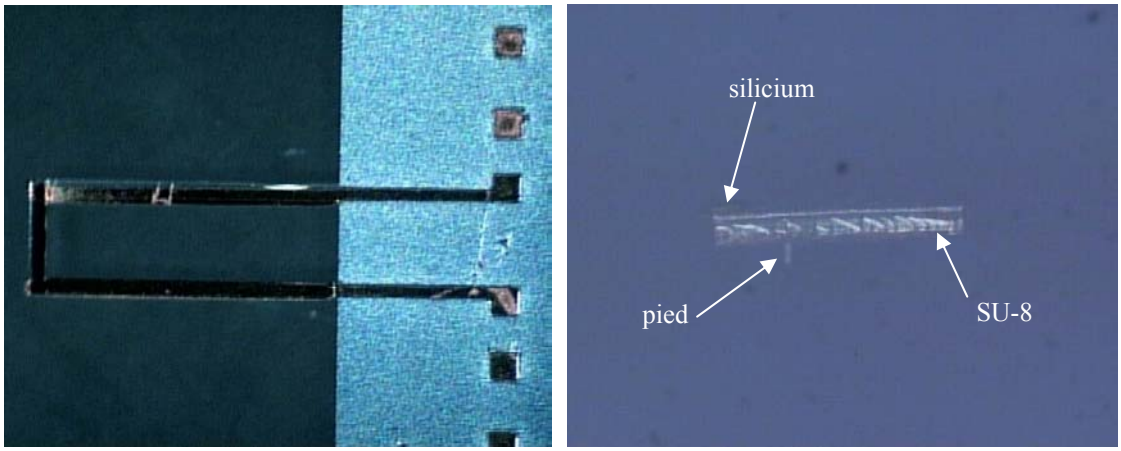
q. gravure sèche du silicium

6.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication

Cette fabrication ne comporte que des étapes déjà décrites au préalable, sauf l'étape o. La photolithographie de l'étape p du procédé a nécessité l'établissement de nouveaux paramètres pour le dépôt de résine SU-8 pour la fabrication du pied.
Huit masques ont été nécessaires pour la réalisation de ces actionneurs.

Gravure sèche de la liaison en silicium (étape o)
La gravure sèche de la liaison en silicium a été effectuée par RIE sur la face inférieure, avec une couche de résine de protection pour les parties en silicium à ne pas graver. La résine résiste mal à la RIE qui dure environ 30 minutes. C'est pourquoi cette étape n'a pas permis de graver complètement la liaison, il reste toujours une fine couche de silicium de l'ordre de 2 à 4 µm. Par contre, la résine SU-8 n'est pas altérée par la RIE.

Les résultats des micropattes en résine SU-8 sur silicium réalisés à l'IMFC sont présentés en Figure 4.11.



(a) (b)

Figure 4.11 : Micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 60 µm : (a) vue de la micropatte complète et (b) vue de la micropatte en bout avec son pied

Le procédé de fabrication que nous avons établi pour ces réalisations est donné en annexe 10.

7 Procédé de fabrication des micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 20 µm : type 4

Les micropattes sont constituées de deux actionneurs bilames en SU-8 (60 µm) sur silicium (20 µm), reliés entre eux par une poutre de liaison de résine SU-8 de 20 µm d'épaisseur, comme l'indique la Figure 4.12.

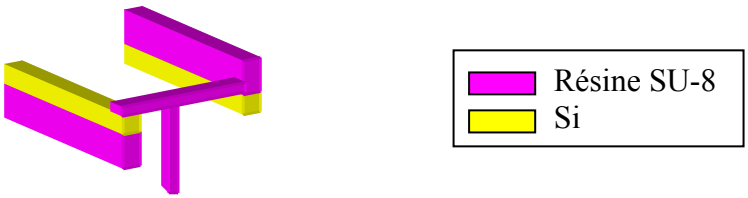


Figure 4.12 : Schéma de la micropatte en résine SU-8 sur silicium avec une liaison SU-8 de 20 µm

7.1 Description du procédé de fabrication

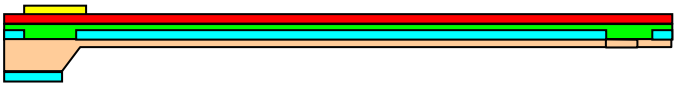
l. gravure humide de l'alumunium

m. dépôt de titane et cuivre par pulvérisation

n. photolithographie simple face en résine négative

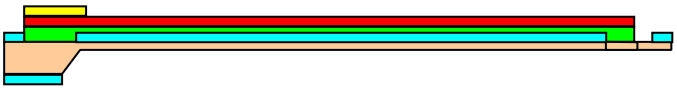
o. dépôt d'or par pulvérisation

p. lift off

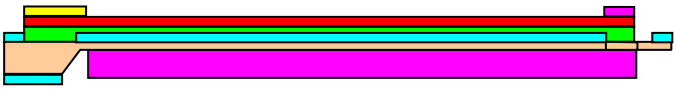


q. photolithographie simple face

r. gravure humide du cuivre et du titane et retrait de la résine



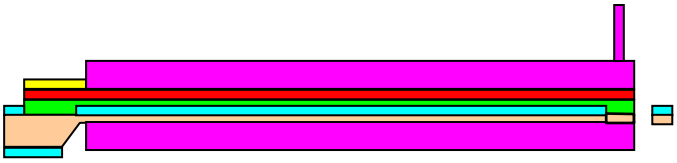
s. photolithographie double face de SU-8



t. photolithographie simple face de SU-8

u. photolithographie simple face de SU-8

v. gravure sèche du silicium



7.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication

Cette fabrication comporte des étapes déjà décrites au préalable. La gravure sèche du silicium pour la liaison à l'étape g a nécessité une nouvelle mise au point des paramètres.

Neuf masques ont été nécessaires pour la réalisation de ces actionneurs.

Dépôt d'aluminium double face (étape g)
L'aluminium est déposé sur les deux faces comme couche masque pour la gravure de la liaison de silicium par RIE. Une très fine couche est déposée sur la face non gravée, pour protéger la surface. Une couche plus épaisse est déposée sur la face gravée pour ne graver que les ouvertures. Le dépôt est effectué par pulvérisation pendant 2 minutes sur la face non gravée et 9 minutes sur la face gravée.

Gravure sèche de la liaison silicium (étape k)
La gravure lors de l'étape précédente n'ayant pas été correcte, nous avons choisi de graver la liaison en début de procédé. La gravure est effectuée par RIE pendant 45 minutes pour traverser les membranes. Cette étapes a posé quelques problèmes de mise au point pour les étapes suivantes. En effet, lors de l'enduction d'un résine fine sur un wafer percé, la résine n'adhère pas sur le bord des trous. Nous avons donc utilisé des résines plus épaisses, et déterminé les paramètres adéquats. Pour le lift off, c'est la résine LOR30B, associée à la résine AZ5214 qui nous a permis d'obtenir de bons résultats. La résine SU-8 quant à elle est très épaisse, les paramètres de dépôt n'ont donc pas changés.

Gravure humide de l'aluminium (étape l)
A la fin de la gravure de la liaison silicium, il nous faut retirer l'aluminium. Une partie a été consommée lors de la gravure par RIE, nous utilisons un produit d'attaque pour l'aluminium pour graver le reste. Le temps de gravure n'est pas fixe. A chaque fabrication, les temps de gravure ont été différents. Ceci n'était pas critique, car l'oxyde comme le silicium ne sont pas gravés par le produit d'attaque de l'aluminium, le wafer pouvait donc rester le temps nécessaire.

Photolithographie double face SU-8 (étape s)
Pour le dépôt de SU-8 en double face, la résine est déposée dans une même étape sur l'actionneur sur la face inférieure, et sur la liaison sur la face supérieure. Il est à noter qu'avec les membranes, le dépôt de résine SU-8 sur l'actionneur se trouve dans le trou des membranes. La cuisson se fait dans un four, le wafer déposé dans un verre de montre pour ne pas altérer la résine. Le paramètre critique ici étant le temps d'insolation de la liaison qu'il a fallut définir de manière à n'insoler que 20 µm. En effet, la face inférieure étant enduite de résine elle aussi, il ne faut pas insoler trop longtemps, la liaison étant ouverte (donc transparente), la résine de la face inférieure serai insolée elle aussi. D'autre part, il faut insoler suffisamment profond pour que la résine SU-8 adhère sur l'actionneur.

Les résultats des micropattes en résine SU-8 sur silicium réalisés à l'IMFC sont présentés en Figure 4.13.

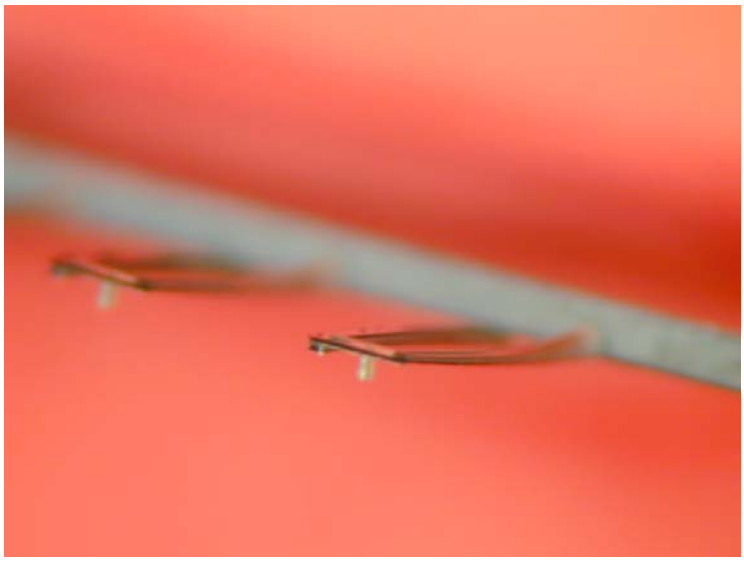


Figure 4.13 : Micropattes en résine SU-8 sur silicium avec les actionneurs en opposition et la liaison de 20 µm

Le procédé de fabrication que nous avons établi pour ces réalisations est donné en annexe 11.

8 Procédé de fabrication de la structure complète du microrobot

Le microrobot est constitué de six micropattes telles que celles décrites au paragraphe précédent et un corps en silicium.
L'objectif de cette fabrication est d'obtenir la structure complète du microrobot, comme l'indique la Figure 4.14.

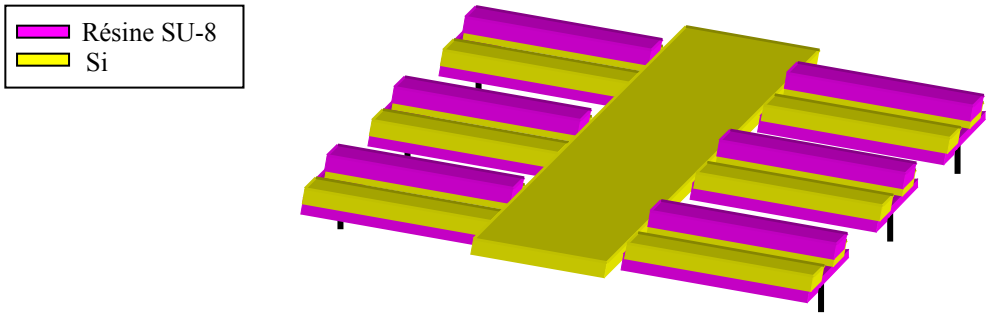
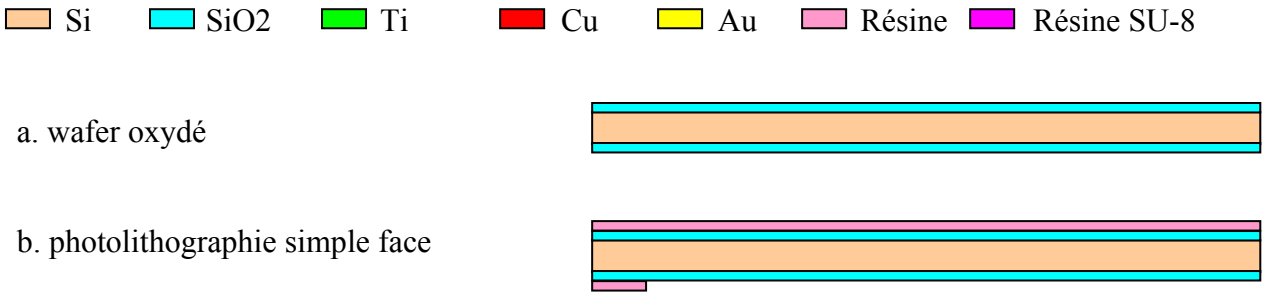


Figure 4.14 : Schéma de la micropatte en résine SU-8 sur silicium avec une liaison SU-8 de 20 µm

Le procédé de fabrication très proche du précédent, mais le dessin des masques a changé. Neuf masques ont été dessinés pour la réalisation du microrobot.

8.1 Description du procédé de fabrication



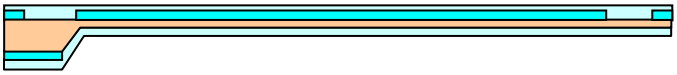
c. ouverture de l'oxyde face inférieure et retrait de la résine

d. gravure humide du silicium

e. Photolithographie simple face

f. ouverture de l'oxyde face supérieure et retrait de la résine

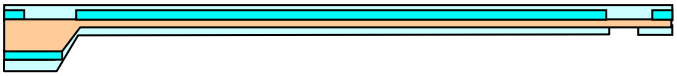
g. dépôt d'aluminium double face



h. photolithographie simple face

i. gravure humide de l'aluminium

j. retrait de la résine



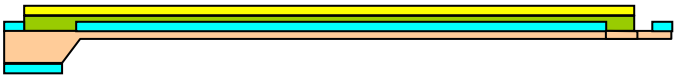
k. gravure sèche de la liaison en silicium

l. gravure humide de l'aluminium

m. dépôt de chrome et d'or par pulvérisation

n. photolithographie simple face

o. gravure humide de l'or et du chrome et retrait de la résine

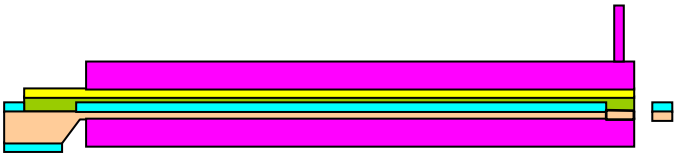


p. photolithographie double face de SU-8

q. photolithographie simple face de SU-8

r. photolithographie simple face de SU-8

s. gravure sèche du silicium



8.2 Elaboration des différentes étapes de fabrication

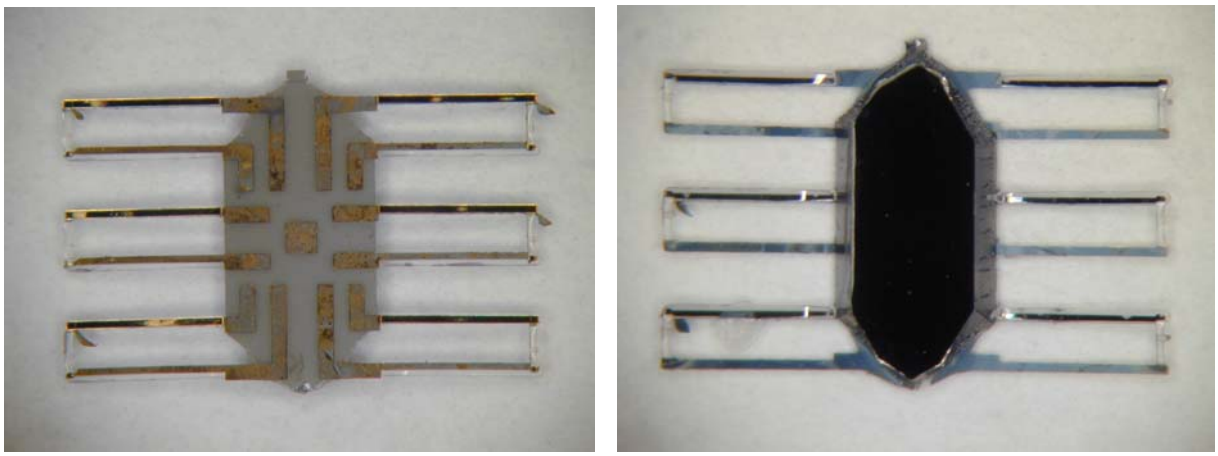
Là encore, les étapes de fabrications étant les mêmes que précédemment, seuls quelques paramètres ont dû être établis pour cette nouvelle fabrication. Comme par exemple le temps de la gravure sèche de la liaison silicium (étape k), le nombre de liaison à graver étant différent, cela change la surface à graver et donc le temps de gravure par RIE. Le temps de gravure sèche pour la libération des structures (étape v) a dû être modifié lui aussi.

Gravure humide de l'aluminium (étape l)
C'est l'acide nitrique qui a été utilisé dans ce procédé pour graver le reste de l'aluminium. Le temps de gravure n'étant pas critique, puisque l'acide nitrique n'attaque ni l'oxyde ni l'aluminium.

Dépôt de chrome et d'or par pulvérisation (étape m)
Pour simplifier le procédé de fabrication, et éviter deux dépôts successifs avec ouverture du bâti de pulvérisation, les dépôts de titane, cuivre et or ont été remplacés par des dépôts chrome et or. Le chrome est utilisé comme couche d'accroche, et l'or pour les contact et l'alimentation des actionneurs.

Gravure humide de l'or et du chrome
L'or et le chrome sont gravés avec des produit d'attaque standard du commerce.

Les résultats de fabrication du microrobot réalisé à l'IMFC sont présentés en Figure 4.15.



(a) (b)

Figure 4.15 : Microrobot réalisé à l'IMFC (a) vue de dessous (b) vue de dessus

Le procédé de fabrication que nous avons établi pour ces réalisations est donné en annexe 11.

9 Conclusion

En utilisant les procédés présentés dans ce chapitre, nous avons réalisé :

- des prototypes d'actionneurs à l'IMM,
- des prototypes d'actionneurs à l'IMFC,
- quatre prototypes différents de micropattes,
- un prototype de microrobot.

Le Tableau 4.1 présente une synthèse des différentes structures, avec les résultats obtenus et la suite qui leur a été donnée.

Structure	**Résultats**	**Perspectives**
Actionneurs IMM	Déplacements très faibles	Augmenter la couche métallique
Actionneurs IMFC	Déplacements toujours faibles	Utilisation dans le domaine optique
Micropattes Ni/Si	Déflexion correcte Consommation énergétique importante	Améliorer la consommation énergétique
Micropattes SU-8/Si liaison 20 µm Si	Déflexion correcte Consommation énergétique correcte Inclinaison faible	Améliorer l'inclinaison
Micropattes SU-8/Si liaison 60 µm SU-8	Déflexion correcte Consommation énergétique correcte Inclinaison faible	Améliorer l'inclinaison
Micropattes SU-8/Si liaison 20 µm SU-8	Déflexion correcte Consommation énergétique correcte Inclinaison correcte	Réalisation de la structure complète du microrobot
Microrobot	Fonctionnement correcte	Améliorer la connectique

Tableau 4.1: Synthèse des différentes structures fabriquées durant la thèse

Les différents procédés décrits dans ce chapitre ont été longs et difficiles à établir. De nombreux essais ont dû être fait pour certaines étapes de dépôt par pulvérisation, de gravure par RIE ou de dépôt de résine SU-8 . Ceci pour définir les paramètres, optimiser les étapes et obtenir les résultats attendus et pour qu'ils soient reproductibles.
De la fabrication des premiers actionneurs à l'IMM, à la fabrication de la structure complète du microrobot, nous avons acquis une bonne maîtrise des techniques de fabrication en salle blanche, ainsi que des techniques de caractérisation des réalisations.
Toutes les structures réalisées ont été expérimentées, pour permettre une évolution ou un retour sur conception pour améliorer les performances, et aboutir à une structure complète du microrobot.

10 Références bibliographiques

[1] http://aveclafaux.freeservers.com/SU-8.html#lorenz98c
[2] A. Bonvilain, J.R. Coudevylle, P. Blind, N. Chaillet "Micromachined thermal actuated microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of SPIE, Micromachining and Microfabrication 2001, sur CD ROM, 12 pages, pp. 403-414, Vols. 4557-4561, 22-25 octobre 2001, San Francisco, CA USA.

Chapitre 5 :
Réalisation et expérimentation du microrobot

1 Introduction

Dans ce chapitre, une première partie présente la structure du microrobot et son fonctionnement. La deuxième partie concerne l'étude mécanique de la structure, notamment le fonctionnement dynamique du microrobot. La troisième partie présente les simulations numériques de la structure complète réalisées sous Ansys. La quatrième partie décrit la réalisation du microrobot, son procédé de fabrication ayant été décrit au chapitre précédent. La cinquième partie présente les résultats des expérimentations et les performances du microrobot. Pour conclure, une comparaison de notre microrobot est effectuée avec les différents microrobots réalisés dans le monde et présentés au chapitre 1.

2 Structure du microrobot

A l'issue de la réalisation des micropattes de type 4, constituées de deux bilames thermiques fonctionnant en opposition, leur expérimentation nous a permis d'obtenir des déplacements et un cycle de fonctionnement satisfaisants. Ce sont donc ces micropattes qui sont associées sur un corps en silicium pour réaliser la structure complète du microrobot comme le présente le schéma de la Figure 5.1.

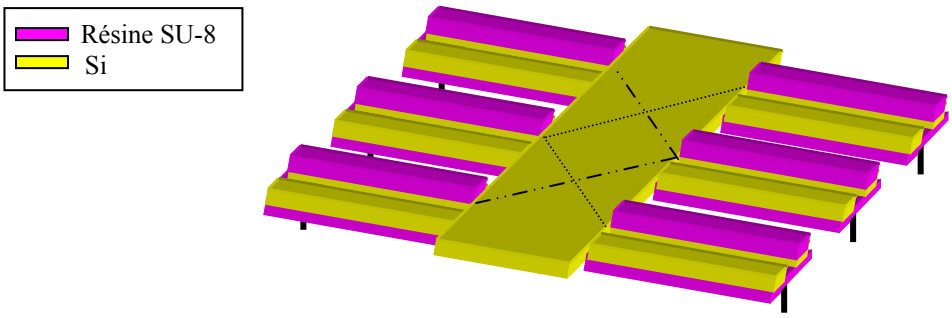


Figure 5.1 : schéma de la structure complète du microrobot

Rappelons que les pattes sont mises en mouvement trois par trois comme dans la marche normale d'un insecte. C'est à dire les deux pattes extrêmes d'un côté et la patte centrale de l'autre, comme le montre les pointillés et les traits mixtes fin sur le corps du microrobot à la Figure 5.1.

Le choix de six pattes était implicite, notre microrobot étant basé sur la morphologie d'un insecte. Néanmoins, une étude rapide montre que l'idéal pour la répartition du poids peut être différent.

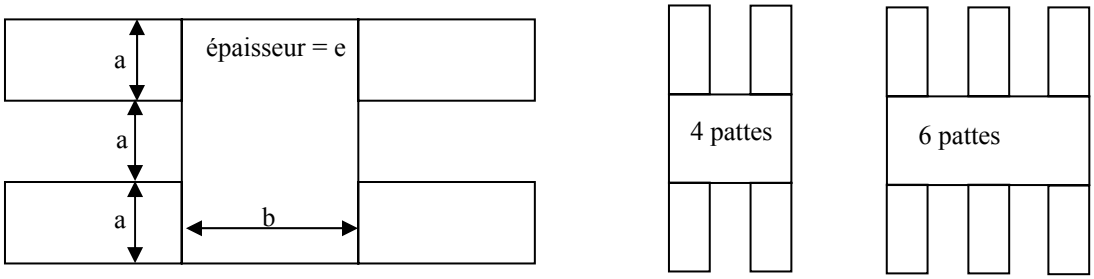


Figure 5.2 : schéma de la dimension du microrobot en fonction du nombre de pattes

D'après la Figure 5.2, il est possible de déterminer le poids supporté par chaque patte en fonction du nombre de pattes. L'écart entre deux pattes est choisi de la même dimension que la largeur d'une patte.

Notons (2.n) le nombre de pattes. Le volume du corps du microrobot s'écrit alors :

$$V = (2.n - 1).a.b.e$$

et la masse :

$$m = \rho.V$$

Le poids supporté par une patte est :

$$P_p = \frac{m}{2.n} = \frac{\rho.\left[(2.n-1).a.b.e\right]}{2.n} = \frac{A.(2.n-1)}{2.n}$$

Avec $A = \rho.a.b.e$

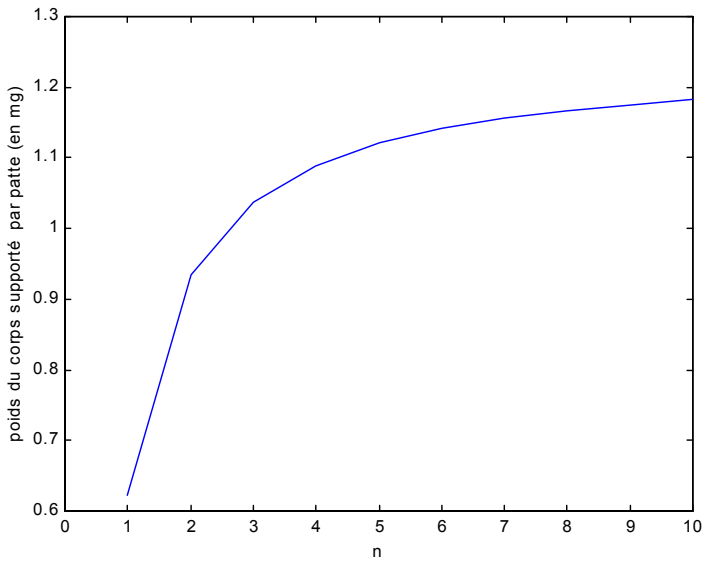


Figure 5.3 : poids supporté par une patte en fonction du nombre de patte

La Figure 5.3 montre que plus le nombre de pattes est faible, plus le poids supporté par chaque patte est faible.

En revanche, pour ce qui est de la stabilité du microrobot, l'idéal est d'avoir six pattes ou plus. Le choix des six pattes est donc tout à fait approprié dans le cas de notre microrobot.

Nous avons calculé au chapitre 3 la déflexion engendrée par le poids du corps du microrobot sur un actionneur. Reprenons ce calcul pour le poids réel du corps effectivement réalisé.

La masse m_c (en kg) du corps s'écrit :

$$m_c = L.l.e.\rho = 6,22.10^{-6}\ \text{kg}$$

L est la longueur du corps et vaut : 3,5 mm,
l est la largeur du corps et vaut : 2 mm,
e est l'épaisseur du corps et vaut : 380 µm,
ρ est la densité du silicium et vaut : 2340 Kg/m^3.

Le poids P (en N) du corps s'écrit :

$$P = m.g = 61\ \mu N$$

g est l'accélération de la pesanteur et vaut : 9,81 m/s^2.

Le microrobot possède six pattes et douze actionneurs, le poids du corps par actionneur Pa (en N) est donc de :

$$Pa = \frac{P}{12} = 5{,}1\ \mu N$$

La déflexion d'un actionneur se calcule par :

$$\delta = \frac{Pa.L^3}{3.E.I} = 0{,}5\ \mu m$$

E est le module d'Young moyen du bilame et vaut : 31 GPa,
I est le moment quadratique du bilame et vaut : $4{,}26.10^{-18}\ m^4$.

Le poids du corps du microrobot génère une déflexion des actionneurs donc des pattes de 0,5 µm, que l'on peut considérer comme négligeable.

Finalement, les dimensions du corps du microrobot (Figure 5.4) sont déterminées par la taille des pattes, et par les connections qu'il est nécessaire de positionner sur le corps. Les dimensions du corps sont par conséquent les suivantes :

- 3,5 mm de long,
- 2 mm de large,
- 380 µm d'épaisseur.

Ces dimensions sont susceptibles de varier avec l'évolution du microrobot.
L'épaisseur est celle du wafer utilisé. Dans un premier temps, l'épaisseur du wafer est conservée pour permettre des opérations de connexion sur le corps du microrobot sans trop de risque de détérioration. Par la suite, l'épaisseur du corps pourra être réduite.

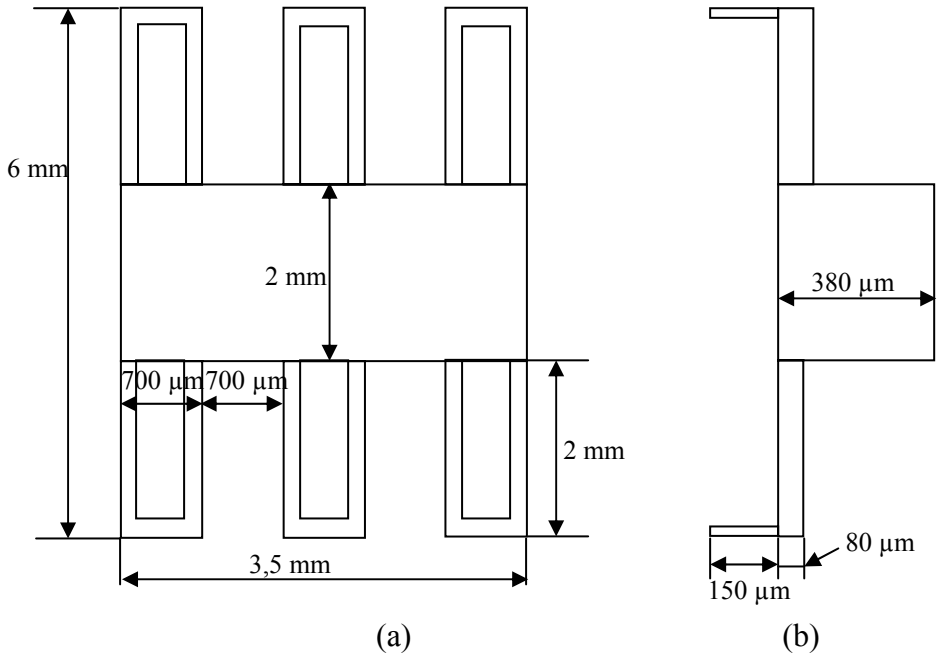


Figure 5.4 : schéma des dimensions du microrobot (a) vue de dessus (b) vue de gauche de la vue (a)

Le microrobot a finalement pour dimensions hors tout : 3,5 mm de long, 6 mm de large et 500 µm de hauteur. Ces dimensions sont très inférieures aux dimensions maximaled que nous nous étions fixés d'un cube de 10 mm de côté, comme le schématise la Figure 5.5.

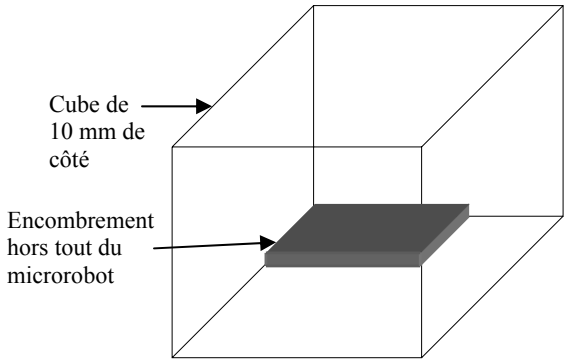


Figure 5.5 : schéma de l'encombrement du micorobot dans un cube de 10 mm de côté

3 Etude mécanique de la structure du microrobot

L'étude statique de la patte effectuée au chapitre 3 avait pour objet de définir l'équilibre du microrobot dans son état repos. Nous avons étudié quelles étaient les forces mises en jeu dans les pattes, pour déterminer leurs déformations. Ces résultats nous ont permis de dimensionner les pattes ainsi que leurs actionneurs. Nous réalisons maintenant une étude mécanique dynamique pour prévoir le comportement du microrobot en mouvement, notamment pour définir sur quel type de sol il peut se déplacer (en fonction de son état de surface), et définir les conditions de non glissement du pied sur le sol.

Le glissement est défini par un cône dont le demi-angle est φ, comme indiqué Figure 5.6. La force résultante appliquée au point de contact entre les deux solides est notée d_f, et ses projections verticales et horizontales sont notées respectivement $d_{n,f}$ et $d_{t,f}$ [2].

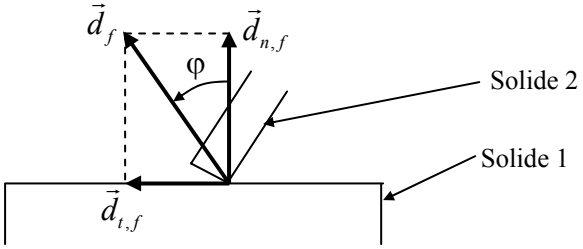


Figure 5.6 : représentation des conditions de glissement

Le coefficient d'adhérence f vaut : $f = tg\ \varphi$.

La condition d'équilibre s'écrit :

$$\left\|\vec{d}_{t,f}\right\| \leq f.\left\|\vec{d}_{n,f}\right\|$$

3.1 Etude mécanique dynamique du microrobot

Dans le cycle de fonctionnement des pattes du microrobot, chaque patte est actionnée pour faire avancer le pied d'un pas, et c'est lorsque l'alimentation est arrêtée que le microrobot avance. L'étude dynamique permet de prédire le mouvement de la patte par rapport au sol lorsque l'on arrête l'alimentation. Non alimentés, les deux bilames de chaque patte agissent alors comme des lames de ressort. Chaque actionneur subit une certaine déformation lors de son alimentation, et le retour se fait par l'élasticité de la structure. Le schéma de la Figure 5.7 montre l'état déformée de trois pattes, lorsque celles-ci sont alimentées.

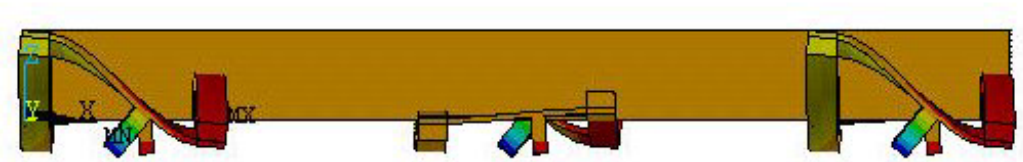


Figure 5.7 : schéma de la structure du microrobot vu de côté lorsque trois pattes sont actionnées

Etudions l'équilibre du microrobot dans cet état. Pour cela, décomposons les différents états par lesquels passe le microrobot lorsqu'il effectue un pas, comme l'indique la Figure 5.8. Sur cette figure, les pieds sont volontairement grossis par rapport au corps, pour bien montrer ce qu'il se passe au niveau du contact entre les pattes et le sol.

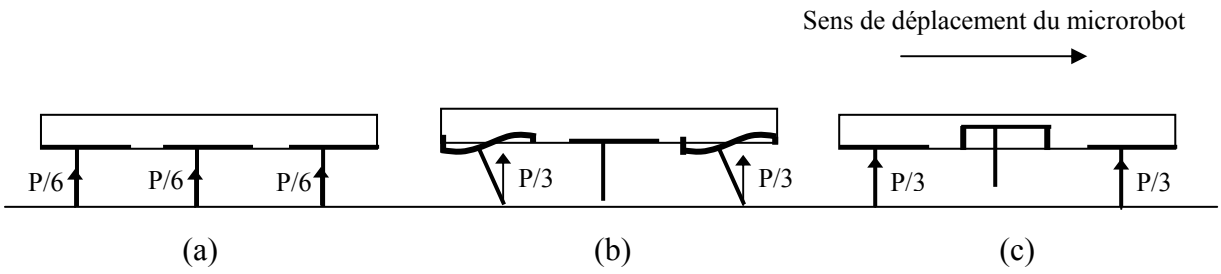


Figure 5.8 : décomposition des états par lesquels le microrobot passe lorsqu'il effectue un pas
(a) état repos, aucune patte n'est actionnée, elles touchent toutes le sol
(b) trois pattes sont actionnées mais ne bougent plus, les pattes actionnées touchent le sol, pas les autres
(c) les trois pattes actionnées sont revenues à leur état repos par élasticité de leur structure, pendant que les trois autres sont actionnées à leur tour

A la Figure 5.8 b, trois pattes sont non actionnées et ne touchent pas le sol, les trois autres sont actionnées et sont en contact avec le sol. Le microrobot ne bouge pas, il est en équilibre sur les trois pattes au sol. Il n'est alors soumis qu'à son propre poids, et les efforts sont tous normaux à la surface du sol. Il ne peut donc pas y avoir de glissement. Dans l'état suivant, l'alimentation est arrêtée, et le microrobot fait un pas. Dans le même temps, les trois autres pattes sont actionnées pour se lever (Figure 5.8 b). C'est dans cet état que le pied risque de glisser sur le sol si l'accélération est trop importante.

Calculons l'accélération maximale du pied qui lui permet de ne pas glisser :

$f.P = m.\gamma$ avec $P = m.g$

f est le coefficient de frottement du pied sur le sol,
P est le poids du microrobot,
m est la masse du microrobot,
γ est l'accélération du microrobot dans la direction de son déplacement,
g est l'accélération de la pesanteur qui vaut 9,81 m/s².

Ceci peut donc s'écrire :

$f.g = \gamma$

Prenons $f = 0{,}3$ (valeur classiquement utilisée pour f) et calculons γ : γ = 3 m/s².

Tant que γ reste inférieure à 3 m/s², le pied ne glisse pas.

Calculons maintenant l'accélération du pied lors du retour des actionneurs dans leur position de repos. Pour cela, traçons la courbe de déflexion de l'actionneur en fonction du temps lors de son refroidissement. Dans le calcul, nous considérons comme négligeable la constante de temps mécanique devant la constante de temps thermique.

$$m.Cp.\Delta\dot{T} + h.S.\Delta T = 0$$

$$\frac{m.Cp}{h.S}\Delta\dot{T} + \Delta T = 0$$

$$\tau.\frac{dT}{dt} + \left(T - Ta\right) = 0$$

$$T(t) = Ta + (T - Ta)e^{-t/\tau}$$

m est la masse de l'actionneur,
Cp est la chaleur spécifique de l'actionneur,
ΔT est l'écart de température entre l'actionneur et la température ambiante,
h est le coefficient de convection,
S est la surface de convection,
T est la température de l'actionneur,
Ta est la température ambiante,
t est le temps de refroidissement.

D'autre part :

$$\delta = \frac{V.L^2.\Delta T}{2.e}$$ (équation 4 chapitre 2)

D'où :

$$\delta = \frac{V.L^2.(T - Ta)e^{-t/\tau}}{2.e}$$

La courbe de la déflexion en fonction du temps lors du refroidissement des actionneurs est présentée en Figure 5.9.

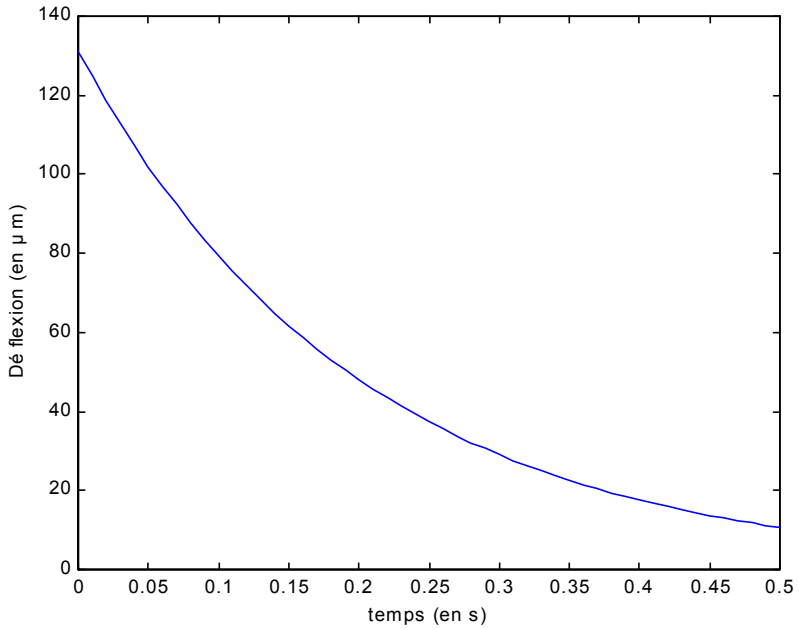


Figure 5.9 : courbe de la déflexion en fonction du temps lors du refroidissement des actionneurs

L'accélération est maximum au début du refroidissement lorsque δ = 130 µm. Calculons alors la valeur de l'accélération à cet instant :

$$\delta = B.e^{-t/\tau}$$

$$\dot{\delta} = -\frac{B}{\tau}e^{-t/\tau} \text{ , avec } B = \frac{V.L^2.(T - T_a)}{2.e}$$

$$\ddot{\delta} = \frac{B}{\tau^2}e^{-t/\tau}$$

Pour t = 0 s :

$$\ddot{\delta} = \frac{B}{\tau^2} = 1,27.10^{-3} \ m/s^2$$

L'accélération du pied au début du pas est de $1,27.10^{-3}$ m/s², ce qui est très largement inférieur à l'accélération maximale pour qu'il y ait glissement (3 m/s²), il n'y aura donc pas de glissement.

Nous pouvons maintenant déterminer le coefficient de frottement qui pourrait amener un glissement, pour déterminer le type de sol sur lequel le microrobot ne pourrait pas se déplacer sans glisser :

$$f.g = \gamma$$

avec : γ_{max} du pied = $1,27\ 10^{-3}$ m/s²
g = 9,81 m/s²

$$f = \frac{\gamma}{g} = 1,29.10^{-4}$$

Le coefficient de frottement est une grandeur de l'ordre de 0,005 dans les cas les plus favorables au glissement (sur le téflon par exemple). Le coefficient de frottement calculé ici est de $1,29.10^{-4}$, or il ne semble pas possible de trouver une surface courante qui ait un coefficient de frottement aussi faible. Nous pouvons donc en déduire que le microrobot peut se déplacer sur tous les types de surface sans glisser.

3.2 Détermination de la rugosité maximale de la surface sur laquelle le microrobot peut se déplacer

D'après la Figure 5.10, la grandeur qui détermine la rugosité d'une surface est l'indice de rugosité Ra. La rugosité est définie par l'écart moyen arithmétique du profil qui s'écrit :

$$Ra = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$$

En fabrication mécanique, les valeurs de R_a (en microns) suivantes sont couramment utilisées [1]:
R_a > 6,3 correspond à des spécifications peu sévères,

$1,6 \leq R_a \leq 6,3$ correspond à des spécifications moyennes,
$R_a < 1,6$ correspond à des spécifications sévères.

A titre d'exemple :

- pour une surface métallique brute moulée, $R_a = 10$ à 50,
- pour une surface métallique rectifiée, $R_a = 0,4$ à 3,2,
- pour une surface de verre brut, $R_a = 4$; et pour un verre poli, $R_a = 1$.

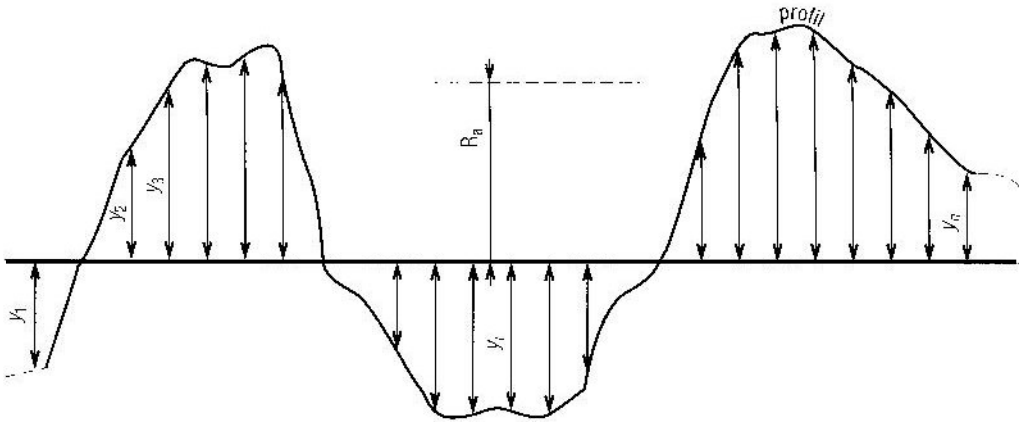


Figure 5.10 : schéma de la détermination de la rugosité d'une surface

La trajectoire de déplacement du pied du microrobot par rapport au sol est présenté Figure 5.11 :

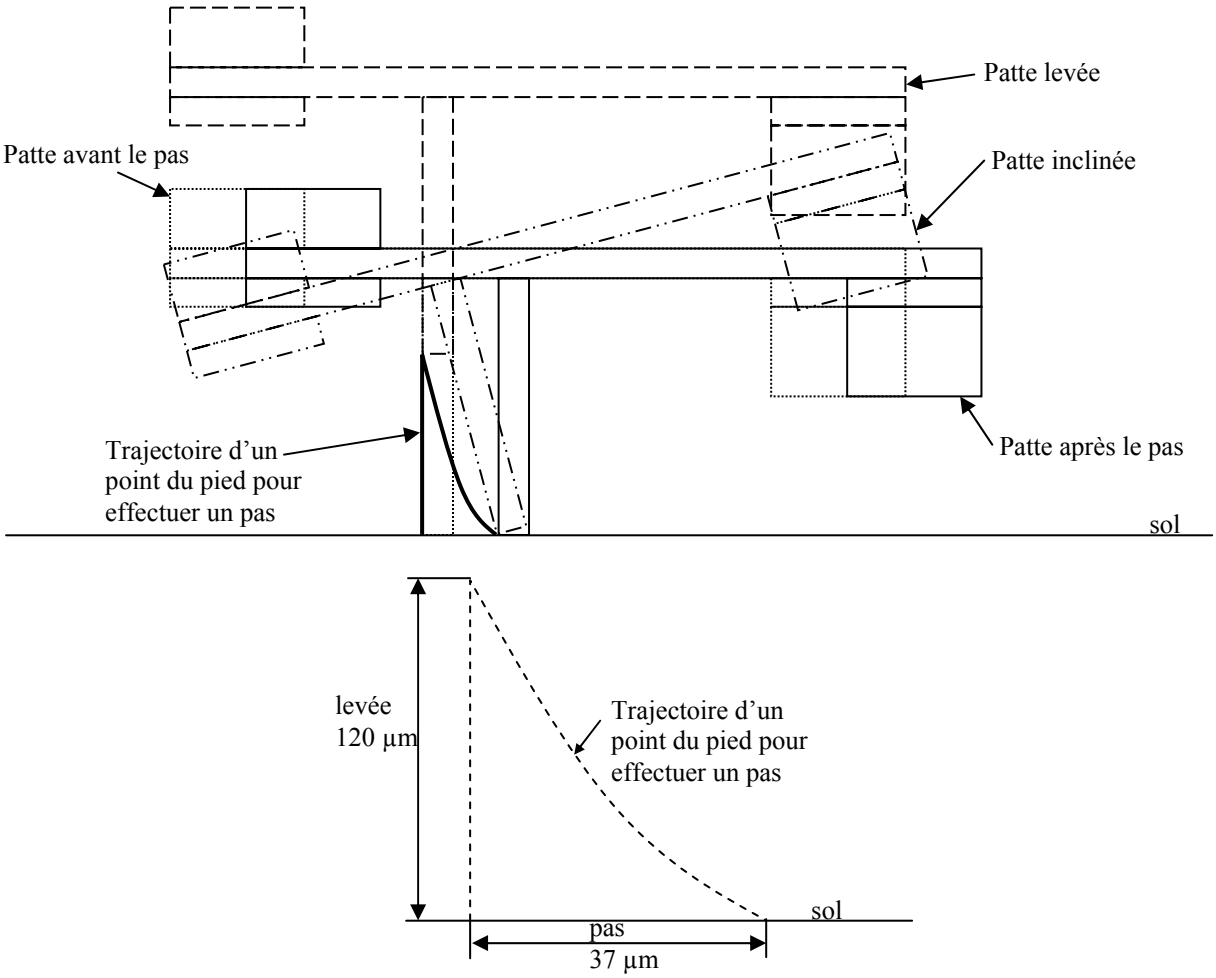


Figure 5.11 : trajectoire de déplacement d'un point du pied du microrobot pour effectuer un pas

D'après cette trajectoire, tant que la hauteur de l'obstacle est inférieur strictement à la course de levée de la patte, il pourra être franchi. La Figure 5.12 présente les trajectoires effectuées par l'extrémité du pied en fonction de l'obstacle et de sa forme.
Cette figure montre en (a) que la longueur du pas n'est pas régulière. Lorsque le pied heurte l'obstacle sans le franchir (pas 1), le pas est plus court qu'un pas sur sol plan. Lors du pas suivant (pas 2), le pied franchit l'obstacle, et du fait qu'il touchera le sol au début de l'inclinaison de la patte, là aussi le pas sera plus court. La vitesse du microrobot sera donc plus lente lors d'un franchissement d'obstacle que sur sol plan et horizontal.

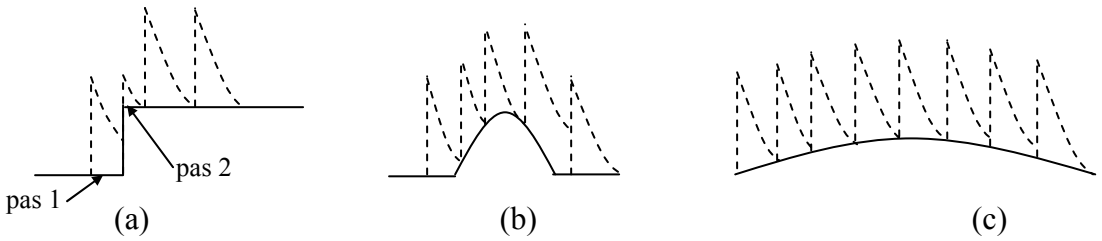


Figure 5.12 : trajectoires de l'extrémité du pied en fonction de l'obstacle à franchir

Il faut noter également que la hauteur du corps par rapport au sol est supérieure à la course de levée d'une patte, donc si le pied peut franchir un obstacle, le microrobot tout entier peut le franchir. Enfin lors de la descente d'un obstacle, la patte entrera en contact avec le sol lorsque les trois autres se lèveront et que l'équilibre du microrobot se fera sur les trois patte non actionnées. Là aussi, la hauteur de l'obstacle devra être inférieure strictement à la course de levée de la patte. Des expérimentations devront être faites pour vérifier toutes ces hypothèses.
En conclusion, il est difficile de définir précisément un indice de rugosité limite. Celui-ci étant une moyenne arithmétique, une valeur donnée de Ra ne préjuge pas de "l'obstacle" maximum qui peut être rencontré, ce dernier devant être inférieur strictement à 100 µm. Le pied ayant une hauteur de 120 µm, cela nous donne une petite marge de fonctionnement. On peut dire néanmoins, d'après les indices de rugosité donnés plus haut à titre d'exemple, que le microrobot peut se déplacer sur une surface métallique brute moulée, ayant un Ra compris entre 10 et 50. Là encore, des expérimentations devront le confirmer.

4 Modélisation numérique sous Ansys du microrobot

Des simulations numériques ont été effectuées sous Ansys, pour déterminer la température dans les pattes lorsque trois d'entre elles sont actionnées comme le montre la Figure 5.13. La simulation des trois autres pattes donne des résultats symétriques. Ces résultats sont conformes aux simulations des pattes seules, l'élévation de température des parties les plus chaudes est de l'ordre de 100 °C.

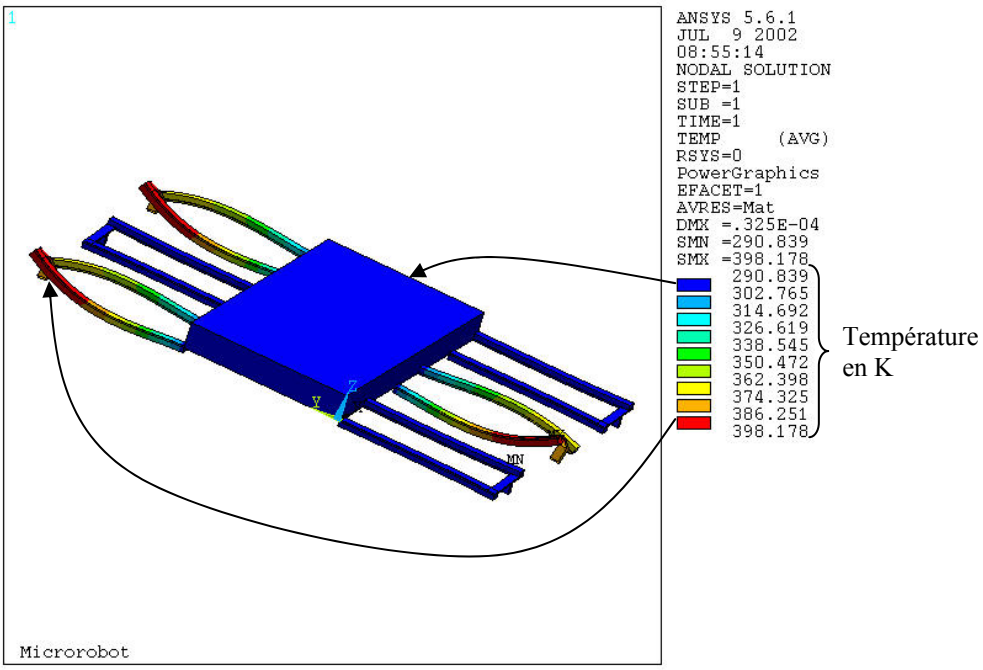
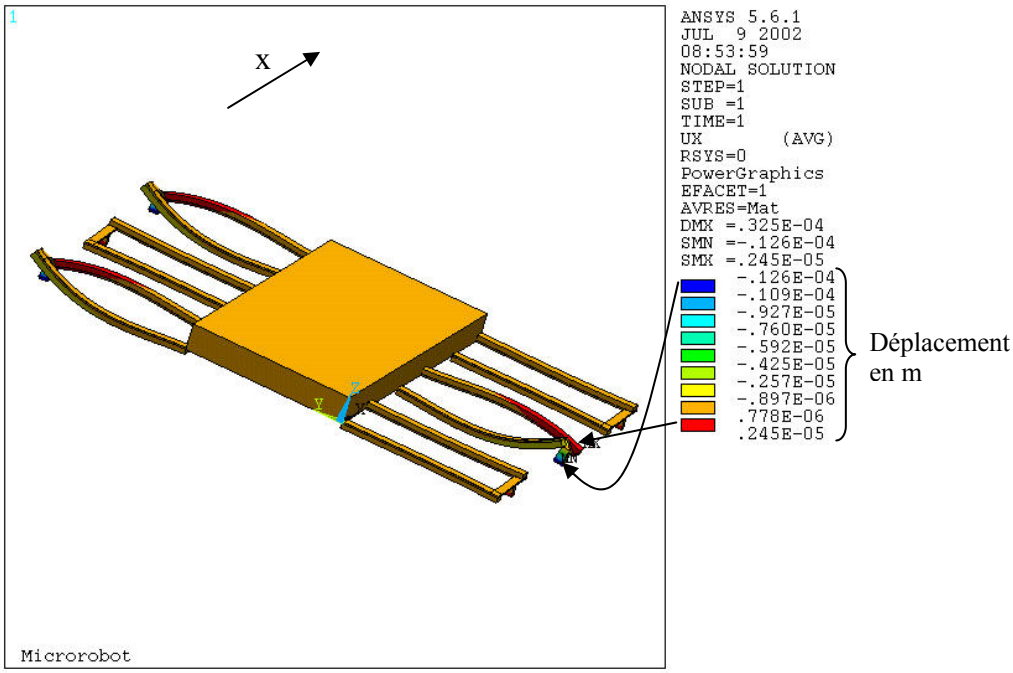


Figure 5.13 : schéma de simulation ansys de la température lorsque trois pattes sont actionnées

La Figure 5.14 donne les déplacements suivant l'axe x lorsque trois pattes sont actionnées. Ces résultats permettent de prédire la longueur du pas (12,6 µm) pour une température donnée (environ 100 °C). La première figure présente le microrobot en perspective, la suivante le présente vu de côté.



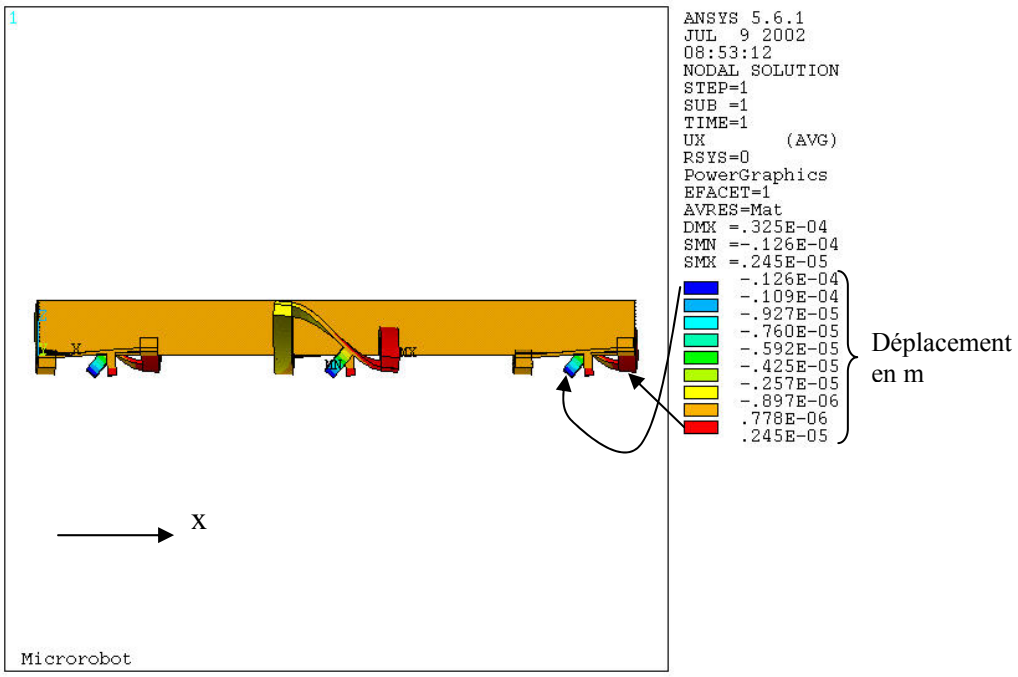


Figure 5.14 : schéma des déplacements suivant x lorsque trois pattes sont actionnées, la première vue présente le microrobot en perspective, la suivante le montre vu de côté

La Figure 5.15 donne les déplacements suivant l'axe y lorsque trois pattes sont actionnées. Ces résultats permettent de vérifier que les déformations (de l'ordre de quelques microns) suivant cet axe ne perturbent pas le bon fonctionnement du microrobot.

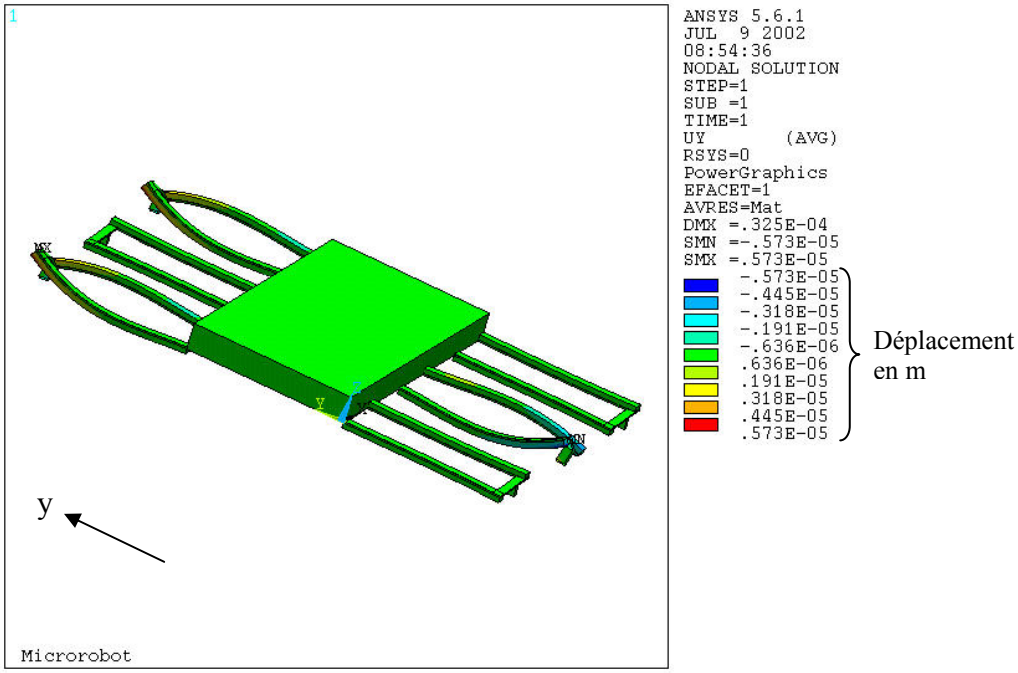


Figure 5.15 : schéma de simulation ansys des déplacements suivant y lorsque trois pattes sont actionnées

La Figure 5.16 donne les déplacements suivant l'axe z lorsque trois pattes sont actionnées. Ces résultats permettent de connaître les déflexions des actionneurs (32 µm pour l'actionneur qui défléchit vers le bas, et 11 µm pour l'actionneur qui défléchit vers le haut), ainsi que

l'inclinaison de la poutre de liaison (5°). Ces déflexions sont bien entendu fonction de la tension d'alimentation appliquée à chaque actionneur et donc de la température.

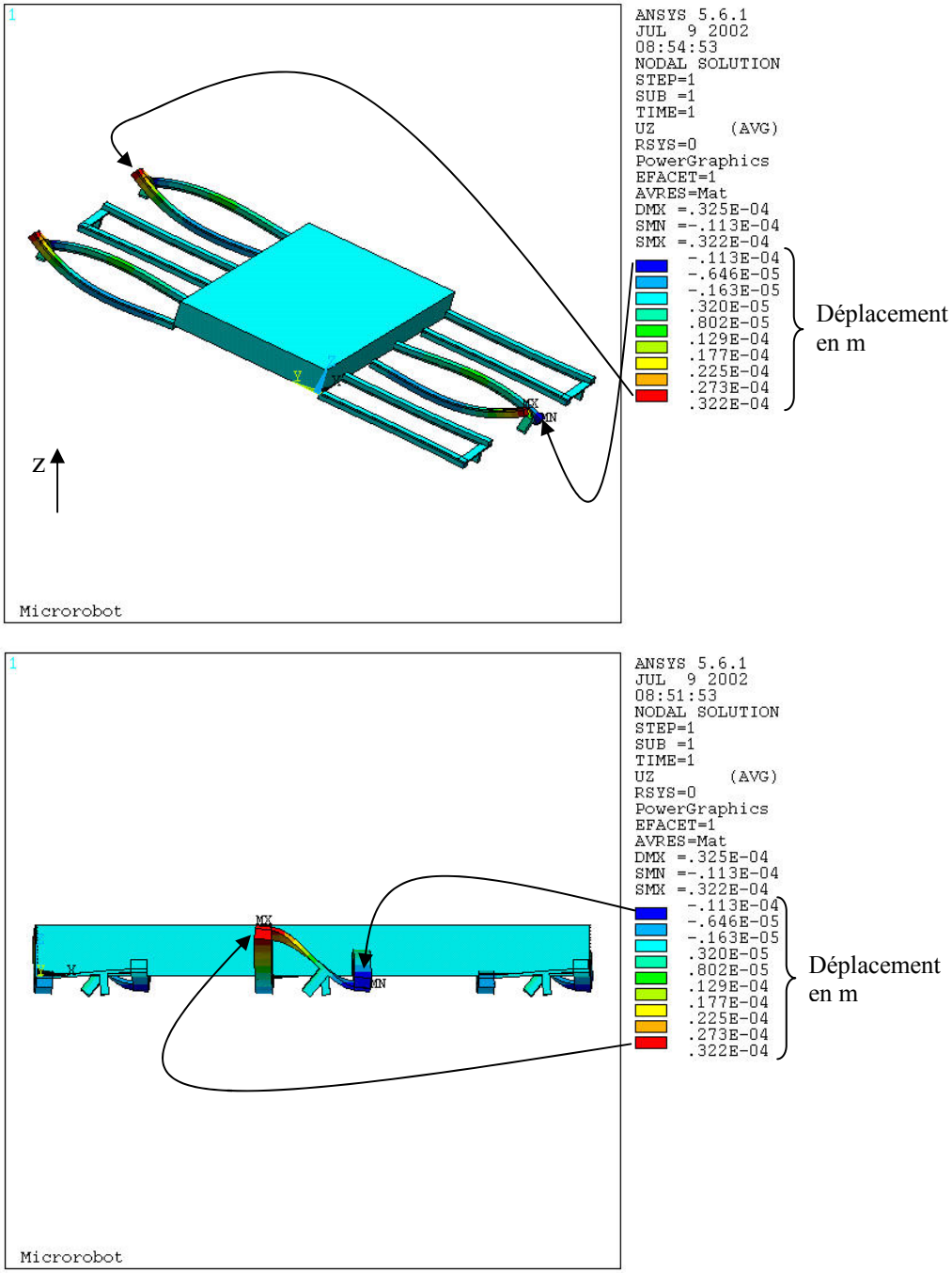


Figure 5.16 : schéma des déplacements suivant z lorsque trois pattes sont actionnées , la première vue présente le microrobot en perspective, la suivante le présente vu de côté

Ces simulations numériques permettent de prédire le fonctionnement du microrobot tel qu'il a été évalué lors de la conception. Notamment pour vérifier le cycle de fonctionnement des pattes, et l'amplitude des déflexions.

5 Réalisation du microrobot

Les microrobots ont été réalisés par microfabrication, le procédé a été décrit au chapitre précédent. Sur le wafer, certains microrobots restent solidaires, et d'autres sont complètement libérés, comme le présentent les photos des Figure 5.17 et Figure 5.18.

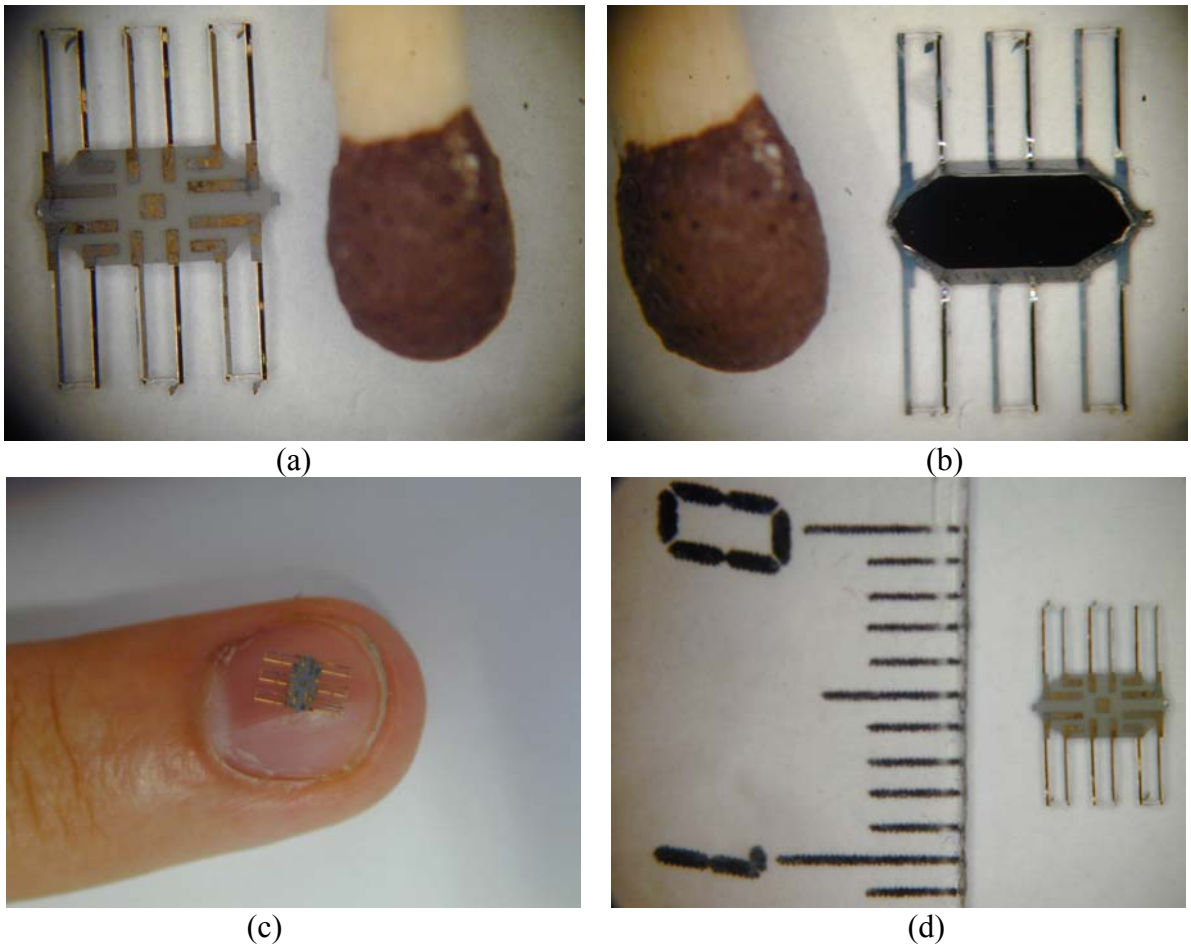


Figure 5.17 : photo du microrobot seul (a) vue de dessous à côté d'une allumette, (b) vue de dessus à côté d'une allumette (c) posé sur un ongle (d) à côté d'une règle centimétrique

Les microrobots libérés n'ont pu être alimentés, en raison des difficultés de connexion des fils d'alimentation. Cette étape a posé des problèmes dus à la fragilité des structures et au poids des fils.

La géométrie des électrodes a alors été modifiée pour permettre un bonding sur le microrobot qui reste solidaire du wafer (Figure 5.18), et son alimentation par pointe pour l'expérimentation.

Dans l'avenir, les liaisons entre les électrodes sera faite par microfabrication. Les connexions d'alimentation seront alors réalisées par des fils de type fils de Litz (fil divisé en plusieurs brins isolés), soudés à la pâte argent.

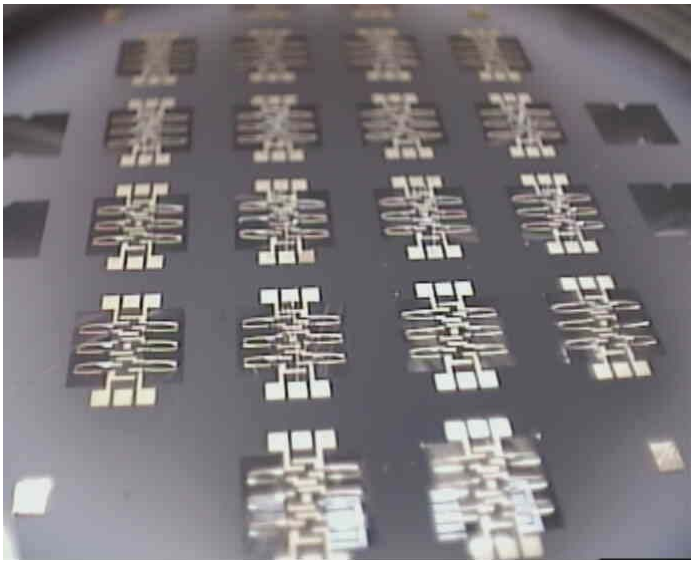


Figure 5.18 : photo des microrobots solidaires du wafer

A l'issue de la fabrication, le bonding est effectué en vue de l'expérimentation, comme le présente la photo de la Figure 5.19.

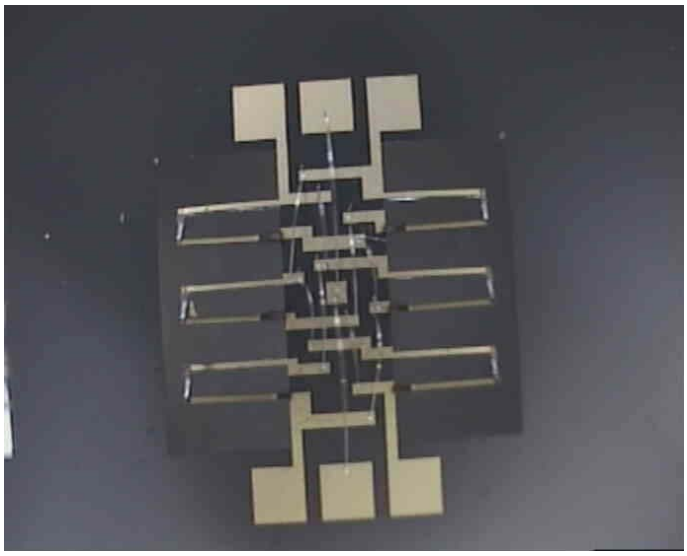


Figure 5.19 : photo du microrobot solidaire du wafer, avec le bonding

Les pattes du microrobot sont actionnées trois par trois comme dans la marche normale de l'insecte, c'est à dire que les actionneurs sont alimentés eux aussi trois par trois. Le schéma de la Figure 5.20 présente les liaisons électriques réalisées par bonding qui permettent l'expérimentation du microrobot.

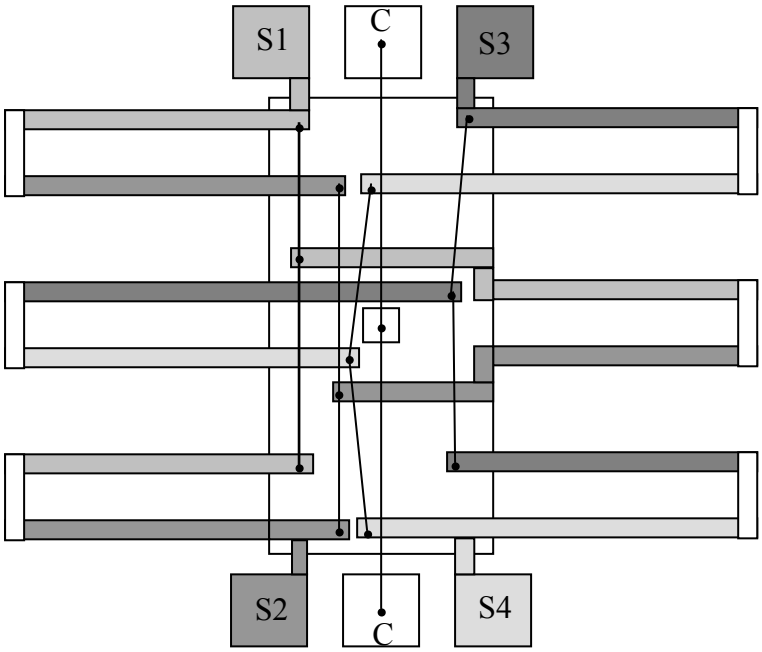


Figure 5.20 : schéma des connexions des actionneurs du microrobot

6 Expérimentations

L'alimentation des actionneurs est effectuée avec les pointes déjà utilisées pour l'expérimentation des pattes (Figure 5.21).

Pour obtenir une alimentation variable pour chaque actionneur, une carte d'alimentation a été développée (voir schéma en annexe 13). Elle comporte quatre voies commandées par un DSP (Digital Signal Processing) comme le présente la Figure 5.22, déjà utilisé lors de l'expérimentation des pattes. Ce DSP génère des signaux synchronisés qui par l'intermédiaire de la carte permettent d'alimenter les actionneurs (Figure 5.23) de manière à ce que les pattes effectuent un cycle de fonctionnement.

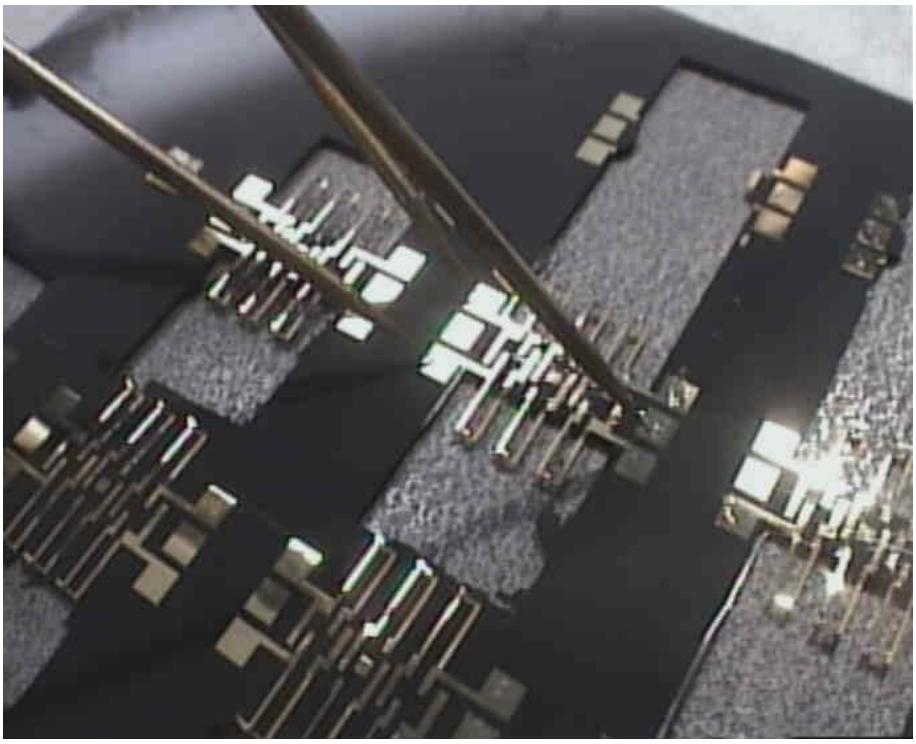


Figure 5.21 : photo du microrobot avec les pointes d'alimentation pour l'expérimentation

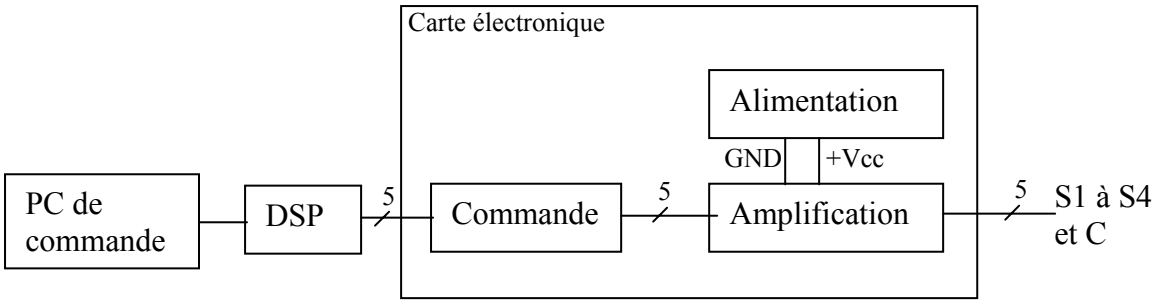


Figure 5.22 : structure de la carte d'alimentation pour les expérimentations du microrobot

La sortie S1 commande la levée de trois pattes, la sortie S2 commande l'inclinaison de ces trois mêmes pattes. Les sorties S3 et S4 commandent les trois autres pattes de la même manière. C'est ainsi qu'est obtenu le cycle de fonctionnement des pattes du microrobot.

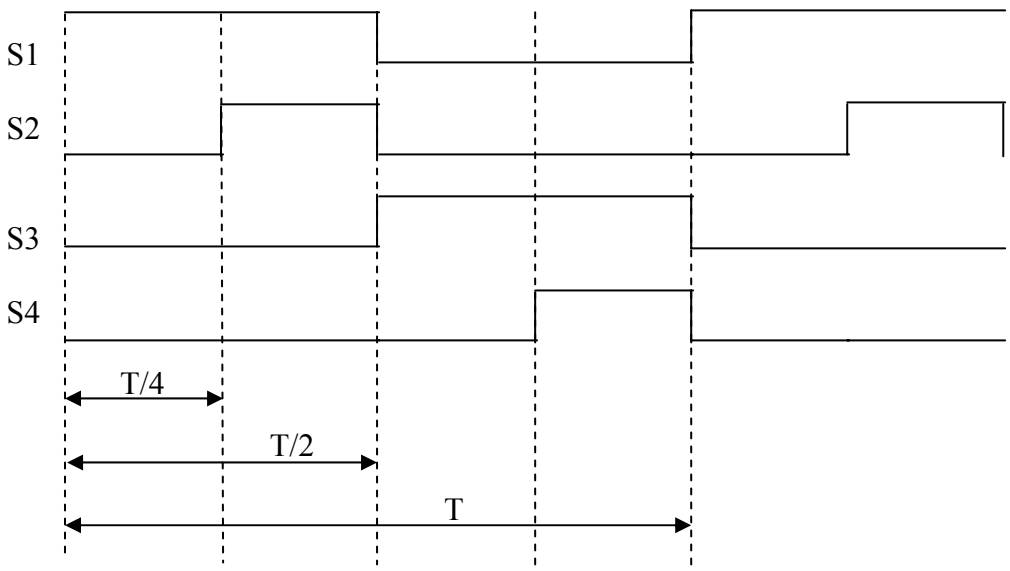


Figure 5.23 : chronogramme des signaux d'alimentation des actionneurs

La première expérimentation consiste à faire fonctionner les six pattes du microrobot de manière synchronisées. Lors de cette expérimentation, le courant est mesuré à la sortie de l'alimentation, c'est à dire qu'il inclut la consommation de la carte électronique d'alimentation. Les courants relevés sont, pour une alimentation sous 5,6 V :
1er quart de période : i = 37 mA
2ème quart de période : i = 46,5 mA
3ème quart de période : i = 31,8 mA
4ème quart de période : i = 51,9 mA.

Ces courants permettent de calculer la puissance électrique et l'énergie consommée par pas :

$$P = 5,6.(34,4 + 49,2) = 468\ mW / pas$$

Pour une fréquence de 1 Hz, la consommation énergétique est de :

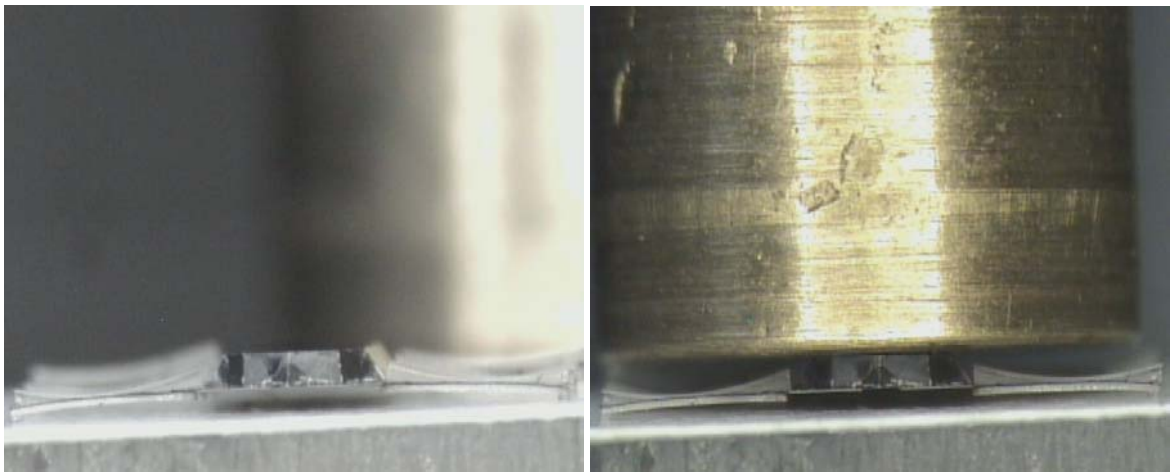
$$E = 468 \times 0,5 = 234\ mJ$$

L'énergie consommée a été évaluée au chapitre 3 pour ces pattes, elle était de 216 mJ/pas. La différence peut être imputée à la consommation de la carte d'alimentation.

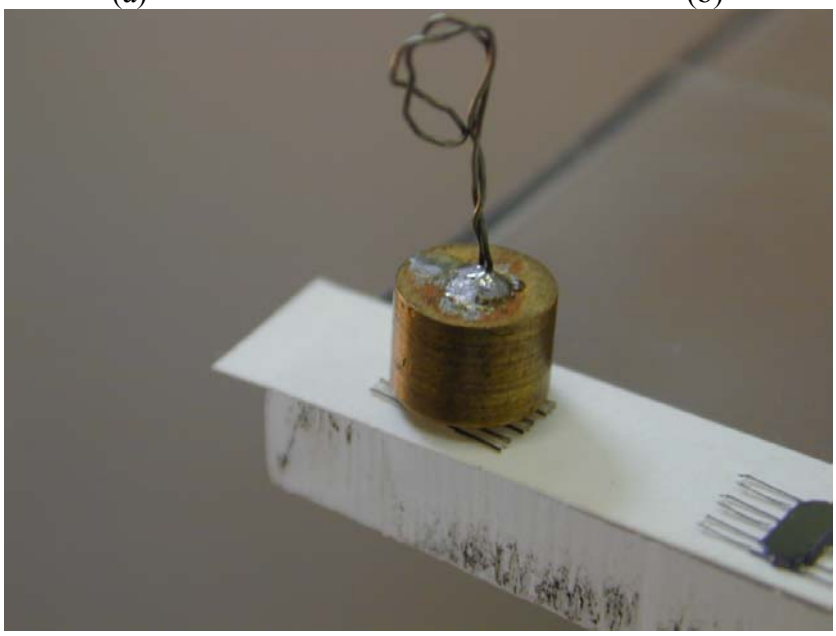
La deuxième expérimentation est une expérimentation en fréquence. La fréquence maximale de fonctionnement de la patte a été déterminée au chapitre 3. Elle est de 1,67 Hz. Les essais sont effectués de 0,2 à 2 Hz. Cette expérimentation montre que plus la fréquence augmente, plus les déplacements des pattes diminuent. Au delà de 1,2 Hz, les déflexion sont plus faibles, mais le cycle de fonctionnement reste complet. Ceci implique que plus le microrobot sera actionné a une fréquence élevée, plus le pas sera petit, ce qui n'accélèrera donc pas la vitesse du microrobot. De plus, plus la fréquence d'actionnement sera élevée, plus la surface sur laquelle le microrobot se déplacera devra être lisse.

Le microrobot est ensuite expérimenté en durée, à une fréquence de 0,5 Hz pendant une heure et dix minutes, ce qui correspond à plus de 2.10^3 cycles de fonctionnement. Ce test n'entraîne aucune détérioration.

La charge que le microrobot peut porter en statique a été calculée, elle est de 5,3 g. Des expérimentations ont été effectuées. Un poids a été posé sur le "dos" du microrobot pour vérifier si les pattes supportaient ce poids, sans que le "ventre" touche le sol. Les photos de la Figure 5.24 présentent les résultats de ces expérimentations.



(a) (b)



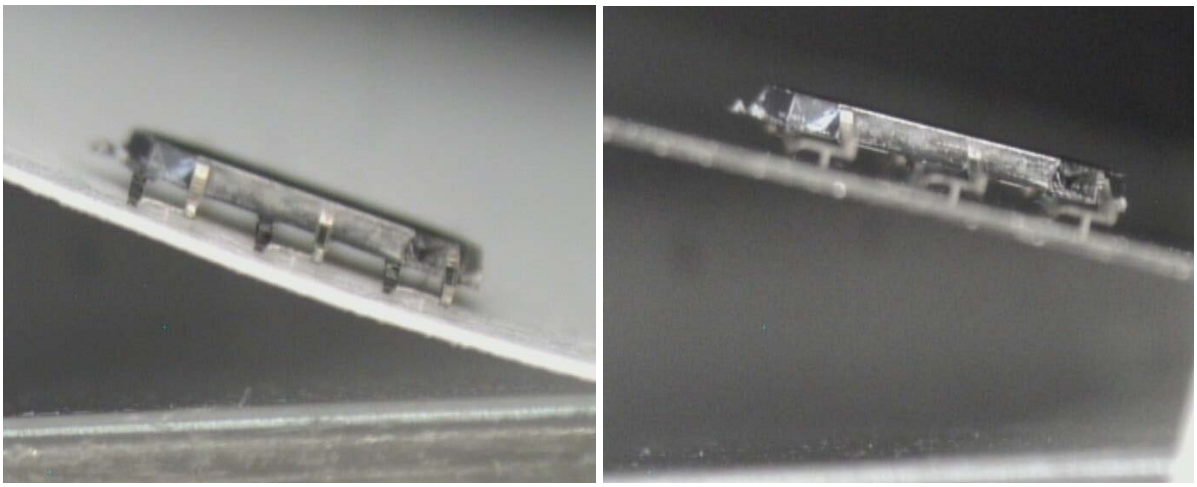
(c)

Figure 5.24 : Photos des expérimentations de la charge statique du microrobot : (a) profil du microrobot à vide, (b) profil du microrobot chargé d'un poids de 1 g, (c) vue d'ensemble du microrobot chargé du poids de 1 g

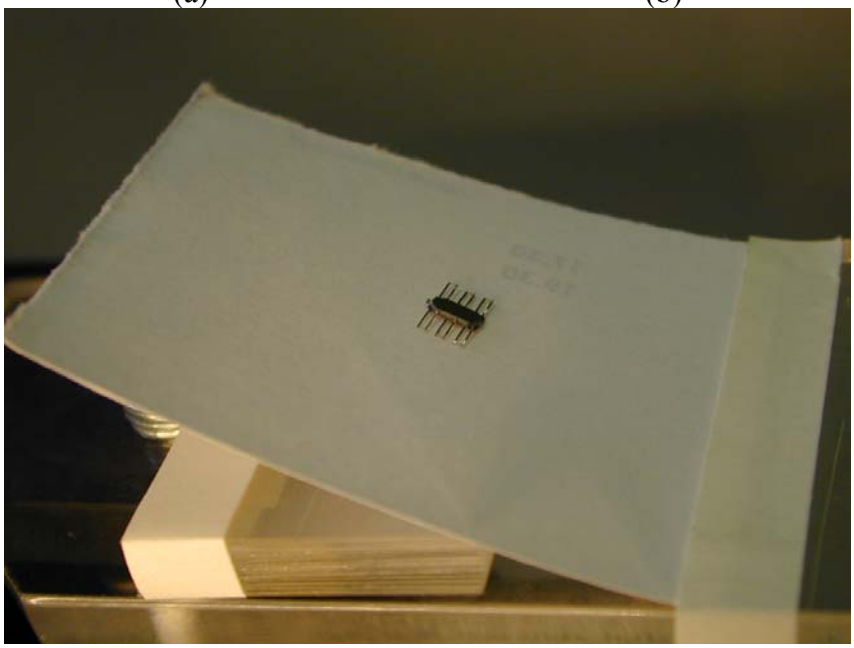
Les poids dont nous disposions sont très gros par rapport au microrobot. Les trois premiers, de 1 g, 2 g et 3 g permettent de vérifier que seules les pattes du microrobot touchent le sol. Le poids de 3 g pose un problème de planéité, il est donc délicat de s'assurer que ce poids est uniformément réparti sur les six pattes. A partir du poids de 4 g, le microrobot disparaît sous le poids, il est donc impossible de vérifier qu'il peut porter les 5,3 g. Il peut néanmoins semble t'il porter au moins 3 g. De nouveaux poids doivent être réalisés, dans un matériau plus dense de manière à être plus petits, pour effectuer de nouvelles expérimentations.

Le microrobot a aussi été placé sur des plans inclinés, un en verre et l'autre en papier. Sur le verre, le microrobot glisse lorsque l'inclinaison est supérieure à 12 °. Par contre sur le papier,

le microrobot ne glisse pas jusqu'à une inclinaison d'environ 20 °. Les photos de la Figure 5.25 présentent le microrobot sur les différents plans inclinés.



(a) (b)



(c)

Figure 5.25 : photos du microrobot sur plan incliné : (a) microrobot sur un plan incliné en papier, (b) microrobot sur un plan incliné en verre, (c) vue d'ensemble de l'expérimentation

Ces expérimentations permettent de vérifier que le microrobot peut rester sur un plan incliné. Lorsque cela sera possible, des expérimentations complémentaires devront être effectuées pour vérifier si le microrobot peut aussi se déplacer sur un plan incliné, et déterminer le degré d'inclinaison du "sol" en fonction de la nature de la surface.

La dernière expérimentation consiste à faire avancer un élément sur les pattes, comme dans le cas d'un microconvoyeur. Cette expérimentation a été réalisée pour valider la marche, mais n'a pas aboutie. Déposer un objet de très petite dimension sur un support aussi fragile avec une résolution inférieure au millimètre et ce avec une brucelle n'a pas été possible. En effet, l'objet touchait toujours la wafer support du microrobot à un endroit et empêchait le fonctionnement. Néanmoins, nous avons pu vérifier que les pattes faisaient bouger l'objet.

Le sommaire des photos et de toutes les expérimentations filmées sont en annexe 14 et jointes sur CD Rom.

Les expérimentations des pattes et du microrobot nous ont permis de déterminer les performances du microrobot que nous pouvons alors positionner par rapport aux autres microrobots déjà réalisés dans le monde, et qui ont été présentés au chapitre 1. Le Tableau 5.1 présente un récapitulatif des caractéristiques de tous ces microrobots.

Microrobot / Caractéristiques	Boston	Berkeley	Tokyo	Colorado	Stockholm	Lille	Washington	Besançon
Dimensions (surface en cm^2x hauteur en mm)	0,28 x 0,2	1 x 0,5	0,0105 x 0,1	0,25 x 0,7	0,75 x 1	2,25 x NC	3 x 1	0,21 x 0,5
Actionnement	piézo-électrique	électro-statique	piézo-électrique	thermique	thermique	électro-statique	thermique	thermique
Vitesse	NC	1 mm/sec	NC	7,55 µm/s	6 mm/s	2,4 µm/s	635 µm/s	102 µm/s
Charge portée	NC	NC	NC	0,128 g	2,5 g	NC	1,448g	5,3 g
Poids propre	NC	NC	NC	32 mg	88 mg	NC	457mg	2,33 mg
Puissance consommée par patte et par pas	NC	quelques µW	NC	592 mW	90 mW	NC	NC	360 mW
Longueur du pas	NC	NC	NC	3,75 µm	NC	0,240 µm	5 µm	37 µm
Fréquence d'actionnement	NC	NC	NC	2 Hz	NC	50 Hz	110 Hz	1,7 Hz
Etat actuel des travaux	non réalisé	non actionné	terminé	terminé	terminé	en cours	terminé	en cours
Nombre de pattes	6	6	6	96	8	128	256 x 2	6
Autonomie du déplacement	oui	oui	non	oui	oui	partiel-lement	partiellement	oui
Nombre de degré de liberté par patte	2	2	1	2	1	1	1	2

Tableau 5.1: tableau comparatif des microrobots

7 Conclusion

La réalisation de la structure complète du microrobot a montré sa faisabilité. Les expérimentations quant à elles ont validé les performances attendues pour notre microrobot.
Le Tableau 5.1 montre que notre microrobot est le deuxième plus petit après Tokyo, Boston n'ayant pas été réalisé, qu'il est le quatrième plus rapide, qu'il est celui qui peut porter la plus grosse charge, et qu'il a une puissance consommée du même ordre de grandeur que les autres. Ce tableau permet aussi de constater que les microrobots actionnés thermiquement ont de grandes amplitudes de déplacement, et une densité d'énergie importante, ce qui leur permet de transporter des charges importantes par rapport à leur poids.
Parmi les microrobots cités dans le tableau, rappelons que celui de Boston n'a, à notre connaissance, jamais été réalisé, que dans celui de Berkeley, l'actionnement n'est pas encore intégré, que celui de Tokyo ne se déplace que sur une surface participant à sa locomotion. Ceux du Colorado et de Stockholm sont par contre entièrement terminés. Celui de Lille est en cours de finition, quant à celui de Washington, il est cité, mais dépasse les conditions de dimensions donnés pour un microrobot au chapitre 1.

Bien que notre microrobot ne soit pas terminé, les résultats sont très encourageants, tant sur l'aspect des microfabrications que sur les performances du microrobot lui même.
A très court terme, la prochaine étape est la réalisation des connexions des électrodes par microfabrication et non plus par bonding, et ceci sur la face supérieure du microrobot. Des outils adéquats devront être développés pour permettre la connexion de fils type fils de Litz pour expérimenter le microrobot dans des conditions réelles de fonctionnement. Des essais pourront alors être effectués sur des surfaces de rugosité variables, voir même le franchissement d'obstacle. Des expérimentations pourront aussi être rélisées pour le transport de charge en dynamique et la marche sur plan incliné.

8 Références bibliographiques

[1] Jean Louis Fanchon, "Guide des sciences et technologies industrielles", Afnor – Nathan, ISBN Nathan : 2.09.176632.1, ISBN Afnor : 2.12.494112.7, 1996.
[2] P Agati, N Mattera, "Mécanique appliquée, résistance des matériaux, mécanique des fluides, thermodynamique", Dunod, ISBN : 2.10.003217.8, 1996.

Conclusion générale

L'objectif premier était de réaliser un microrobot autonome à pattes sur une seule puce pour obtenir un microrobot de type "insecte".

Nous nous sommes focalisés en premier lieu sur la locomotion et l'actionnement des pattes. Depuis la réalisation de l'actionneur bilame en aluminium sur silicium en vue de sa caractérisation, jusqu'à la réalisation de la structure complète du microrobot avec ses actionneurs intégrés, un pas important a été franchi.

L'utilisation du nickel à la place de l'aluminium sur le silicium lors de la réalisation du premier type de patte par microfabrication avait dégradé quelque peu les performances mécaniques de l'actionneur. Mais c'est surtout la consommation énergétique de la patte qui a nécessité un retour sur conception pour envisager une autre solution. Le remplacement du nickel par de la résine SU-8 sur le silicium a nettement amélioré le fonctionnement. La température de fonctionnement a été divisée par quatre, la consommation énergétique a été divisée par plus de sept, pour des performances mécaniques semblables. Seul petit inconvénient, la fréquence d'actionnement a été diminuée, elle a été divisée par un et demi.

Par la suite, c'est l'élasticité de la structure mécanique de la patte qu'il a fallu repenser, en accord avec les possibilités offertes par les microfabrications. C'est ainsi que les pattes de type 4 ont vu le jour, avec un cycle de fonctionnement conforme à celui attendu et des performances tout à fait satisfaisantes.

La réalisation et l'expérimentation de la structure complète du microrobot ont permis de déterminer ses performances par rapport à celles établies théoriquement, et de les comparer avec les performances des microrobots déjà réalisés à travers le monde. Ses performances sont déjà très prometteuses. En effet à notre connaissance, il est d'une part le microrobot le plus petit au monde se déplaçant sur une surface ne participant pas à sa locomotion, et d'autre part le microrobot qui peut supporter le poids le plus important (plus de 5 g). Cette dernière caractéristique permet notamment d'envisager son autonomie énergétique, ou l'embarquement d'autres éléments.

Dans un avenir très proche, deux solutions doivent être mises en œuvre pour permettre une alimentation du microrobot par fil. La première solution consiste à réaliser une partie de la connectique sur le microrobot par microfabrication, ce qui nécessite la mise au point d'un nouveau procédé de fabrication. La deuxième solution consiste à développer les outils nécessaires à la connexion de fils de très petit diamètre par soudure à la pâte argent.

Dans un avenir plus lointain, l'autonomie énergétique de ce microrobot devra être envisagée. Deux pistes pourront être explorées : l'alimentation par induction ou par microbatterie. Dans le premier cas, le microrobot devra se déplacer dans un champ électromagnétique, ce qui n'est pas toujours possible suivant l'application visée. Par contre dans ce cas, l'autonomie du microrobot n'est pas limitée dans le temps. Dans le deuxième cas, le microrobot est parfaitement autonome, mais pour une durée limitée, de plus de deux heures tout de même.

A plus long terme, on peut envisager de lui intégrer sa commande, des capteurs pour lui permettre de percevoir son environnement, et des éléments de télécommunication pour le

diriger ou pour en faire fonctionner plusieurs collectivement. Il peut envisager également de lui intégrer un organe de préhension.

Les applications de ce microrobot à pattes peuvent alors être : l'exploration et l'inspection en milieu fortement confiné ou en milieu hostile, l'inspection, voire la réparation de canalisations de très faible diamètre, le convoyage ou le positionnement d'objets de petites dimensions dans les micro-usines du futur, l'assemblage de pièces micromécaniques rigides, ou encore l'auto-implantation de fonction dans des systèmes complexes.

Références bibliographiques

Chapitre 1 : Insectes et microrobots

[1] Patrice Leraut "Les insectes dans leur milieu", Ecoguide, Bordas, 1976.
[2] Wolfgang Dierl; Werner Ring, trad. fr. Michel Cuisin "Guide des insectes", Delachaux et Niestlé ; ISBN 2-603-00847-1, 1992.
[3] Jiri Zahradnik et Milan Chvala, adaptation française de Michel Cuisin "La grande encyclopédie des insectes", collection Grande encyclopédies, édition Gründ.
[4] P.J. Gullan ; P.S. Cranston "The insects : an outline of entomology", Chapman & Hall, 1996.
[5] Guido Grandi "Introduzione allo studio dell'entomologia", Ed Esopterigoti, vol. I, 1951.
[6] Holk Cruse ; "What Mechanisms Coordinate Leg Movement in Walking Arthropods ?" ; TINS ; Vol. 13 ; N° 1 ; pp 15-21 ;1990
[7] Hirofumi Miura, Takashi Yasuda, Yayoi Kubo Fujisawa, Isao Shimoyama ; "Insect Model Based Microrobot" ; The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX; Stockholm Sweden ; pp 392-395 ; 1996.
[8] Isao Shimoyama, Takashi Yasuda, Hirofumi Miura, Yayoi Kubo Fujisawa, Yuichi Ezura ; "Mobile Microrobots" ; Robotica ; Vol. 14 ; pp 469-476 ; 1996.
[9] Takashi Yasuda, Isao Shimoyama, Hirofumi Miura ; "Microrobot Actuated by a Vibration Energy Field" ; The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators ; pp 42-45 ; 1996.
[10] Jan G. Smits ; "Is Micromecanics Becoming a New Subject for Academic Courses or the Design of a Piezoelectric on Silicon Microrobot" ; Industrie Symposium ; IEEE ; 1989.
[11] Jan G. Smits ; "Design Considerations of a Piezoelectric-on -Silicon Microrobot" ; Sensors and Actuators ; A 35 ; pp 129-135 ; 1992.
[12] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Towards an Articulated Silicon Microrobot" ; Proc. ASME Winter Mtg. ; Chicago ; November 1994.
[13] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Micro Mechanical Components for Microrobotics" ; Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm ; Sweden ; June 1995.
[14] Richard Yeh, Ezekiel J. J. Kruglick and Kristofer S. J. Pister ; "Surface-micromachined components for articulated microrobots" ; Journal of microelctromechanical systems ; Vol. 5 ; N°1 ; pp 10-17 ; march 1996.
[15] P.E. Kladitis, V.M. Bright ; "Prototype Microrobots for Micro Positionning and Micro Unmanned Vehicles" ; Sensors and Actuators 80 ; pp 132-137 ; 2000.
[16] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "3D micromachined devices based on Polyimide Joint technologie", SPIE Conference on Devices and Process Technologies for MEMS and Microelectronics, vol. 3892, pp 118-132, 27-29 october 1999, Queensland, Australia.
[17] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "A Robust Micro Conveyer Realized by Arrayed Polyimide Joint Actuators", IEEE MEMS'99, 17-21 january 1999, Orlando, USA.
[18] Thorbjörn Ebefors, Johan Ulfstedt-Mattsson, Edvard Kalversten, Göran Stemme, "A Robust Micro Conveyer Realized by Arrayed Polyimide Joint Actuators", J. Micromech. Microeng., Vol. 10, pp 1-13, 2000.
[19] Randall D. Beer ; Roger D. Quinn, Hillel J. Chiel and Roy E. Ritzmann ; "Biologically inspired approaches to robotics" ; 1997 ; Communication of the ACM ; vol.40 n°3 ; pp 31-38.
[20] P Basset, A Kaiser, P Bigotte, D Collard, L Buchaillot ; "A large stepwise motion electrostatic actuator for a wireless microrobot" ; Proceeding of MEMS'02, pp 606-609.
[21] http://www.isen.fr/recherche/microsystem/microrobot.htm.

[22] Matthew H. Mohebbi, Mason L. Terry, Karl F. Böhringer ; "Omnidirectional Walking Microrobot Realized by Thermal Microactuator Arrays" ; Proceeding of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition ; New York ; November 11-16 2001.
[23] Uwe Müller-Wilm, Jeffrey Dean, Holk Cruse, Hans-Jürgen Weidemann, Jürgen Eltze, Friederich Pfeiffer ; "Kinematic Model of a Stick Insect as an Example of a Six-Legged Walking System" ; Adaptive Behavior ; Vol. 1, Number 2 ; pp 155-169 ; 1992.
[24] H Cruse ; "Which Parameters Control the Leg Movement of a Walking Insect ? 1. Velocity Control During the Stance Phase" ; J. Exp. Biol. ; N° 116 ; pp 343-355 ; 1985.
[25] Holk Cruse ; "Coordination of Leg Movement in Walking Animals" ; pp 105-119.
[26] H Cruse, J Dean, M Suilmann ; "The Contributions of Diverse Sense Organs to the Control of Leg Movement by a Walking Insect" ; J. Comp. Physiol. ; A 154 ; pp 695-705 ; 1984.
[27] J Dean ; "A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Caurusius Morosius : 1. A Geometrical Consideration of Contralateral and Ipsilateral Coordination Mechanisms Between Two Adjacent Legs" ; Biol. Cybern. ; N° 64 ; pp 393-402 ; 1991.
[28] J Dean ; "A Model of Leg Coordination in the Stick Insect, Caurusius Morosius : 2. Description of the Kinematic Model and simulation of Normal Step Patterns" ; Biol. Cybern. ; N° 64 ; pp 403-411 ; 1991.
[29] Fred Delcomyn ; "Factors Regulating Insect Walking" ; Ann. Rev. Entomol. ; N° 30 ; pp 239-256 ; 1985.
[30] Fred Delcomyn ; Nelson ME ; Cocatre-Zilgien JH "Sense organs of insect legs and the selection of sensors for agile walking robots", 1996, The International Journal of Robotics Research, vol. 15, pp 113-127.
[31] D Graham ; "Simulation of a Model for the Coordination of Leg Movement inFree Walking Insects" ; Biol. Cybernetics ; N°26 ; pp 187-198 ; 1977.
[32] D Graham ; "Pattern and Control of Walking in Insects" ; Advances in Insect Physiology ; Vol. 18 ; pp 31-140 ; 1985.
[33] Wilson D "Insect walking", 1966, Annual Review of Entomology, vol. 11, pp 103-122.
[34] Massood Tabib-Azar "Microactuators : Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical and Smart Structures", 1998, Series Editor : Harry L. Tuller, Kluwer Academic Publishers.

Chapitre 2 : Etude, réalisation et caractérisation d'actionneurs piézo-électriques et thermiques

[1] Massood Tabib-Azar "Microactuators : Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical and Smart Structures", 1998, Series Editor : Harry L. Tuller, Kluwer Academic Publishers.
[2] Sergej Fatikow, Ulrich Rembold "Mycrosystem Technology and Microrobotics", 1997, Springer.
[3] Niels Tas, Jeroen Wissink, Louis Sander, Theo Lammerink, Miko Elwenspoek "Modeling, design and testing of the electrostatic shuffle motor", Sensors and Actuators, A70, 1998, pp 171-178.
[4] N.R. Tas, A.H.Sonnenberg, A.F.M. Sander and M.C. Elwenspoek "Surface Micromachined Linear Electrostatic Stepper Motor",
[5] W.S.N. Trimmer and K.J. Gabriel "Design Consideration for a Practical Electrostatic Micromotor", Sensors and Actuators, 11, 1987, pp 189-206.
[6] Motoharu Yamaguchi, Shuji Kawamura, Kazuyuki Minami and Masayoshi Esashi "Distributed Electrostatic Micro-Actuator", pp 18-23, 1993.

[7] T Akiyama, D Collard, H Fujita "Scratch drive actuator with mechanical links for self assembly of three dimensional MEMS", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 6, n°1, pp 10-17, 1997.
[8] P Minotti, P Langelt, G Bourbon, T Masuzawa "Design and characterisation of high torque/low speed silicon based electrostatic micromotors using stator/rotor contact interactions", Japanese Journal of Applied Physics, vol.37, part 2, n°3B, 1998.
[9] L.S. Fan, Y.C. Tai, R.S. Muller "IC – processed electrostatic micromotors", IEEE International Electronic Devices Meeting, pp 666-669, 1988.
[10] Takashi Yasuda, Isao Shimoyama and Hirofumi Miura "CMOS drivable electrostatic micro-actuator with large deflection",
[11] G. Lin, C.J. Kim, S. Konishi and H. Fujita "Design, Fabrication, and Testing of a C-Shape Actuator", 8th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensor IX, Stockholm, Sweden, june 25-29, 1995.
[12] C.H. Ahn, Y.J. Kim and M.G. Allen "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils", Proc. IEEE MEMS, pp 1-6, 1993.
[13] H. Guckel, T.R. Christensen, J.K. Skrobis, T.S.Jung, J. Klein, K.V. Hartojo and I. Widjaja "A first fonctionnal current excited planar rotationnal magnetic micormotor", Proc. IEEE MEMS, pp 7, 1993.
[14] K.I. Arai and T. Honda "Micromagnetic actuators", Robotica, vol.14, pp 477-481, 1996.
[15] Thomas Frank and Cornelius Schilling "The development of cascadable microdrives with muscle-like operating behaviour", J. of Micromech. Microeng., vol. 8, pp 222-229, 1998.
[16] H Guckel, T Earles, J Klein, J.D Zook, T Ohnstein "Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing", Sensors and Actuators, A53, pp 386-391, 1996.
[17] Anita M. Flynn, Lee S. Tavrow, Stephen F. Bart, Rodney A. Brooks, Daniel J. Ehrlich, K.R. Udayakumar and L. Eric Cross "Piezoelectric micromotors for microrobots", Ultrasonics symposium, pp 1163-117, 1990.
[18] P. Murlat, M. Kohli, T. Maeder, A. Kholkin, K. Brooks, N. Setter, R. Luthier "Fabrication and characterisation of PZT thin-film vibrtors for micromotors", Sensors and Actuators, A48, pp 157-165, 1995.
[19] Nikhil A. Koratkar and Inderjit Chopra "Analysis and Testing of a Froude Scaled Helicopter Rotor with Piezoelectric Bender Actuated Trailing Edge Flaps", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 8, pp 555-570, july 1997.
[20] Toshio Fukuda, Hiroshi Sato, Fumihito Arai, Hitoshi Iwata, Kouichi Itoigawa, Furo Cho, Chikusa Ku "Parallel Beam Micro Sensor/Actuator Unit Using PZT Thin Film and its Application Examples", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1498-1503, Leuven, Belgium, may 1998.
[21] Yongli Huang, Hong Zhang, Eun Sok Kim, Sang Gook Kim and Yong Bae Jeon "Piezoelectrically Actuated Microcantilever for Actuated Mirror Array Application", Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp 191-195, Hilton Head, South Carolina, june 2-6 1996.
[22] Koichi Suzumori, Akihiro Koga, Fumika Kondo and Riyoko Haneda "Integrated flexible microactuator systems", Robotica, Vol. 14, pp 493-498, 1996.
[23] S. Schweizer, S. Calmes, M.Laudon, Ph. Renaud "Thermally actuated optical microscanner with large angle and low consumption", Sensors and Actuators, 1999.
[24] Wensyang Hsu, Zhen-Peng Xu "An Electro-thermally Driven Micro Membranes Actuator with Two-way Deflection", Microsystem Technologies 98, 6th International conference on Micro Electro Opto Mechanical Systems and Components, pp 319-324, Potsdam, December 1-3, 1998.
[25] Murat Okyar, Xi-Qing Sun and William N. Carr "Thermally excited inchworm actuators and stepwise micromotors : Analysis and fabrication", SPIE vol 3224, pp 372-379, 1997.

[26] Qing-An Huang and Neville Ka Shek Lee "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator", J. Micromech. Microeng., vol. 9, pp 64-70, 1999.
[27] John H. Comtois, Victor M. Bright "Application for surface-micromachined polysilicon thermal actuators", Sensors and Actuators A 58, pp 19-25, 1997.
[28] Chi Shiang Pan and Wensyang Hsu "An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator", J. Micromech. Microeng., vol. 7, pp 7-13, 1997.
[29] Ph Lech, C Kara Slimane, B Romanowicz and Ph Renaud "Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuator", J. Micromech. Microeng., vol. 6, pp 134-137, 1996.
[30] J. Agnus, A. Bonvilain, G. Cabodevila, N. Chaillet, Y. Haddab, P. Rougeot "Study and Development of a Station for Manipulation Tasks in the Microworld", SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, Vol. 3834, pp 141-152,Boston, September 1999.
[31] Ryu Kanno, Satoshi Tadokoro, Toshi Takamori and Motofumi Hattori "Linear Approximate Dynamic Model of ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film) Actuator", International Conference on Robotics and Automation, pp 219-225, Mineapolis, April 1996.
[32] N. Chaillet, L. Buchaillot, J. Abadie, I. Roch, Ch. Lexcellent ; "Micro-actionneurs électroactifs" ; Chapitre 5 : Micro-actionneurs en Alliages à Mémoire de Forme ; Collection EGEM, Ed. Hermès Sciences et Publications, ISBN : 2-7462-0364-2, 2002.
[33] A. Lendlein et al : Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 98, 842, 2001.
[34] Cristina R. Neagu, Johannes G. E. Gardeniers, Miko Elwenspoek and John J. Kelly "An Electrochemical Microactuator : Principle and First Results", Journal of Microelectromechanical systems, Vol. 5, n°1, March 1996.
[35] Stephanus Buttgenbach and Jurgen Hesselbach "Shape memory alloy microactuator system", SPIE vol. 3202, pp 20-28, 1998.
[36] Mihai Calin, Nicolas Chaillet, Alain Bourjault, Arnaud Bertsch, Sophie Zissy "Design and Control of Compliant Microrobot", IEEE 1996, pp 489-492.
[37] Mohamed Touaibia, Nicolas Chaillet and Alain Bourjault "In-Pipe Microrobot System based on Shape Memoty Alloy Actuators", Mechatronics'98, Kitakyushu, pp 272-277, 1998.
[38] William Daniau "Micro-Technologies de Salle Blanche à l'IMFC", formation salle blanche IMFC, 1998.
[39] Guillaume Laurent, Emmanuel Piat, "Efficiency of Swimming Microrobots using Ionic Polymer Metal Composite Actuators", IEEE International Conference of Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
[40] http://www.lapinville.net/anim_fourmi.htm
[41] A. Bonvilain, N. Chaillet "Etude et réalisation d'un microrobot de type insecte", Actes des Journées Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'13), 4 pages, 28-29 septembre 2000, IRISA-Rennes.
[42] Yassine Haddab, "Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique", Thèse de doctorat n° 847, université de Franche Comté, 2000.
[43] Alain Bourjault, Nicolas Chaillet, "La microrobotique", Systèmes Automatisés IC2, Information Commande et Communication, Editions Hermès Lavoisier, Hermès Science publication, ISBN 2-7462-0352-9, 2002.
[44] Jan G. Smits and Susan I. Dalke, "The Constituent Equations of Piezoelectric Bimorphs", IEEE Ultrasonic symposium, pp 781-784, 1989.
[45] D.A.Berlincourt, D.R.Curran, H.Jaffe, "Piezoelectric and Piezomagnetic Materials", Physical Acoustics Vol IA Academic Press New-York 1964.

[46] Jan G. Smits and Wai-Shing Choi, "The Constituent Equations of Piezoelectric Heterogeneous Bimorphs", IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, vol. 38, n°3, pp 256-270, may 1991.
[47] Jocelyne Jouanneau, "Pyromètres à bilames", Collection des techniques de l'ingénieur, R 2 540, 1985.
[48] Norme ASTM B 106-78 précise les modalités exactes d'essai pour la détermination de la courbure spécifique de Villarceau.
[49] A. Bonvilain, J. Agnus, N. Chaillet, A. Bourjault "Etude des microactionneurs bilames piézo-électriques et thermiques en vue de la locomotion d'un microrobot à pattes", Actes des Deuxièmes Journées du Pôle Microrobotique, pp. 29-34, 4-5 février 1999, Futuroscope, Poitiers.
[50] Yassine Haddab, Nicolas Chaillet, Alain Bourjault, "A Microgripper Using Smart Piezoelectric Actuators", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2000, 30 octobre au 5 novembre 2000, Kagawa University, Takamatsu, Japon.
[51] Cédrick Chappaz, Thèse en cours au LPMO (Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs).
[52] Emmanuelle Gallois-Pichonat, Jean Claude Jeannot, Michel de Labachelerie, "A micromechanical focusing device for artificial vision", 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Antibes – Juan les pins, 15-18 octobre 2001, .
[53] Quing-An Huang, Neville Ka Shek Lee, "Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°9, pp 64-70, 1999.
[54] Ph. Lerch, C Kara Slimane, B Romanowicz, and Ph. Renaud, "Modelisation and charactérisation of asymmetrical thermal micro-actuators", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°6, pp 134-137, 1996.
[55] John H. Comtois, Victor M. Bright, "Applications for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and array", Sensors and Actuators A58, pp 19-25, 1997.
[56] Chi Shiang Pan and Wensyang Hsu, "An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator", Journal of Micromechanical and Microengeniring, n°7, pp 7-13, 1997.
[57] Martin Hoffmann, Peter Kopka, Edgar Voges, "Bistable micromechanical fiber-optic switches on silicon with thermal actuators", Sensors and Actuators, n° 78, pp 28-35, 1999.
[58] Bernard Eyglument, "Manuel de thermique : théorie et pratique", 2ème édition, Hermes.

Chapitre 3 : Développement des pattes du microrobot

[1] A. Bonvilain, N. Chaillet "Some prototypes of silicon-based thermal actuated microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of the 5th Franco-Japanese Congress & 3rd European-Asian Congress of MECHATRONICS, sur CD ROM, 6 pages, pp. 437-442, 9-11 octobre 2001, Besançon.
[2] A. Bonvilain, N. Chaillet "Fabrication and experiment of microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of SPIE, Microrobotics and Microassembly III, vol. 4568, pp. 163-174, 29-30 octobre 2001, Newton, USA.
[3] http://www.cea.fr/fr/institutions/Clefs44/fr-clefs44/clefs4470.html

Chapitre 4 : Microfabrications mises en œuvre pour la réalisation du microrobot

[1] http://aveclafaux.freeservers.com/SU-8.html#lorenz98c
[2] A. Bonvilain, J.R. Coudevylle, P. Blind, N. Chaillet "Micromachined thermal actuated microlegs for an insect-like microrobot", Proc. of SPIE, Micromachining and Microfabrication 2001, sur CD ROM, 12 pages, pp. 403-414, Vols. 4557-4561, 22-25 octobre 2001, San Francisco, CA USA.

Chapitre 5 : Réalisation et expérimentation du microrobot

[1] Jean Louis Fanchon, "Guide des sciences et technologies industrielles", Afnor – Nathan, ISBN Nathan : 2.09.176632.1, ISBN Afnor : 2.12.494112.7, 1996.
[2] P Agati, N Mattera, "Mécanique appliquée, résistance des matériaux, mécanique des fluides, thermodynamique", Dunod, ISBN : 2.10.003217.8, 1996.

Résumé :

Les microrobots à pattes déjà réalisés par microfabrication dans le monde sont très peu nombreux. A l'heure actuelle, à notre connaissance, on en compte six, certains sont terminés, d'autres sont en cours d'étude. Cette relative rareté s'explique en partie par la difficulté que représente l'intégration d'actionneurs sur de si petites structures. Les travaux présentés ici portent sur l'étude et la réalisation de la structure mécanique et du micro-actionnement d'un microrobot à pattes. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la locomotion du microrobot et à son actionnement. Des micropattes ont été conçues, réalisées et expérimentées. Elles sont actionnées par deux bilames thermiques (en SU-8 sur Si) fonctionnant en opposition, qui leur procurent deux degrés de liberté. Les micro-actionneurs bilames thermiques ont été retenus pour leurs grandes amplitudes de déplacement, leur densité d'énergie importante et leur relative facilité de réalisation par microfabrication. La structure complète du microrobot a ensuite été réalisée de manière monolithique avec six micropattes et un corps en silicium. Ses dimensions hors tout sont de 3,5 mm de long, 6 mm de large et 0,5 mm de haut. Les expérimentations révèlent les bonnes performances de ce nouveau microrobot comparé à ceux déjà réalisés. Notamment, ce microrobot semble être le plus petit au monde possédant six pattes et se déplaçant sur un sol ne participant pas à sa locomotion. Il est aussi capable de supporter des charges importantes. La prochaine étape est l'intégration de la connectique sur le corps du microrobot. A plus long terme, on peut imaginer y intégrer son énergie, sa commande, des capteurs, voire des organes de télécommunication. Ce microrobot pourra être utilisé dans l'exploration d'environnements confinés, dans le microconvoyage ou pour l'auto-implantation de fonctions dans des systèmes complexes.

Mots clés : Insectes, Micro-actionneurs bilames thermiques, microfabrications, micropattes, microrobot

Abstract :

Legged Microrobots already fabricated by microfabrication are little numerous in the world. At the moment we account six, some are ended, the others are in the course of study. This relative rarity explains itself partially by the difficulty which represents the integration of actuators on so small structures. The works presented here concern the study and the fabrication of the mechanical structure and the micro-actuation of a legged microrobot. At first, we were interested in the locomotion of the microrobot and in its actuation. Microlegs were conceived, fabricated and experimented. They are actuated by two thermal bimorphs (in SU-8 resin on silicon) working in opposition, who get them two degrees of freedom. Thermal bimorphs micro-actuators were held for their big amplitudes of movement, their important density of energy and their relative ease of fabrication by microfabrication. The complete structure of the microrobot was then realized in a monolithic way with six microlegs and a body in silicon. Its dimensions except everything are 3,5 mm long, 6 mm wide and 0,5 mm high. The experiments reveal the good performances of this new microrobot compared with those already realized. Notably, this microrobot seems to be the smallest of the world possessing six legs and moving on a ground not participating in its locomotion. It is also capable of carrying important loads. The next stage is the integration of the connectic on the body of the microrobot. In longer term, one can imagine to integrate its energy, its command, sensors, even organs of telecommunication. This microrobot can be used in the investigation of stuffy environments, in the micro-escorting or for the auto-establishment of functions in complex systems.

Key words : Insects, Thermal bimorph micro-actuators, microfabrications, microlegs, microrobot