



Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique.

Yassine Haddab

► To cite this version:

Yassine Haddab. Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2000. Français. NNT: . tel-00258279

HAL Id: tel-00258279

<https://theses.hal.science/tel-00258279>

Submitted on 21 Feb 2008

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.

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Thèse de Doctorat

présentée à

L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté

pour obtenir le

**Grade de Docteur de l'Université de Franche-Comté
Spécialité Automatique et Informatique**

**Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort
et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique**

par

Yassine HADDAB

(DEA en Informatique, Automatique et Productique)

Soutenue le 22 décembre 2000 devant la Commission d'Examen :

K. YUCEF-TOUMI	Professeur MIT Cambridge, Etats-Unis (Président)
M. de MATHELIN	Professeur ENSPS, Université Louis Pasteur, Strasbourg (Rapporteur)
M. RICHETIN	Professeur Université de Clermont-Ferrand (Rapporteur)
M. AROUS	Chef de projet Goodyear, Hysys Consulting, Lissieu
A. BOURJAULT	Professeur ENSMM Besançon
N. CHAILLET	Maître de Conférences, HDR, Université de Franche-Comté Besançon
F. MUNERATO	Maître de Conférences Université de Metz
N. PIAT	Professeur ENSMM Besançon

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) au sein du groupe de recherche « microrobotique et microsystèmes ». Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur Alain Bourjault Professeur à l'ENSM pour m'avoir accueilli au LAB, pour son encadrement, pour ses conseils et également pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance envers Monsieur Nicolas Chaillet, Maître de Conférence, HDR, à l'Université de Franche-Comté pour son parfait encadrement et pour avoir toujours répondu à mes nombreuses sollicitations tout au long de la réalisation des travaux de thèse ainsi que pendant la rédaction de ce mémoire.

Je tiens vivement à remercier Monsieur Kamal Youcef-Toumi, Professeur au MIT (Cambridge) pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs Michel de Mathelin, Professeur à l'ENSPS (Strasbourg) et Marc Richetin, Professeur à l'Université de Clermont-Ferrand pour avoir accepté de rapporter ce travail de thèse ainsi que pour les corrections qu'ils y ont apportées.

Je remercie Monsieur Gonzalo Cabodevila, Maître de Conférence à l'ENSM pour l'aide qu'il m'a apportée lors de la phase de réalisation du système de micropositionnement.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Madame Nadine Piat, Professeur à l'ENSM et Messieurs Francis Munerato, Maître de Conférence à l'Université de Metz et Mustapha Arous, Chef de Projet (Hysys Consulting, Lissieu) pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Patrick Rougeot, Ingénieur de Recherche (LAB) pour son aide inestimable, sa présence permanente et ses qualités humaines.

Je remercie également Monsieur Joël Agnus, Ingénieur d'Etudes (LAB) pour avoir mis à ma disposition les actionneurs piézoélectriques ainsi que pour son aide.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Jean Perry pour son aide technique.

Enfin, il me tient à cœur de remercier tous mes collègues du LAB pour leur soutien et pour la bonne ambiance qu'ils savent maintenir au sein du laboratoire, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail de thèse.

À la mémoire de mon père
À ma mère

Sommaire

Introduction générale	3
------------------------------------	----------

Chapitre 1 : enjeux et applications de la microrobotique

1. La course à la miniaturisation	9
2. La microrobotique : un enjeu stratégique.....	9
3. Qu'est ce qu'un microrobot ?.....	10
4. Domaines applicatifs de la microrobotique.....	11
4.1 La micromanipulation	11
4.2 L'exploration intra-tubulaire.....	11
4.3 Le domaine médical	12
4.4 Le micropositionnement.....	12
4.5 Les microrobots pour les micro-usines	12
5. La micromanipulation et ses applications	13
5.1 Introduction	13
5.2 Stockage et transmission de l'information	14
5.3 Intégration de circuits à semiconducteurs	15
5.4 Micromécanique.....	15
5.5 Biotechnologies.....	15
5.6 Test des matériaux.....	16
5.7 Médecine	16
6. Le micromonde : un univers complexe	16
6.1 La physique du micromonde	16
6.2 Forces mises en jeu dans le micromonde	17
6.3 Influence de la physique du micromonde sur les stratégies de manipulation	19
6.3.1 Réduction des forces d'adhésion.....	20
6.3.2 Réduction des forces de Van Der Waals.....	20

6.3.2.1 Utilisation de matériaux à faible constante de Lifschitz-Van Der Waals	20
6.3.2.2 Augmentation de la rugosité des surfaces en contact.....	20
6.3.3 Réduction des tensions de surface.....	21
6.3.4 Réduction des forces électrostatiques	21
6.4 Influence de l'environnement.....	22
7. Transmission des informations entre le micromonde et le macromonde.....	22
8. Conclusion du chapitre.....	23

Chapitre 2 : approches pour la conception de micromanipulateurs

1. Introduction	29
2. Actionneurs pour la microrobotique	29
2.1 Introduction	29
2.2 Critères de choix d'un type de micro-actionneur.....	30
2.2.1 Evaluation des performances des micro-actionneurs	30
2.2.2 Contraintes relatives aux interactions	31
2.2.3 Contraintes de conception	31
2.3 Différents types d'actionneurs	32
2.3.1 Actionneurs électriques	33
2.3.1.1 Actionneurs électrostatiques	33
2.3.1.2 Actionneurs piézoélectriques	37
2.3.1.3 Actionneurs électrostrictifs	39
2.3.2 Actionneurs magnétiques	40
2.3.2.1 Actionneurs électromagnétiques	40
2.3.2.2 Actionneurs magnétostrictifs	43
2.3.3 Actionneurs thermiques / actionneurs à transformation de phase.....	43
2.3.3.1 Dilatation de gaz.....	44
2.3.3.2 Dilatation de solides	44
2.3.3.3 Transformation de phase	46
2.3.4 Actionneurs optiques.....	47
2.3.4.1 Actionneurs optiques directes	47
2.3.4.2 Actionneurs optiques indirectes	48
2.3.5 Actionneurs chimiques / actionneurs biologiques.....	48

2.4 Organes de transmission de mouvements	48
2.4.1 Les fluides électrorhéologiques.....	48
2.4.2 Organes mécaniques et acoustiques	50
2.4.2.1 Les organes mécaniques.....	50
2.4.2.2 Transmetteurs à ultrasons et acoustiques	51
3. Différentes approches pour la conception de micromanipulateurs	53
3.1 Introduction	53
3.2 Caractérisation des micromanipulateurs	53
3.3 Approches pour la conception de micromanipulateurs.....	54
3.3.1 Miniaturisation de macromanipulateurs.....	54
3.3.2 Micropréhenseurs à doigts actionnés individuellement	55
3.3.3 L'approche de type pince.....	57
3.3.4 Manipulateurs à actionneurs distribués.....	61
3.3.5 Manipulateurs isolés.....	62
3.3.6 Manipulation par forces d'adhésion	64
3.3.7 Manipulation à distance (effet Raman...)	65
4. Conclusion du chapitre.....	65

Chapitre 3 : réalisation de micromanipulateurs à actionneurs piézoélectriques

1. Introduction	71
2. La piézoélectricité	71
2.1 Compléments sur l'effet piézoélectrique.....	71
2.2 Matériaux piézoélectriques	73
2.2.1 Les matériaux piézoélectriques naturels	73
2.2.2 Les céramiques piézoélectriques	73
2.2.3 Films minces déposés.....	74
2.2.4 Polymères piézoélectriques	75
3. Equations de la piézoélectricité.....	75
4. Actionneurs piézoélectriques	79
4.1 Utilisation de l'effet longitudinal	79
4.2 Empilement d'éléments.....	81
4.3 Utilisation de l'effet transverse	82

5. Premières réalisations de micropinces	82
6. Réalisation des prototypes.....	87
6.1 Conception et génération des masques de gravure	87
6.2 Gravure du substrat en salle blanche.....	88
6.3 Difficultés rencontrées lors de la fabrication	91
7. Unimorphes et bimorphes piézoélectriques	91
8. Utilisation d'unimorphes piézoélectriques pour la réalisation d'une micropince.....	92
8.1 Caractéristiques des unimorphes piézoélectriques utilisés	92
8.2 Réalisation de la micropince	93
9. Modèle statique d'un unimorphe piézoélectrique.....	95
9.1 modèle statique.....	95
9.2 Limitation du modèle statique.....	97
10. Modèle dynamique d'un unimorphe piézoélectrique	98
10.1 Equation différentielle régissant les vibrations latérales d'une poutre de section constante.....	98
10.2 Résolution de l'équation différentielle dans le cas de l'application d'une force extérieure F.....	100
10.3 Prise en compte de l'effet piézoélectrique inverse.....	102
11. Validation du modèle	103
11.1 Banc de mesure pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques....	103
11.2 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de tension	104
11.3 Réponse fréquentielle de l'unimorphe	105
11.4 Limite de validité du modèle.....	106
11.5 Identification du modèle de l'unimorphe	106
11.6 Application d'échelons de force.....	107
11.7 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de force.....	108
11.8 Comparaison avec le calcul théorique.....	109
12. Forme finale de la fonction de transfert	111
13. Conclusion du chapitre.....	112

Chapitre 4 : commande en position de la micropince et mesure de forces d'interaction

1. Introduction	117
-----------------------	-----

2. Commande en position d'un unimorphe piézoélectrique.....	117
2.1 Régulateur PID.....	117
2.2 Régulateur à retour d'état avec intégrateur.....	119
2.2.1 Représentation d'état du système.....	119
2.2.2 Mise en place de la régulation d'état avec intégrateur.....	120
2.2.3 Observateur d'ordre réduit pour l'estimation de la vitesse de déplacement de l'extrémité de l'unimorphe.....	122
2.2.4 Implémentation du régulateur.....	124
3. Mesure de forces.....	125
3.1 Utilisation d'un unimorphe piézoélectrique en capteur de force.....	125
3.2 Manipulation à effort contrôlé.....	127
3.3 Utilisation d'organes terminaux divers.....	129
3.4 Observateur de force.....	131
3.5 Implémentation de l'observateur de force.....	133
3.5.1 Variation de force à tension électrique nulle.....	133
3.5.2 Variation de tension électrique à force nulle.....	134
3.5.3 Variation de tension électrique à force constante.....	136
3.5.4 Conclusion.....	138
4. Conclusion du chapitre.....	138

Chapitre 5 : expériences de micromanipulation

1. Introduction.....	143
2. Système de positionnement 3D.....	143
2.1 Table de micropositionnement X-Y.....	144
2.2 Bras de positionnement (axe Z).....	146
3. Station de micromanipulation.....	148
4. Application à des travaux de micromanipulation.....	149
4.1 Déplacement de fils de 100 μm de diamètre.....	150
4.2 Contribution au montage de mécanismes de montres.....	152
5. Micro-outils de découpe.....	153
6. Perspectives concernant l'utilisation des unimorphes piézoélectriques.....	155
6.1 Manipulations en milieu aqueux.....	155

6.2 Test de microcircuits	156
6.3 Augmentation de l'échelle des dimensions des micro-objets manipulés	156
6.4 Utilisation de modules supplémentaires	157
6.5 Micromanipulation par adhésion	159
7. Vers le concept de micro-usine	161
8. Conclusion du chapitre	163

Conclusion générale	167
----------------------------------	-----

Bibliographie	171
----------------------------	-----

Annexes

Annexe 1 : structure de micropinces sur substrat en matériau piézoélectrique	179
Annexe 2 : calcul de l'observateur de force	182
Annexe 3 : séquences vidéos disponibles sur CD-ROM	185

Introduction générale

Introduction générale

Depuis plus d'une décennie, l'intérêt des chercheurs concernant l'infiniment petit ne cesse de croître. La réduction d'échelle représente de nos jours un enjeu considérable. D'un point de vue industriel, la miniaturisation permet de réduire les coûts de fabrication et d'améliorer la fiabilité et la durée de vie des produits. En médecine, les perspectives de manipulation sur le génome humain suscite l'intérêt de nombreux laboratoires. Cependant, travailler dans ces échelles de dimensions non accessibles directement à l'homme requiert le développement de microsystèmes capables d'interagir avec le « micromonde ». C'est dans ce contexte que se positionne la microrobotique.

Un microrobot est fonctionnellement comparable à un robot traditionnel. Il doit comporter des fonctions de perception de l'environnement, de traitement de l'information et d'actionnement. Cependant le passage du robot au microrobot n'est pas simple. La réalisation de microrobots par miniaturisation de robots traditionnels est confrontée à des barrières technologiques très difficiles voire impossibles à franchir. La conception de microrobots nécessite de repenser complètement les fonctions d'actionnement et de capteur. Des travaux de recherche menés dans différents laboratoires ont montré que l'un des meilleurs moyens de réaliser des microactionneurs consiste à utiliser des matériaux actifs (piézoélectriques, alliages à mémoire de forme...). L'utilisation de ces actionneurs pose des problèmes de commande. L'élaboration de lois de commandes souffre souvent de l'absence ou du moins de la pauvreté des modèles existants.

Les besoins exprimés dans nombre de disciplines nouvelles ont créé une forte demande concernant les systèmes de micromanipulation. La micromanipulation constitue l'une des fonctions principales de la microrobotique. Un micromanipulateur doit être en mesure de réaliser des tâches de manipulation non destructives sur des objets de petites tailles souvent très fragiles (cellules et organismes biologiques, microcomposants électroniques, optiques et mécaniques...). La conception et la réalisation de micromanipulateurs se heurtent à un grand nombre de difficultés liées d'une part aux problèmes de fabrication et d'autre part à la complexité des interactions qui se produisent dans le micromonde. Cette problématique a motivé ce travail de thèse qui débute par une présentation brève de la microrobotique et de ses domaines d'application (premier chapitre).

Dans le deuxième chapitre, nous évoquons les principaux actionneurs ainsi que les approches utilisés en microrobotique pour la réalisation de micromanipulateurs. Divers prototypes de micromanipulateurs réalisés dans différents laboratoires sont présentés.

Parmi les principes d'actionnement utilisables, l'effet piézoélectrique nous a paru particulièrement adapté pour la réalisation de micromanipulateurs en raison de ses nombreux

avantages (précision, rapidité ...). Dans le troisième chapitre, nous présentons plusieurs prototypes de micropinces que nous avons conçues et réalisées à partir de matériaux piézoélectriques. Les essais menés ont abouti à un concept de micropince, de fabrication simple, utilisant des unimorphes piézoélectriques permettant à la fois d'atteindre de grandes précisions de positionnement et de mesurer les efforts exercés sur les objets manipulés. Nous avons également développé un modèle dynamique décrivant le comportement de cette micropince. Diverses expérimentations ont été menées pour vérifier la validité du modèle établi.

Le quatrième chapitre est consacré aux questions relatives à la commande en position des doigts de la micropince et à la mesure des forces exercées sur les objets manipulés. Plusieurs solutions sont proposées. Certaines sont fondées sur l'utilisation du modèle dynamique développé. En ce qui concerne la commande en position, nous proposons et expérimentons une commande numérique par retour d'état avec intégrateur, générant une haute précision de positionnement de chaque doigt. Les performances atteintes permettent d'envisager l'emploi de la micropince réalisée dans différents domaines.

Enfin, dans le cinquième chapitre, dans le but de réaliser des tâches complètes de micromanipulation, la micropince est associée à un système de positionnement que nous avons également développé et qui utilise des actionneurs en alliage à mémoire de forme. Plusieurs applications à des cas concrets sont présentées. Dans ce chapitre nous exposons également diverses idées permettant d'améliorer les performances du système conçu et d'élargir son champ d'application. Certains de ces principes peuvent servir de point de départ à des travaux futurs.

Chapitre 1
Enjeux et applications de la microrobotique

Table des matières

1. La course à la miniaturisation.....	9
2. La microrobotique : un enjeu stratégique	9
3. Qu'est ce qu'un microrobot ?	10
4. Domaines applicatifs de la microrobotique	11
4.1 La micromanipulation.....	11
4.2 L'exploration intra-tubulaire	11
4.3 Le domaine médical.....	12
4.4 Le micropositionnement	12
4.5 Les microrobots pour les micro-usines.....	12
5. La micromanipulation et ses applications.....	13
5.1 Introduction.....	13
5.2 Stockage et transmission de l'information	15
5.3 Intégration de circuits à semiconducteurs.....	16
5.4 Micromécanique	16
5.5 Biotechnologies	16
5.6 Test des matériaux	17
5.7 Médecine.....	17
6. Le micromonde : un univers complexe.....	17
6.1 La physique du micromonde.....	17
6.2 Forces mises en jeu dans le micromonde.....	17
6.3 Influence de la physique du micromonde sur les stratégies de manipulation.....	20
6.3.1 Réduction des forces d'adhésion	21
6.3.2 Réduction des forces de Van Der Waals	21
6.3.2.1 Utilisation de matériaux à faible constante de Lifschitz-Van Der Waals.....	21
6.3.2.2 Augmentation de la rugosité des surfaces en contact	21
6.3.3 Réduction des tensions de surface	22
6.3.4 Réduction des forces électrostatiques.....	22
6.4 Influence de l'environnement	23
7. Transmission des informations entre le micromonde et le macromonde	23
8. Conclusion du chapitre	24

Table des illustrations

Fig. 1. 1 : Alice (photo : Autonomous Systems Lab, EPFL)	11
Fig. 1. 2 : Microrobot intra-tubulaire [59].....	12
Fig. 1. 3 : Echelle des dimensions des objets concernés par la micromanipulation	14
Fig. 1. 4 : Principaux domaines d'application de la micromanipulation	15
Fig. 1. 5 : Effets des forces d'adhésion	18
Fig. 1. 6 : Représentation sphère-plan.....	19
Fig. 1. 7 : Amplitude des forces	20
Fig. 1. 8 : Modèle sphère-plan rugueux	22
Fig. 1. 9 : Réduction de l'intensité des forces électrostatiques	23

1. La course à la miniaturisation

D'énormes efforts de recherche et développement sont réalisés en permanence en matière de miniaturisation et d'intégration. Que ce soit pour les objets d'usage quotidien (notamment les appareils électroniques grand public) ou pour des dispositifs industriels professionnels, la miniaturisation est devenue un argument commercial extrêmement important. La miniaturisation est intéressante à plus d'un titre. Les produits miniatures sont plus fiables, plus rapides, moins gourmands en énergie et facilement transportables. Les statistiques ont montré que l'intégration a permis d'augmenter de manière considérable la durée de vie des appareils tout en minimisant le nombre de pannes. Les japonais considèrent que les systèmes miniaturisés constitueront l'essentiel de l'industrie du 21^e siècle. Ils estiment que le développement des microtechnologies produira une révolution industrielle comparable à ce qui s'est passé au 18^e siècle en Angleterre.

Pendant longtemps la miniaturisation ne concernait que la microélectronique avec la course à l'intégration du plus grand nombre possible de transistors sur un substrat de silicium. De nos jours, il est possible de réaliser dans un volume de quelques mm³ un ordinateur complet très rapide et doté d'une puissance de calcul colossale. La disponibilité de tels ordinateurs a incité les concepteurs à intégrer les autres composants (mécaniques, optiques...) entrant dans la réalisation d'un système pour aboutir à ce qu'on appelle aujourd'hui un microsystème ou MEMS (Micro Electro Mechanical System), concept dont la définition reste assez vague. Un microsystème apparaît donc comme un système de petite (voire de très petite) taille intégrant des fonctions de capteur, de traitement du signal, d'actionneurs...

2. La microrobotique : un enjeu stratégique

Dans de nombreux laboratoires, des chercheurs s'intéressent à la réalisation de robots de dimensions millimétriques (voire submillimétriques) pour satisfaire de nouveaux besoins apparus par exemple en microchirurgie ou en assemblage de micromécanismes. La microrobotique n'est pas seulement un prolongement de la robotique traditionnelle, elle représente une discipline à part entière tant les problèmes à résoudre sont spécifiques et les difficultés nombreuses.

Dans plusieurs pays, des programmes scientifiques ont été lancés pour soutenir la recherche en microsystèmes. En France, le CNRS a mis en place le *programme microsystèmes* qui a pour but le développement de matériaux nouveaux, la mise au point de procédés de microfabrication ainsi que la conception de microactionneurs et microcapteurs. La microrobotique apporte des solutions à des problèmes complexes comme par exemple les interventions en milieux technologiques ou biologiques fortement encombrés, confinés, dangereux ou inaccessibles. La microrobotique est encore au stade de la recherche et du développement. Il faudra sans doute attendre plusieurs années avant de voir sur le marché des produits finis.

Actuellement, les tâches concernées par la microrobotique ne se situent pas au niveau des actions répétitives propres aux robots industriels. Les microrobots sont sollicités pour effectuer des travaux ponctuels ou des tâches irrégulières ou inhabituelles (exploration, entretien, réparation...).

3. Qu'est ce qu'un microrobot ?

A priori, ce qui différencie un microrobot d'un robot est essentiellement lié aux dimensions. Un microrobot est fonctionnellement comparable à un robot traditionnel. Il doit comporter des fonctions de :

- perception de l'environnement,
- traitement de l'information,
- actionnement.

La définition du microrobot est encore imprécise. Un microrobot doit-il obligatoirement avoir des dimensions de l'ordre du micron ou suffit-il qu'il soit en mesure de réaliser des tâches très précises dans un environnement microscopique ? La définition qui semble la plus appropriée est donnée dans [17] :

On peut qualifier de microrobot un robot qui, s'il n'est pas stricto sensu de dimensions micrométriques,

- est fondé sur des composants de taille micrométrique (microcapteurs, microactionneurs,...) ;

- est de structure mécanique réalisée à partir de procédés microtechnologiques (pouvant par exemple permettre, par la très grande multiplication du nombre d'actionneurs élémentaires micrométriques sur une surface millimétrique, d'obtenir une puissance motrice notable à l'échelle macroscopique) ;

- manipule des objets de taille micrométrique ou, d'une manière plus générale, effectue des tâches dans le micromonde, c'est à dire le monde de ces micro-objets ;

- possède des hautes résolutions de positionnement, inférieures au micron (l'étude et la réalisation de robots à haute résolution, typiquement de l'ordre de 100 nm ou moins, conduit souvent à des robots de faibles dimensions et de faible domaine atteignable, du fait du principe d'actionnement et/ou du principe constructif utilisés).

Actuellement, le label « microrobot » est donné à un robot qui vérifie au moins une des propositions précédentes.

Les chercheurs en microrobotique ont très vite compris que la réalisation de microrobots par miniaturisation de robots traditionnels se heurte à des barrières technologiques très difficiles ou impossibles à franchir. Les robots utilisent dans une très large mesure des structures mécaniques complexes et des actionneurs électromagnétiques, totalement inadaptés à la miniaturisation. La conception de microrobots nécessite de repenser complètement les fonctions d'actionnement et de capteur et d'utiliser les possibilités offertes par les méthodes modernes de micro-usinage (technique LIGA [41], microstéréolithographie [42]...) [18]. Les microrobots actuels utilisent des actionneurs piézoélectriques, à alliages à mémoire de forme (AMF), magnétostrictifs ou encore électrostatiques. L'utilisation de ces actionneurs pose des problèmes de commande. L'élaboration de lois de commandes souffre de l'absence ou du moins de la pauvreté des modèles existants.

La figure 1.1 présente le microrobot ALICE développé à l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse). Il est équipé d'un microcontrôleur 8 bits et transporte sa

source d'énergie (deux piles bouton) qui lui confère une autonomie pouvant atteindre 10 heures.

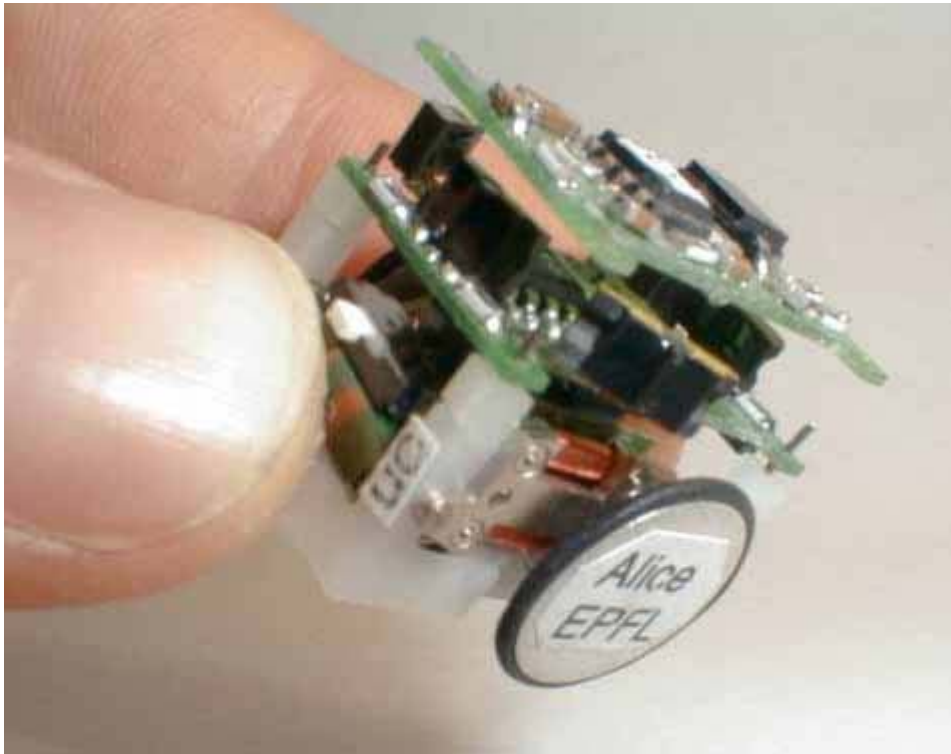


Fig. 1. 1 : Alice (photo : Autonomous Systems Lab, EPFL)

Ce microrobot mobile permet d'atteindre des environnements hostiles ou inaccessibles à l'homme du fait de leur confinement ou du danger qu'ils présentent.

4. Domaines applicatifs de la microrobotique

Les domaines d'application de la microrobotique sont très variés. Les chercheurs découvrent régulièrement de nouvelles situations où l'emploi de microrobots peut s'avérer des plus utiles. De manière générique, nous pouvons classer ces applications dans des thèmes dont les plus importants sont listés ci-dessous :

4.1 La micromanipulation

Il s'agit d'effectuer des tâches de manipulation sur des objets dont la taille est typiquement inférieure au millimètre. Les microrobots manipulateurs viennent au secours des robots classiques trop imposants et peu précis pour réaliser de tels travaux.

4.2 L'exploration intra-tubulaire

Elle consiste en la réalisation et l'exploitation de microrobots capables de se déplacer dans un tube dans le but de réaliser des tâches de vérification et de maintenance. Un microrobot capable de détecter des fissures ou des coupures dans des canalisations de faible diamètre s'avère extrêmement intéressant pour l'inspection de tuyaux destinés à véhiculer des produits toxiques. La figure 1.2 présente un prototype de microrobot pour l'inspection de

tuyaux de diamètre 10 mm réalisé dans le cadre du projet EXIIT (Exploration et Inspection Intra Tube) du CNRS.



Fig. 1. 2 : Microrobot intra-tubulaire [59]

4.3 Le domaine médical

L'un des grands rêves des microroboticiens concerne la fabrication d'un microrobot que l'on pourrait injecter dans le corps humain et qui serait capable de se déplacer et de se positionner à un endroit précis. Ce microrobot pourrait alors soigner un traumatisme local directement depuis l'intérieur du corps par libération de substances chimiques ou par micromanipulation. Il serait équipé de caméras renvoyant les informations à l'extérieur, au médecin chargé de l'intervention. A l'état actuel des recherches en microrobotique, un tel robot paraît difficilement réalisable en raison de grandes difficultés technologiques. Les microrobots peuvent cependant dorénavant être d'un grand secours pour des applications en microchirurgie ou en neurochirurgie.

4.4 Le micropositionnement

Que ce soit pour réaliser des opérations de micro-assemblage ou pour visualiser un micro-objet à l'aide d'un microscope, il est très utile, parfois indispensable, de pouvoir positionner des objets ou des microsystèmes avec une très grande précision (inférieure à 1 μm). Les systèmes de positionnement traditionnels ne peuvent atteindre de très hautes précisions en raison de limitations mécaniques, de jeux dans les engrenages... La microrobotique permet, grâce à l'utilisation de nouveaux procédés d'actionnement, de réaliser des tâches de micropositionnement de manière très précise [28].

4.5 Les microrobots pour les micro-usines

La miniaturisation à grande échelle pose de nombreux problèmes liés à la fabrication de microcomposants et à l'assemblage de microsystèmes. Les usines chargées de fabriquer ces

produits miniaturisés utilisent souvent des machines-outils et des robots conçus initialement pour fabriquer des pièces de tailles plus importantes. L'utilisation de ces machines pour réaliser des tâches de microfabrication et de micro-assemblage nécessite une adaptation souvent très coûteuse. La microrobotique permet, en utilisant des principes d'actionnement simples, de réaliser des machines dont les dimensions sont compatibles avec la taille des objets fabriqués. La réduction des dimensions des machines-outils et des robots industriels offre de nombreux avantages (gain en précision et en rapidité, augmentation sensible du rendement, portabilité...).

5. La micromanipulation et ses applications

5.1 Introduction

L'un des domaines applicatifs importants de la microrobotique concerne la micromanipulation, c'est à dire la manipulation d'objets de dimensions variant généralement de 1 μm à 1 mm. Pour qu'un microrobot mérite l'appellation « micromanipulateur », il doit être en mesure de manipuler des objets de taille très faible (inférieure à 1mm). Manipuler signifie saisir, maintenir, transporter, positionner et lâcher des micro-objets. Les manipulateurs de dimensions métriques traditionnelles, souvent à bras polyarticulés, ne permettent pas d'effectuer des tâches de manipulation précises lorsque la taille des objets est très faible. Leur précision est limitée par des phénomènes de frottement, de jeu dans les engrenages, de dilatation thermique...

Un micromanipulateur est fonctionnellement comparable à un manipulateur traditionnel. Cependant, les principes d'actionnement utilisés sont très différents. Lors de la conception d'un micromanipulateur, on recherchera la simplicité de fabrication et la précision.

La figure 1.3 présente la plage de dimensions des objets concernés par la micromanipulation.

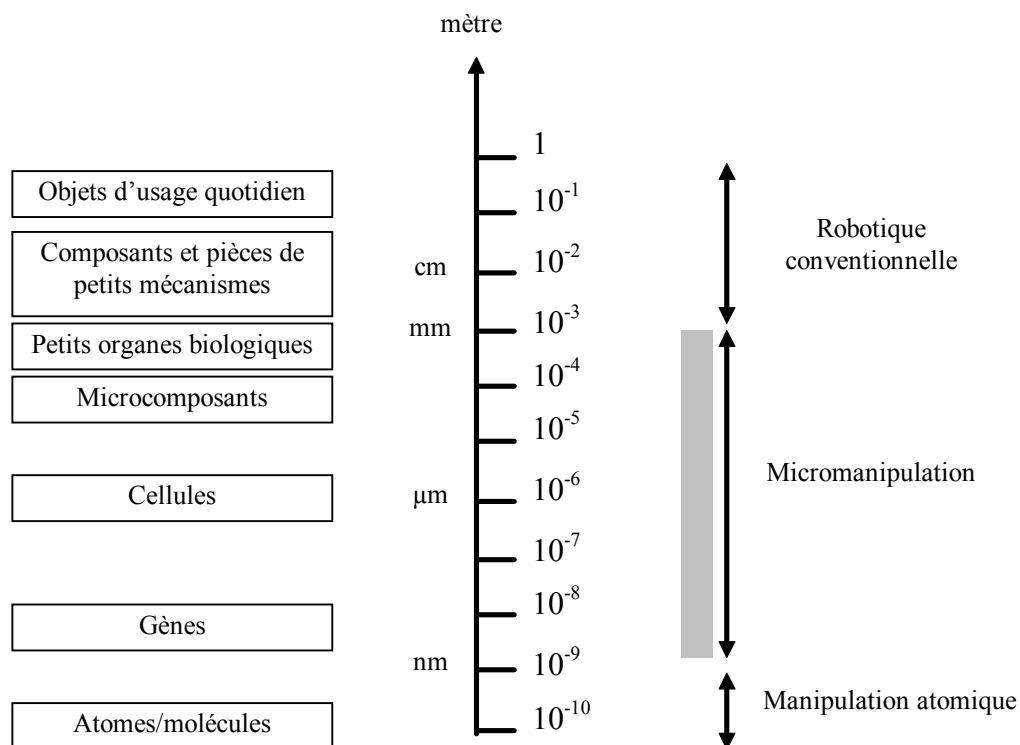


Fig. 1. 3 : Echelle des dimensions des objets concernés par la micromanipulation

Les efforts de miniaturisation consentis dans diverses disciplines ainsi que les dernières découvertes réalisées dans le domaine biomédical ont créé une forte demande concernant les outils de micromanipulation. Du point de vue économique, les développements les plus importants de systèmes de micromanipulation sont pressentis dans deux disciplines : le bio-médical et le stockage et la transmission de l'information.

Il est difficile de donner une liste exhaustive des applications de la micromanipulation. La figure 1.4 présente les plus importantes.

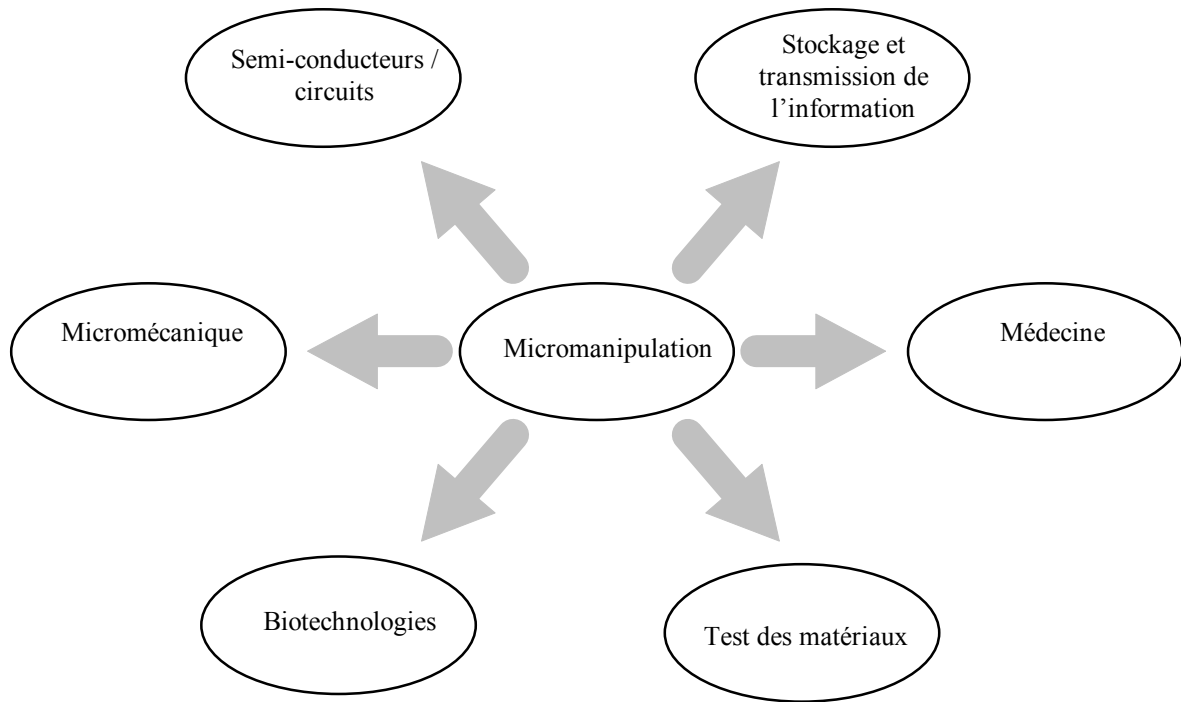


Fig. 1. 4 : Principaux domaines d'application de la micromanipulation

5.2 Stockage et transmission de l'information

La micro-informatique a connu une évolution spectaculaire lors de la dernière décennie. En effet, il ne se passe pas un trimestre sans que les médias ne rapportent la commercialisation d'un microprocesseur encore plus rapide et toujours plus performant à un point tel qu'un ordinateur devient obsolète après deux ou trois ans d'utilisation. La guerre que se livrent les fondeurs de microprocesseurs pour s'accaparer le marché a permis à la micro-informatique de connaître un développement impressionnant. La puissance croissante des micro-ordinateurs ainsi que les exigences des consommateurs créent une forte demande concernant les capacités de stockage des données. Durant ces dix dernières années, la capacité de stockage des disques durs est passée de 10 Mega-octets à 10 giga-octets alors que la taille des disques durs a été réduite de moitié. Une telle avancée n'est possible que grâce à la miniaturisation des têtes de lecture/écriture ainsi que la précision de positionnement. La production de disques constitue un enjeu économique majeur. A titre d'exemple, pour la seule année 1996, la production a été de 400 millions de disques. Ce nombre croît chaque année. Produire de grandes quantités de disques nécessite l'automatisation des processus de fabrication et de montage des têtes de lecture/écriture d'où une forte demande de micromanipulateurs non contaminants capables de réaliser en salle blanche les tâches d'assemblage et de positionnement précis.

Dans le domaine de la transmission de l'information, les fibres optiques constituent de nos jours l'un des moyens les plus sûrs et les moins coûteux pour véhiculer des flots importants de données. Dans ce domaine, l'un des problèmes à résoudre est l'alignement des fibres optiques sur les guides d'ondes [44]. Un mauvais alignement entraîne une réduction importante de la puissance lumineuse transmise (porteuse d'informations). Il est alors

nécessaire d'utiliser un nombre important d'amplificateurs le long de la ligne. L'emploi de systèmes de micromanipulation permet de réaliser des positionnements précis et ainsi de réduire considérablement le coût de l'installation.

5.3 Intégration de circuits à semiconducteurs

Les microprocesseurs et les microcontrôleurs représentent une part très importante de la production mondiale de circuits intégrés. D'autres types de circuits connaissent actuellement des développements considérables. Il s'agit notamment des circuits analogiques, hybrides et surtout des circuits de hautes fréquences employés dans la téléphonie mobile, domaine qui représente un enjeu économique et stratégique majeur. Dans tous les cas, des besoins en ce qui concerne les systèmes de micromanipulation et de micropositionnement se font ressentir pour assurer des tâches telles que :

- le test de circuits intégrés,
- la correction de circuits,
- l'analyse locale,
- la fabrication de microcircuits,
- le test de microsurfaces.

Les microcircuits sont souvent très fragiles. Dans la phase de fabrication, il convient de les manipuler avec précision et en contrôlant les forces de contact avec le micromanipulateur.

5.4 Micromécanique

La fabrication de dispositifs micromécaniques est tributaire de la facilité d'exécution de deux tâches :

- la fabrication de micropièces (microengrenages...),
- l'assemblage de microsystèmes.

Si la fabrication de micropièces mécaniques a connu de grandes évolutions notamment avec le développement de méthodes modernes de micro-usinage 3D (LIGA, microstéréolithographie...), il n'en est pas de même pour l'assemblage des microsystèmes. L'utilisation de micromanipulateurs 3D permet de faciliter l'assemblage, l'ajustage et le test des micromachines.

5.5 Biotechnologies

S'il est un domaine qui a bouleversé la science en cette fin de siècle, c'est bien la découverte du génome humain. La génétique est une discipline qui fascine nombre de chercheurs pour toutes les solutions qu'elle peut apporter dans le traitement de certaines maladies graves. La génétique est également source de grandes peurs car des erreurs de manipulation ou d'interprétation peuvent mettre en péril le devenir de l'humanité. Le risque est d'autant plus grand si les techniques de manipulation génétique tombent entre les mains de personnes malveillantes.

Le décodage du génome humain a fait apparaître un nouveau moyen de prodiguer des soins. Il s'agit de la thérapie génique. Les généticiens opèrent par manipulation du génome. Pour cela, il est indispensable d'utiliser des micromanipulateurs qui soient à la fois précis et non contaminants.

D'autres disciplines de la biologie requièrent l'emploi de micromanipulateurs. Il s'agit entre autres de :

- la fusion cellulaire,
- la fécondation in-vitro,
- les greffes d'organes,
- les réaction chimiques.

5.6 Test des matériaux

Il s'agit soit de tests effectués sur des composants entrant dans la fabrication de micromécanismes (mesure des propriétés mécaniques des microstructures, tests sur les couches minces...) soit de tests locaux sur des pièces mécaniques plus imposantes (tests de microtribologie...).

5.7 Médecine

Certaines interventions chirurgicales requièrent une précision que le bras humain ne peut atteindre. C'est le cas par exemple en chirurgie ophtalmique et en neurochirurgie. Par ailleurs, dans certains cas, le chirurgien a besoin d'intervenir dans des endroits inaccessibles (cavités, tubes digestifs...). Le développement de divers outils de micromanipulation et d'endoscopie représente un apport considérable. Le concepteur de micro-outils destinés à être utilisés en milieu médical doit de plus respecter des normes de sécurité sévères (isolation galvanique, utilisation de matériaux biocompatibles...)

6. Le micromonde : un univers complexe

La conception d'outils capables de manipuler des micro-objets est une tâche difficile car de nombreux problèmes doivent être résolus avant l'obtention de prototypes opérationnels. Actuellement, la maîtrise de la manipulation d'objets de taille comprise entre 1 mm et 1 μ m est un grand défi. Les phénomènes physiques à cette échelle sont beaucoup plus complexes que ceux à l'échelle macroscopique. Le concepteur doit prendre en compte dans sa réalisation les différents phénomènes d'interaction qui existent entre l'organe terminal du micromanipulateur et les objets à manipuler. Négliger ces interactions conduit dans la majeure partie des cas à une réalisation inopérante ou du moins caractérisée par des performances dégradées.

6.1 La physique du micromonde

Pour décrire les interactions entre micro-objets, on parle souvent de « micro-physique ». Ce terme laisse penser que les lois qui régissent le comportement des corps de petite taille sont différentes de celles qui caractérisent le macro-monde. Il n'en est rien ! La différence provient du fait que certaines forces, totalement négligeables à l'échelle humaine, deviennent prépondérantes dès que la taille des objets est très faible. A ces dimensions, les effets de surface jouent un rôle plus important que les effets de volume.

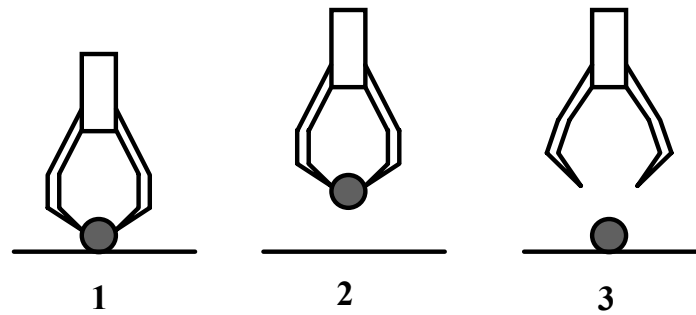
6.2 Forces mises en jeu dans le micromonde

Les phénomènes physiques qui interviennent dans les interactions entre micro-objets sont essentiellement [3][8][27][30][62][63]:

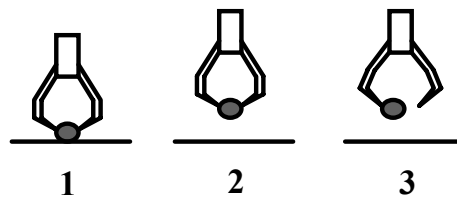
- les forces de gravité,

- les forces électrostatiques (générées par tribo-électrification ou transfert de charges au moment des contacts),
- les forces de Van Der Waals (forces atomiques),
- les tensions de surface entre les éléments en contact (liées au degré d'humidité des micro-objets).

Les forces électrostatiques, les forces de Van Der Waals ainsi que les tensions de surface favorisent l'adhésion entre micro-objets à un point tel qu'il est souvent plus facile de prendre un objet que de le lâcher (voir figure 1.5).



Manipulation d'objets macroscopiques



Manipulation d'objets microscopiques

Fig. 1. 5 : Effets des forces d'adhésion

Dans le but de comparer l'amplitude de ces forces, on s'intéresse aux forces mises en jeu entre une microsphère et un plan (voir figure 1.6). Cette situation représente un cas général de manipulation d'un micro-objet par un doigt d'une micropince.

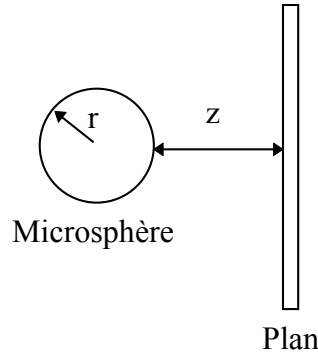


Fig. 1. 6 : Représentation sphère-plan

La force de gravité s'exerçant sur la sphère est donnée par :

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (1.1)$$

où ρ est la masse volumique de la sphère. Pour l'application numérique on choisira $\rho = 2300 \text{ kg.m}^{-3}$ (masse volumique du silicium).

La force électrostatique, calculée à partir de la loi d'attraction de Coulomb, peut être approximée par l'expression suivante, dans le cas d'une sphère isolante et d'un plan conducteur :

$$F_{el} = \frac{\pi \sigma^2 r^2}{\epsilon} \quad (1.2)$$

où σ est la densité surfacique de charges sur la sphère et ϵ la permittivité électrique de l'air, $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ et on prendra $\sigma = 1.6 \times 10^{-6} \text{ C.m}^{-2}$.

Dans le cas décrit ici, les forces de Van Der Waals, dont l'origine est la polarisation des atomes et molécules présents dans le matériau, peuvent s'exprimer de la manière suivante, en supposant que les surfaces en jeu sont non rugueuses :

$$F_{vdw} = \frac{Hr}{8\pi z^2} \quad (1.3)$$

où H est la constante de Lifshitz-Van Der Waals. H varie environ de 0.6 eV pour les polymères à 9 eV pour les métaux. (argent, or).

On prendra ici $H = 2.5 \text{ eV}$. Par ailleurs, z représente la très petite distance qui existe entre deux objets lorsque ceux-ci se « touchent » au sens macroscopique du terme. z est généralement estimé entre 0.1 nm et 1 nm. On prendra ici $z = 1 \text{ nm}$.

Enfin la tension de surface, due aux forces de capillarité, dans le cas d'un film d'humidité entre les deux surfaces en contact (sphère et plan) peut s'exprimer comme suit :

$$F_{tens} = 4\pi\chi r \quad (1.4)$$

où χ est la tension de surface, $\chi=73 \text{ mn.m}^{-1}$ pour l'eau.

La figure 1.7 représente l'amplitude des forces précédemment décrites en fonction de la taille de la microsphère.

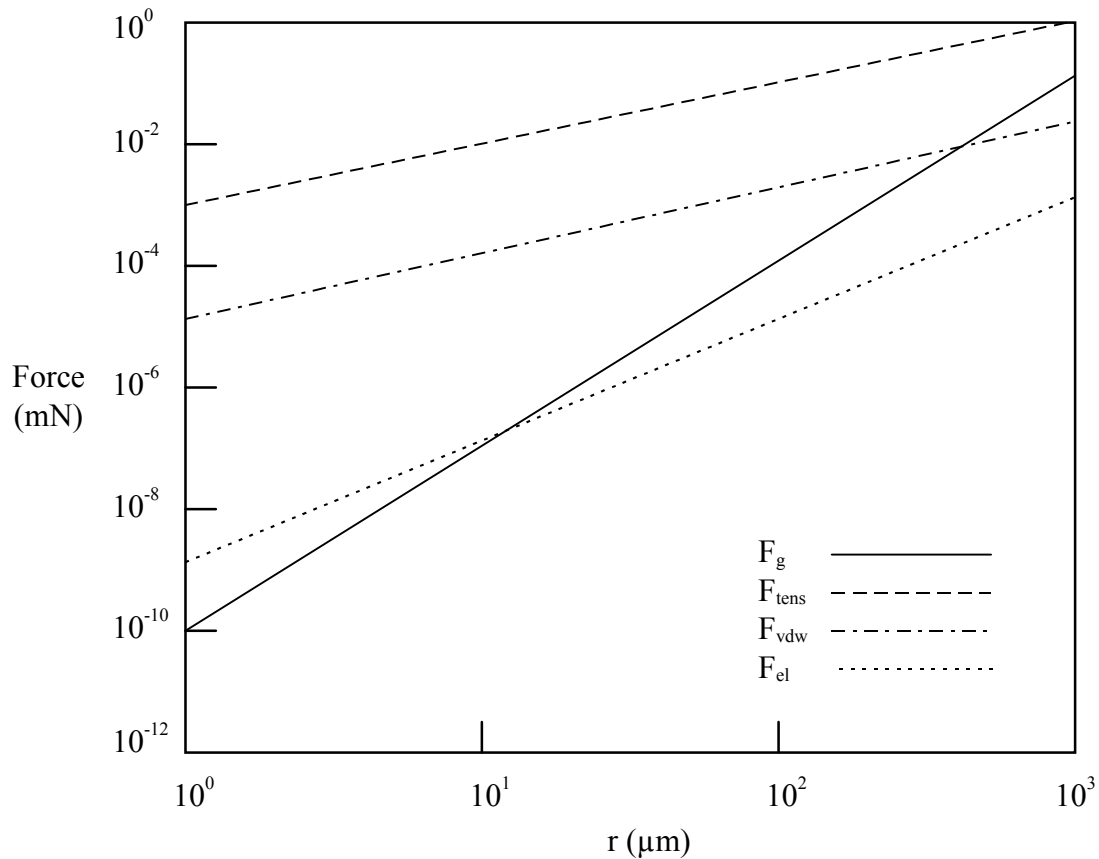


Fig. 1. 7 : Amplitude des forces

On constate que, dans cet exemple, pour des sphères de rayon inférieur à 10 μm, la force de gravité devient la plus faible.

6.3 Influence de la physique du micromonde sur les stratégies de manipulation

La prépondérance des forces d'adhésion dans le micromonde fait apparaître de nouveaux problèmes à résoudre. L'un des problèmes majeurs posés par les tâches de micromanipulation de type prise-dépose concerne la dépose car le micro-objet manipulé a tendance à coller au micromanipulateur et il est difficile de le lâcher à un endroit bien précis. Dès lors, deux stratégies sont possibles :

- 1- minimiser les forces d'adhésion afin de se rapprocher des conditions de manipulation habituelles à l'échelle macroscopique,

2- exploiter ces forces elles-mêmes pour manipuler les micro-objets. Nous verrons dans la suite comment les forces d'adhésion peuvent être mises à profit pour réaliser des tâches de micromanipulation.

6.3.1 Réduction des forces d'adhésion

Plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre pour minimiser l'effet des forces d'adhésion. Certaines permettent de réduire l'amplitude d'un effet particulier. D'autres, plus générales, offrent la possibilité de vaincre momentanément l'adhésion entre le micro-objet à manipuler et le micromanipulateur. On peut par exemple faire vibrer l'organe terminal du micromanipulateur pour générer des accélérations suffisamment grandes pour détacher les micro-objets qui restent collés au micro-manipulateur.

6.3.2 Réduction des forces de Van Der Waals

Deux méthodes sont possibles.

6.3.2.1 Utilisation de matériaux à faible constante de Lifschitz-Van Der Waals

L'expression des forces de Van Der Waals fait intervenir la constante H de Lifschitz-Van Der Waals. Il est possible de réduire l'effet de ces forces, soit en utilisant des matériaux à faible constante de Lifschitz-Van Der Waals pour réaliser les micromanipulateurs, soit en recouvrant les objets existant par une couche de matériau à constante plus faible. Le tableau suivant donne la valeur de la constante de Lifschitz-Van Der Waals pour quelques matériaux.

Matériau	H (eV)
polymères	0,6-0,9
(KBr)	2,0
(Al)	4,0
(Ge)	6,6-7,6
(Si)	6,8-7,2
graphite	7,2
(Cu)	8,5
(Ag)	9,0

6.3.2.2 Augmentation de la rugosité des surfaces en contact

Reprenons le modèle sphère-plan proposé en figure 1.6, en considérant cette fois-ci que le plan possède une surface rugueuse d'épaisseur a (voir figure 1.8).

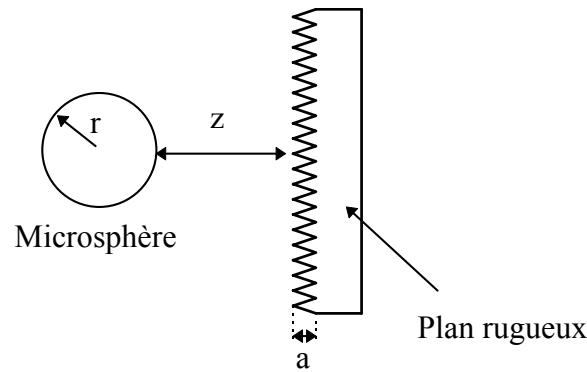


Fig. 1. 8 : Modèle sphère-plan rugueux

La force d'attraction de Van Der Waals apparaissant entre les deux éléments est calculée en sommant les interactions qui apparaissent entre les atomes. Lorsque la rugosité du plan augmente, l'espace occupé par les atomes sur la surface diminue, d'où une diminution de l'amplitude de la force de Van Der Waals. Si a est très faible par rapport à r , La force qui agit est donnée par :

$$F_{vdwa} = \left(\frac{z}{z + \frac{a}{2}} \right)^2 F_{vdw} \quad (1.5)$$

où :

F_{vdw} est la force de Van Der Waals dans le cas d'un plan lisse,

et F_{vdwa} est la force de Van Der Waals dans le cas d'un plan rugueux.

6.3.3 Réduction des tensions de surface

Les tensions de surface sont dues à l'humidité de l'environnement de travail. Afin de diminuer leur effet, il faut réduire le taux d'humidité de l'environnement. Une autre solution consiste à recouvrir les parties utiles par un matériau hydrophobe.

6.3.4 Réduction des forces électrostatiques

Les forces électrostatiques ont pour origine les charges électriques qui apparaissent sur les micro-objets. Pour réduire ces forces, il est nécessaire de décharger ces corps. Ceci peut se faire soit par ionisation, soit en donnant aux outils de manipulation des formes qui favorisent la décharge électrique (voir figure 1.9).

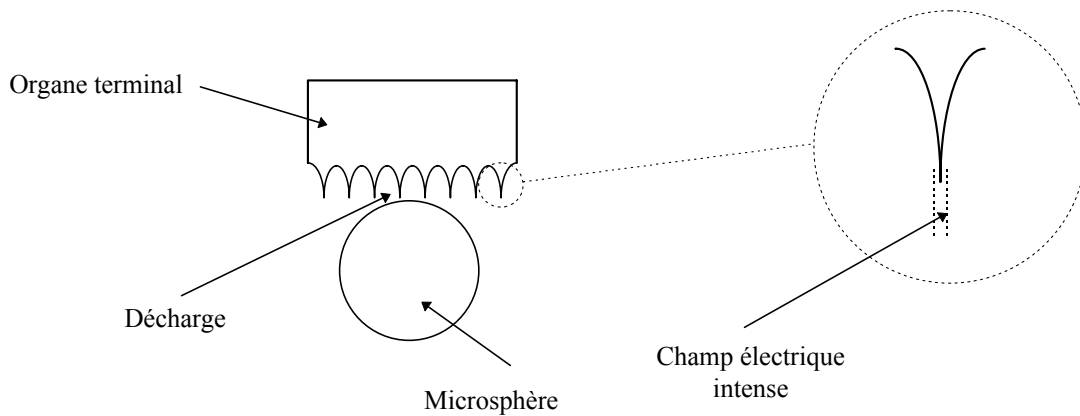


Fig. 1. 9 : Réduction de l'intensité des forces électrostatiques

6.4 Influence de l'environnement

L'environnement dans lequel s'effectuent les tâches de micromanipulation peut avoir une influence considérable. Les variations des conditions atmosphériques telles que le taux d'humidité et la température ont souvent des effets néfastes sur le bon déroulement des opérations. De même, les vibrations mécaniques, les interférences, les glissements mécaniques, la pollution et autres perturbations peuvent altérer de manière sensible les signaux issus des capteurs. Le rapport signal sur bruit évolue de manière défavorable lorsqu'on passe du macromonde au micromonde car les variations des signaux utiles sont plus faibles. Tous ces éléments font qu'il est extrêmement important de travailler dans des environnements connus, stables et éloignés de toute source de perturbation.

7. Transmission des informations entre le micromonde et le macromonde

Le monde microscopique n'étant pas directement accessible à l'homme, il est indispensable de développer des moyens d'échange d'informations entre le micromonde et l'univers à l'échelle humaine. Pour effectuer des tâches de micromanipulation dans de bonnes conditions, deux sens sont nécessaires : la vision et le toucher.

- La vision est à considérer au sens large. Il peut s'agir d'images réelles issues de microcaméras optiques ou du résultat de la scrutation de l'environnement par un microscope à champ proche. Dans certaines situations, une simple mesure de distances suffit pour établir une évaluation tridimensionnelle de la topologie de la scène. L'utilisation de moyens de visualisation pose cependant des problèmes d'encombrement et d'accès à l'environnement de travail.

- Le second sens important est le toucher. Il est très utile, parfois indispensable, d'avoir non seulement un retour d'information concernant la position exacte du manipulateur mais également les forces exercées sur les objets manipulés. La mesure de ces forces permet d'éviter de déformer ou de détruire les objets.

Les développements actuels concernant la réalité virtuelle et les représentations 3D peuvent également être très utiles pour la microrobotique [53]. Une représentation de l'environnement de travail permet par exemple à l'opérateur de s'entraîner avant la réalisation de la tâche.

8. Conclusion du chapitre

La microrobotique est désormais une thématique scientifique et technique à part entière. Elle est fondamentalement pluridisciplinaire car elle utilise de nombreuses technologies : microélectronique, micromécanique, optique, informatique... Elle est appelée à jouer un rôle important dans les enjeux économiques et stratégiques du 21^e siècle. La conception de microrobots requiert la prise en compte d'un grand nombre de paramètres liés d'une part aux principes d'actionnement à mettre en œuvre et d'autre part à l'interaction du microrobot avec l'environnement dans lequel il évolue. Les structures mécaniques et les actionneurs utilisés en robotique traditionnelle sont totalement inadaptés à la miniaturisation. C'est pourquoi un microrobot ne peut être réalisé par simple miniaturisation de robots traditionnels. De nouveaux principes d'actionnement plus simples et plus précis doivent être développés.

L'une des fonctions principales de la microrobotique concerne la micromanipulation d'objets de faible taille. La manipulation d'objets dont la taille est comprise entre 1 μm et 1 mm pose des problèmes spécifiques liés aux interactions complexes qui se produisent dans le micromonde.

Chapitre 2

Approches pour la conception de micromanipulateurs

Table des matières

1. Introduction.....	29
2. Actionneurs pour la microrobotique.....	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Critères de choix d'un type de micro-actionneur	30
2.2.1 Evaluation des performances des micro-actionneurs	30
2.2.2 Contraintes relatives aux interactions.....	31
2.2.3 Contraintes de conception.....	31
2.3 Différents types d'actionneurs	32
2.3.1 Actionneurs électriques	33
2.3.1.1 Actionneurs électrostatiques	33
2.3.1.2 Actionneurs piézoélectriques.....	37
2.3.1.3 Actionneurs électrostrictifs	39
2.3.2 Actionneurs magnétiques.....	40
2.3.2.1 Actionneurs électromagnétiques	40
2.3.2.2 Actionneurs magnétostrictifs	43
2.3.3 Actionneurs thermiques / actionneurs à transformation de phase	43
2.3.3.1 Dilatation de gaz	44
2.3.3.2 Dilatation de solides	44
2.3.3.3 Transformation de phase.....	46
2.3.4 Actionneurs optiques	47
2.3.4.1 Actionneurs optiques directes.....	47
2.3.4.2 Actionneurs optiques indirectes.....	48
2.3.5 Actionneurs chimiques / actionneurs biologiques	48
2.4 Organes de transmission de mouvements	48
2.4.1 Les fluides électrorhéologiques	48
2.4.2 Organes mécaniques et acoustiques.....	50
2.4.2.1 Les organes mécaniques	50
2.4.2.2 Transmetteurs à ultrasons et acoustiques.....	51
3. Différentes approches pour la conception de micromanipulateurs.....	53

3.1 Introduction.....	53
3.2 Caractérisation des micromanipulateurs	53
3.3 Approches pour la conception de micromanipulateurs.....	54
3.3.1 Miniaturisation de macromanipulateurs	54
3.3.2 Micropréhenseurs à doigts actionnés individuellement.....	55
3.3.3 L'approche de type pince	57
3.3.4 Manipulateurs à actionneurs distribués	61
3.3.5 Manipulateurs isolés	62
3.3.6 Manipulation par forces d'adhésion	64
3.3.7 Manipulation à distance (effet Raman...)	65
4. Conclusion du chapitre	65

Table des illustrations

<i>Fig. 2. 1 : Principe de fonctionnement d'un actionneur</i>	29
<i>Fig. 2. 2 : Principaux actionneurs utilisés en microrobotique</i>	32
<i>Fig. 2. 3 : Condensateur plan</i>	34
<i>Fig. 2. 4 : Actionneur utilisant un condensateur plan</i>	34
<i>Fig. 2. 5 : Equilibre d'un actionneur à condensateur plan</i>	35
<i>Fig. 2. 6 : Utilisation d'un condensateur en mouvement latéral</i>	35
<i>Fig. 2. 7 : utilisation de plusieurs condensateurs</i>	36
<i>Fig. 2. 8 : Exemples de micromoteurs électrostatiques rotatifs</i>	37
<i>Fig. 2. 9 : Principe de l'effet piézoélectrique</i>	38
<i>Fig. 2. 10 : Différentes configurations d'actionneurs piézoélectrique</i>	39
<i>Fig. 2. 11 : Principe d'un actionneur électromagnétique</i>	40
<i>Fig. 2. 12 : Moteur électromagnétique (University of Wisconsin-Madison, Department of Electrical and Computer Engineering)</i>	41
<i>Fig. 2. 13 : Moteur électromagnétique pas à pas (University of Wisconsin-Madison, Department of Electrical and Computer Engineering)</i>	42
<i>Fig. 2. 14 : Prototype de moteur électromagnétique à courant continu (Toshiba Corporation, Nagoya, Manufacturing Engineering Research Center, Small Motor Development Center)</i>	42
<i>Fig. 2. 15 : Principe d'un actionneur magnétostrictif</i>	43
<i>Fig. 2. 16 : Structure générale d'un actionneur thermique</i>	44
<i>Fig. 2. 17 : Actionneur utilisant la dilatation d'un gaz</i>	44
<i>Fig. 2. 18 : Actionneur à bimorphe thermique</i>	45
<i>Fig. 2. 19 : Prototype de patte pour un microrobot de type insecte</i>	46
<i>Fig. 2. 20 : Illustration de l'effet mémoire de forme</i>	46
<i>Fig. 2. 21 : Actionneur contrôlé par une source lumineuse</i>	47
<i>Fig. 2. 22 : Principe d'utilisation des fluides électrorhéologiques</i>	49
<i>Fig. 2. 23 : Distribution de particules dans un fluide électro-rhéologique</i>	49
<i>Fig. 2. 24 : Applications des fluides électrorhéologiques</i>	50
<i>Fig. 2. 25 : Micro-engrenage réalisé en technologie LIGA</i>	51
<i>Fig. 2. 26 : Scalpel chirurgical en silicium</i>	52
<i>Fig. 2. 27 : Structure d'un nanotranslateur piézoélectrique</i>	52
<i>Fig. 2. 28 : Miniaturisation de macro-manipulateurs</i>	55
<i>Fig. 2. 29 : Poutre à bimorphe thermique</i>	55
<i>Fig. 2. 30 : Deux prototypes d'un manipulateur à baguette</i>	56
<i>Fig. 2. 31 : Tube en matériau piézoélectrique</i>	56
<i>Fig. 2. 32 : Micromanipulateur à boule</i>	57
<i>Fig. 2. 33 : Robot MINIMAN</i>	57
<i>Fig. 2. 34 : Pince à actionneur électrostatique</i>	58
<i>Fig. 2. 35 : Pince actionnée par un fil en AMF</i>	58
<i>Fig. 2. 36 : Pince à actionneur en AMF</i>	59
<i>Fig. 2. 37 : Système de mesure de déplacements</i>	60
<i>Fig. 2. 38 : Deux pinces actionnées par un élément piézoélectrique</i>	60
<i>Fig. 2. 39 : Actionneur électrostatique distribué</i>	61
<i>Fig. 2. 40 : Diverses configurations de manipulateurs distribués</i>	62
<i>Fig. 2. 41 : Poutre actionnée par effet magnétostrictif</i>	63
<i>Fig. 2. 42 : Manipulateur utilisant des forces magnétiques</i>	63
<i>Fig. 2. 43 : Manipulateur 3D utilisant des forces magnétiques</i>	64
<i>Fig. 2. 44 : Manipulation en utilisant les forces d'adhésion</i>	64
<i>Fig. 2. 45 : Manipulation par effet Raman</i>	65

1. Introduction

Dans ce chapitre nous abordons deux éléments clés entrant dans la réalisation de systèmes de micromanipulation. Il s'agit des microactionneurs et des micromanipulateurs.

Les microactionneurs sont les éléments moteurs responsables de la génération des mouvements. Ils constituent souvent l'un des éléments de base des microsystèmes. Les travaux de recherche menés à travers le monde dans le domaine des microsystèmes ont permis de faire apparaître les principes physiques utilisables pour l'élaboration de microactionneurs. La première partie de ce chapitre est consacrée à ces principes.

La réalisation de tâches de micromanipulation nécessite l'emploi de dispositifs appelés micromanipulateurs. Ils sont chargés d'exécuter les actions élémentaires constituant la tâche de micromanipulation (prise, transport, libération...). Un micromanipulateur est mu par un ou plusieurs microactionneurs et possède des organes qui lui permettent d'interagir avec les objets à manipuler. Dans la seconde partie du chapitre, nous présentons diverses méthodes utilisées pour la réalisation de micromanipulateurs.

2. Actionneurs pour la microrobotique

2.1 Introduction

Un actionneur est un dispositif capable de convertir une énergie qui lui est fournie en une énergie mécanique. L'un des objectifs principaux de la robotique est de générer du mouvement. La figure 2.1 illustre le principe d'un actionneur.

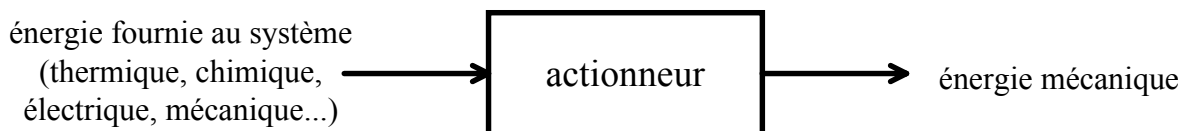


Fig. 2. 1 : Principe de fonctionnement d'un actionneur

Le rendement d'un actionneur ainsi que la quantité de travail restituée dépendent fortement du principe d'actionnement.

La notion de micro-actionneur est encore mal définie. certains auteurs se réfèrent à la taille du dispositif. Ainsi, dans la littérature, le nom micro-actionneur est donné à des actionneurs dont les dimensions vont du micron à quelques centimètres voire un décimètre. Mais le plus souvent, on attribue le préfixe "micro" aux actionneurs capables de générer des mouvements de faible amplitude avec une résolution inférieure au micron. Cette ambiguïté provient du fait que la microrobotique est une discipline très jeune et que les travaux menés dans ce sens sont encore au stade de la recherche. On ignore si la meilleure solution consiste à

réaliser des actionneurs de taille micrométrique ou alors d'utiliser des actionneurs plus imposants mais capables d'effectuer des tâches adaptées aux dimensions des micro-objets.

2.2 Critères de choix d'un type de micro-actionneur

Le choix d'un type d'actionneur pour la conception d'un micromanipulateur s'effectue sur la base d'un certain nombre de critères. Il s'agit d'une part de critères de performance de l'actionneur (rapidité, amplitude des déplacements engendrés, forces motrices, résolution, précision...) et, d'autre part, de contraintes relatives à l'interaction du manipulateur avec les objets manipulés et avec l'environnement extérieur. De plus, le concepteur doit prendre en compte d'autres paramètres tels que le coût ou la facilité d'adapter l'actionneur à ses besoins propres.

2.2.1 Evaluation des performances des micro-actionneurs

Le choix d'un micro-actionneur parmi ceux existant se fait par comparaison des performances. Un cahier des charges est établi à partir des besoins dictés par l'application. Ces besoins dépendent fortement de la nature des tâches à réaliser. Les principaux critères de sélection pour des applications de micromanipulation sont :

- **la stationnarité** : c'est l'aptitude du micro-actionneur à avoir un comportement invariant dans le temps. Divers phénomènes peuvent provoquer le changement de comportement d'un actionneur au cours du temps (relaxations internes, frictions, transformation de phase...). Il est souvent utile de faire subir aux actionneurs un grand nombre de cycles de mouvement avant toute utilisation.

- **la linéarité** : il s'agit ici de la linéarité de la sortie (déplacement, force...) en fonction du signal d'excitation. Elle est en général exprimée en pourcentage de l'échelle maximale du signal de sortie. Ce critère, très recherché par les concepteurs de microsystèmes, facilite grandement l'élaboration des lois de commande. Dans la pratique, la majorité des micro-actionneurs présente des comportements non linéaires.

- **la précision** : elle qualifie l'aptitude de l'actionneur à fournir une grandeur de sortie très proche de la consigne.

- **la résolution** : c'est le plus petit incrément du signal de commande qui produit une variation détectable de la grandeur de sortie.

- **la sensibilité** : c'est le rapport entre la variation du signal de sortie ΔY et la variation du signal d'excitation ΔX : $S = \Delta Y / \Delta X$.

- **la rapidité** : elle qualifie l'aptitude de l'actionneur à suivre dans le temps les variations du signal d'entrée.

- **la réversibilité** : Lorsque l'effet physique mis en jeu dans l'actionneur est réversible (effet piézoélectrique par exemple), l'actionneur peut jouer un rôle de capteur de position ou d'effort permettant ainsi de réaliser dans de faibles volumes des microsystèmes instrumentés.

Les critères généraux cités ne sont pas les seuls qui interviennent dans la sélection d'un micro-actionneur. Dans certains cas, on évitera au maximum les non linéarités telles que

l'hystérésis, le seuil... Notons également le fait qu'à l'exception des microsystèmes embarqués, le rendement énergétique est peu important dans la mesure où les puissances mises en jeu sont extrêmement faibles.

2.2.2 Contraintes relatives aux interactions

Dans la phase de conception d'un micromanipulateur, il est nécessaire de tenir compte d'une part des interactions qui peuvent se produire entre les micro-objets manipulés et l'organe terminal du manipulateur et, d'autre part, de l'influence de l'environnement sur les opérations de manipulation. Ces deux éléments influent sur le choix de l'actionneur.

La nature des objets à manipuler (pièces mécaniques, cellules biologiques...) et leurs caractéristiques (forme, compliance...) conditionnent la manière de réaliser les opérations de prise-dépose ainsi que la forme de l'organe terminal et les matériaux rentrant dans sa composition. Une estimation des forces d'adhésion qui interviennent peut se révéler d'un grand intérêt pour le choix des organes terminaux. En biologie et en médecine, les micromanipulateurs utilisés doivent être fabriqués en matériaux bio-compatibles et non contaminants. Dans le cas de la micromanipulation en milieu médical, les contraintes de sécurité imposent d'isoler électriquement tout organe terminal en contact avec le corps du patient du reste du système. En biologie, les opérations de micromanipulation se déroulent presque exclusivement en milieu liquide. Il est donc impératif que la structure du micromanipulateur autorise l'immersion de tout ou partie de l'organe terminal.

Les variations des conditions extérieures (température, pression, bruits divers...) altèrent dans une large mesure la qualité des actions de micromanipulation. La dilatation des objets manipulés et/ou du manipulateur due à une élévation de température, peut induire des incertitudes sur la position de chacun de ces éléments rendant ainsi l'opération de saisie plus ardue.

2.2.3 Contraintes de conception

Lorsque le principe d'actionnement à mettre en œuvre a été validé, il convient de considérer la faisabilité et le coût du projet. Il faut alors recenser les technologies et les moyens à utiliser pour aboutir à un prototype fini et vérifier si l'état de la technologie permet l'usinage des différents éléments qui constituent le système. Souvent l'accès aux techniques de microfabrication (LIGA, μ SPL...) se révèle extrêmement coûteux. Lorsqu'il s'agit de développer un objet technologique ou un procédé nouveau, le coût constitue rarement un obstacle. Mon sentiment est que la microrobotique doit rester étroitement liée aux applications et à l'industrie (micro-industrie ?) comme l'a été la robotique à ses débuts. Et dans ce cadre, la prise en compte du coût de la réalisation est indispensable.

2.3 Différents types d'actionneurs

La figure 2.2 présente les principaux types d'actionneurs utilisables en microrobotique [54].

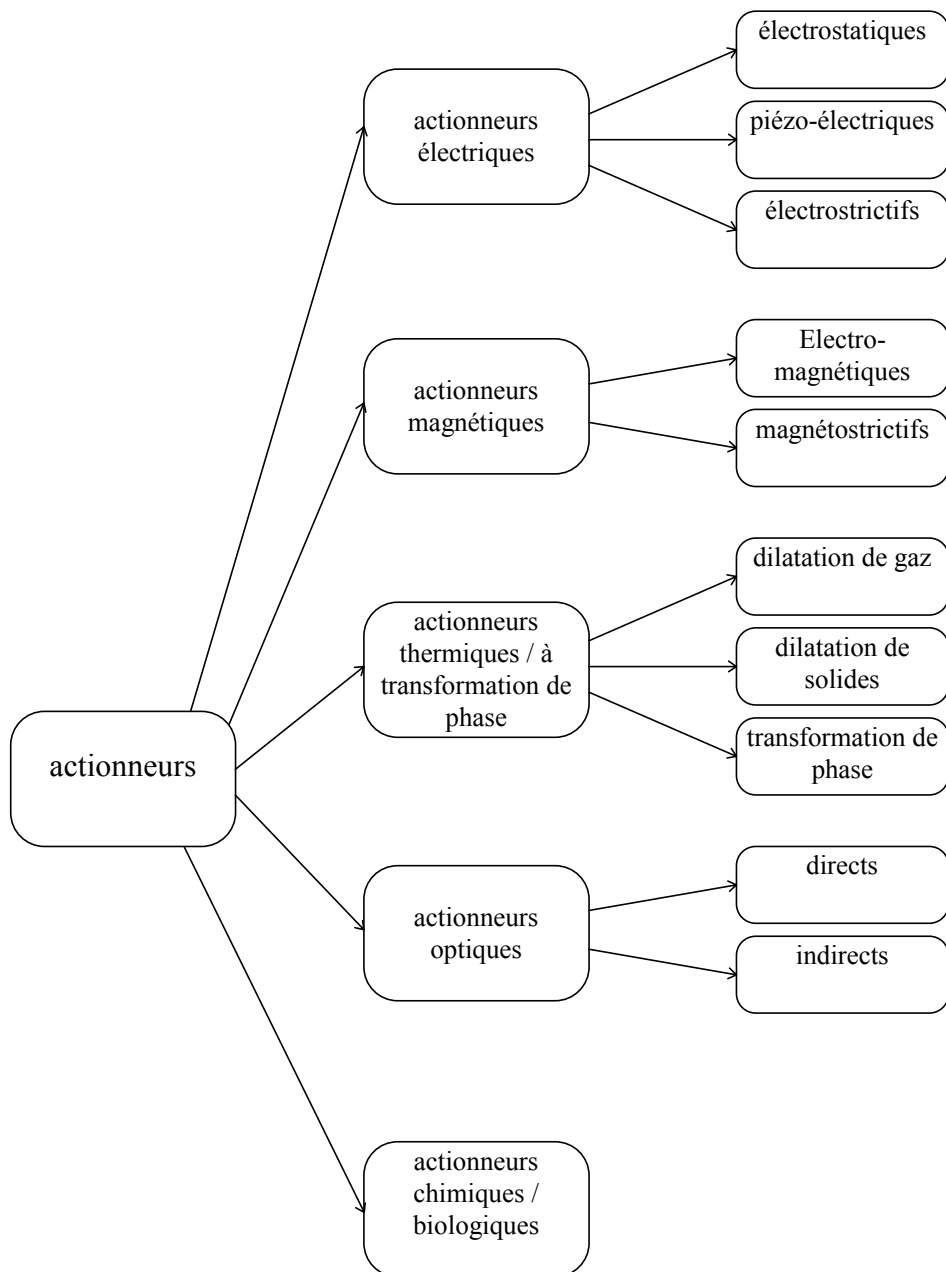


Fig. 2. 2 : Principaux actionneurs utilisés en microrobotique

Examinons le principe de fonctionnement de ces actionneurs :

2.3.1 Actionneurs électriques

Les actionneurs électriques utilisent la conversion d'une énergie électrique en énergie mécanique.

2.3.1.1 Actionneurs électrostatiques

Les actionneurs électrostatiques exploitent l'attraction coulombienne entre deux corps pour générer des déplacements ou pour exercer des forces.

La force électrostatique produite peut être calculée à partir de l'expression de l'énergie emmagasinée (U_e). Cette énergie vaut :

$$U_e = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.1)$$

où C est la capacité électrostatique du système et V , la tension appliquée. A l'intérieur du champ électrostatique, la force générée est donnée par :

$$F = -\nabla U_e \quad (2.2)$$

expression dans laquelle le symbole ∇ désigne l'opérateur gradient.

Le calcul de la capacitance C dépend des propriétés du système. Si l'on considère le cas d'un condensateur constitué de deux armatures planes (voir figure 2.3), la force électrostatique d'attraction entre les deux armatures est donnée par :

$$F = \varepsilon \frac{SV^2}{2d^2} \quad (2.3)$$

où :

ε : est la constante diélectrique,

S : la surface des armatures,

V : la différence de potentiel entre les armatures,

d : la distance séparant les armatures.

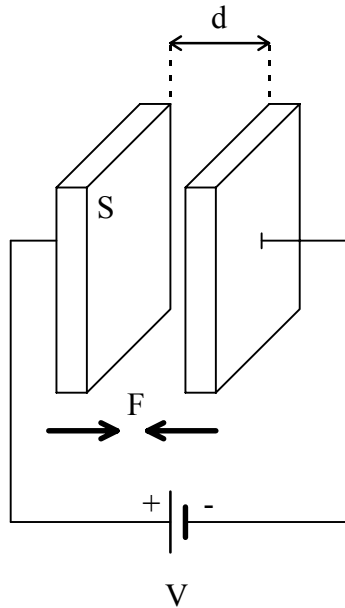


Fig. 2. 3 : Condensateur plan

La figure 2.4 montre un actionneur constitué d'un condensateur plan dont une armature est fixe et l'autre mobile. L'armature mobile est liée à un ressort de raideur k . On considère qu'il ne peut y avoir de déplacement que suivant la direction x . Pour une tension V donnée, l'équilibre est obtenu lorsque la force électrostatique et la force de rappel du ressort sont égales. La force électrostatique produite n'étant pas linéaire, l'équilibre peut être obtenu graphiquement par la méthode de la droite de charge (voir figure 2.5). Pour une même tension, deux points d'équilibre sont possibles (p_2 est un point d'équilibre stable et p_1 un point d'équilibre instable). Ceci génère des difficultés pour la commande.

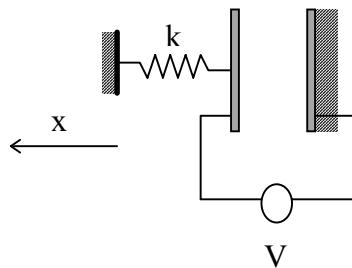


Fig. 2. 4 : Actionneur utilisant un condensateur plan

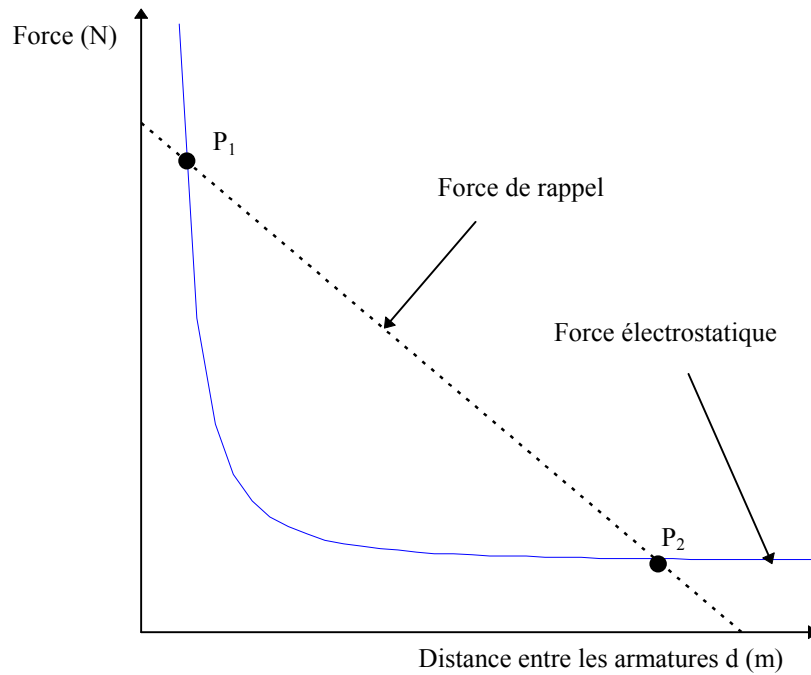


Fig. 2. 5 : Equilibre d'un actionneur à condensateur plan

Lorsque l'armature mobile peut se mouvoir selon la direction y , la force électrostatique est telle qu'elle maximise la capacitance C . On parle alors de mouvement latéral (voir figure 2.6).

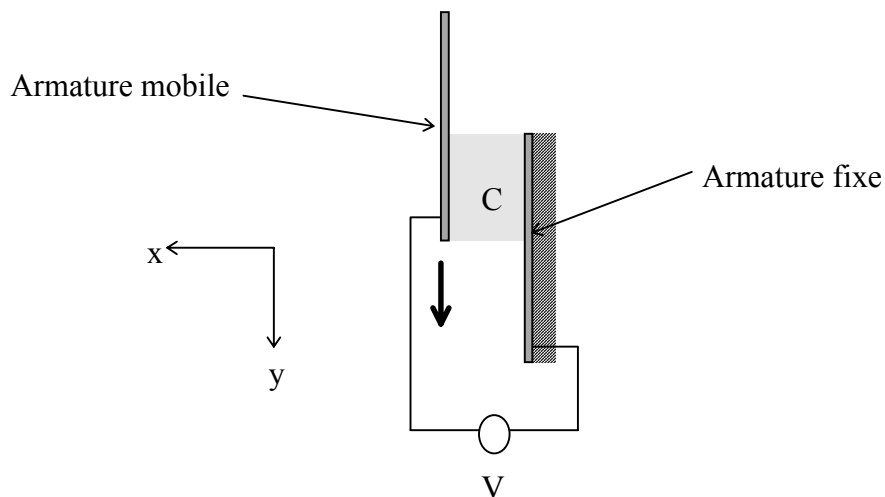


Fig. 2. 6 : Utilisation d'un condensateur en mouvement latéral

Notons que dans ce cas, il est possible de générer des forces de sens inverses permettant le déplacement en Y^+ comme en Y^- . La figure 2.7 montre comment accroître l'amplitude de la force électrostatique en multipliant le nombre de condensateurs.

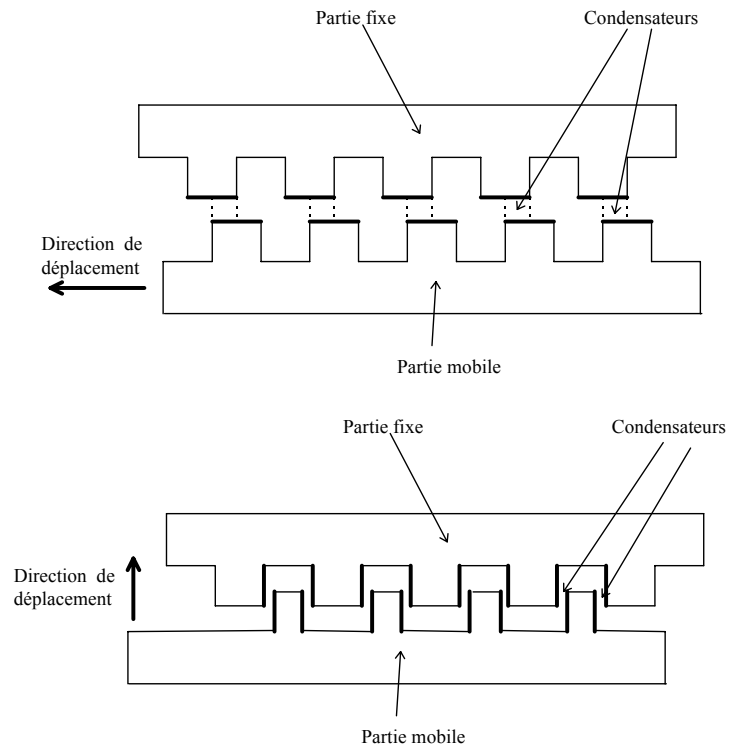
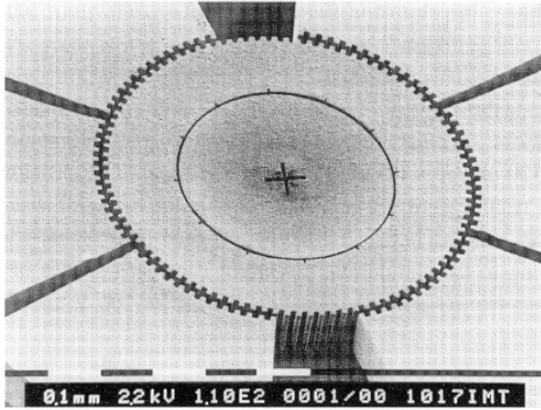
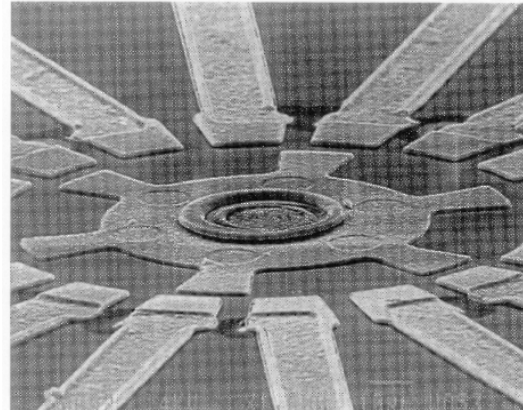


Fig. 2. 7 : utilisation de plusieurs condensateurs

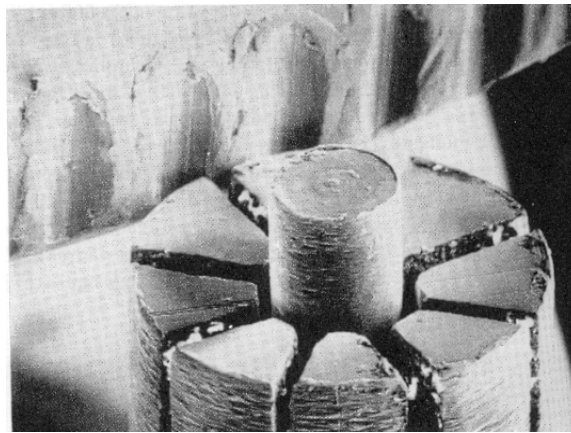
Les forces électrostatiques sont également utilisées pour générer des mouvements en rotation. Divers prototypes de micromoteurs électrostatiques ont été développés avec succès [45]. La figure 2.8 en présente quelques exemples.



Prototype de moteur électrostatique rotatif (Karlsruhe Research Center, IMT).



Moteur électrostatique en polysilicium (LAAS/CNRS, Toulouse).



Moteur électrostatique excentrique (Wobble) microassemblé directement (Center for Engineering Design, University of Utah).

Fig. 2. 8 : Exemples de micromoteurs électrostatiques rotatifs

Les actionneurs électrostatiques se prêtent bien à la miniaturisation. Les forces générées ne dépendent ni de l'épaisseur des armatures ni du volume du système. De plus, l'amplitude de la force électrostatique est inversement proportionnelle à l'écart entre les armatures. Des forces importantes peuvent être générées par des dispositifs de très petite taille. Cependant, un certain nombre d'inconvénients limite l'utilisation de ce type d'actionneurs dans certaines situations. Le champ électrostatique produit attire les micro-objets présents dans l'environnement de travail (poussière...). La commande de tels systèmes est rendue difficile par la forte non linéarité et la nécessité d'appliquer des tensions élevées (typiquement de 40 à 200 Volts pour un déplacement de quelques microns).

2.3.1.2 Actionneurs piézoélectriques

Les actionneurs piézoélectriques sont caractérisés par une très grande précision et une aptitude à produire des forces importantes. Ils sont très rapides mais ils génèrent des

mouvements d'amplitude très faible. Ces actionneurs jouent un rôle important en microrobotique car ils conviennent très bien à la fabrication d'actionneurs extrêmement petits.

Les matériaux piézoélectriques sont capables de transformer une énergie mécanique en énergie électrique. Lorsqu'une pression est appliquée sur le matériau, des charges apparaissent sur les surfaces du cristal. Il s'agit de l'effet piézoélectrique direct, décrit pour la première fois par les frères Curie en 1880. L'effet piézoélectrique est réversible. En effet, l'application d'une tension électrique sur les faces du cristal piézoélectrique provoque une déformation selon certaines directions. Cette propriété remarquable permet, sous certaines conditions, d'utiliser les matériaux piézoélectriques aussi bien en capteur qu'en actionneur. Les domaines d'application des actionneurs et capteurs piézoélectriques sont très variés (biologie et médecine, micro-électronique, optique, mesure précise, têtes de lecture / écriture pour imprimantes...). Certains matériaux présentent cette propriété naturellement (quartz, tourmaline, sel de rochelle...) alors que d'autres sont synthétisés en laboratoire (PZT, BaTiO_3 ...).

L'effet piézoélectrique apparaît dans les matériaux à structure cristalline asymétrique. Cela signifie qu'il n'existe pas de centre de symétrie par rapport aux ions négatifs et positifs d'une maille élémentaire. Une pression mécanique extérieure provoque la séparation des centres des charges positives et négatives. Ceci génère une polarisation et l'apparition de charges électriques sur les faces du cristal. La figure 2.9 schématise ce principe.

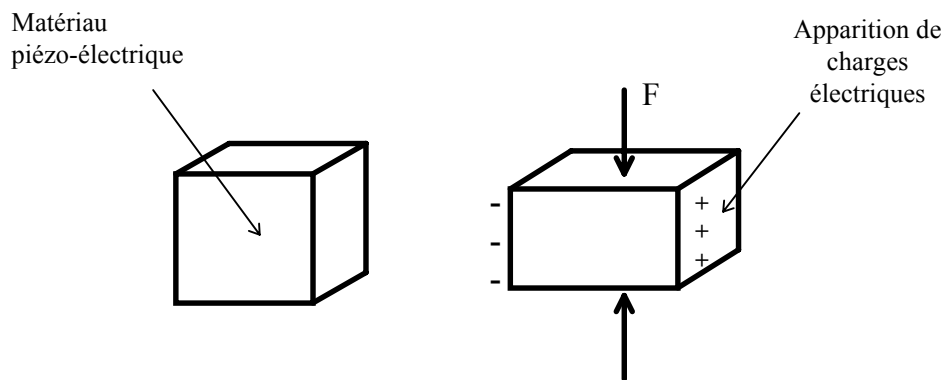


Fig. 2. 9 : Principe de l'effet piézoélectrique

Lorsque le matériau est porté à une température supérieure à une certaine valeur critique appelée température de Curie, il perd ses propriétés piézoélectriques car il devient une structure cristalline symétrique.

Le principe de l'effet piézoélectrique ainsi que la modélisation des actionneurs utilisant cet effet feront l'objet d'une présentation détaillée dans la suite.

Un actionneur piézoélectrique se déforme d'environ 0,1 à 0,2 % selon une direction donnée. La forme et la structure de l'actionneur peuvent être adaptées à la tâche à réaliser. Ainsi, les fabricants d'actionneurs piézoélectriques présentent des gammes complètes de composants piézoélectriques. La figure 2.10 présente quelques configurations couramment employées. La figure 2.10-a montre un tube en matériau piézoélectrique. La figure 2.10-b présente un bimorphe constitué d'une couche en matériau piézoélectrique équipée de deux électrodes et une couche métallique. L'application d'une tension électrique aux bornes de l'élément piézoélectrique provoque la flexion du bimorphe. Lorsque le déplacement obtenu avec un seul élément piézoélectrique est insuffisant, on a recours aux empilements d'éléments

(figure 2.10-c). Ces configurations permettent d'augmenter le déplacement global, qui vaut la somme des déplacements générés par chacun des éléments sans pour autant augmenter la tension électrique appliquée.

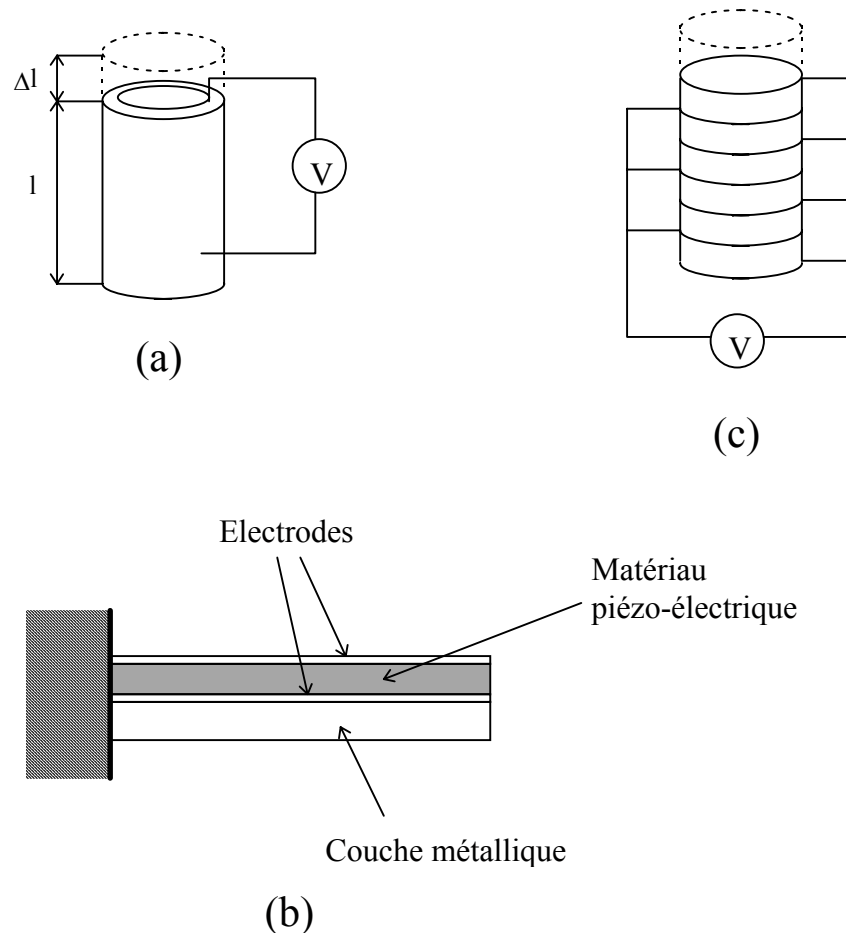


Fig. 2. 10 : Différentes configurations d'actionneurs piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont réputés pour leur rapidité et leur très grande précision.

2.3.1.3 Actionneurs électrostrictifs

Les matériaux électrostrictifs présentent des phénomènes analogues à ceux observés pour les céramiques piézoélectriques. Sous l'effet d'un champ électrique, une polarisation induite apparaît dans le matériau. Sous l'effet de cette polarisation, le matériau se déforme dans la limite de son élasticité. Tout comme la piézoélectricité, l'électrostriction est aussi un effet électromécanique couplé. Cependant, par opposition aux matériaux piézoélectriques qui, une fois polarisés, présentent une linéarité de leur réponse en terme de déformation, les matériaux électrostrictifs sont qualifiés de non linéaires, car il apparaît que la déformation induite est proportionnelle au carré de la polarisation. C'est le cas du matériau du type $0,9\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-0,1\text{PbTiO}_3$, que l'on nomme plus simplement PMN. Par ailleurs, les céramiques de type PMN ne présentent pas le phénomène d'hystérésis observé dans les PZT ferro-électriques. Par contre, le champ électrique à appliquer est plus important que pour les

PZT, mais on obtient des déformations environ deux fois plus importantes avec les PMN. Le temps de réponse est de l'ordre de la microseconde. Ces matériaux semblent prometteurs pour des applications de type micropositionnement, exigeant à la fois une très grande précision et une bonne reproductibilité des déplacements.

2.3.2 Actionneurs magnétiques

Les actionneurs magnétiques sont certainement les plus connus de tous. Ils sont en effet présents dans un grand nombre de dispositifs utilisés dans la vie quotidienne (appareils électroménagers, moteurs, relais, valves...).

2.3.2.1 Actionneurs électromagnétiques

Dans le domaine des microsystèmes, la majorité des micro-actionneurs décrits dans la littérature exploitent des forces attractives. Une force magnétique attractive est généralement obtenue en utilisant un élément déformable (poutre...) en matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique (voir figure 2.11).

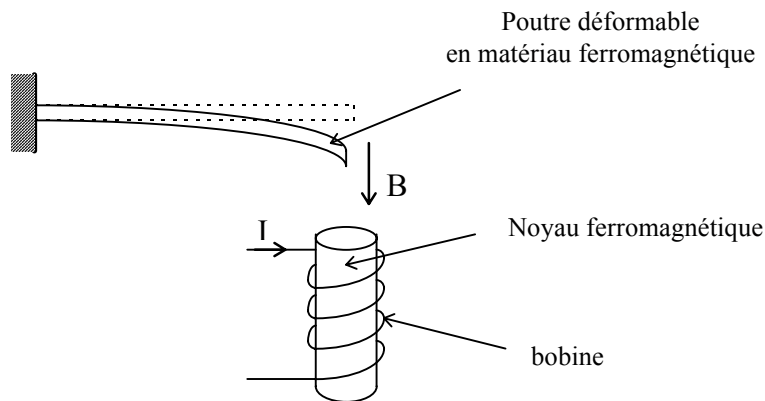


Fig. 2. 11 : Principe d'un actionneur électromagnétique

Lorsqu'un champ magnétique est produit par le passage d'un courant électrique dans un électroaimant, on parle d'actionneur électromagnétique.

Les actionneurs magnétiques sont réputés pour leur aptitude à exercer des forces extrêmement importantes. Les forces magnétiques sont des effets qui dépendent du volume de l'actionneur. C'est pourquoi la miniaturisation d'actionneurs basés sur ce principe n'est pas très aisée. De plus, les actionneurs électromagnétiques sont de fabrication relativement complexe. Pour réaliser un micro-actionneur électromagnétique, il est nécessaire d'intégrer dans un faible volume, une structure tridimensionnelle comportant au moins une bobine et un noyau en matériau ferromagnétique.

Les micro-actionneurs exploitant des forces de nature électromagnétique ont connu un regain d'intérêt pour la microrobotique depuis le développement de procédés de microfabrication 3D tels que la technique LIGA. L'efficacité de tels micro-actionneurs en microrobotique dépend fortement de la qualité et des propriétés physiques des matériaux utilisés.

Les figures 2.12 et 2.13 montrent deux prototypes de micromoteurs électromagnétiques. La figure 2.14 présente un produit fini.

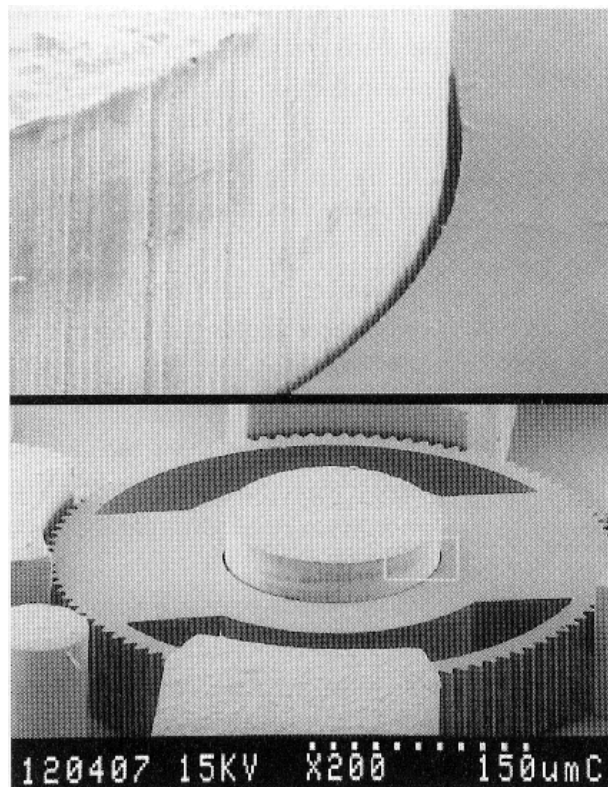
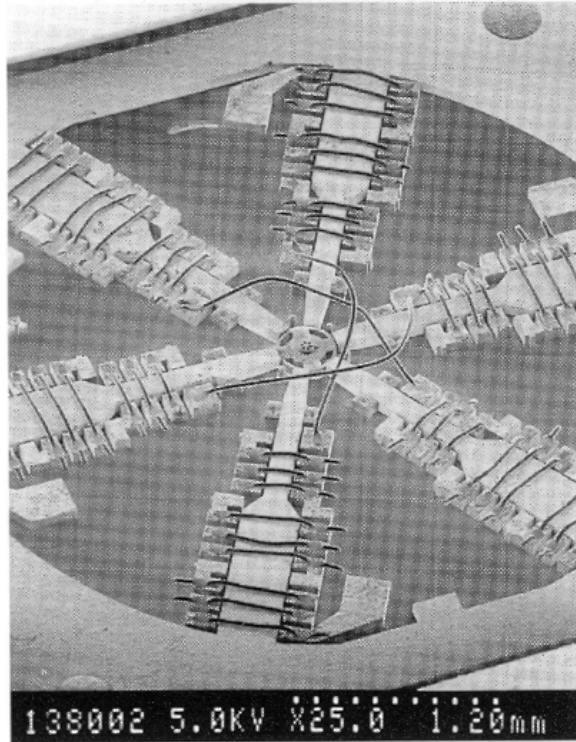
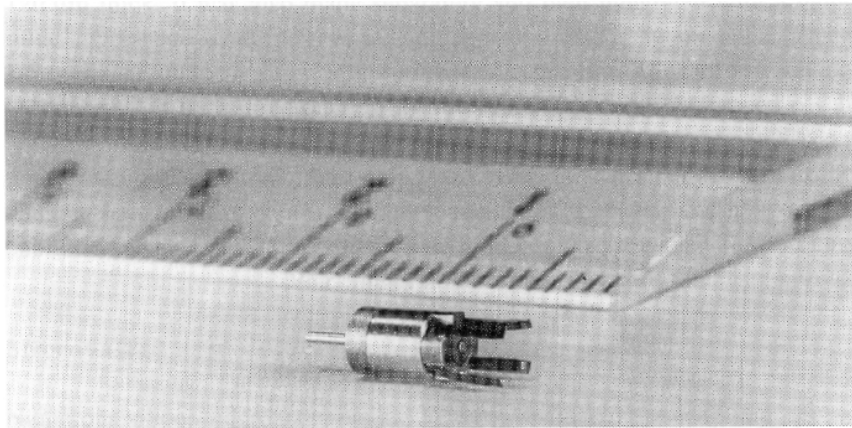


Fig. 2. 12 : Moteur électromagnétique (University of Wisconsin-Madison, Department of Electrical and Computer Engineering)



**Fig. 2. 13 : Moteur électromagnétique pas à pas
(University of Wisconsin-Madison, Department of
Electrical and Computer Engineering)**



**Fig. 2. 14 : Prototype de moteur électromagnétique à courant
continu (Toshiba Corporation, Nagoya, Manufacturing
Engineering Research Center, Small Motor Development Center)**

L'utilisation d'actionneurs électromagnétiques en microrobotique pose d'importants problèmes de commande dus essentiellement au phénomène d'hystérésis propres aux interactions magnétiques.

2.3.2.2 Actionneurs magnétostrictifs

La magnétostriction est la propriété de certains matériaux à subir des variations de dimensions sous l'effet d'un champ magnétique (voir figure 2.15).

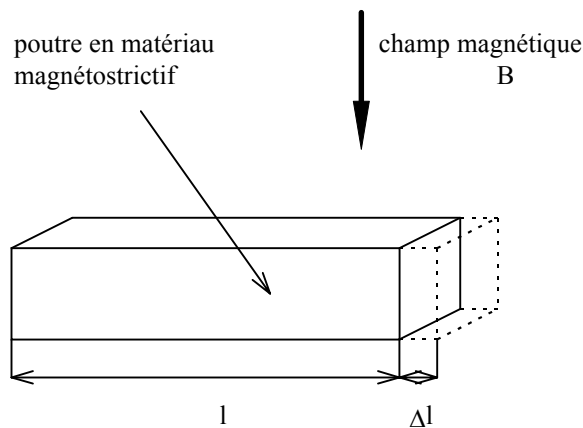


Fig. 2. 15 : Principe d'un actionneur magnétostrictif

La grandeur $\Delta l/l$ est typiquement voisine de 10^{-6} . Certains matériaux tels que le Terfenol-D (TbDyFe) possèdent d'excellentes propriétés magnétostrictives. Ils permettent d'obtenir des élongations relatives $\Delta l/l$ de l'ordre de 0,15% à 0,2%. Les matériaux magnétostrictifs sont robustes et très résistants aux conditions difficiles.

L'intérêt d'utiliser des actionneurs basés sur ce principe réside dans le fait que des déplacements peuvent être induits sans contact. Cette qualité est appréciée notamment dans deux cas de figure : lorsque l'environnement de travail est confiné et n'autorise pas le passage de fils d'alimentation électrique, et quand la tâche à réaliser nécessite une isolation galvanique (cas de la micromanipulation en biologie ou en médecine).

2.3.3 Actionneurs thermiques / actionneurs à transformation de phase

Ces actionneurs permettent d'obtenir de l'énergie mécanique à partir d'une énergie thermique. L'énergie thermique peut être produite par différents moyens (effet Joule, réaction chimique, lumière...). L'effet joule est sans doute le moyen le plus utilisé dans les micro-actionneurs pour produire de la chaleur.

La fabrication d'actionneurs thermiques est relativement aisée. Le principal inconvénient de ce type d'actionneurs est sa lenteur. En effet la commande est fondée sur des échanges thermiques qui sont des processus très lents. Les actionneurs thermiques semblent bien adaptés à la miniaturisation dans la mesure où plus les éléments constituant l'actionneur sont petits, plus les échanges thermiques sont rapides.

La structure générale d'un actionneur thermique est représentée à la figure 2.16.

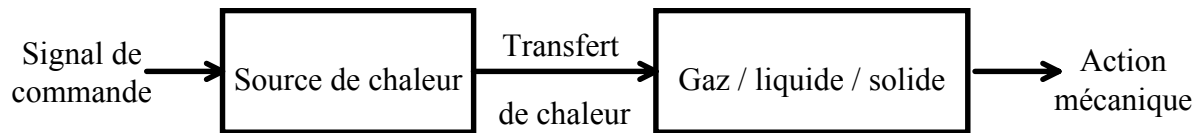


Fig. 2. 16 : Structure générale d'un actionneur thermique

2.3.3.1 Dilatation de gaz

Lorsqu'un gaz est chauffé, il se dilate selon la loi :

$$PV=nRT \quad (2.4)$$

où P est la pression du gaz, V son volume, T la température absolue, R la constante des gaz parfaits ($R = 8.3143 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$) et n le nombre de moles. Cette propriété peut être exploitée pour créer un déplacement (voir figure 2.17).

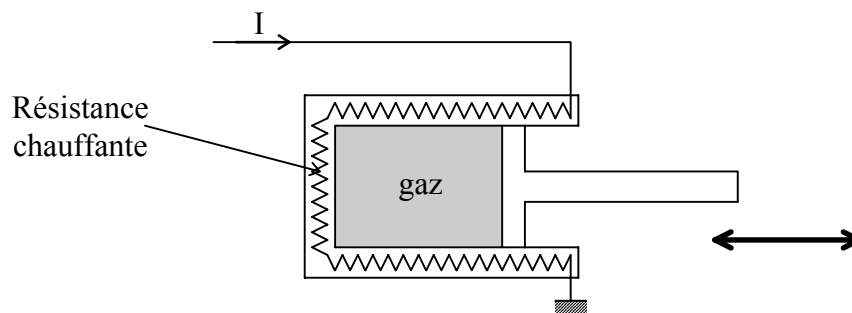


Fig. 2. 17 : Actionneur utilisant la dilatation d'un gaz

2.3.3.2 Dilatation de solides

Toute pièce mécanique de forme quelconque peut être considérée comme actionneur thermique. En effet des déplacements mécaniques peuvent être induits par simple dilatation thermique. Dans le but d'amplifier les mouvements, les structures utilisées pour la conception de micro-actionneurs sont souvent des bimorphes (voir figure 2.18).

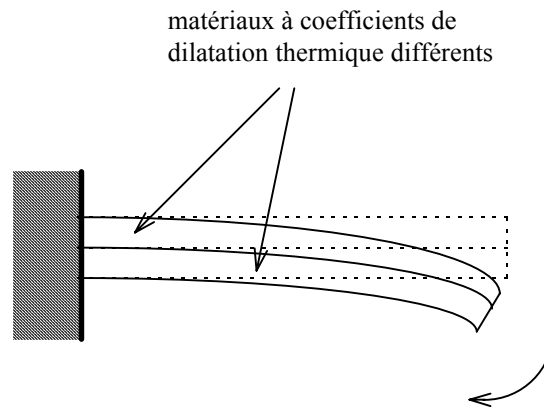


Fig. 2. 18 : Actionneur à bimorphe thermique

Un bimorphe thermique exploite la différence de dilatation de deux couches solidaires de matériaux différents. L'accroissement de la température provoque la flexion du bimorphe.

Le tableau suivant donne les coefficients de dilatation thermique de quelques matériaux.

Matériau	$\Delta l/l$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Al	25×10^{-6}
Ni	13×10^{-6}
Mo	5×10^{-6}
Cu	$16,6 \times 10^{-6}$
Au	$14,2 \times 10^{-6}$
Pb	29×10^{-6}
Pt	9×10^{-6}
Ag	19×10^{-6}
Zinc	35×10^{-6}
Si	3×10^{-6}
Ge	$5,8 \times 10^{-6}$
GaAs	$6,86 \times 10^{-6}$
SiO_2	5×10^{-7}
Si_3N_4	4×10^{-6}

Il est bien évident que divers types de mouvements peuvent être obtenus en utilisant des structures complexes et des matériaux différents. La figure 2.19 montre un prototype d'actionneur thermique compliant développé en vue d'une utilisation pour la locomotion d'un microrobot de type insecte [2].

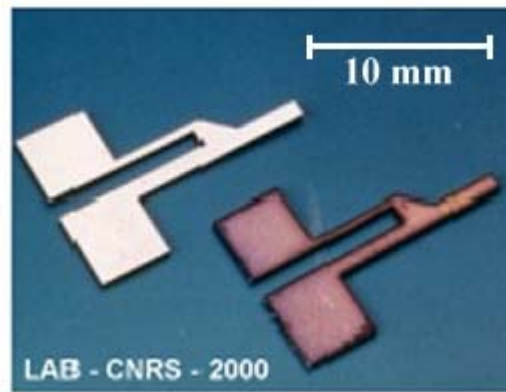


Fig. 2. 19 : Prototype de patte pour un microrobot de type insecte

2.3.3.3 Transformation de phase

au voisinage de la température de transformation de phase (austénite/martensite), certains matériaux présentent des caractéristiques thermomécaniques exceptionnelles produisant des variations de volume qui dépassent de loin celles produites par dilatation thermique. C'est le cas des alliages dits à mémoire de forme tel que le Nickel-Titane (NiTi). Les AMF (alliages à mémoire de forme) sont capables de se déformer de manière significative (jusqu'à 6% en traction) sous l'action de leur température. Après déformation permanente à basse température, les AMF retrouvent leur forme initiale non déformée par simple chauffage (effet mémoire de forme, voir figure 2.20).

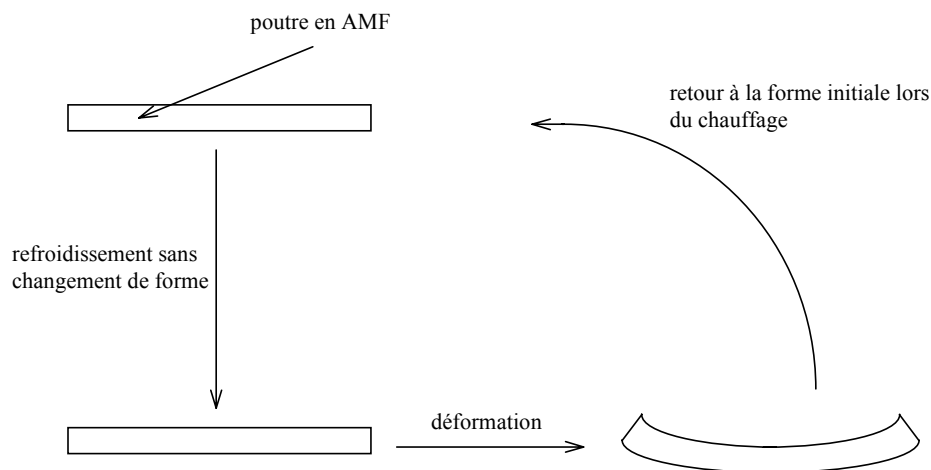


Fig. 2. 20 : Illustration de l'effet mémoire de forme

Ainsi, les AMF peuvent transformer l'énergie thermique qui leur est fournie en un travail mécanique. Ils peuvent alors restituer de grandes déformations et générer des efforts relativement importants lorsqu'ils sont chauffés.

Les AMF sont en général peu coûteux et la mise en œuvre physique de la commande par chauffage peut être réalisée simplement, en utilisant l'effet Joule par exemple, par passage d'un courant électrique dans l'AMF. Cependant, comme cela a déjà été mentionné précédemment, le phénomène thermomécanique à l'origine de la déformation confère à ces

matériaux un temps de réponse relativement long (la bande passante n'excède pas 1 Hz pour un fil AMF de 150 μm de diamètre) et un rendement extrêmement faible. De plus, le comportement des AMF est fortement non linéaire avec hystérésis, ce qui rend la synthèse des lois de commande relativement complexe. Les recherches actuelles s'orientent vers l'élaboration de modèles de comportement thermomécaniques (modèles de connaissance) qui permettent de mieux appréhender les problèmes de commande [12].

La majorité des AMF utilisés se présente sous la forme de fils, de ressorts, de plaques ou, plus récemment, de films minces. L'intérêt en microrobotique réside dans le fait que les déformations générées sont suffisamment importantes pour éviter l'utilisation d'amplificateurs mécaniques. L'intégration et la mise en œuvre de ce type d'actionneurs en sont ainsi grandement simplifiées.

De manière générale, les actionneurs thermiques offrent une solution peu coûteuse et facile à mettre en œuvre pour le micro-actionnement. La grandeur de commande étant d'origine thermique, ces actionneurs sont très sensibles à la température ambiante.

Des travaux ont été menés pour augmenter la rapidité des micro-actionneurs thermiques. L'une des voies est l'utilisation de modules à effet Peltier [1].

2.3.4 Actionneurs optiques

La majorité des actionneurs optiques utilise des fibres optiques (ou d'autres guides d'ondes optiques) pour transporter aussi bien l'énergie que les signaux de commande et les informations issues de capteurs entre les différentes parties de l'actionneur. Une même fibre optique permet de véhiculer de très grandes quantités d'informations en parallèle en utilisant plusieurs longueurs d'onde. Ces actionneurs présentent l'avantage d'être insensibles aux interférences électromagnétiques.

On distingue deux types :

2.3.4.1 Actionneurs optiques directes

Dans ce type d'actionneurs, l'énergie transportée par la source lumineuse est directement utilisée pour créer un déplacement. La figure 2.21 montre un exemple d'actionneur contrôlé par une source lumineuse.

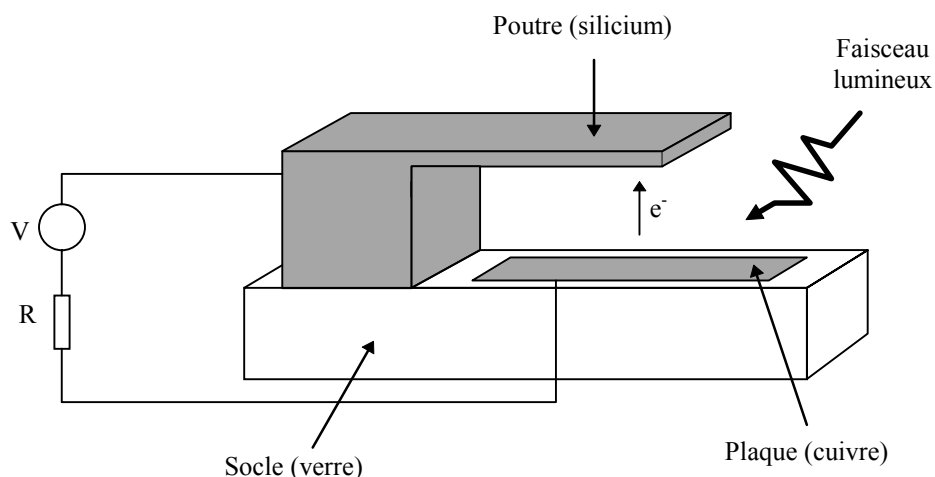


Fig. 2. 21 : Actionneur contrôlé par une source lumineuse

Le système est constitué d'une poutre en matériau semi-conducteur (silicium) fixée à un socle en verre sur lequel est déposée une plaque en cuivre. L'ensemble constitué par la

poutre et la plaque forme un condensateur. L'application d'une différence de potentiel électrique constante aux bornes de ces deux éléments provoque l'apparition d'une force d'attraction électrostatique qui engendre la flexion de la poutre. Le système peut être actionné au moyen d'un faisceau lumineux monochromatique envoyé sur la plaque en cuivre. En effet, l'énergie fournie par la source lumineuse donne aux électrons une énergie cinétique suffisante pour traverser l'écart entre les deux armatures. Il en résulte un changement de la charge globale apparaissant sur les armatures du condensateur et donc un déplacement de la poutre en silicium.

2.3.4.2 Actionneurs optiques indirectes

Les actionneurs optiques indirectes utilisent un faisceau lumineux pour chauffer un gaz ou un solide. La dilatation ainsi produite est exploitée pour réaliser un actionneur. On peut ainsi fabriquer des vérins, des micropompes... Cependant les déplacements obtenus sont faibles.

2.3.5 Actionneurs chimiques / actionneurs biologiques

Les actionneurs chimiques et biologiques sont, parmi les actionneurs vus, ceux qui produisent les plus grandes forces. Qui ne s'est pas étonné devant une minuscule fourmi transportant un objet pesant plusieurs fois son poids ?

L'actionneur chimique le plus simple est la pile électrochimique. Ce dispositif fournit de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique emmagasinée dans les éléments qui la constituent. Une pile ne peut produire directement de l'énergie mécanique. Cependant, l'énergie électrique produite peut, à son tour, être convertie pour produire des déplacements ou pour exercer des forces. Un muscle humain utilise un processus plus sophistiqué pour produire directement de l'énergie mécanique à partir de réactions chimiques. L'ensemble muscles-squelette est à la base de la locomotion chez l'homme ainsi que chez un grand nombre d'espèces animales. La biologie constitue une source d'inspiration très importante pour les concepteurs de micro-actionneurs. Lorsque la technologie permettra d'imiter le fonctionnement des actionneurs biologiques, il faudra s'attendre à un bouleversement dans les méthodes de conception des microsystemes ainsi qu'à un accroissement considérable des performances et des rendements.

2.4 *Organes de transmission de mouvements*

En plus des effets précédemment cités, certains principes physiques permettent de transmettre ou de convertir les mouvements produits par un actionneur. C'est le cas notamment des fluides électrorhéologiques et des organes mécaniques.

2.4.1 Les fluides électrorhéologiques

Les fluides électrorhéologiques sont constitués d'un fluide diélectrique porteur contenant des particules semi-conductrices dont la taille est comprise entre 0.04 μm et 100 μm . Ces particules occupent un volume compris entre 15 % et 50 % du volume total. L'application d'un champ électrique d'intensité suffisante provoque la polarisation des particules semi-conductrices qui se réorganisent alors en chaînes entre les électrodes (voir figure 2.22). Il en résulte une variation de la viscosité du fluide. Ainsi, quelques millisecondes suffisent pour solidifier un liquide. Cet effet, découvert dans les années quarante, est

réversible. L'arrêt de l'application du champ électrique fait que le fluide retrouve sa viscosité initiale.

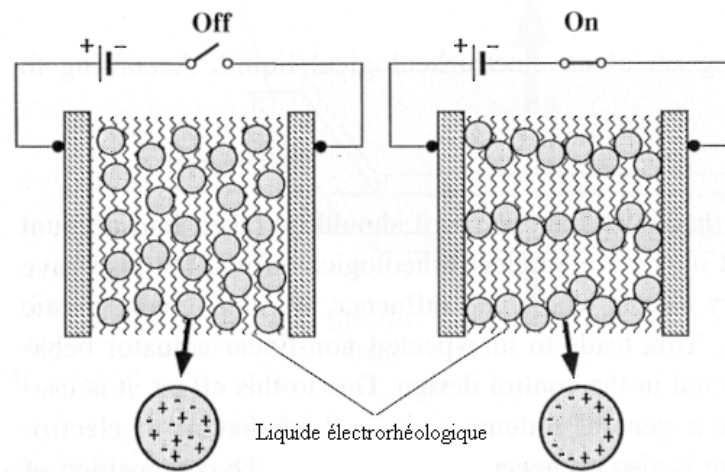


Fig. 2. 22 : Principe d'utilisation des fluides électrorhéologiques

La figure 2.23 présente une photographie de la distribution typique de particules dans un fluide électrorhéologique prise à l'aide d'un microscope à balayage électronique.

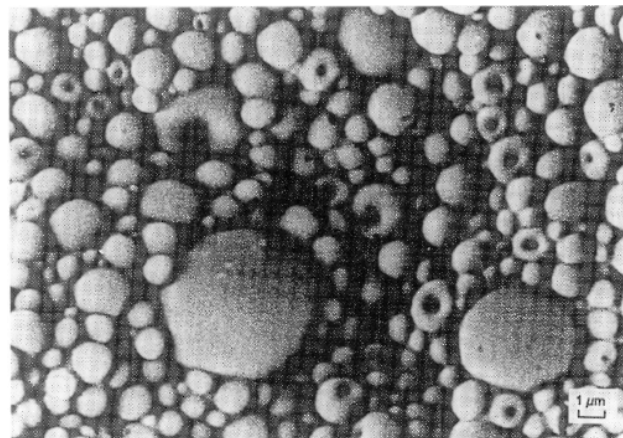


Fig. 2. 23 : Distribution de particules dans un fluide électro-rhéologique

Il n'existe dans la littérature que très peu d'articles rapportant l'utilisation de ce principe dans les microsystèmes. La figure 2.24 montre deux applications typiques : l'amortissement intelligent et la transmission de couples dans les mouvements de rotation.

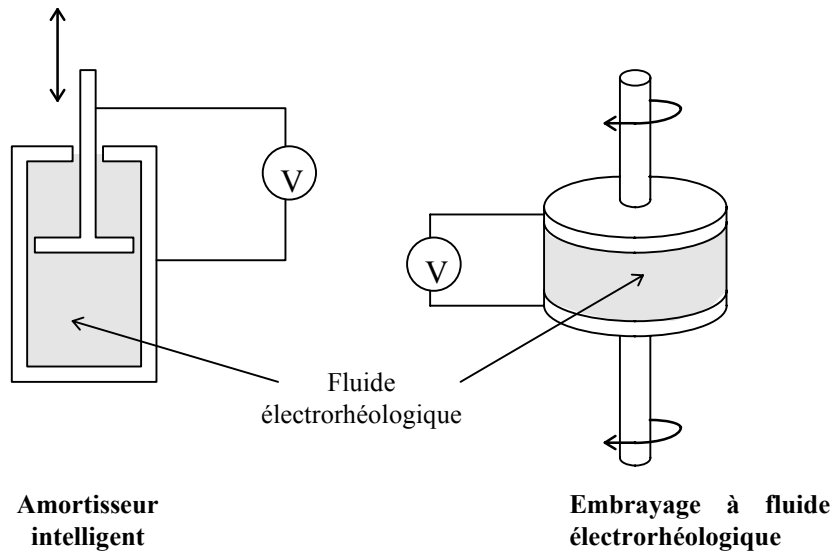


Fig. 2. 24 : Applications des fluides électrorhéologiques

2.4.2 Organes mécaniques et acoustiques

2.4.2.1 Les organes mécaniques

Ils permettent notamment d'amplifier un déplacement mécanique, de convertir une translation en une rotation ou d'effectuer des trajectoires complexes. Ils sont souvent constitués d'un ensemble plus ou moins grand de pièces mécaniques (engrenages, crémaillères, charnières...). Les organes mécaniques ont pénétré le domaine des microsystemes depuis le développement de techniques de micro-usinage 3D telles que la technique LIGA ou la microstéréophotolithographie [42]. La figure 2.25 montre un exemple de micro-engrenage réalisé à l'aide de la technique LIGA.

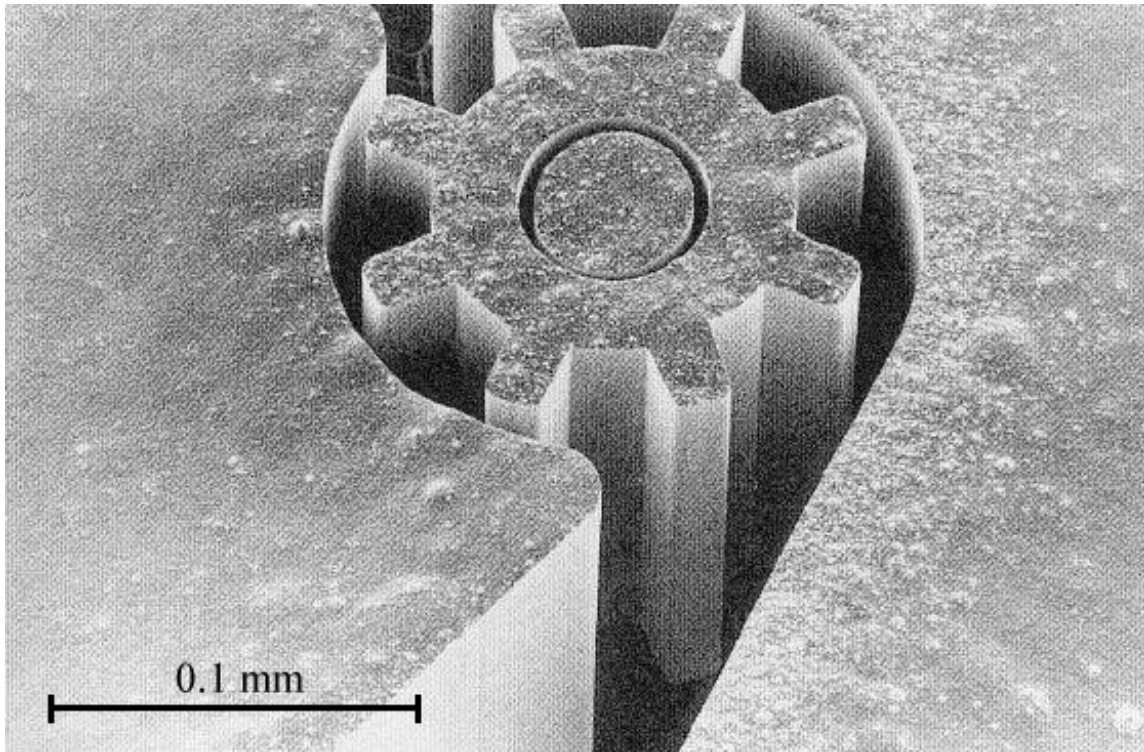


Fig. 2. 25 : Micro-engrenage réalisé en technologie LIGA

2.4.2.2 Transmetteurs à ultrasons et acoustiques

Il est bien connu que les vibrations permettent de transporter de l'énergie mécanique. Les transmetteurs à ultrasons utilisent le principe suivant : une source mécanique produit un signal vibratoire. Il s'agit le plus souvent d'un élément piézoélectrique excité au voisinage de sa fréquence de résonance. Ces vibrations sont véhiculées par des milieux solides, liquides ou gazeux jusqu'à un organe terminal qui entre à son tour en vibration et produit ainsi un travail mécanique. La figure 2.26 montre un scalpel chirurgical exploitant ce principe.

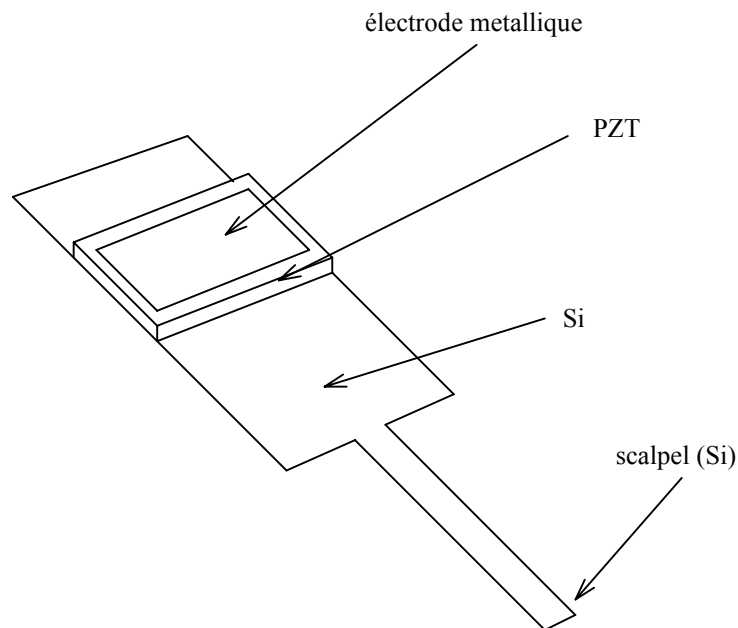


Fig. 2. 26 : Scalpel chirurgical en silicium

Les vibrations mécaniques générées peuvent également être converties en mouvement de translation ou de rotation. La figure 2.27 montre un nanotranslateur piézo-électrique [28]. Ce dispositif est capable de se mouvoir avec des courses illimitées. Le pas minimum de déplacement est inférieur à 100 nm. Le nanotranslateur est réalisé à partir de l'assemblage d'une plaque métallique (bronze-béryllium) et de transducteurs piézoélectriques (PZT) disposés de manière à former une matrice de 5×4 éléments.

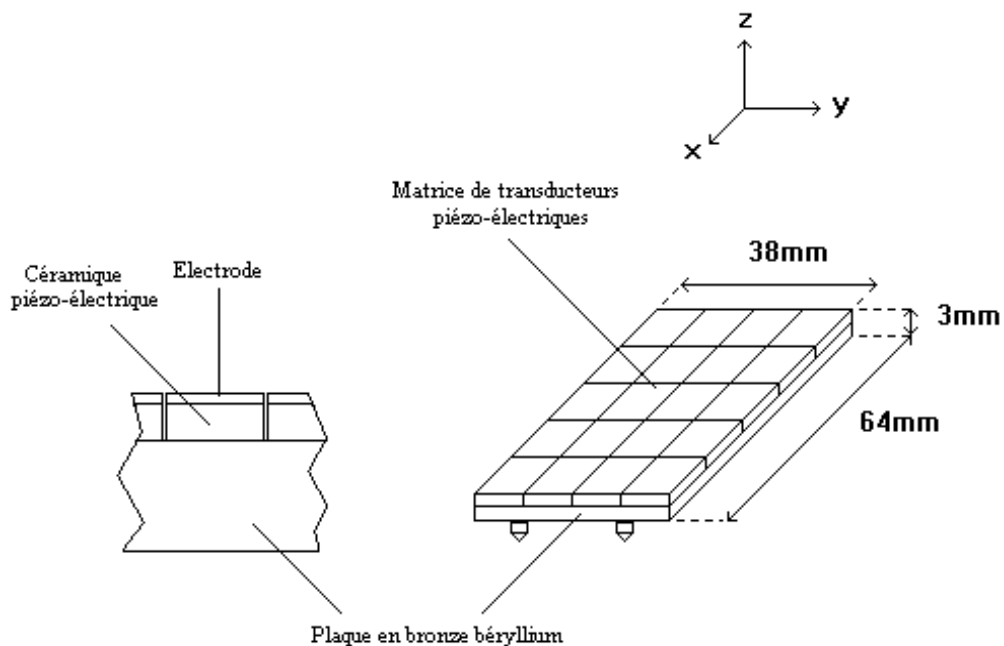


Fig. 2. 27 : Structure d'un nanotranslateur piézoélectrique

Chaque céramique est recouverte d'une électrode métallisée sur sa face supérieure permettant son excitation par une tension électrique. quatre plots, fixés sous la plaque métallique, servent à convertir les vibrations en déplacement de corps solide. L'excitation de céramiques piézoélectriques à des fréquences bien déterminées permet d'obtenir des déplacements suivant les directions X^+ , X^- , Y^+ et Y^- ainsi que des rotations suivant θ^+ et θ^- .

3. Différentes approches pour la conception de micromanipulateurs

3.1 Introduction

Un micromanipulateur est un dispositif capable de réaliser des tâches de micromanipulation, c'est à dire de manipuler des objets de dimensions micrométriques.

Dans la partie précédente, nous avons vu divers principes d'actionnement permettant de générer des déplacements ou d'exercer des forces. En général, l'utilisation de micro-actionneurs seuls ne permet pas de remplir ces tâches. C'est pourquoi le concept de micromanipulateur englobe outre les micro-actionneurs, divers autres éléments tels que des structures mécaniques plus ou moins complexes, des amplificateurs mécaniques de mouvements, des organes terminaux adaptés au contact avec les micro-objets ou encore des éléments de canalisation de l'énergie. Un micromanipulateur peut également être équipé de capteurs de position et de force rendant son emploi plus aisé. Dans ce cas, on parle souvent de micromanipulateurs « intelligents ».

Depuis quelques années, divers prototypes de micromanipulateurs ont été réalisés à travers le monde [7][11][13][22][31][36][56][60]. Dans cette partie, nous présentons les principales approches utilisées pour la conception de micromanipulateurs, illustrées par des réalisations concrètes. Certaines de ces réalisations ont des dimensions trop importantes pour être utilisées en microrobotique. Elles ont néanmoins été retenues pour leur originalité et pour le rôle qu'elles pourraient jouer si une version miniaturisée était réalisée.

3.2 Caractérisation des micromanipulateurs

Il est extrêmement difficile d'énoncer des critères généraux pour évaluer la qualité ou les performances d'un micromanipulateur tant les exigences sont variées et étroitement liées au type de manipulation souhaitée et aux caractéristiques des micro-objets à manipuler. Ainsi, dans certains cas on favorisera la précision de positionnement et dans d'autres l'aptitude à mesurer les efforts exercés sur les objets manipulés. Dans d'autres situations encore, on cherchera à effectuer des séquences de micromanipulation le plus rapidement possible (cas des opérations de « pick & place »).

Les prototypes réalisés dans les laboratoires constituent un grand progrès dans la résolution des problèmes liés à la micromanipulation. Cependant malgré les divers travaux effectués pour développer des micromanipulateurs et pour mettre au point des principes d'actionnement et des procédés de fabrication, on constate que pour une tâche donnée, il n'existe pas de règles pour obtenir un manipulateur approprié.

Un micromanipulateur idéal et multi-usage aurait les propriétés suivantes :

- plusieurs degrés de liberté,
- isolation entre les signaux de contrôle et l'environnement de travail,
- haute précision,
- temps de réponse court,
- non contaminant,

- aptitude à exercer de grandes forces,
- aptitude à travailler dans divers environnements (en salles blanches, en milieu liquide...),
- possibilité de manipuler des micro-objets de tailles et de formes diverses,
- simplicité de fabrication,
- présence de capteurs puissants capables de délivrer des informations précises sur la position du manipulateur, les forces appliquées sur l'objet manipulé ainsi que l'environnement extérieur,
- commande en boucle fermée de la position du manipulateur et des efforts appliqués sur l'objet cible.

En pratique, il est très difficile de réunir toutes ces caractéristiques dans un même manipulateur. Les prototypes réalisés ne peuvent en général manipuler qu'un type particulier de micro-objets et dans des conditions bien déterminées.

3.3 Approches pour la conception de micromanipulateurs

Les micromanipulateurs réalisés peuvent être classés selon différents critères tels que le type d'actionnement utilisé, la résolution de positionnement, les dimensions ou encore la largeur des débattements maximum obtenus. Dans ce paragraphe nous proposons une classification des micromanipulateurs existants selon un critère qui nous paraît fondamental : l'interaction avec les micro-objets manipulés. Les différents prototypes réalisés à travers le monde utilisent des principes d'actionnement très différents. Cependant on constate que malgré ces différences, les micromanipulateurs sont toujours conçus selon l'une des approches suivantes [36]:

3.3.1 Miniaturisation de macromanipulateurs

Pour concevoir un micromanipulateur, l'idée la plus simple consiste à utiliser les connaissances acquises des expériences de manipulation à l'échelle macroscopique. Un micromanipulateur peut alors être réalisé par miniaturisation des "macro-outils" pour permettre la manipulation d'objets de faible taille (voir figure 2.28). L'un des plus grands avantages de cette méthode est que la modélisation et la commande des manipulateurs sont bien connues. Cette approche souffre de deux limitations majeures :

- les procédés de fabrication actuels ne permettent pas toujours de réaliser des pièces mécaniques complexes de faible taille,
- il est difficile de trouver des outils et des machines capables d'assembler des microsystèmes complexes.

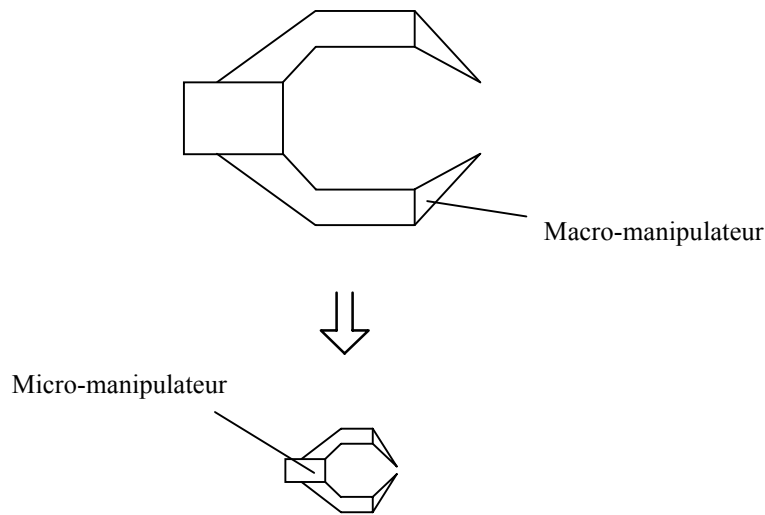


Fig. 2. 28 : Miniaturisation de macro-manipulateurs

3.3.2 Micropréhenseurs à doigts actionnés individuellement

Cette approche consiste en la fabrication et la commande d'un doigt de pince (poutre, baguette...) pouvant se déplacer en flexion ou en mouvement latéral. Dès lors, un micromanipulateur peut être réalisé en utilisant deux doigts ou plus. Cette méthode est particulièrement intéressante pour les applications de manipulation qui nécessitent une grande dextérité et où il est important de pouvoir actionner chaque doigt indépendamment des autres.

Une manière relativement simple consiste à utiliser des bimorphes. La figure 2.29 montre une poutre actionnée par un bimorphe thermique. Elle est constituée de deux couches de matériaux ayant des coefficients de dilatation très différents. Lorsque la température croît, la poutre fléchit en raison de la différence entre les coefficients de dilatation des deux matériaux. La position de l'extrémité de la poutre peut alors être contrôlée au moyen de la température. Des travaux sur les bimorphes thermiques ont été décrits dans la littérature [32].

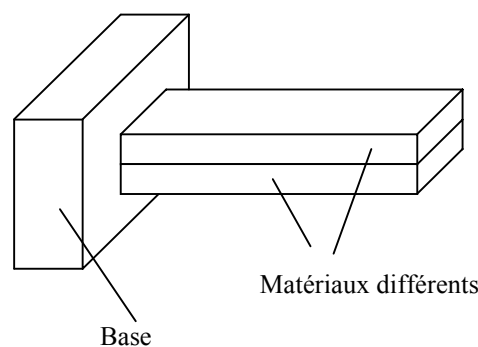


Fig. 2. 29 : Poutre à bimorphe thermique

La dilatation thermique n'est pas le seul effet utilisable pour actionner des bimorphes. On peut, par exemple, utiliser l'effet piézoélectrique ou les alliages à mémoire de forme.

La figure 2.30 présente deux réalisations de doigt de pince inspirées des baguettes utilisées dans l'art culinaire asiatique utilisant des plates-formes de Stewart [4] [5].

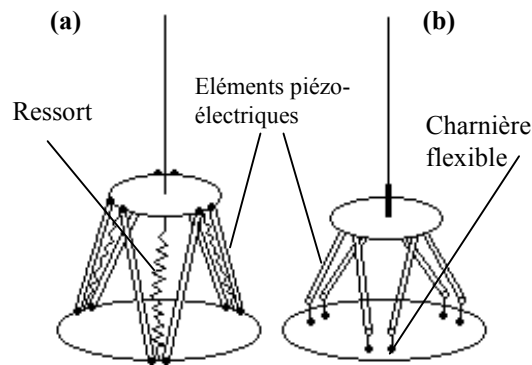


Fig. 2. 30 : Deux prototypes d'un manipulateur à baguette

Ces manipulateurs utilisent une structure parallèle pour obtenir six degrés de liberté. Le système est actionné par six éléments piézoélectriques. Des ressorts ont été ajoutés au premier prototype (figure 2.30-a) afin de maintenir la stabilité et de permettre au manipulateur de se déplacer de manière continue. Le second prototype (figure 2.30-b) utilise des charnières flexibles. La précision atteinte est de l'ordre de 10 nm.

D'autres manipulateurs ont été développés en utilisant comme actionneur des éléments piézoélectriques tubulaires équipés d'une électrode interne et de quatre électrodes externes [24]. Une aiguille est fixée sur l'élément tubulaire dans le but d'amplifier les déplacements obtenus et de permettre d'effectuer des tâches de manipulation (voir figure 2.31). Les déplacements de l'extrémité de l'aiguille sont obtenus par application de tensions électriques entre l'électrode interne et les électrodes externes.

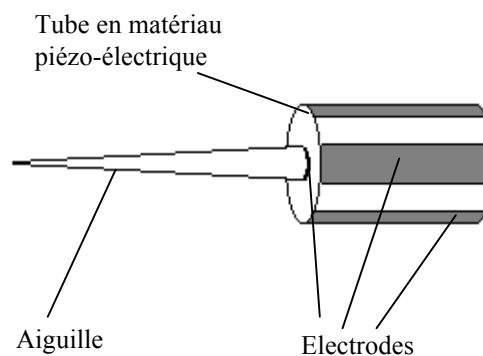


Fig. 2. 31 : Tube en matériau piézoélectrique

Un autre procédé original utilise trois éléments tubulaires comparables à ceux décrits pour tourner une boule métallique sur laquelle est fixée une aiguille (ou tout autre organe

terminal). La boule métallique est attirée contre les trois piézocéramiques à l'aide d'un aimant permanent (voir figure 2.32).

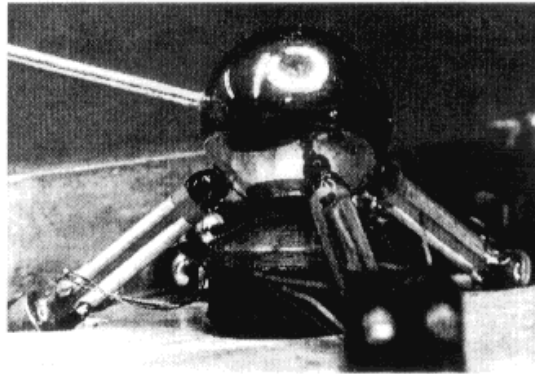


Fig. 2. 32 : Micromanipulateur à boule

Ce manipulateur est capable d'effectuer de larges déplacements avec une précision de 10 nm. La figure 2.33 présente un système mobile équipé de deux doigts à boule métallique (robot MINIMAN [25]).

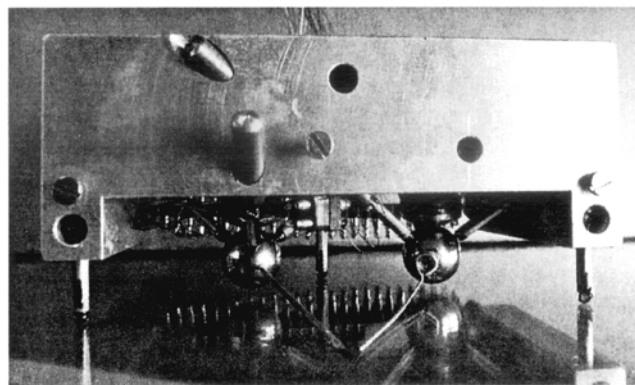


Fig. 2. 33 : Robot MINIMAN

3.3.3 L'approche de type pince

Cette méthode consiste en la fabrication de structures comparables à des pinces. L'actionnement résulte de l'interaction entre les deux doigts. Dans ce type de manipulateurs, il n'est pas possible d'actionner un doigt individuellement, ce qui pose dans certains cas des problèmes de préhension (position du micro-objet par rapport aux doigts de la pince...). Divers prototypes ont été réalisés. La figure 2.34 montre une pince en polysilicones actionnée au moyen de la force électrostatique apparaissant entre deux armatures d'un condensateur plan [21].

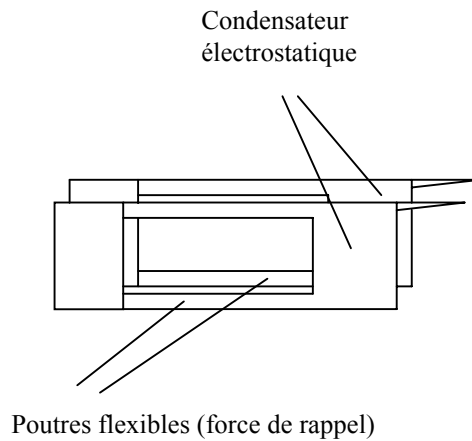


Fig. 2. 34 : Pince à actionneur électrostatique

Chaque armature est maintenue par deux poutres dont la flexion provoque l'apparition d'une force de rappel qui permet de contrebalancer la force électrostatique. Plusieurs versions ont été fabriquées avec des armatures dont la surface est comprise entre $100 \mu\text{m}^2$ et $0,1 \text{ mm}^2$.

La figure 2.35 présente deux prototypes d'une pince destinée à être utilisée pour effectuer des opérations de prise-dépose pour le montage de disques durs [43].

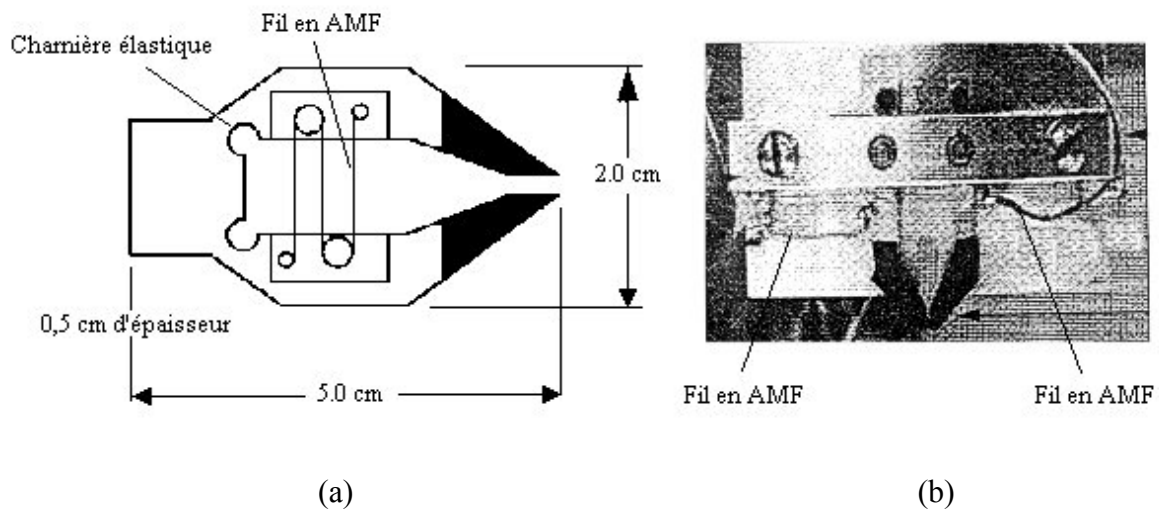


Fig. 2. 35 : Pince actionnée par un fil en AMF

Elle est constituée d'une structure en plastique ABS. Ce matériau offre de très bonnes propriétés élastiques. Un fil d'AMF (NiTi) de 0,076 mm de diamètre sert à actionner la pince. L'extrémité des doigts est fabriquée en plastique conducteur pour réduire l'effet des forces électrostatiques sans pour autant contaminer les têtes de lecture/écriture par des particules métalliques.

La figure 2.35-a montre un premier prototype. L'AMF est utilisé pour fermer la pince. la force de rappel est produite par l'élasticité de la structure. Dans le but d'augmenter la rapidité des cycles de fermeture/ouverture de la pince, un second prototype à été réalisé

(figure 2.35-b). Dans ce cas, l'AMF est utilisé pour ouvrir la pince. Au repos, la pince est maintenue fermée à l'aide de deux ressorts. Les performances de ces deux prototypes sont données dans le tableau suivant :

	Prototype a	Prototype b
temps de contraction de l'AMF	1,75 s	2,2 s
temps de retour à l'état initial	4,5 s	0,9 s

La pince représentée à la figure 2.36 utilise un élément en AMF comme actionneur. elle est destinée à manipuler des objets dont la taille est comprise entre 0,2 mm et 2 mm [49]. Chaque doigt mesure 15 mm de long, 4 mm de large (1 mm à l'extrémité) et 0,13 mm d'épaisseur. La pince est actionnée par un fil en AMF de 0,3 mm de diamètre en forme de U. L'ouverture de la pince est effectuée en faisant passer un courant électrique le long du fil en AMF. L'arrêt de l'alimentation provoque le refroidissement du fil et par conséquent la fermeture de la pince. Le déplacement minimal réalisable est inférieur à 0,05 mm.

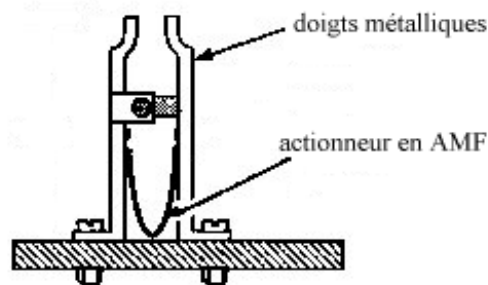


Fig. 2. 36 : Pince à actionneur en AMF

La mesure des déplacements est réalisée à l'aide d'un système optique constitué de deux parties. La première, solidaire de l'un des deux doigts, est constituée d'une diode électroluminescente (LED) ainsi que d'un photodétecteur. La seconde, liée au second doigt, est formée d'un élément opaque de forme triangulaire pouvant glisser entre la source lumineuse et le photodétecteur (voir figure 2.37). L'intensité lumineuse captée est fonction de l'épaisseur de l'élément opaque et donc dépend de l'écart entre les deux doigts.

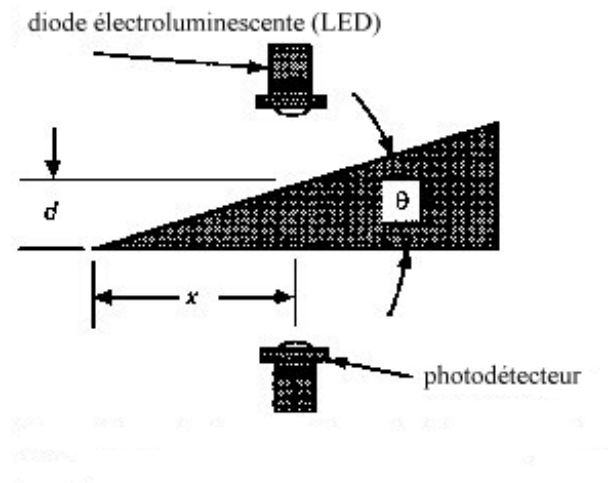
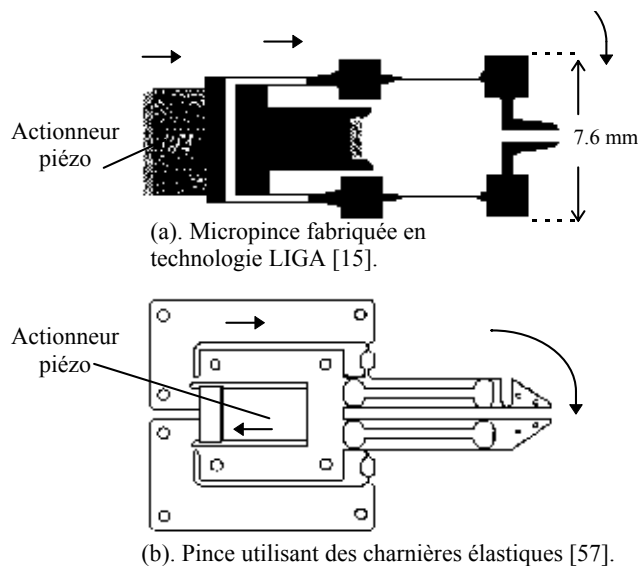


Fig. 2. 37 : Système de mesure de déplacements

D'autres actionneurs présentant des déplacements beaucoup plus faibles peuvent également être employés, à condition d'amplifier mécaniquement les mouvements générés. C'est le cas notamment des actionneurs piézoélectriques. Malgré les faibles dimensions des objets à manipuler, les déplacements générés par effet piézoélectrique doivent être amplifiés pour être utilisables en micromanipulation. La figure 2.38 montre deux pinces utilisant un élément piézoélectrique comme actionneur et une structure mécanique pour amplifier les déplacements.



→ Sens de déplacement

Fig. 2. 38 : Deux pinces actionnées par un élément piézoélectrique

3.3.4 Manipulateurs à actionneurs distribués

Une approche intéressante consiste à fabriquer des micromanipulateurs en utilisant un ensemble de très petits actionneurs (cellules élémentaires). Des déplacements importants peuvent être obtenus par sommation des déplacements faibles générés par chaque cellule élémentaire. Ces manipulateurs se prêtent bien à la commande par réseaux de neurones. La figure 2.39 montre un actionneur "macroscopique" formé de cellules élémentaires actionnées par une force électrostatique [61].

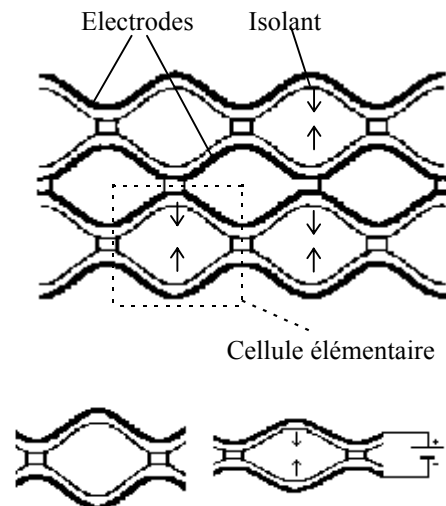


Fig. 2. 39 : Actionneur électrostatique distribué

Chaque cellule est constituée de deux armatures ondulées et isolées électriquement. L'application d'une différence de potentiel génère une force d'attraction qui aura tendance à rapprocher les deux armatures. L'arrêt de l'excitation provoque le retour de la cellule à son état initial. La multiplication du nombre de cellules élémentaires permet d'obtenir de grands déplacements ainsi que des forces importantes (voir figure 2.40).

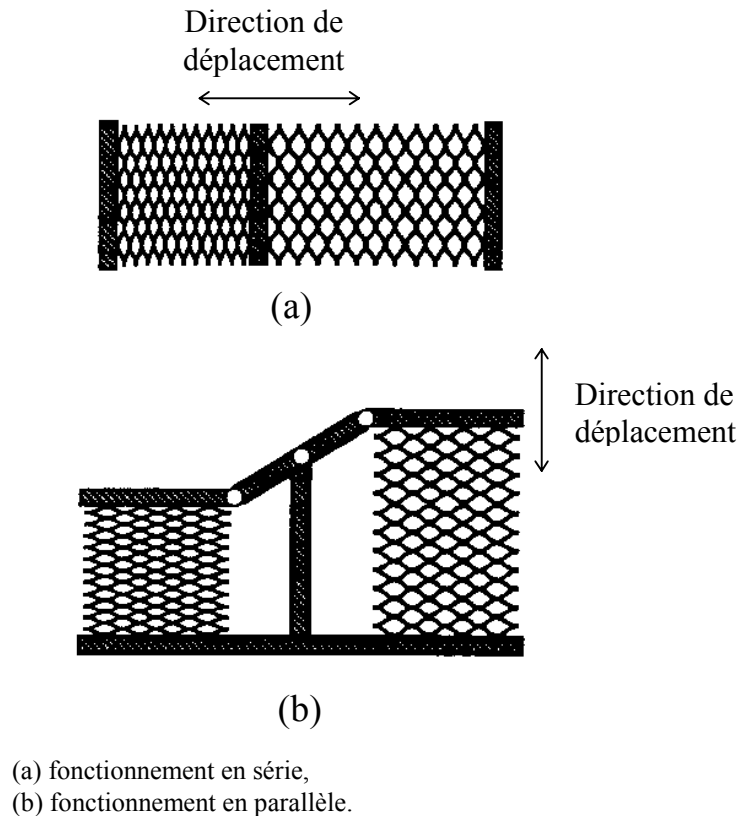


Fig. 2. 40 : Diverses configurations de manipulateurs distribués

Des déformations de l'ordre de 32% ont été obtenues pour une tension de 500 Volts.

La mesure du déplacement peut être réalisée en utilisant la variation de capacité d'une ou plusieurs cellules élémentaires. Ceci peut être réalisé soit en réservant quelques cellules exclusivement à la mesure, soit en utilisant des cellules à la fois pour l'actionnement et la mesure des déplacements. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de superposer à la tension de commande un signal qui servira à mesurer la capacité.

3.3.5 Manipulateurs isolés

Certaines tâches de manipulation nécessitent une isolation galvanique entre l'organe terminal et le reste du manipulateur. Lors de la manipulation de cellules biologiques, la présence de signaux électriques peut endommager les objets manipulés. Dans d'autres cas, l'amplitude des déplacements nécessaire est très grande et ne doit pas être entravée par la présence de câbles de liaison.

Divers principes peuvent être employés. La figure 2.41 montre une poutre actionnée par effet magnétostrictif.

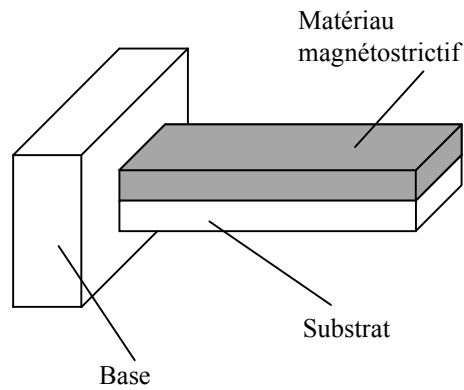


Fig. 2. 41 : Poutre actionnée par effet magnétostrictif

La poutre fléchit lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique.

La figure 2.42 présente un manipulateur qui utilise des forces magnétiques pour déplacer de petits aimants sur une base. Le prototype réalisé possède des dimensions beaucoup trop grandes pour envisager son utilisation en microrobotique. Cependant, une version miniaturisée pourrait être d'une grande utilité dans certains cas.

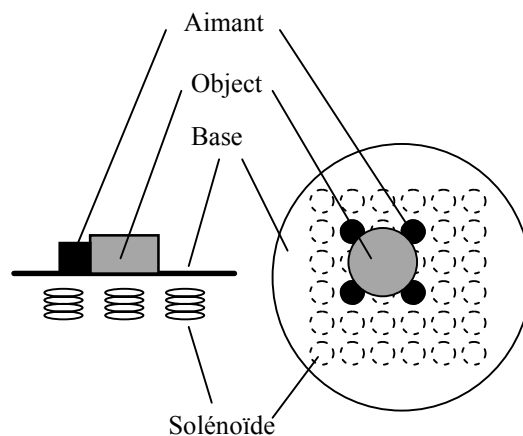


Fig. 2. 42 : Manipulateur utilisant des forces magnétiques

L'utilité de ce manipulateur réside dans le fait que l'organe terminal n'est pas lié au reste du système. Un objet peut être déplacé sur de longues distances et peut même être tourné de plus de 360 degrés sans être lâché. De plus, ce système autorise l'emploi de plusieurs organes terminaux simultanément.

Le champ magnétique est créé par une matrice de solénoïdes. L'organe terminal (aimant permanent) se déplace lorsque des courants électriques sont appliqués séquentiellement sur les solénoïdes [38]. La figure 2.43 montre comment il est possible d'effectuer une manipulation 3D à l'aide de ce système. Cependant, l'ensemble des points accessibles est un espace discret.

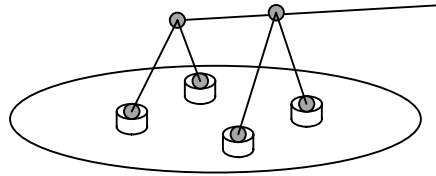


Fig. 2. 43 : Manipulateur 3D utilisant des forces magnétiques

3.3.6 Manipulation par forces d'adhésion

La présence des forces d'adhésion constitue un problème important qui entrave souvent le bon déroulement des opérations de micromanipulation. C'est pourquoi les concepteurs de micromanipulateurs tentent en général de les éliminer ou, du moins, de minimiser leur effet par divers moyens (traitement de surface, travail en environnement sec...). Cependant lorsqu'elles sont bien maîtrisées, ces forces peuvent constituer un moyen intéressant pour manipuler des micro-objets (voir figure 2.44).

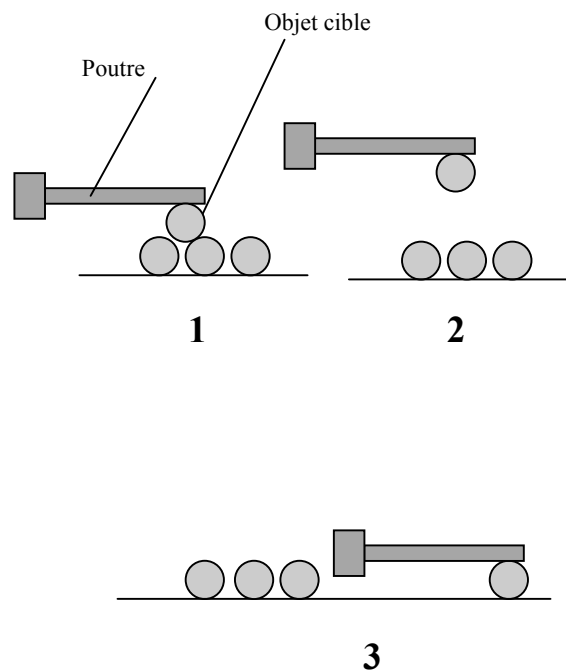


Fig. 2. 44 : Manipulation en utilisant les forces d'adhésion

Selon la nature des objets à manipuler, il est possible d'exploiter l'une ou l'autre des forces d'adhésion qui interviennent dans ces dimensions. Un manipulateur fabriqué en matériau isolant peut soulever des micro-objets grâce aux interactions électrostatiques. De même une poutre humide présente des tensions de surface qui permettent de manipuler de petits objets. Ces objets peuvent être relâchés par exemple par évaporation du liquide. Des travaux de modélisation ont été menés dans ce sens [47].

3.3.7 Manipulation à distance (effet Raman...)

Certains procédés permettent de manipuler des micro-objets à distance (sans contact physique). C'est le cas notamment de l'effet Raman (voir figure 2.45). L'effet Raman permet de déplacer des micro-objets en milieu liquide grâce à l'interaction qui se produit entre le micro-objet et le faisceau laser. En utilisant deux faisceaux laser, il est possible de réaliser des micromanipulations dans un espace à trois dimensions [6].

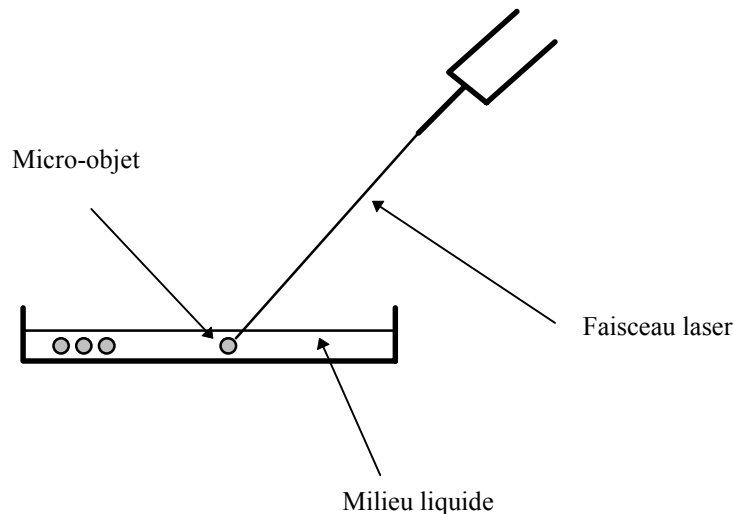


Fig. 2. 45 : Manipulation par effet Raman

4. Conclusion du chapitre

Les principes d'actionnement pouvant être mis en œuvre pour la réalisation de microactionneurs sont nombreux. Chaque principe présente des avantages et des inconvénients. Le choix est souvent dicté par les besoins de l'application. Par exemple, dans certains cas, on choisira des actionneurs à alliage à mémoire de forme en raison des larges déplacements qu'ils offrent. Dans d'autres cas, on favorisera les actionneurs piézoélectriques pour leur rapidité et leur précision. Pour réaliser un micromanipulateur, le concepteur doit considérer divers aspects tels que le choix du principe d'actionnement à utiliser, l'interaction du manipulateur avec l'environnement dans lequel il évolue...

Divers prototypes de micromanipulateurs ont été réalisés dans plusieurs laboratoires à travers le monde. L'approche par miniaturisation se heurte aux difficultés liées à la fabrication de microcomposants. Les méthodes de microfabrication disponibles offrent des possibilités limitées. Il apparaît que la voie la plus appropriée consiste à utiliser des principes d'actionnement simples afin d'éviter l'emploi de structures mécaniques complexes difficiles à fabriquer dans ces dimensions.

Notons enfin que les prototypes réalisés sont rarement équipés de capteurs en mesure de fournir des informations concernant les forces exercées sur les micro-objets manipulés.

Chapitre 3
Réalisation de micromanipulateurs
à actionneurs piézoélectriques

Table des matières

1. Introduction.....	71
2. La piézoélectricité.....	71
2.1 Compléments sur l'effet piézoélectrique	71
2.2 Matériaux piézoélectriques	73
2.2.1 Les matériaux piézoélectriques naturels	73
2.2.2 Les céramiques piézoélectriques	73
2.2.3 Films minces déposés	74
2.2.4 Polymères piézoélectriques	75
3. Equations de la piézoélectricité	75
4. Actionneurs piézoélectriques.....	79
4.1 Utilisation de l'effet longitudinal.....	79
4.2 Empilement d'éléments	81
4.3 Utilisation de l'effet transverse.....	82
5. Premières réalisations de micropinces.....	82
6. Réalisation des prototypes	87
6.1 Conception et génération des masques de gravure	87
6.2 Gravure du substrat en salle blanche	88
6.3 Difficultés rencontrées lors de la fabrication.....	91
7. Unimorphes et bimorphes piézoélectriques.....	91
8. Utilisation d'unimorphes piézoélectriques pour la réalisation d'une micropince	92
8.1 Caractéristiques des unimorphes piézoélectriques utilisés	92
8.2 Réalisation de la micropince.....	93
9. Modèle statique d'un unimorphe piézoélectrique	95
9.1 modèle statique	95
9.2 Limitation du modèle statique	97
10. Modèle dynamique d'un unimorphe piézoélectrique.....	98
10.1 Equation différentielle régissant les vibrations latérales d'une poutre de section constante.....	98
10.2 Résolution de l'équation différentielle dans le cas de l'application d'une force extérieure F	100
10.3 Prise en compte de l'effet piézoélectrique inverse	102
11. Validation du modèle.....	104
11.1 Banc de mesure pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques.....	104
11.2 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de tension.....	105
11.3 Réponse fréquentielle de l'unimorphe	105
11.4 Limite de validité du modèle	106
11.5 Identification du modèle de l'unimorphe.....	106
11.6 Application d'échelons de force	107
11.7 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de force	108
11.8 Comparaison avec le calcul théorique	109
12. Forme finale de la fonction de transfert.....	111
13. Conclusion du chapitre	112

Table des illustrations

Fig. 3. 1 : Piézoélectricité dans un cristal de sulfure de cadmium	72
Fig. 3. 2 : Effet piézoélectrique inverse dans un cristal de sulfure de cadmium.....	73
Fig. 3. 3 : Polarisation d'une céramique	74
Fig. 3. 4 : Système orthogonal décrivant les propriétés d'un matériau piézoélectrique polarisé	75
Fig. 3. 5 : Identification des directions pour la notation condensée.....	77
Fig. 3. 6 : Effet piézoélectrique longitudinal.....	80
Fig. 3. 7 : Empilement d'éléments piézoélectriques	81
Fig. 3. 8 : Effet piézoélectrique transverse.....	82
Fig. 3. 9 : Structure simple d'une pince à deux doigts	83
Fig. 3. 10 : Structure simple d'une pince à extrémités parallèles	83
Fig. 3. 11 : Effet piézoélectrique local	84
Fig. 3. 12 : Flexion d'une poutre à effet piézoélectrique local	85
Fig. 3. 13 : Utilisation d'électrodes en forme de S.....	85
Fig. 3. 14 : Prototypes de micropinces	86
Fig. 3. 15 : Masque de gravure pour les structures en PZT	87
Fig. 3. 16 : Masque de gravure pour les électrodes.....	88
Fig. 3. 17 : Unimorphes et bimorphes piézoélectriques.....	91
Fig. 3. 18 : Utilisation d'unimorphes et de bimorphes piézoélectriques.....	92
Fig. 3. 19 : Dimensions des unimorphes piézoélectriques utilisés.....	93
Fig. 3. 20 : Unimorphe piézoélectrique sur son support	93
Fig. 3. 21 : Structure de la micropince à unimorphes piézoélectriques	94
Fig. 3. 22 : Micropince à unimorphes piézoélectriques	94
Fig. 3. 23 : Flexion d'un unimorphe piézoélectrique	95
Fig. 3. 24 : Comportement hystérétique d'un unimorphe PZT/laiton.....	97
Fig. 3. 25 : Vibration latérale d'une poutre droite.....	98
Fig. 3. 26 : Élément infinitésimal de poutre soumis aux différents efforts	98
Fig. 3. 27 : Poutre en flexion soumise à une force F.....	100
Fig. 3. 28 : représentation externe d'un unimorphe piézoélectrique.....	103
Fig. 3. 29 : Schéma du banc de mesure pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques.....	104
Fig. 3. 30 : Déflexion de l'unimorphe en réponse à l'application d'un échelon de tension de 100 Volts	105
Fig. 3. 31 : Réponse fréquentielle de l'unimorphe.....	106
Fig. 3. 32 : Déflexion expérimentale/déflexion du modèle en réponse à l'application d'un échelon de tension de 100 Volts.....	107
Fig. 3. 33 : Schéma du banc de caractérisation du transfert $F \rightarrow \delta$	108
Fig. 3. 34 : Comparaison des réponses indicielles à un échelon de force et à un échelon de tension	109

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé divers principes physiques pouvant être mis en œuvre pour actionner des micromanipulateurs. L'un d'entre eux a particulièrement retenu notre attention en raison des avantages qu'il offre. Il s'agit de l'effet piézoélectrique. Les actionneurs piézoélectriques sont précis, rapides et ils peuvent exercer des efforts importants [23]. Ils souffrent cependant de la faiblesse des déplacements générés. C'est pourquoi, leur utilisation pour la réalisation de micromanipulateurs ne peut être envisagée que si le prototype est équipé d'un amplificateur mécanique de déplacements.

Dans ce chapitre, nous donnons tout d'abord un bref aperçu des fondements de la piézoélectricité. Ensuite, nous présentons deux types de micromanipulateurs exploitant l'effet piézoélectrique. Le premier est destiné à être réalisé directement sur un substrat (ou "wafer") de PZT par usinage en salle blanche. Les prototypes conçus n'ont pu être réalisés en raison de certaines difficultés technologiques. Le second type utilise des unimorphes piézoélectriques comme actionneur. Un modèle dynamique de ces unimorphes est proposé.

2. La piézoélectricité

La piézoélectricité est la propriété remarquable de certains matériaux de convertir une sollicitation mécanique en énergie électrique (effet direct) et réciproquement une excitation électrique en énergie mécanique (effet inverse). L'effet piézoélectrique ayant été présenté dans le paragraphe 2.3.1.2. du chapitre 2, dans cette partie, nous donnons des compléments concernant le mécanisme de la piézoélectricité ainsi que les matériaux piézoélectriques.

2.1 Compléments sur l'effet piézoélectrique

La piézoélectricité est liée à la structure cristalline du matériau. Elle n'apparaît que dans les cristaux ne possédant pas de centre de symétrie. Une contrainte de compression ou de cisaillement appliquée au cristal provoque la dissociation des barycentres des charges positives et négatives. Il en résulte l'apparition d'un moment dipolaire par unité de volume, c'est-à-dire une polarisation. Ce mécanisme est illustré par le modèle unidimensionnel d'un cristal de sulfure de cadmium représenté sur la figure 3.1. Ce matériau est constitué de couches successives d'ions de soufre et d'ions de cadmium supposés reliés entre eux par des ressorts. Les deux plus proches voisins d'un ion n'étant pas symétriques par rapport à cet ion, les ressorts disposés de part et d'autre ont des constantes de rappel k_1 et k_2 différentes.

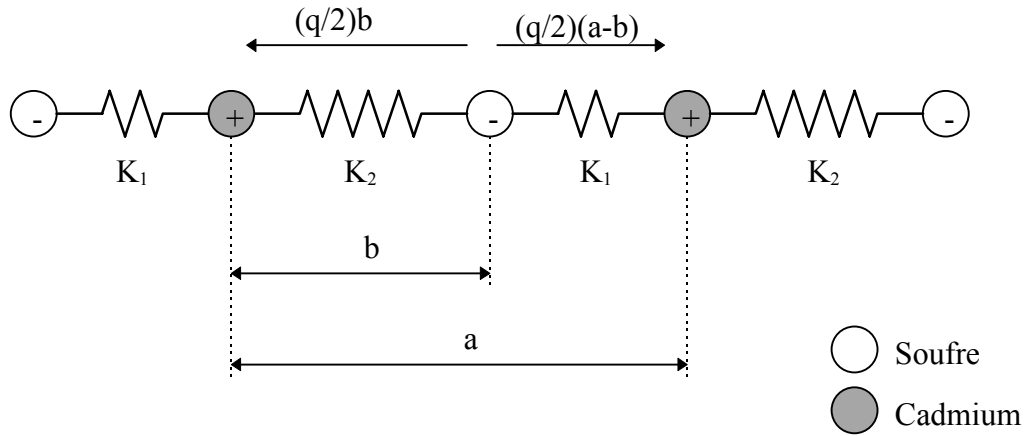


Fig. 3. 1 : Piézoélectricité dans un cristal de sulfure de cadmium

Soient $-q$ et $+q$ les charges effectives des ions soufre et cadmium. La chaîne peut être divisée en mailles de longueur a , comportant deux dipôles de moments :

$$\frac{q}{2}(a-b) \text{ et } -\frac{q}{2}b \quad (3.1)$$

Le moment dipolaire d'une molécule est donc :

$$P_m = \frac{q}{2}(a-2b) \quad (3.2)$$

Au repos, la polarisation par unité de volume P_0 n'est pas nulle si b est différent de $a/2$.

$$P_0 = \frac{nq}{2}(a-2b) \quad (3.3)$$

n est le nombre de molécules CdS par unité de volume.

- Sous l'action d'une contrainte, la chaîne se déforme. La modification des distances a et b entraîne une variation de la polarisation :

$$P = \Delta P_0 = \frac{nq}{2}(\Delta a - 2\Delta b) \quad (3.4)$$

C'est l'effet piézoélectrique direct.

- L'application d'un champ électrique provoque le déplacement en sens opposé des ions positifs et négatifs. La distance $(a-b)$ augmente tandis que b diminue (voir figure 3.2). Les ressorts n'ayant pas la même raideur, il en résulte une déformation : c'est l'effet piézoélectrique inverse.

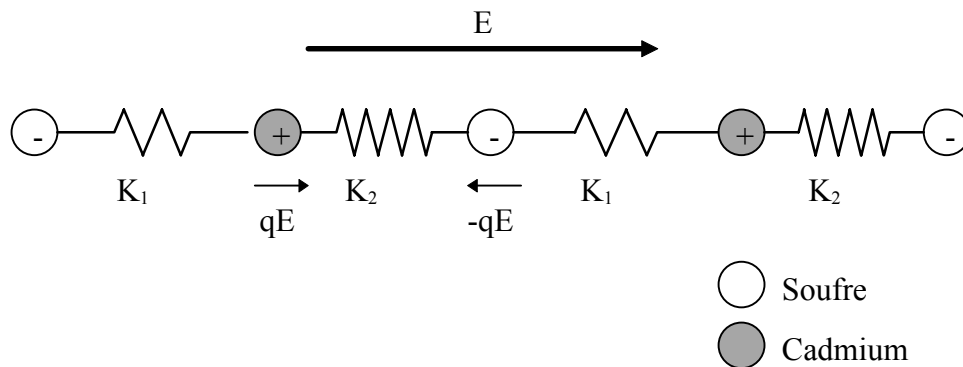


Fig. 3. 2 : Effet piézoélectrique inverse dans un cristal de sulfure de cadmium

2.2 Matériaux piézoélectriques

Tous les matériaux présentant un effet piézoélectrique sont anisotropes. Ce sont des monocristaux (naturels ou de synthèse) ou des matériaux présentant une anisotropie introduite lors de leur élaboration.

2.2.1 Les matériaux piézoélectriques naturels

certaines matériaux sont piézoélectriques à l'état naturel (quartz, tourmaline, sel de Rochelle...). Ils sont cependant de moins en moins utilisés car surclassés par les matériaux de synthèse qui présentent de bien meilleures propriétés piézoélectriques.

2.2.2 Les céramiques piézoélectriques

Ce sont des matériaux obtenus par frittage d'un mélange de poudres (BaTiO_3 , PZT...). Après frittage, on dispose d'un matériau à structure polycristalline. Les monocristaux de petite taille qui le composent sont orientés de manière aléatoire. Leurs dipôles électriques sont donc désordonnés et le matériau ne présente pas d'effet piézoélectrique macroscopique. Pour faire apparaître un effet piézoélectrique dans ces matériaux, il convient d'aligner les dipôles selon une direction privilégiée (voir figure 3.3). Cette opération est réalisée en polarisant le matériau sous un champ électrique intense (quelques KV/mm).

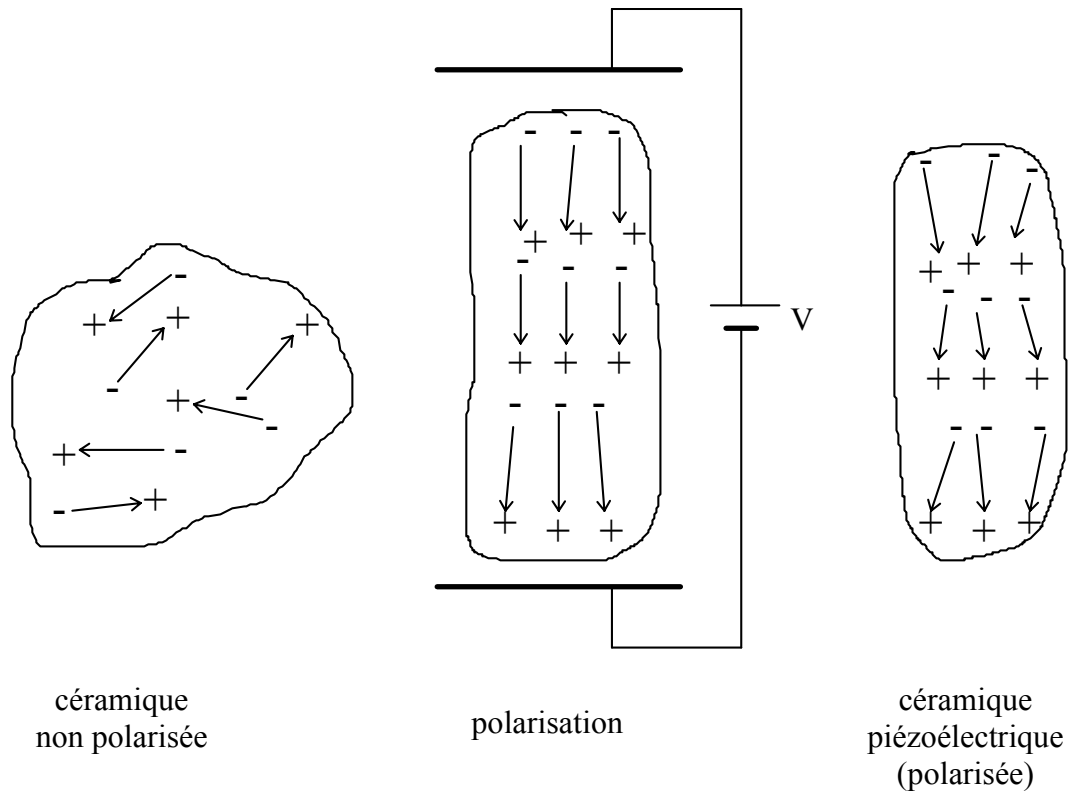


Fig. 3. 3 : Polarisation d'une céramique

Lors de l'application du champ électrique, le matériau s'allonge conformément à la direction du champ et se rétracte perpendiculairement. Les dipôles électriques s'alignent et gardent leur alignement après l'arrêt de l'application du champ électrique. Le matériau est alors polarisé et présente un effet piézoélectrique.

En général, le champ électrique appliqué est uniforme, mais il est possible d'appliquer sur le matériau un ou plusieurs champs électriques dans des directions différentes pour obtenir des caractéristiques piézoélectriques particulières ou un effet local.

Ces céramiques sont caractérisées par une forte piézoélectricité. Elles présentent cependant quelques limitations :

- étant obtenues par frittage, elles présentent une faible résistance à la traction. Elles supportent cependant de fortes contraintes de compression ;
- les matériaux dont l'effet piézoélectrique est obtenu par polarisation sont caractérisés par une température critique appelée température de Curie T_c . Lorsque ces matériaux sont soumis à une température supérieure à T_c , ils perdent leur effet piézoélectrique. Notons également que les caractéristiques piézoélectriques de ces céramiques dépendent fortement de la température ;
- la céramique perd son effet piézoélectrique si elle est soumise à un fort champ électrique opposé à celui utilisé pour sa polarisation (champ coercitif). Il existe une valeur E_c de champ critique à ne pas dépasser.

2.2.3 Films minces déposés

Certains matériaux peuvent être obtenus sous forme de films minces de quelques microns d'épaisseur par évaporation sous vide ou par pulvérisation.

2.2.4 Polymères piézoélectriques

Certains polymères, tel que le PVDF, peuvent être rendus piézoélectriques après divers traitements (laminage, polarisation...).

3. Equations de la piézoélectricité

Les matériaux piézoélectriques étant anisotropes, les effets piézoélectriques sont différents suivant l'axe choisi. Il est donc nécessaire de définir un système d'axes (voir figure 3.4).

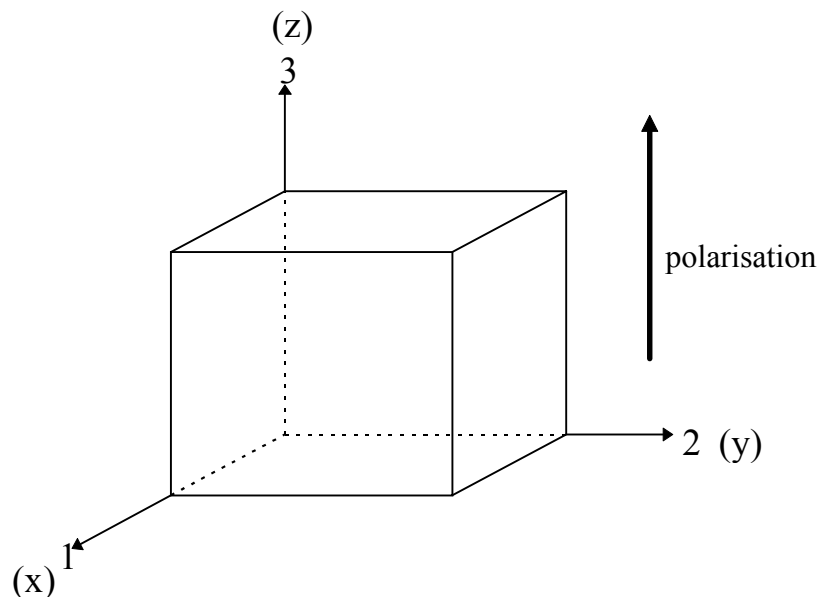


Fig. 3. 4 : Système orthogonal décrivant les propriétés d'un matériau piézoélectrique polarisé

L'axe 3 (z) est toujours choisi suivant la direction de polarisation du matériau.

La piézoélectricité met en jeu les variables mécaniques, électriques et thermiques présentées dans le tableau suivant :

Variables mécaniques	S T	déformation relative contrainte
Variables électriques	E D	champ électrique déplacement électrique
Variables thermiques	θ σ	température absolue entropie

Les équations piézoélectriques sont de nature tensorielle. Pour écrire les relations liant ces diverses variables, on peut choisir de manière arbitraire le jeu de variables indépendantes pourvu qu'il n'y ait qu'une variable de chaque espèce (mécanique, électrique et thermique). On peut ainsi définir huit jeux de variables indépendantes. On choisira le jeu de variables le mieux adapté au problème à traiter pour en faciliter la résolution. Par exemple, dans le cas

statique ou quasi-statique, la température θ sera prise comme variable indépendante (on opère à température déterminée). On aboutit alors à quatre jeux de relations tensorielles [48][9][37] :

→ variables indépendantes T et E :

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^{E,\Theta} T_{kl} + d_{mij}^{\Theta} E_m + \alpha_{ij}^E \delta\Theta \\ D_m &= d_{mij}^{\Theta} T_{ij} + \varepsilon_{mn}^T E_n + p_m^T \delta\Theta \\ \delta\sigma &= \alpha_{ij}^E T_{ij} + p_m^T E_m + \rho c^{T,E} \delta\Theta / \Theta_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

→ variables indépendantes T et D :

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^{D,\Theta} T_{kl} + g_{mij}^{\Theta} D_m + \alpha_{ij}^D \delta\Theta \\ E_m &= -g_{mij}^{\Theta} T_{ij} + \beta_{mn}^T D_n + q_m^T \delta\Theta \\ \delta\sigma &= \alpha_{ij}^D T_{ij} - q_m^T D_m + \rho c^{T,D} \delta\Theta / \Theta_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

→ variables indépendantes S et E :

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^{E,\Theta} S_{kl} - e_{mij}^{\Theta} E_m - \lambda_{ij}^E \delta\Theta \\ D_m &= e_{mkl}^{\Theta} S_{kl} + \varepsilon_{mn}^S E_n + p_m^S \delta\Theta \\ \delta\sigma &= \lambda_{kl}^E S_{kl} + p_m^S E_m + \rho c^{S,E} \delta\Theta / \Theta_0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

→ variables indépendantes S et D :

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^{D,\Theta} S_{kl} - h_{mij}^{\Theta} D_m + \lambda_{ij}^D \delta\Theta \\ E_m &= -h_{mij}^{\Theta} S_{ij} + \beta_{mn}^S D_n + q_m^S \delta\Theta \\ \delta\sigma &= \lambda_{kl}^D S_{kl} - q_m^S D_m + \rho c^{S,D} \delta\Theta / \Theta_0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Les indices supérieurs indiquent les variables qui sont constantes dans la définition des coefficients (par exemple, λ_{kl}^E signifie que λ est défini à champ électrique E constant).

Les propriétés de symétrie des tenseurs de contraintes et de déformations permettent de réduire les tenseurs T et S à des vecteurs à six composantes et ainsi ramener les relations tensorielles initiales à des relations matricielles plus simples à manipuler [48]. Ces relations

se réfèrent à une identification des directions dans le milieu considéré, indiquée sur la figure 3.5.

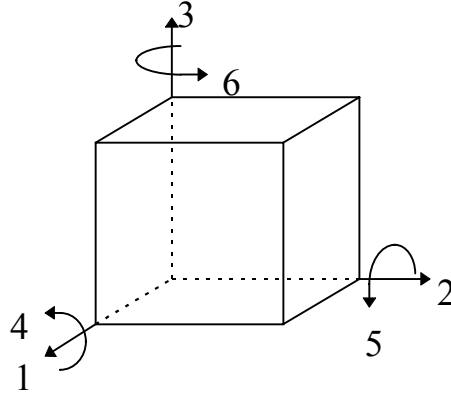


Fig. 3. 5 : Identification des directions pour la notation condensée

Les vecteurs contrainte et déformation s'écrivent alors :

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix}$$

Les composantes T_1, T_2, T_3 et S_1, S_2, S_3 désignent respectivement les contraintes et déformations parallèles aux axes 1, 2 et 3 tandis que les composantes T_4, T_5, T_6 et S_4, S_5, S_6 correspondent aux contraintes et déformations de cisaillement autour de ces mêmes axes.

Cette nouvelle notation permet d'écrire les relations constitutives simplement sous la forme suivante :

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m + \alpha_i^E \Delta\Theta \\ D_m = d_{mj} T_j + \varepsilon_{mn}^T E_n + p_m^T \Delta\Theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_i = s_{ij}^D T_j + g_{mi} D_m + \alpha_i^D \Delta\Theta \\ E_m = -g_{mj} T_j + \beta_{mn}^T D_n + q_m^T \Delta\Theta \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m - \lambda_i^E \Delta\Theta \\ D_m = e_{mj} S_j + \varepsilon_{mn}^S E_n + p_m^S \Delta\Theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_i = c_{ij}^D S_j - h_{mi} D_m - \lambda_i^D \Delta\Theta \\ E_m = -h_{mj} S_j + \beta_{mn}^S D_n + q_m^S \Delta\Theta \end{cases}$$

où les indices i et j varient de 1 à 6 et les indices m et n de 1 à 3.

De plus, les symétries cristallines qui caractérisent les matériaux piézoélectriques permettent de réduire le nombre de coefficients indépendants. Il existe 20 classes cristallographiques pouvant présenter un effet piézoélectrique. Le tableau suivant présente les matrices de coefficients pour les classes cristallographiques les plus utilisées. Les matrices pour les coefficients d_{ij} et h_{ij} ont la même structure, de même que celles pour les coefficients e_{ij} et g_{ij} . Les matrices exprimant les coefficients de souplesse s_{ij} sont semblables à celles des coefficients de raideur c_{ij} et celles des coefficients e_{ij} à celles des coefficients d_{ij} sauf pour les éléments qui sont indiqués.

→ Classe 2mm :

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}$$

→ Classe 32 :

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}$$

avec :

$$e_{26} = -e_{11} \quad c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \quad s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$

→ Classe 3m :

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -2d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}$$

avec :

$$e_{16} = -e_{22} \quad c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \quad s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$

→ Classe 6mm et uniaxe :

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}$$

avec :

$$c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \quad s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$

→ Classe 4mm :

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}$$

4. Actionneurs piézoélectriques

4.1 Utilisation de l'effet longitudinal

Les actionneurs à effet longitudinal sont ceux pour lesquels le champ électrique appliqué et le déplacement produit sont parallèles.

Prenons le cas d'un barreau de section rectangulaire équipé d'électrodes (voir figure 3.6).

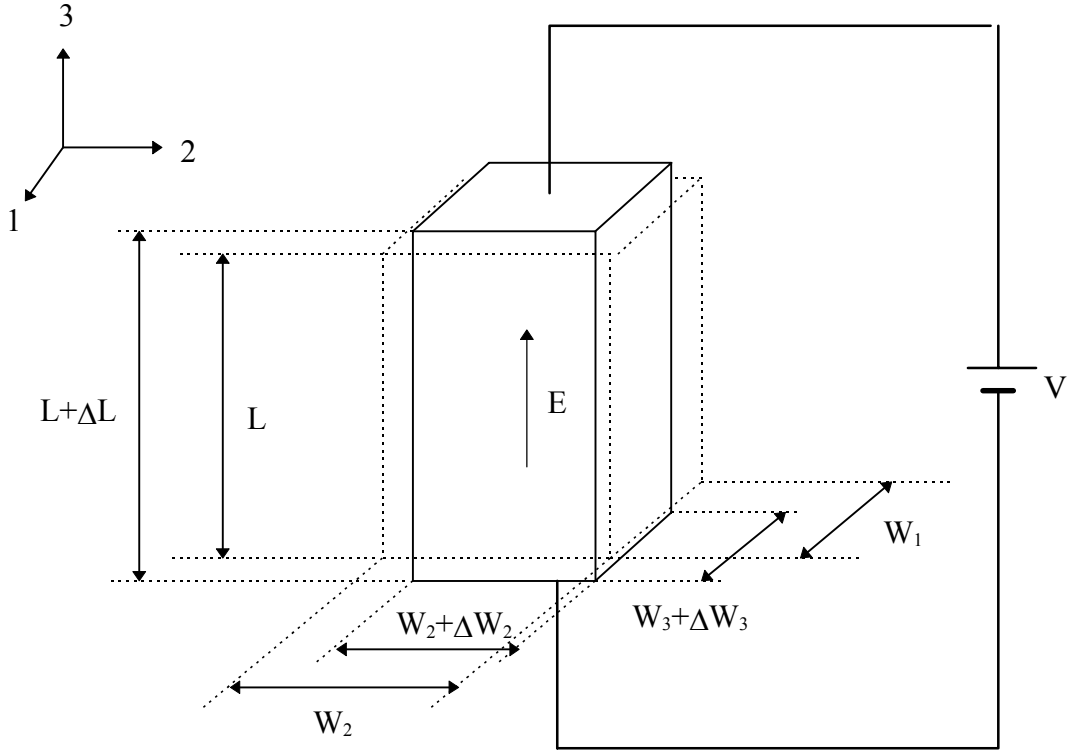


Fig. 3. 6 : Effet piézoélectrique longitudinal

Pour obtenir une élongation pure (sans cisaillement), il faut que les coefficients piézoélectriques d_{34} , d_{35} et d_{36} soient nuls. C'est le cas notamment pour la classe 6mm.

A contraintes nulles, les équations de la piézoélectricité nous permettent d'écrire :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{\Delta W_1}{W_1} = d_{31} E_3 = d_{31} \frac{V}{L} \\
 S_2 &= \frac{\Delta W_2}{W_2} = d_{32} E_3 = d_{32} \frac{V}{L} \\
 S_3 &= \frac{\Delta L}{L} = d_{33} E_3 = d_{33} \frac{V}{L}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

d'où :

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= d_{33} V \\
 \Delta W_1 &= d_{31} \frac{W_1}{L} V \\
 \Delta W_2 &= d_{32} \frac{W_2}{L} V
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Le déplacement ΔL obtenu est directement proportionnel à la tension appliquée.

4.2 Empilement d'éléments

Le déplacement obtenu en utilisant l'effet longitudinal est très faible (environ 0,3 microns pour 1000 volts pour une céramique de type PZT). Les équations précédentes montrent qu'à tension d'alimentation constante, l'élongation ΔL ne dépend pas des dimensions de l'élément. Il est donc possible d'obtenir des déplacements plus importants pouvant atteindre plusieurs dizaines de microns pour une tension de 100 volts en utilisant un empilement d'éléments piézoélectriques.

La figure 3.7 montre une structure couramment employée pour la réalisation d'actionneurs.

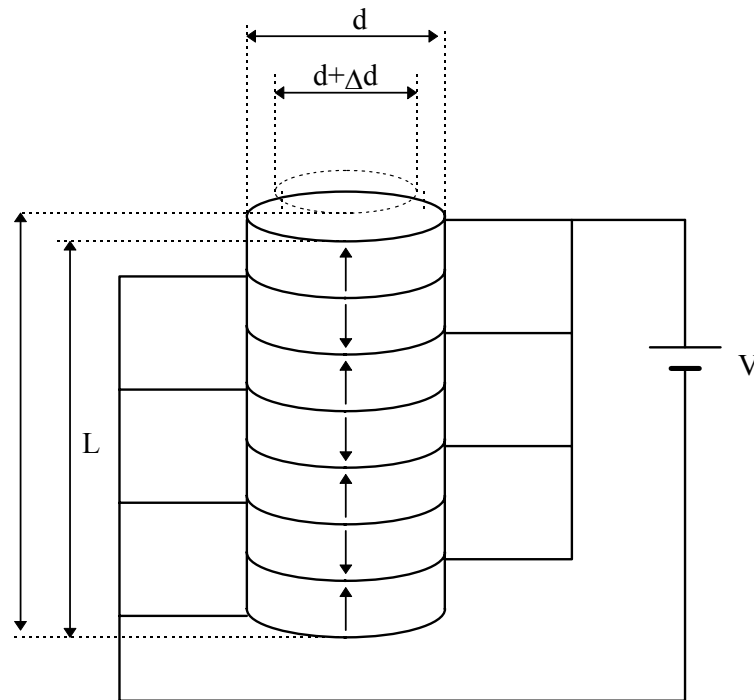


Fig. 3. 7 : Empilement d'éléments piézoélectriques

Il s'agit d'un empilement de disques en matériau piézoélectrique séparés par des électrodes. Les champs électriques dans deux disques successifs ayant été choisis de sens opposés, il est nécessaire, pour obtenir des déplacements qui s'additionnent, que les sens de polarisation soient alternés. Les équations s'écrivent alors :

$$\begin{aligned}\Delta L &= nd_{33}V \\ \Delta d &= d_{31} \frac{d}{L} V\end{aligned}\tag{3.12}$$

n étant le nombre de disques.

4.3 Utilisation de l'effet transverse

Dans ce cas le champ appliqué et le déplacement sont perpendiculaires (voir figure 3.8).

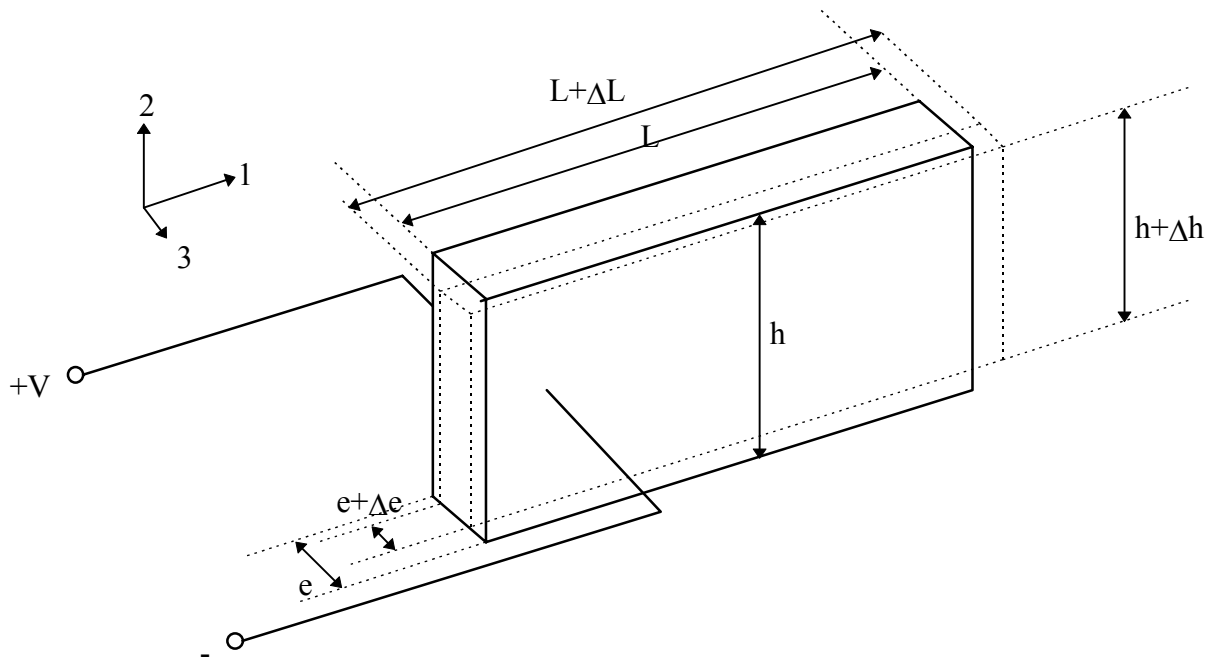


Fig. 3. 8 : Effet piézoélectrique transverse

On peut écrire :

$$S_1 = \frac{\Delta L}{L} = d_{31} \frac{V}{e} \quad (3.13)$$

d'où :

$$\Delta L = d_{31} \frac{L}{e} V \quad (3.14)$$

Le terme L/e est donc un facteur d'amplification qui peut atteindre une centaine si la lame utilisée est mince. Il est donc possible d'obtenir des déplacements beaucoup plus importants que dans le cas de l'effet longitudinal.

5. Premières réalisations de micropinces

Notre objectif étant de manipuler des micro-objets, nos recherches se sont orientées vers l'étude et la réalisation de préhenseurs (pincettes...) qui soient à la fois adaptés aux dimensions des objets à manipuler et de conception simple. Nous avons choisi d'utiliser comme actionneurs des matériaux piézoélectriques pour tous les avantages qu'ils présentent (voir chapitre 2).

Un moyen simple pour manipuler des micro-objets consiste à utiliser une pince à deux doigts de serrage. Celle-ci peut, dans sa version la plus dépouillée, être constituée de deux poutres encastrées capables de se déplacer en flexion (voir figure 3.9).

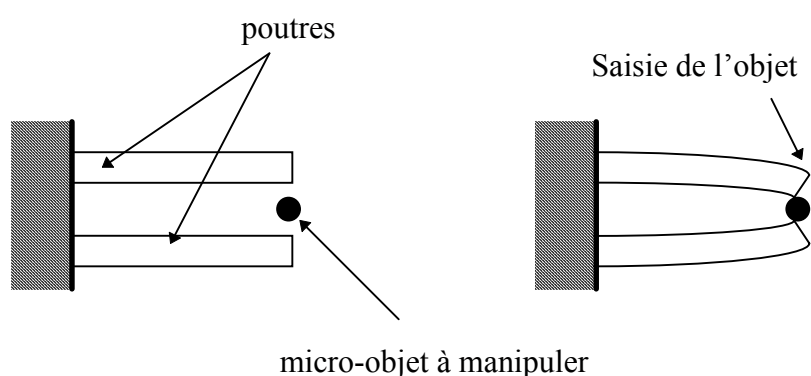


Fig. 3. 9 : Structure simple d'une pince à deux doigts

La saisie du micro-objet est plus aisée si les extrémités des poutres restent parallèles entre elles. On évite ainsi les mouvements brusques de fuite du micro-objet. On aboutit alors à la configuration représentée sur la figure 3.10.

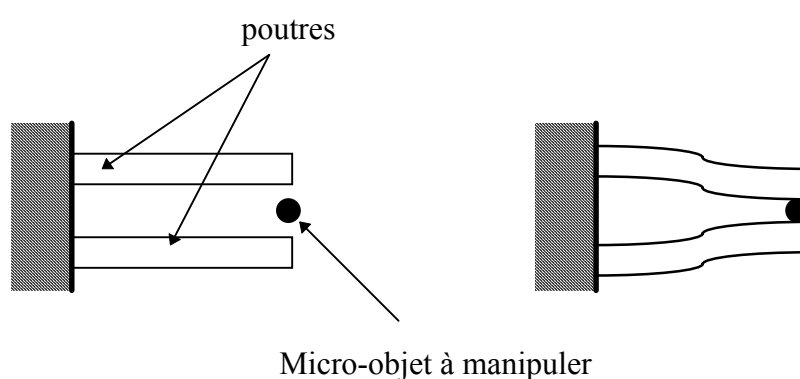


Fig. 3. 10 : Structure simple d'une pince à extrémités parallèles

Ce type de déformation peut être obtenu de la manière suivante :

Considérons une poutre en PZT sur laquelle sont déposées deux électrodes métalliques comme indiqué sur la figure 3.11.

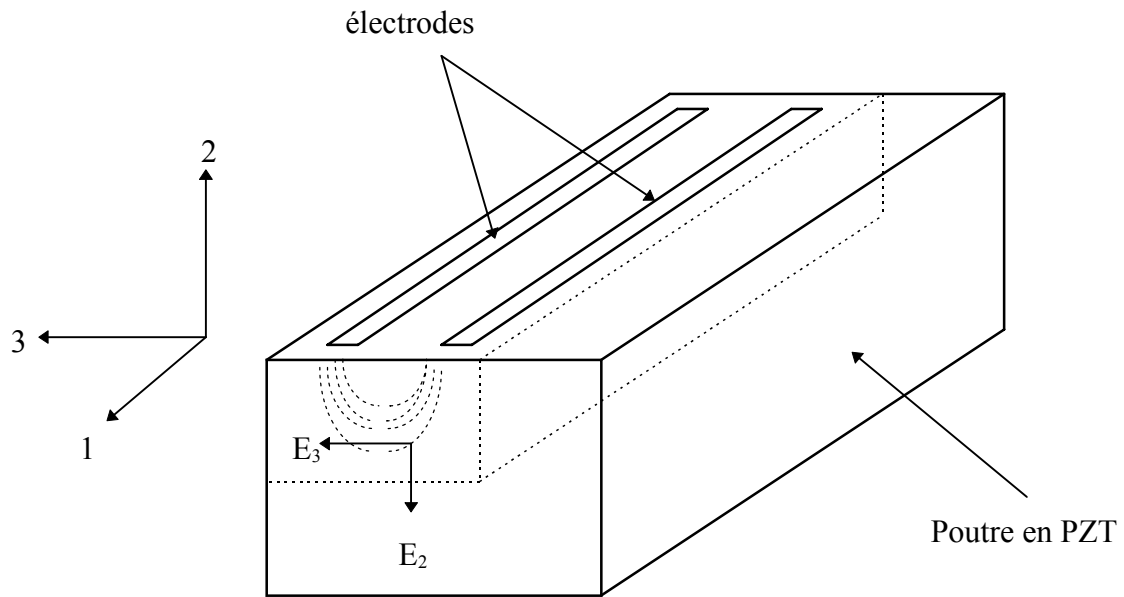


Fig. 3. 11 : Effet piézoélectrique local

L'application d'une différence de potentiel aux bornes des électrodes provoque l'apparition d'un champ électrique E dont les lignes de champ qui traversent la poutre en PZT sont représentées sur la figure 3.11. On se trouve ici dans le cas d'un champ non uniforme qui peut être décomposé en tout point en une composante E_3 selon la direction 3 parallèle à l'axe de polarisation du matériau et une composante E_2 parallèle à l'axe 2.

Si on considère un élément de volume suffisamment petit pour admettre que la variation du champ électrique est négligeable, les déformations suivant les trois axes sont données dans le cas d'un matériau de type PZT et à contrainte nulles par :

$$\begin{aligned} S_1 &= d_{31} E_3 \\ S_2 &= d_{31} E_3 \\ S_3 &= d_{33} E_3 \end{aligned} \quad (3.15)$$

On constate que la composante E_2 n'a pas d'influence.

Si on généralise ce raisonnement à la poutre, on constate que localement (dans le volume représenté en pointillé sur la figure 3.11) on obtient un effet transverse comparable au cas vu précédemment à la différence près que le champ électrique n'est pas uniforme.

L'application d'une différence de potentiel aux bornes des électrodes provoque alors la flexion de la poutre (voir figure 3.12).

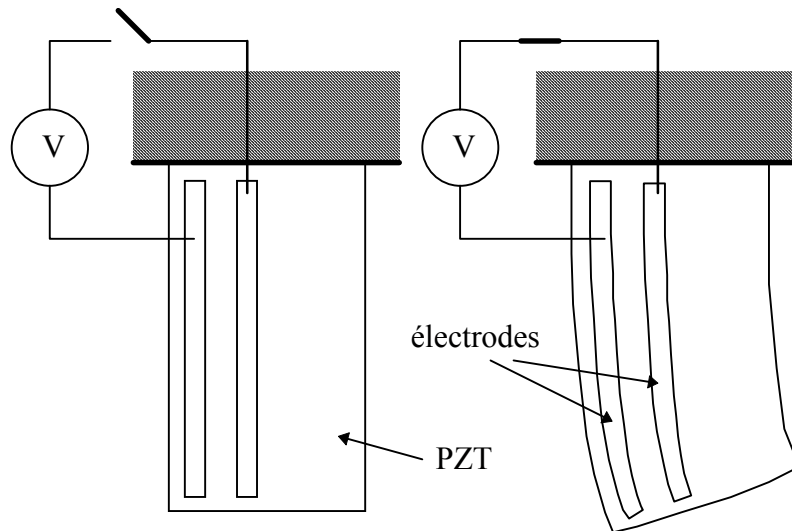


Fig. 3. 12 : Flexion d'une poutre à effet piézoélectrique local

En choisissant convenablement le nombre et la forme des électrodes, il est possible d'obtenir différentes déformations. Intéressons nous plus particulièrement aux électrodes en forme de S représentées à la figure 3.13.

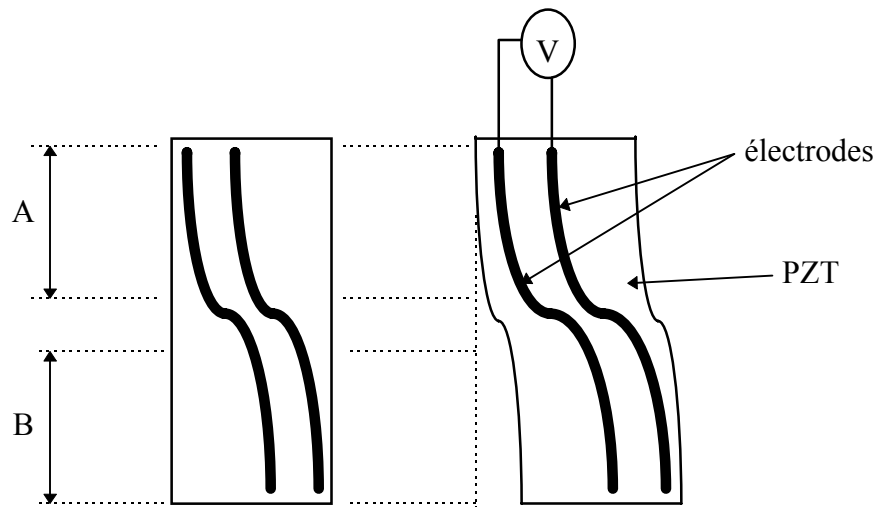


Fig. 3. 13 : Utilisation d'électrodes en forme de S

Dans cette configuration, l'effet produit dans chacune des deux parties A et B permet d'obtenir la déformation de la poutre en forme de S [58]. De plus, l'effet peut être accentué si la poutre est équipée sur sa face inférieure d'électrodes similaires.

Une modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS nous a permis de constater que la déformation obtenue est très faible (quelques nanomètres pour une poutre de 5 mm de long et de section carrée de 128 μm de coté). L'emploi direct de telles structures ne permet donc pas de réaliser avec suffisamment de course utile des tâches de préhension. C'est pourquoi nous avons étudié différentes configurations de pinces dans le but d'amplifier les

débattements obtenus. La figure 3.14 présente quelques prototypes que nous avons conçus. Dans la suite du paragraphe, on désignera par « module élémentaire » une poutre capable de se déformer en forme de S.

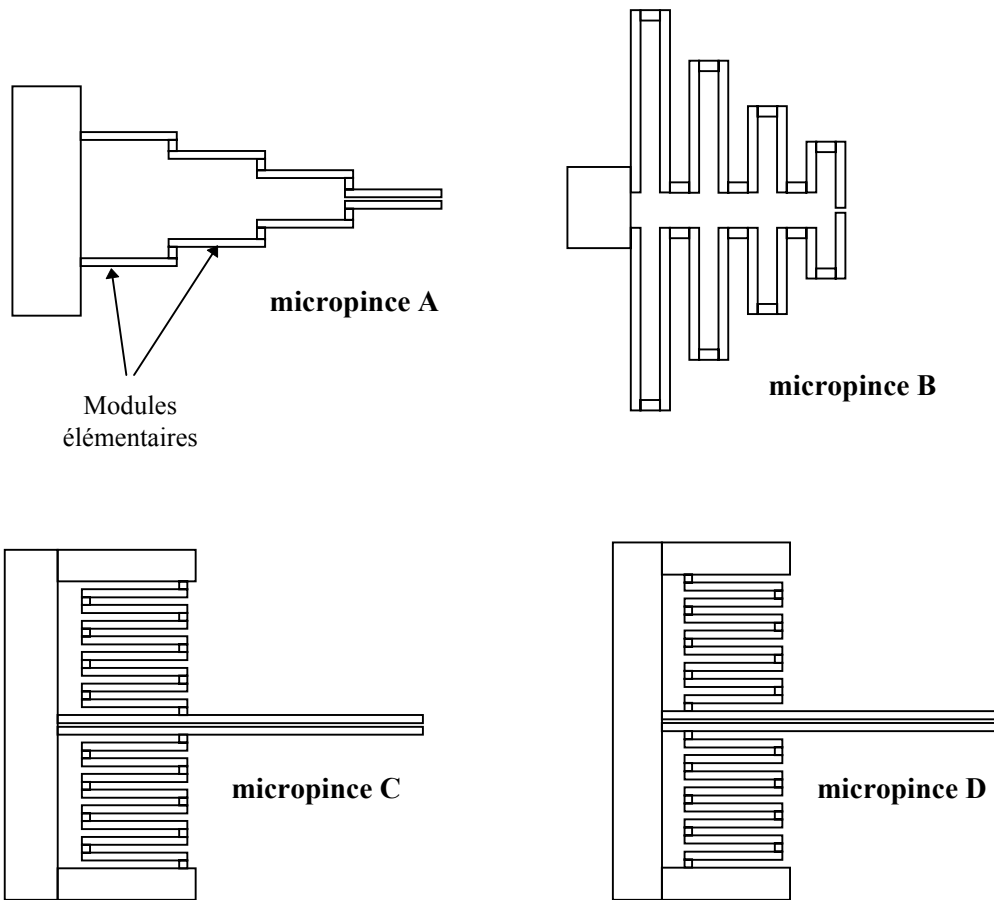


Fig. 3. 14 : Prototypes de micropinces

Une poutre qui se déforme en S permet, nous l'avons vu, de faciliter la préhension des micro-objets. Elle présente également la propriété suivante : les extrémités de plusieurs poutres placées en série restent toujours parallèles. Il en résulte le fait qu'il est possible d'obtenir des déplacements plus importants en multipliant le nombre de modules élémentaires. Cette propriété est mise à profit dans la micropince A. Chaque doigt est constitué de quatre modules élémentaires. La micropince B exploite 16 modules élémentaires de longueurs différentes. Les micropinces C et D utilisent des structures en accordéon constituées chacune de 8 modules élémentaires. Les déplacements produits par ces structures sont amplifiés mécaniquement à l'aide d'un bras de levier constitué par les doigts de la micropince encastrés à l'une des extrémités. Le prototype D est caractérisé par un facteur d'amplification supérieur à celui du modèle C. Des informations plus détaillées sont données en annexe.

6. Réalisation des prototypes

Afin d'obtenir des structures de petite taille, nous avons opté en premier lieu pour la fabrication des prototypes sur un substrat de PZT métallisé sur ses deux faces. Cette approche est facilitée par le fait que les prototypes décrits ne comportent pas d'électrodes sur les flancs. Une telle réalisation nécessite l'emploi de techniques d'usinage chimique en salle blanche. Ce travail a été initié en collaboration avec le Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs (LPMO, Besançon) et a nécessité l'utilisation de la salle blanche de l'Institut des Microtechniques de Franche-Comté (IMFC). Les étapes de fabrication sont décrites dans les paragraphes suivants.

6.1 Conception et génération des masques de gravure

La première étape consiste en la fabrication des masques de gravure. Les différentes structures sont dessinées à l'aide d'un outil de CAO approprié (dans notre cas, nous avons utilisé la chaîne CADENCE) puis positionnées sur un substrat virtuel. Les fichiers générés contiennent toutes les données nécessaires à un générateur de masque pour produire les versions finales des masques. Les figure 3.15 et 3.16 présentent des photographies des masques réalisés pour les structures et les électrodes.

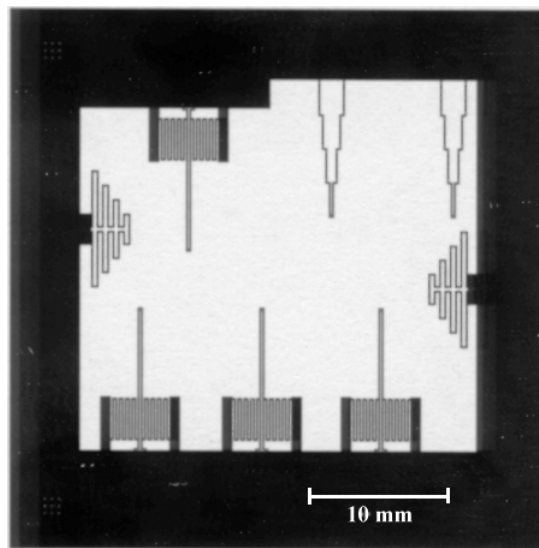


Fig. 3. 15 : Masque de gravure pour les structures en PZT

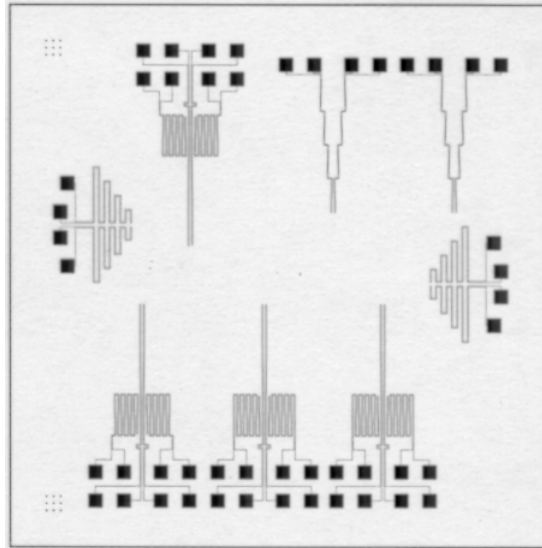


Fig. 3. 16 : Masque de gravure pour les électrodes

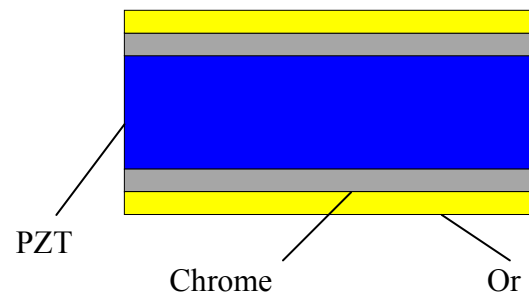
Le substrat utilisé est de forme carrée de 38 mm de côté. Il est constitué d'une couche de PZT de 128 μm d'épaisseur prise en sandwich entre deux couches d'or de 30 μm d'épaisseur. Une couche de chrome a été insérée entre le PZT et l'or pour assurer une bonne liaison.

6.2 Gravure du substrat en salle blanche

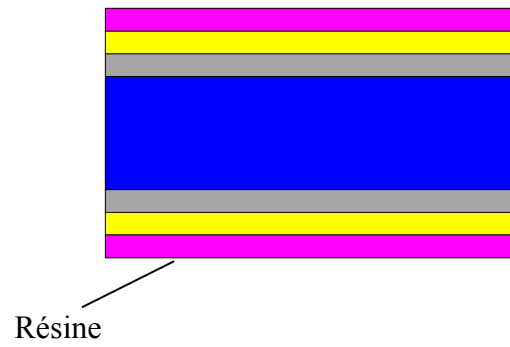
Une fois les masques réalisés, il convient de mettre au point un procédé de fabrication. Il s'agit d'une succession d'opérations (lithographies, attaques chimiques...) permettant d'obtenir les micropinces équipées des électrodes à partir d'un substrat brut.

La réalisation des structures s'effectue selon le procédé suivant :

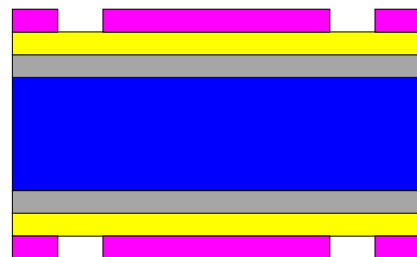
1. substrat à l'état initial



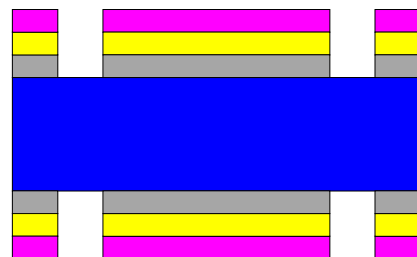
2. dépôt de résine sur les deux faces



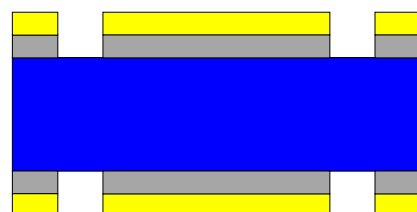
3. lithographie



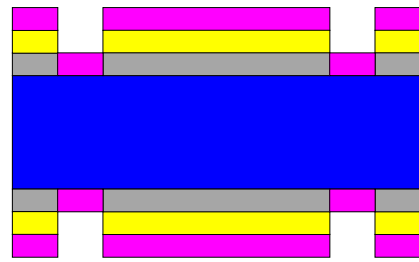
4. attaque de l'or puis du chrome



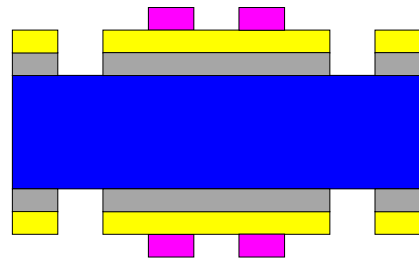
5. dissolution de la résine



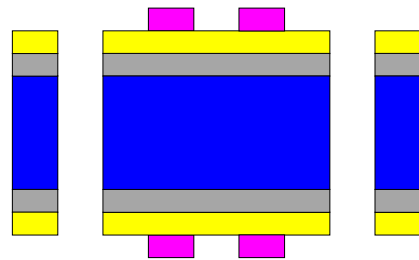
6. dépôt de résine sur les deux faces



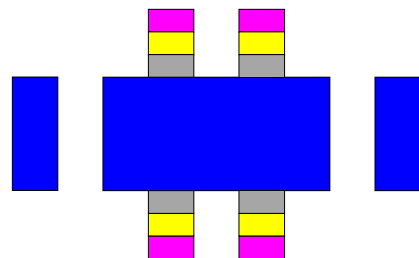
7. lithographie



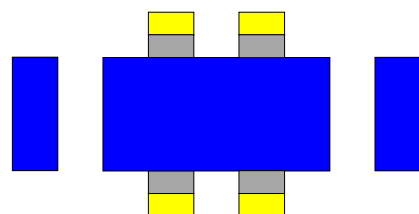
8. attaque du PZT



9. attaque de l'or puis du chrome



10. dissolution de la résine



6.3 Difficultés rencontrées lors de la fabrication

L'usinage chimique du matériau PZT représente actuellement, au plan international, un important défi. Non encore maîtrisé localement et compte tenu du départ de Besançon du protagoniste technologique de notre projet, il nous est apparu risqué de travailler seuls sur ce procédé, sans aucune garantie d'obtention d'échantillons exploitables. La réalisation des micropinces sur un substrat de quartz au lieu du PZT restait néanmoins possible localement. Elle présente cependant un inconvénient majeur : les coefficients piézoélectriques du quartz étant beaucoup plus faibles que ceux du PZT, les déplacements obtenus sont extrêmement faibles.

Ainsi, en dépit de leurs intérêts potentiels et de leur originalité il nous est apparu préférable de différer la réalisation de telles micropinces par usinage chimique et de concevoir d'autres micropinces en PZT permettant l'utilisation de procédés mieux maîtrisés dans notre laboratoire.

Ce nouveau type de micropinces, fondé sur le principe du bilame est décrit dans les paragraphes suivants.

7. Unimorphes et bimorphes piézoélectriques

Les unimorphes et les bimorphes piézoélectriques exploitent l'effet bilame pour provoquer un déplacement en flexion. Un bimorphe est constitué de deux couches en matériau piézoélectrique solidaires l'une de l'autre et équipées d'électrodes. Un unimorphe (ou bimorphe hétérogène) possède une seule couche piézoélectrique. Le seconde est constituée d'un matériau passif (métal, silicium...) (voir figure 3.17).

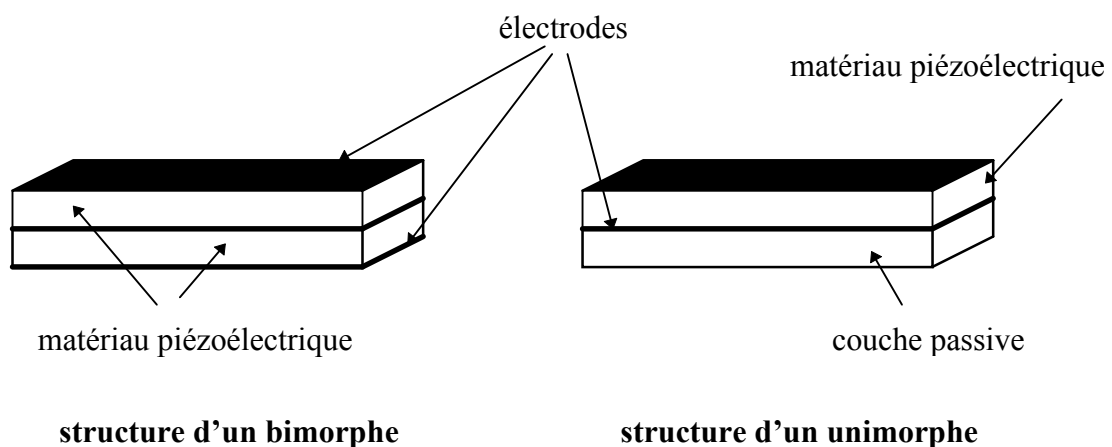


Fig. 3. 17 : Unimorphes et bimorphes piézoélectriques

Par un choix judicieux des sens de polarisation des matériaux piézoélectriques ainsi que des directions des champs électriques appliqués, il est possible de provoquer la flexion de ces structures (voir figure 3.18).

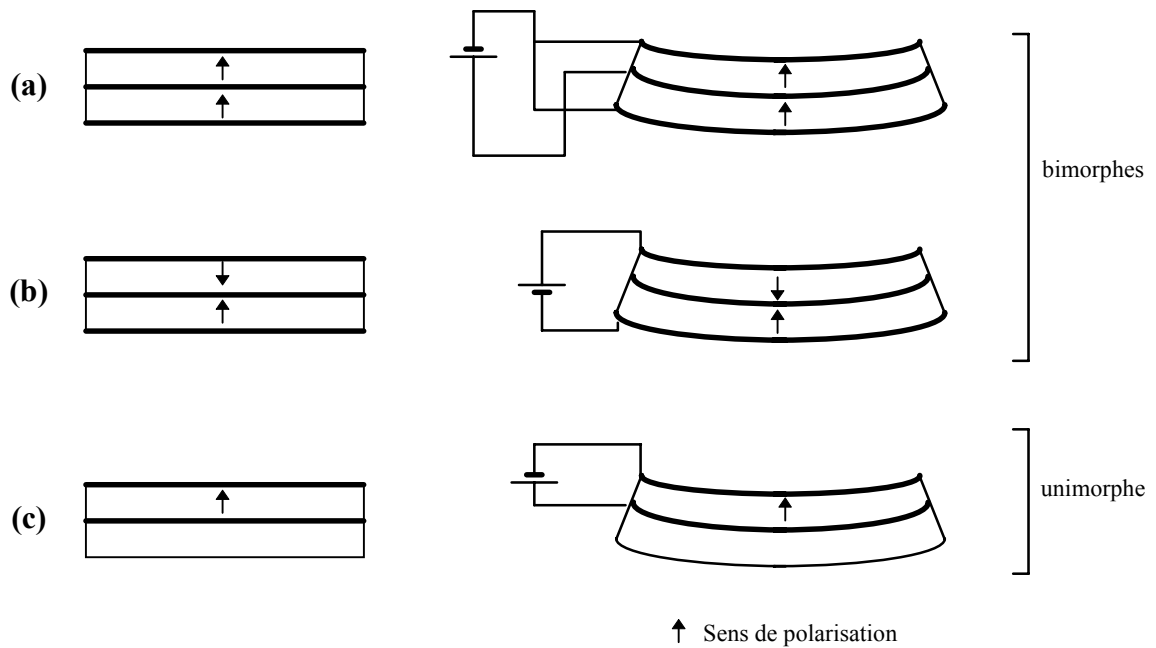


Fig. 3. 18 : Utilisation d'unimorphes et de bimorphes piézoélectriques

- Les deux couches du bimorphe 3.18-a sont polarisées dans le même sens. Pour induire une flexion, il est nécessaire d'inverser le sens du champ électrique créé dans chaque couche.
- Le bimorphe 3.18-b est actionné par un champ uniforme dans toute la structure.
- La figure 3.18-c montre le fonctionnement d'un unimorphe. La flexion obtenue dépend fortement de la souplesse de la couche passive.

Divers travaux ont été menés sur l'étude des bimorphes et des unimorphes [10][20][46][52][55][64]. Dans la suite, nous désignerons par « unimorphe » un actionneur piézoélectrique utilisant l'effet bilame et constitué d'une couche passive et d'une couche en matériau piézoélectrique.

8. Utilisation d'unimorphes piézoélectriques pour la réalisation d'une micropince

8.1 Caractéristiques des unimorphes piézoélectriques utilisés

Les unimorphes piézoélectriques qui ont été utilisés pour notre travail ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) et l'Institut des Microtechniques de Mayence (IMM), programme « Large Scale Facilities », contrat européen ERB-FMGE-CT98-0138. Ils sont constitués d'une couche de PZT de 250 μm d'épaisseur équipée d'électrodes métalliques (épaisseur inférieure à 1 μm) et d'une couche de laiton de 100 μm . Les deux couches sont collées à l'aide d'une colle epoxy conductrice. Le collage est réalisé en portant l'ensemble à une température de 80 °C pendant 45 minutes. Cette température est très inférieure à la température de Curie du PZT (de l'ordre de 180 °C). Les unimorphes sont ensuite découpés aux dimensions souhaitées à l'aide d'une

scie à wafer, ou, pour des formes géométriques plus complexes par un procédé d'usinage laser mis au point au laboratoire. Les dimensions des unimorphes utilisés sont données sur la figure 3.19.

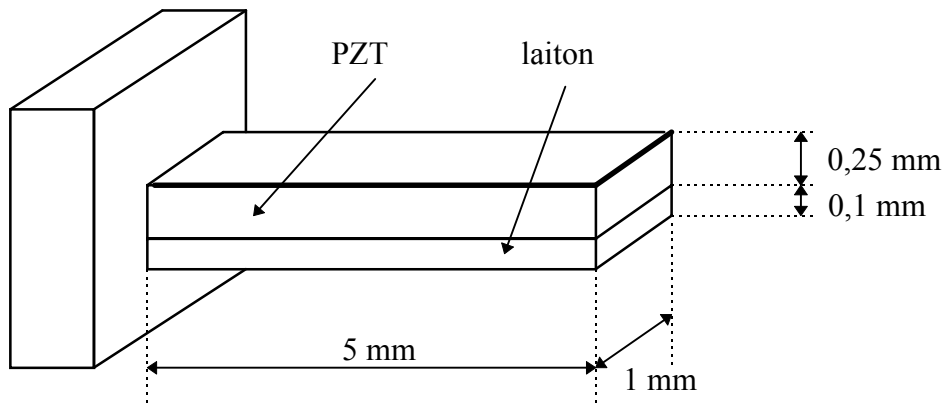


Fig. 3. 19 : Dimensions des unimorphes piézoélectriques utilisés

La figure 3.20 montre une photographie d'un unimorphe sur son support.

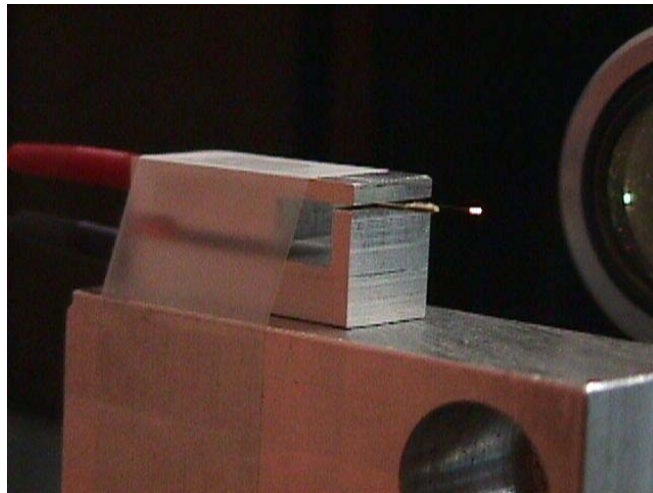


Fig. 3. 20 : Unimorphe piézoélectrique sur son support

8.2 Réalisation de la micropince

L'utilisation de poutres fléchissantes permet de réaliser des micropréhenseurs (voir chapitre 2). Nous avons opté pour la réalisation d'une micropince à deux doigts actionnée par des unimorphes piézoélectriques. Elle doit être de conception simple pour permettre un montage aisé et facilement reproductible. Elle doit en outre autoriser la manipulation d'objets de natures diverses dans une large gamme de dimensions. Des prototypes de micropinces actionnées par des éléments piézoélectriques et utilisant d'autres principes ont été réalisés dans plusieurs laboratoires [15][50][57].

La structure de la micropince réalisée est représentée sur la figure 3.21.

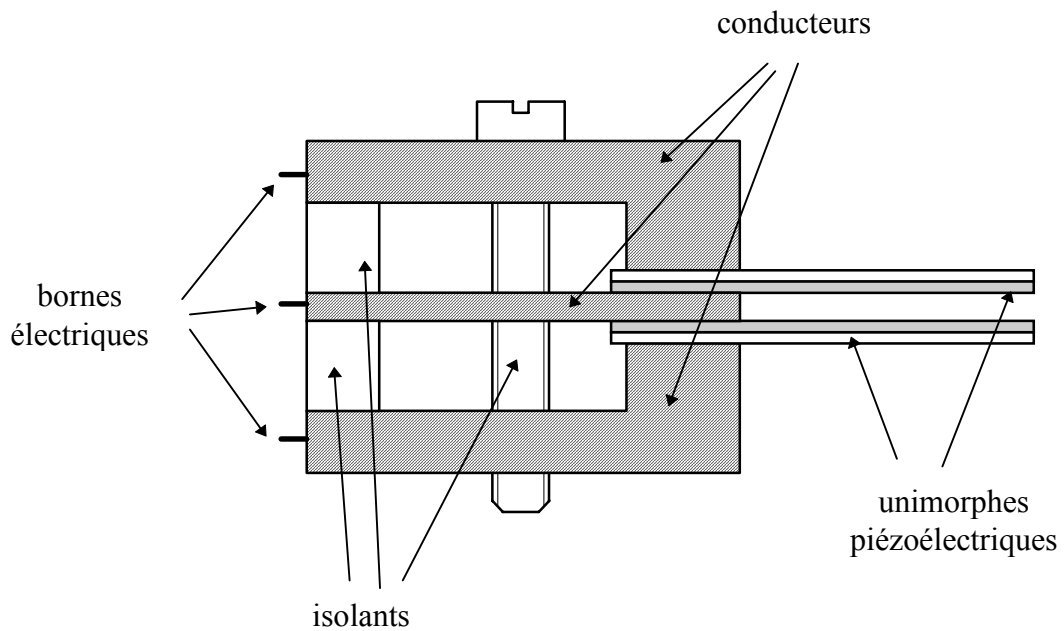


Fig. 3. 21 : Structure de la micropince à unimorphes piézoélectriques

Les deux unimorphes sont maintenus par trois éléments métalliques qui servent également pour l'alimentation électrique. L'épaisseur de la couche métallique insérée entre les deux unimorphes conditionne la plage de dimensions des objets à manipuler. L'utilisation de couches de diverses épaisseurs permet de manipuler des micro-objets dans une très large gamme de dimensions. De plus, divers organes terminaux peuvent être fixés à l'extrémité des unimorphes dans le but de manipuler des objets ayant des caractéristiques diverses. La micropince peut être ouverte ou fermée autour de sa position d'origine en appliquant des tensions positives ou négatives[34][19]. Chaque doigt est actionné individuellement, ce qui permet une grande dextérité lors de la réalisation de tâches délicates. La figure 3.22 montre une photographie de la pince réalisée.

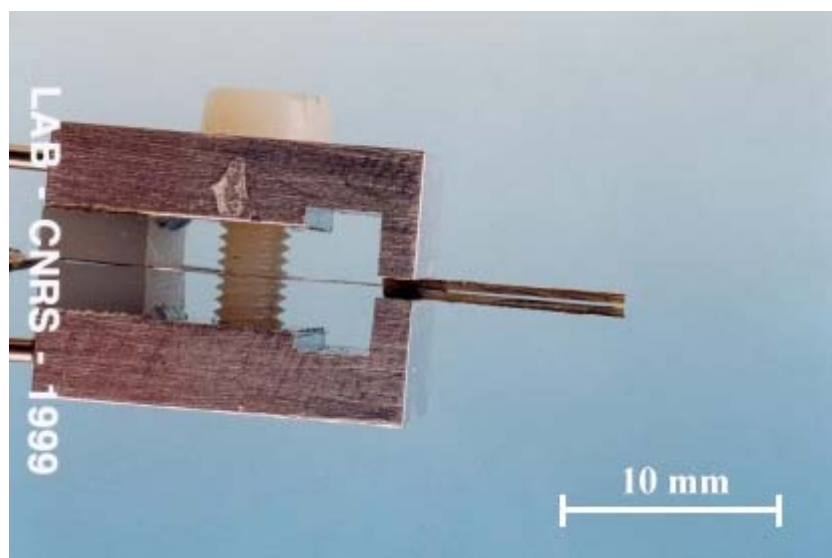


Fig. 3. 22 : Micropince à unimorphes piézoélectriques

L'utilisation de la micropince pour exécuter des tâches de micromanipulation délicates nécessite un modèle dynamique pour contrôler les déplacements et éviter d'endommager voire de détruire les micro-objets manipulés.

La micropince étant symétrique, nous nous limiterons à l'étude d'un seul unimorphe. Le modèle global de la micropince peut être obtenu en écrivant deux fois la même équation (une pour chaque doigt). Dans la suite, nous présentons un modèle statique établi par Smits et al. [51] puis nous proposons une modélisation dynamique fondée sur la théorie des poutres en vibration.

9. Modèle statique d'un unimorphe piézoélectrique

9.1 modèle statique

Considérons la poutre constituée d'un unimorphe piézoélectrique représentée à la figure 3.23 et dans laquelle la couche passive est en silicium.

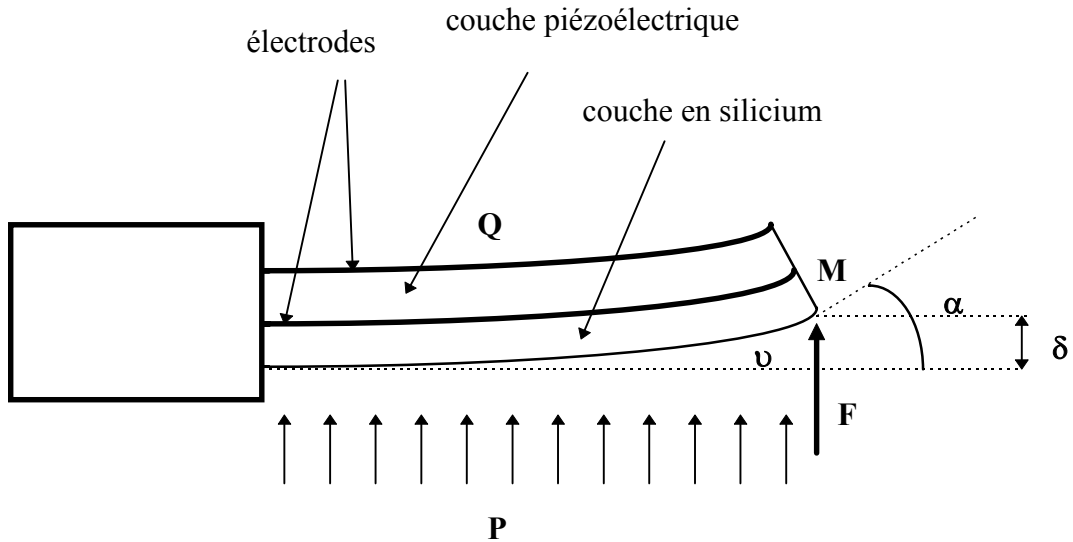


Fig. 3. 23 : Flexion d'un unimorphe piézoélectrique

Le modèle statique établi par Smits et Choi est exprimé par l'équation matricielle suivante [51] :

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \\ v \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ F \\ P \\ V \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Les paramètres sont les suivants :

- V est la tension électrique externe appliquée entre les électrodes,
- F et M sont respectivement la force et le moment externes appliqués à l'extrémité de l'unimorphe,
- P est la pression externe exercée le long de l'unimorphe,
- v est le volume déplacé,
- α est la pente de la poutre à l'extrémité,
- δ est la déflexion verticale à l'extrémité,
- Q est la quantité des charges électriques qui apparaissent sur les électrodes,
- les e_{ij} sont des coefficients constants calculés à partir des propriétés et des dimensions de l'unimorphe.

Les coefficients e_{ij} qui caractérisent l'unimorphe s'expriment comme suit :

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \\ v \\ Q \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \frac{12L}{Kw} & \frac{6L^2}{Kw} & \frac{2L^3}{K} & \frac{6d_{31}BL}{K} \\ \frac{6L^2}{Kw} & \frac{4L^3}{Kw} & \frac{3L^4}{K} & \frac{3d_{31}BL^2}{K} \\ \frac{Kw}{2L^3} & \frac{Kw}{3L^4} & \frac{2K}{3L^5w} & \frac{K}{d_{31}BL^3w} \\ \frac{K}{6d_{31}BL} & \frac{2K}{3d_{31}BL^2} & \frac{5K}{d_{31}BL^3w} & \frac{K}{Lw} \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2 h_{si} (s_{11}^{si} h_p^3 + s_{11}^p h_{si}^3)}{K} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ F \\ P \\ V \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

avec :

$$A = s_{11}^{si} s_{11}^p \left(s_{11}^p h_{si} + s_{11}^{si} h_p \right)$$

$$B = \frac{h_{si} (h_{si} + h_p)}{s_{11}^p h_{si} + s_{11}^{si} h_p} \quad (3.18)$$

$$K = (s_{11}^{si})^2 (h_p)^4 + 4s_{11}^{si} s_{11}^p h_{si} (h_p)^3 + 6s_{11}^{si} s_{11}^p (h_{si})^2 (h_p)^2 + 4s_{11}^{si} s_{11}^p h_p (h_{si})^3 + (s_{11}^p)^2 (h_{si})^4$$

Dans ces expressions :

- L et w désignent respectivement la longueur et la largeur de l'unimorphe,
- h_p et h_{si} représentent respectivement l'épaisseur de la couche piézoélectrique et celle de la couche en silicium,
- s_{11}^p et s_{11}^{si} sont la souplesse du matériau piézoélectrique et du silicium,

- ϵ_{33}^T et d_{31} désignent la permittivité du matériau piézoélectrique à contrainte nulle et sa constante piézoélectrique.

Les travaux présentés dans [51] ont porté sur des unimorphes utilisant comme couche passive du silicium. Les équations obtenues restent valables dans le cas de l'utilisation d'un matériau autre que le silicium. Il suffit alors de substituer aux coefficients h_{si} et s_{11}^{si} leurs équivalents pour le nouveau matériau.

Si l'on considère que la tension électrique V et la force F sont les seules excitations extérieures appliquées sur l'unimorphe, on peut extraire de la matrice précédente les expressions de la déflexion δ ainsi que de la charge Q :

$$\begin{aligned}\delta &= e_{22}F + e_{24}V \\ Q &= e_{42}F + e_{44}V\end{aligned}\quad (3.19)$$

9.2 Limitation du modèle statique

Le modèle décrit précédemment établit des relations parfaitement linéaires entre les différentes variables. Il ne prend pas en compte l'effet d'hystérésis qui apparaît dans les prototypes réels. La courbe représentée sur la figure 3.24 donne, à force nulle, la déflexion δ de l'extrémité d'un de nos prototypes d'unimorphe pour différentes valeurs de la tension d'excitation V . La poutre utilisée pour ces mesures est de type PZT/laiton. Ses dimensions sont : $L=4\text{mm}$, $w=1\text{mm}$, $h_p=250\mu\text{m}$ et $h_{\text{laiton}}=100\mu\text{m}$.

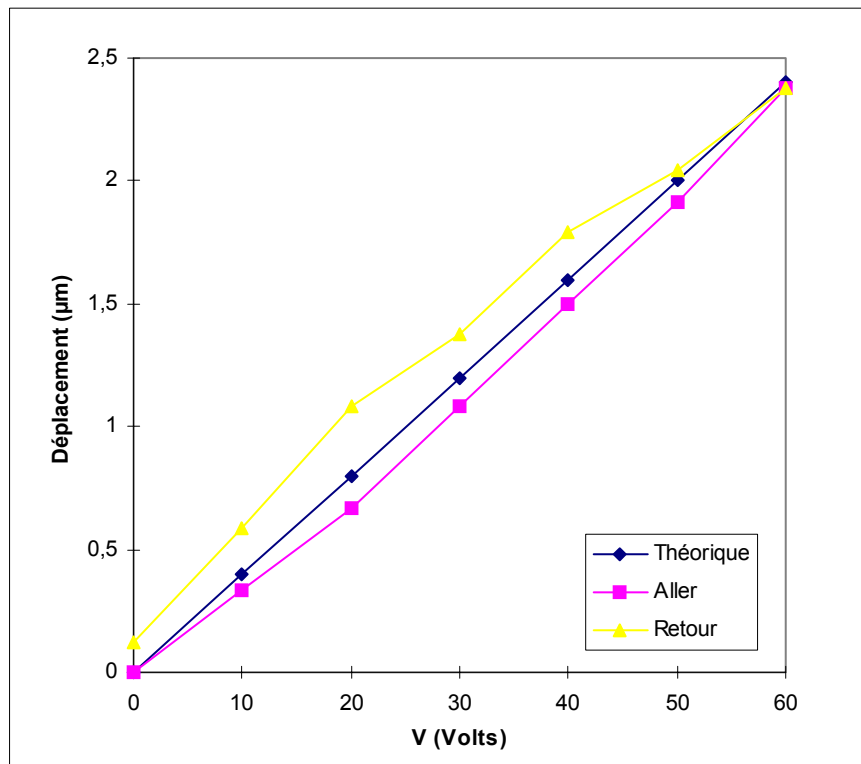


Fig. 3. 24 : Comportement hystérétique d'un unimorphe PZT/laiton

Cette courbe fait apparaître un net effet d'hystérésis. Cependant, nous le verrons par la suite, le modèle précédent constitue dans notre cas une approximation tout à fait satisfaisante pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques.

10. Modèle dynamique d'un unimorphe piézoélectrique

10.1 Equation différentielle régissant les vibrations latérales d'une poutre de section constante

De manière à établir un modèle analytique rendant compte du comportement dynamique des doigts de notre micropince, nous allons dans un premier temps considérer une simple poutre droite encastree-libre vibrant latéralement dans le plan xy (voir figure 3.25).

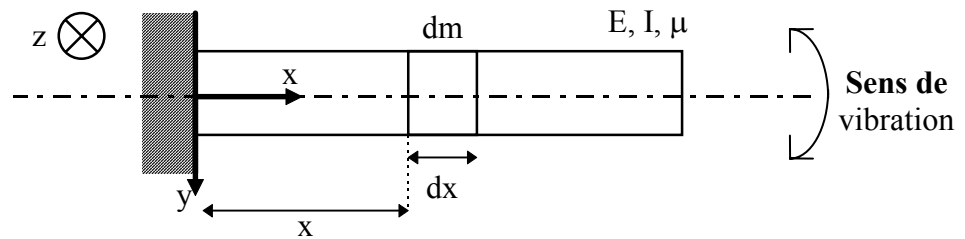


Fig. 3. 25 : Vibration latérale d'une poutre droite

Isolons à présent un élément infinitésimal de la poutre de longueur dx . Celui-ci est alors représenté par la figure 3.26.

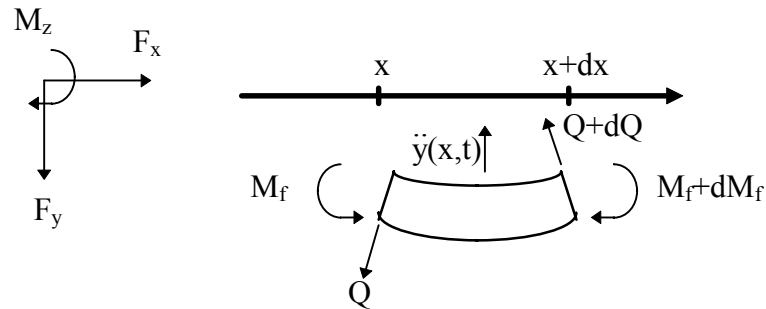


Fig. 3. 26 : Élément infinitésimal de poutre soumis aux différents efforts

L'inertie en rotation des sections de la poutre est supposée négligeable. Ainsi, seul le déplacement vertical (suivant l'axe y) est considéré. L'équation de Newton pour l'élément infinitésimal de poutre de longueur dx et de masse dm s'écrit alors [29]:

$$\sum F_y = dm\ddot{y} = -(Q + dQ) + Q = -dQ = -\frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (3.20)$$

Si l'inertie en rotation de la tranche élémentaire est négligée, l'équilibre des moments par rapport au centre de la section x est exprimé par l'équation :

$$\sum M_z = M_f + dM_f - M_f + (Q + dQ)dx = 0 \quad (3.21)$$

d'où :

$$\frac{\partial M_f}{\partial x} dx + Qdx + \frac{\partial Q}{\partial x} dx^2 = 0 \quad (3.22)$$

Après élimination du terme de second ordre et simplification par dx , la relation entre l'effort tranchant et le moment de flexion est obtenue :

$$Q = -\frac{\partial M_f}{\partial x} \quad (3.23)$$

En notant μ la masse linéique, l'équation de Newton de l'élément de poutre devient alors :

$$\mu dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{\partial Q}{\partial x} dx = \frac{\partial^2 M_f}{\partial x^2} dx \quad (3.24)$$

d'où :

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 M_f}{\partial x^2} \quad (3.25)$$

Par ailleurs, si l'effet de l'effort tranchant sur la déformée est supposé négligeable, la théorie de la résistance des matériaux donne l'équation différentielle suivante :

$$-\frac{M_f}{EI} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \quad (3.26)$$

Dans cette expression, E désigne le module d'Young, I le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe transversal horizontal de la section de poutre et c un facteur d'amortissement.

Après dérivation, cette équation s'écrit :

$$\frac{\partial^2 M_f}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\left(1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \quad (3.27)$$

d'où, l'équation différentielle régissant les vibrations latérales d'une poutre de section constante :

$$\mu_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\left(1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \quad (3.28)$$

10.2 Résolution de l'équation différentielle dans le cas de l'application d'une force extérieure F

Dans le cas où la poutre est soumise à une force F (voir figure 3.27), l'équation précédente s'écrit :

$$\rho A \ddot{\delta} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \left(1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \right] = F \quad (3.29)$$

avec :

- ρ : masse volumique,
- A : Section de la poutre.

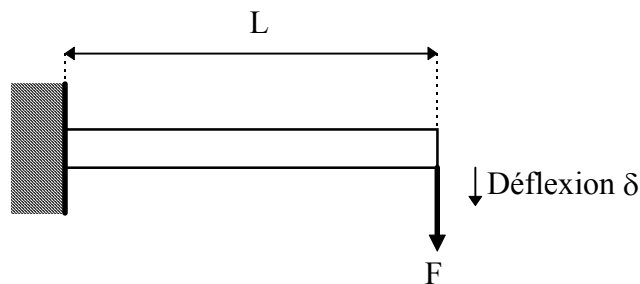


Fig. 3. 27 : Poutre en flexion soumise à une force F

Le comportement dynamique d'un tel système est donc régi par une équation aux dérivées partielles qui est du deuxième ordre par rapport au temps mais du quatrième ordre relativement aux variables géométriques. Cette équation peut être résolue par séparation de variables. On recherche alors des solutions qui sont le produit d'une fonction de la variable géométrique x et d'une fonction du temps :

$$\delta(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j(x) q_j(t) \quad (3.30)$$

Si on émet l'hypothèse que les modes d'ordre supérieur ou égal à 2 ont un effet négligeable devant le premier mode, on peut alors se limiter à une solution de type :

$$\delta(x, t) = \Phi_1(x) q_1(t) \quad (3.31)$$

Par substitution dans l'équation précédente on obtient :

$$\rho A \ddot{\delta} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \left(1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \Phi_1''(x) q_1(t) \right] = F \quad (3.32)$$

d'où :

$$\rho A \ddot{\delta} + EI \Phi_1^{iv}(x) q_1(t) + cEI \Phi_1^{iv}(x) \dot{q}_1(t) = F \quad (3.33)$$

que l'on peut encore écrire sous la forme :

$$\rho A \ddot{\delta}(x, t) + cEI \frac{\Phi_1^{iv}(x)}{\Phi_1(x)} \dot{\delta}(x, t) + EI \frac{\Phi_1^{iv}(x)}{\Phi_1(x)} \delta(x, t) = F(t) \quad (3.34)$$

On s'intéresse maintenant uniquement au déplacement de l'extrémité de la poutre ($x=L$). On pose $\delta_L(t) = \delta(L, t)$ et $\rho A = m$. m représente la masse linéique de la poutre. D'où :

$$m \ddot{\delta}_L(t) + cEI \frac{\Phi_1^{iv}(L)}{\Phi_1(L)} \dot{\delta}_L(t) + EI \frac{\Phi_1^{iv}(L)}{\Phi_1(L)} \delta_L(t) = F(t) \quad (3.35)$$

En régime permanent nous pouvons donc écrire :

$$EI \frac{\Phi_1^{iv}(L)}{\Phi_1(L)} \delta_L = F \quad (3.36)$$

Si la poutre est un unimorphe piézoélectrique, le modèle statique fournit, dans le cas où la force F est la seule excitation :

$$\delta_L = e_{22} F \quad (3.37)$$

Par comparaison avec la relation précédente, nous pouvons alors écrire :

$$EI \frac{\Phi_1^{iv}(L)}{\Phi_1(L)} = \frac{1}{e_{22}} \quad (3.38)$$

D'après ce qui précède, si l'on néglige les vibrations harmoniques, le déplacement de l'extrémité d'un unimorphe piézoélectrique soumis à une force extérieure F peut être exprimé par l'équation différentielle suivante :

$$m\ddot{\delta}_L(t) + \frac{c}{e_{22}} \dot{\delta}_L(t) + \frac{1}{e_{22}} \delta_L(t) = F(t) \quad (3.39)$$

ou encore par la fonction de transfert :

$$G(p) = \frac{\delta_L(p)}{F(p)} = \frac{e_{22}}{e_{22}mp^2 + cp + 1} \quad (3.40)$$

10.3 Prise en compte de l'effet piézoélectrique inverse

Dans le modèle précédent, nous avons émis l'hypothèse que la force F exercée à l'extrémité de la poutre était la seule excitation extérieure. L'utilisation conjointe de l'effet piézoélectrique dans les doigts de la micropince nécessite la prise en compte du transfert $V \rightarrow \delta_L$, c'est-à-dire la possibilité d'actionner chaque doigt par application de tensions électriques.

L'unimorphe peut être considéré comme un système à deux entrées et à une sortie tel que représenté sur la figure 3.28.

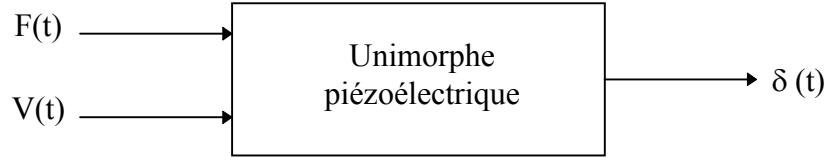


Fig. 3. 28 : représentation externe d'un unimorphe piézoélectrique

Le modèle statique permet d'exprimer la déflexion δ en fonction de la tension électrique V et de la force F .

$$\delta_L = e_{22}F + e_{24}V \quad (3.41)$$

que l'on peut également écrire sous la forme :

$$\delta_L = e_{22} \left(F + \frac{e_{24}}{e_{22}} V \right) \quad (3.42)$$

Ainsi, la grandeur $(e_{24}/e_{22})V$ apparaît du point de vue statique comme une force supplémentaire exercée à l'extrémité de l'unimorphe. On écrit alors :

$$\delta_L(p) = \frac{e_{22}}{e_{22}mp^2 + cp + 1} \left(F(p) + \frac{e_{24}}{e_{22}} V(p) \right) \quad (3.43)$$

d'où :

$$\delta_L(p) = \frac{e_{22}}{e_{22}mp^2 + cp + 1} F(p) + \frac{e_{24}}{e_{22}mp^2 + cp + 1} V(p) \quad (3.44)$$

11. Validation du modèle

11.1 Banc de mesure pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques

Dans le but de vérifier la validité du modèle et d'étudier son utilisation pour l'élaboration ultérieure de lois de commande, nous avons mis au point le banc de mesure représenté sur la figure 3.29 et utilisant nos prototypes d'unimorphes.

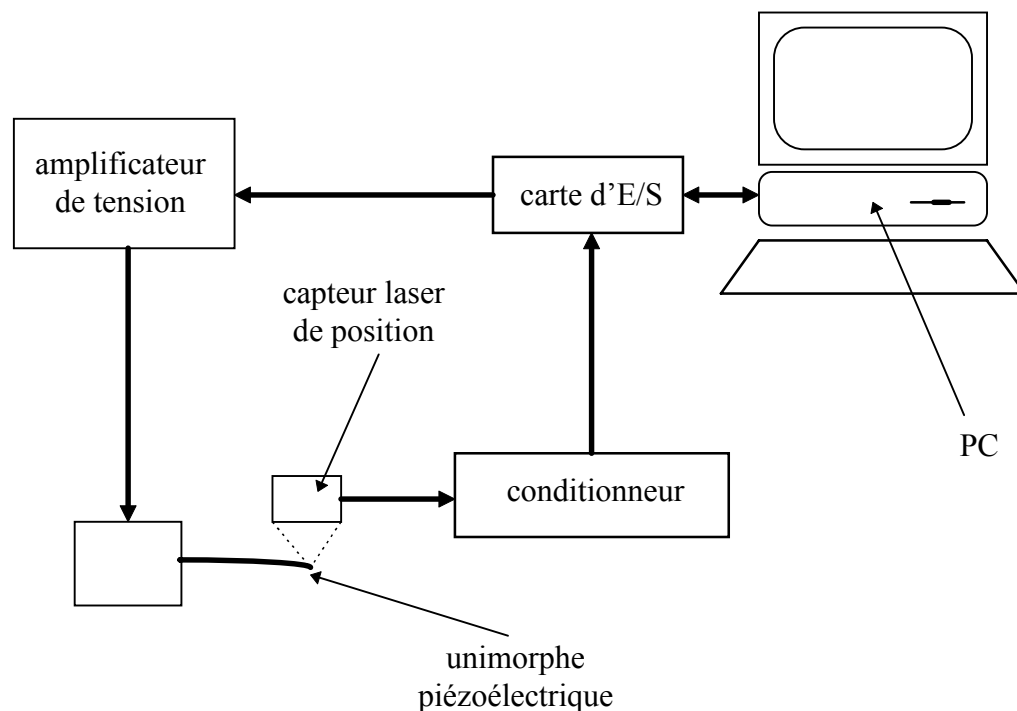


Fig. 3. 29 : Schéma du banc de mesure pour l'étude du comportement des unimorphes piézoélectriques

La mesure du déplacement δ à l'extrémité de l'unimorphe est effectuée à l'aide d'un capteur laser de position dont la résolution est de 10 nm. Ce capteur est capable de mesurer les déplacements de la poutre par rapport à une position initiale. Un conditionneur fournit une tension électrique proportionnelle au déplacement mesuré. Cette tension est numérisée puis transmise à un ordinateur (de type PC) à l'aide d'une carte d'E/S. Le ordinateur permet l'envoi de tensions électriques par l'intermédiaire de la même carte d'E/S. Les tensions délivrées par cette dernière étant limitées à la plage -10V à +10V, un amplificateur de tension de gain $G = 7,5$ permet d'obtenir des tensions mieux adaptées au fonctionnement des éléments piézoélectriques. Le contrôle de l'ensemble est réalisé au moyen de divers logiciels que nous avons conçu (en utilisant l'environnement de développement Borland C++ Builder de Inprise et le logiciel MATLAB de Scientific Software).

Dans ces essais, les unimorphes utilisés sont constitués d'une couche de PZT et d'une couche de laiton dont les dimensions sont les suivantes : $L=4,5\text{mm}$, $w=1\text{mm}$, $h_p=250\mu\text{m}$ et $h_{\text{laiton}}=100\mu\text{m}$.

11.2 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de tension

La figure 3.30 présente la déflexion de l'unimorphe en réponse à l'application d'un échelon de tension de 100 volts à force nulle.

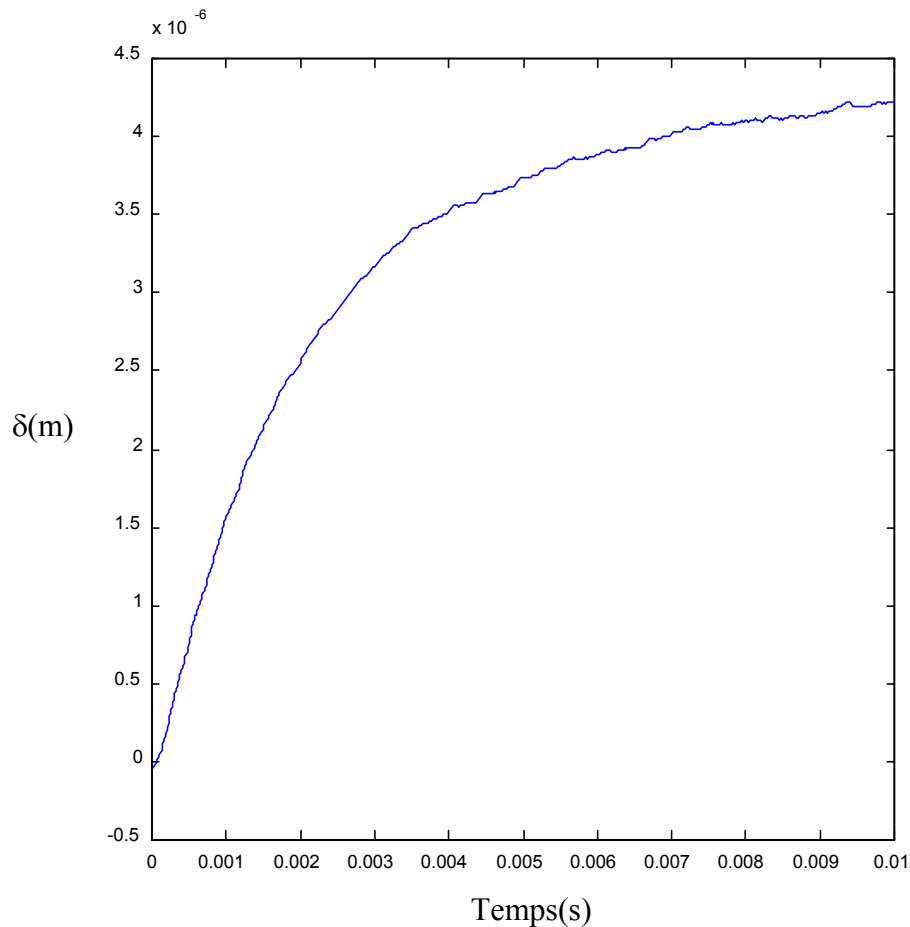


Fig. 3. 30 : Déflexion de l'unimorphe en réponse à l'application d'un échelon de tension de 100 Volts

La réponse est comparable à celle d'un système du premier ordre en ne considérant que la constante de temps dominante. C'est en réalité un second ordre amorti. La constante de temps est d'environ 2,1ms. Le gain statique vaut :

$$e_{24} = \frac{4,2 \cdot 10^{-6}}{100} = 4,2 \cdot 10^{-8} \text{ m/V} \quad (3.45)$$

11.3 Réponse fréquentielle de l'unimorphe

La figure 3.31 représente la réponse fréquentielle expérimentale de l'unimorphe pour le transfert $V \rightarrow \delta$.

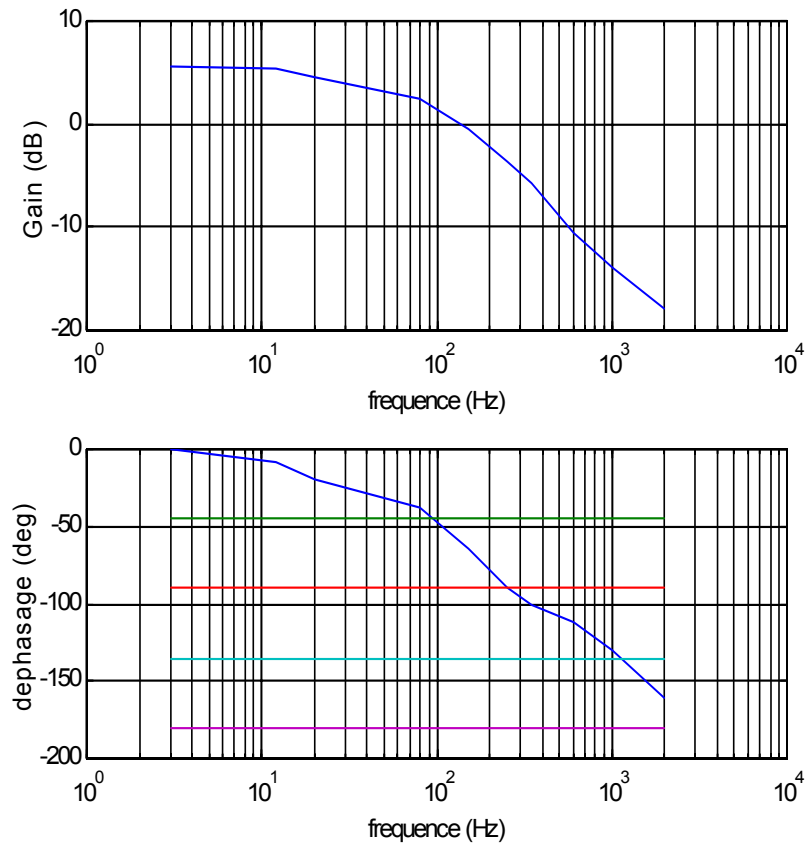


Fig. 3. 31 : Réponse fréquentielle de l'unimorphe

La réponse fréquentielle montre qu'on peut se limiter au premier mode.

11.4 Limite de validité du modèle

Lors de l'établissement du modèle de l'unimorphe piézoélectrique, nous avons émis l'hypothèse que l'effet des modes d'ordre supérieur ou égal à deux était négligeable. Les résultats expérimentaux ont montré que cette hypothèse est justifiée pour les unimorphes utilisés caractérisés par de faibles déplacements. A priori, il est possible d'envisager l'utilisation de ce modèle pour des unimorphes ayant des dimensions plus petites.

11.5 Identification du modèle de l'unimorphe

A partir des acquisitions effectuées à l'aide du banc de mesure, une identification paramétrique simple à l'aide d'un modèle de type ARX calculé sous MATLAB a fourni la fonction de transfert suivante :

$$\delta(p) = \frac{4,2e^{-8}}{1 + 2,15e^{-3}p + 2,05e^{-7}p^2} V(p) \quad (3.46)$$

Les constantes de temps du système valent :

$$T_1 = 2,05\text{ms}$$

$$T_2 = 0,1\text{ms}$$

La figure 3.32 représente la réponse indicielle expérimentale comparée à la réponse du modèle pour une même excitation.

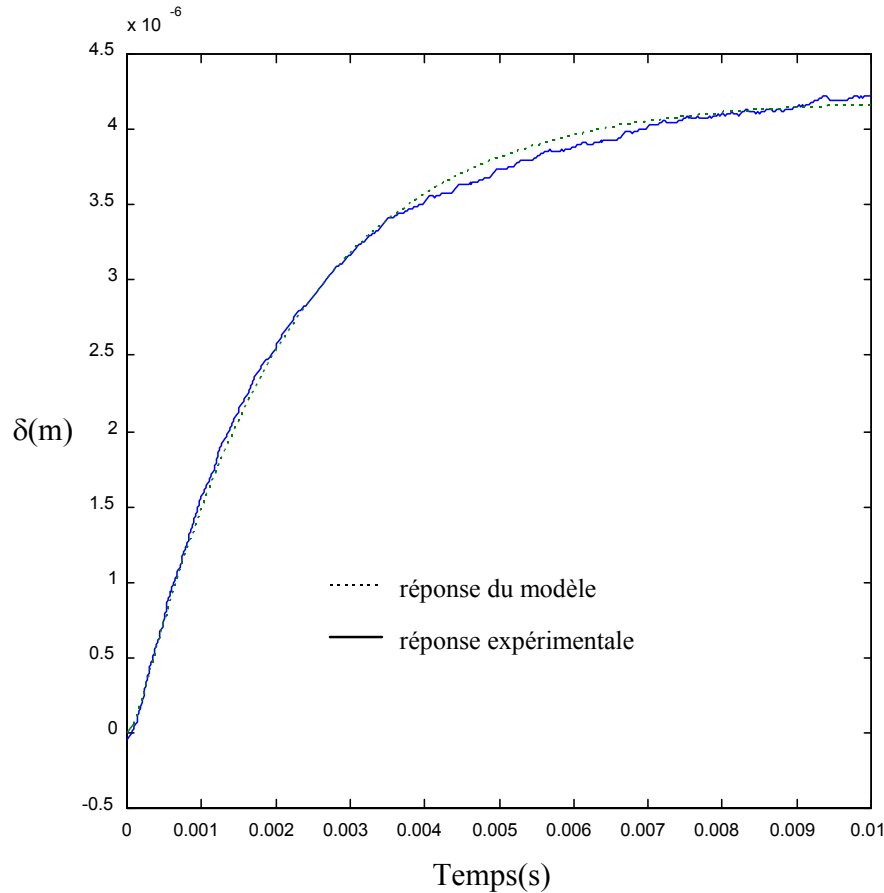


Fig. 3. 32 : Déflexion expérimentale/déflexion du modèle en réponse à l'application d'un échelon de tension de 100 Volts

Il apparaît donc que le modèle représente de manière fidèle le comportement effectif de l'unimorphe.

11.6 Application d'échelons de force

Lors de l'étude du transfert $F \rightarrow \delta$, nous avons été confrontés au problème de l'application d'échelons de force. Acquérir simultanément la consigne de force et la déflexion de la poutre nécessite d'une part la connaissance de l'instant précis de l'application de l'échelon et, d'autre part l'assurance que la réponse enregistrée n'est pas altérée par des phénomènes de rebond ou des imperfections relatives à la forme de l'échelon. Pour cela nous avons utilisé un système utilisant un vérin pneumatique (voir figure 3.33).

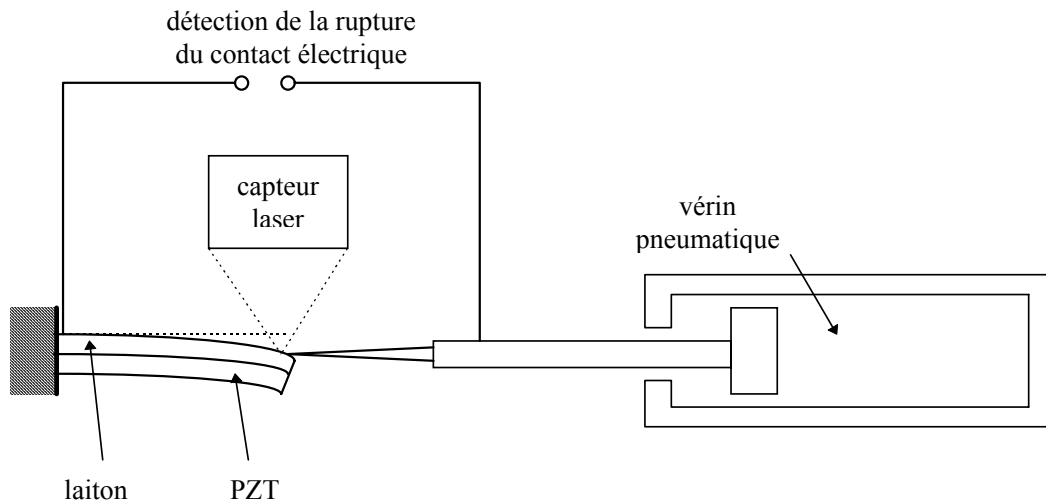


Fig. 3. 33 : Schéma du banc de caractérisation du transfert $F \rightarrow \delta$

Par ailleurs, à l'aide de petits poids calibrés suspendus à l'extrémité de l'unimorphe, nous avons déterminé le gain statique :

$$e_{22} = 5,55.10^{-4} \text{ m / N}$$

Une force constante d'amplitude connue grâce à la mesure de la déflexion δ est appliquée à l'aide du vérin. A l'instant $t=0$, le vérin est actionné, libérant ainsi l'unimorphe. La réponse est enregistrée à l'aide du capteur laser de position. L'instant de l'arrêt de l'application de la force est détecté au moyen de la rupture du contact électrique (voir figure 3.33).

11.7 Réponse d'un unimorphe piézoélectrique à un échelon de force

La figure 3.34 présente une comparaison entre la déflexion de la poutre en réponse à un échelon de force et celle en réaction à un échelon de tension électrique. Pour faciliter cette comparaison, ces deux réponses sont portées à une même échelle.

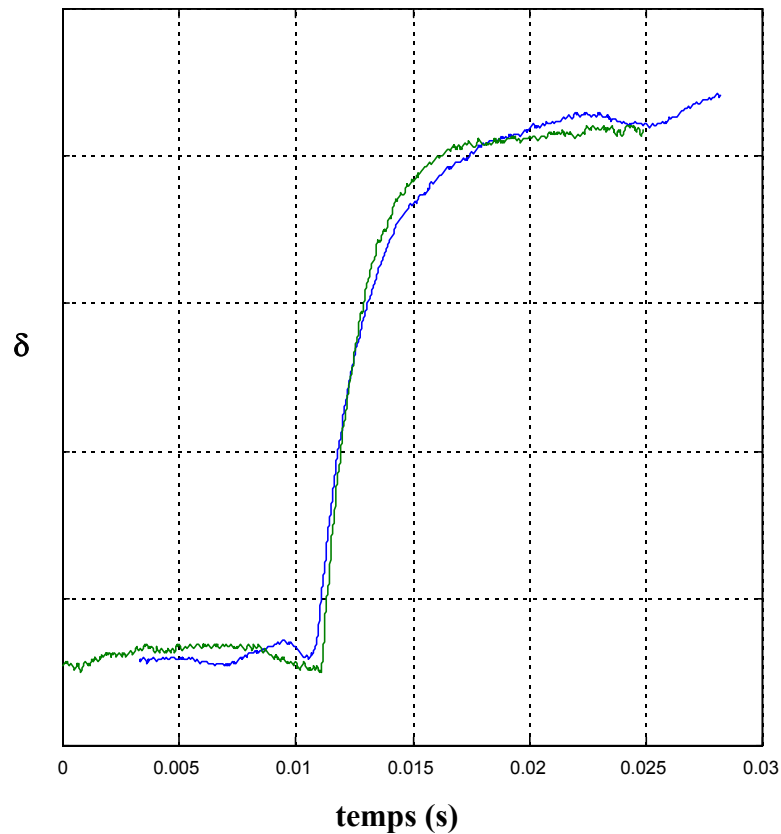


Fig. 3. 34 : Comparaison des réponses indicielles à un échelon de force et à un échelon de tension

On constate qu'au gain statique près, les réponses sont très voisines.

11.8 Comparaison avec le calcul théorique

Rappelons, en le mettant sous la forme canonique des fonctions de transfert du second ordre, le comportement dynamique théorique que nous avons obtenu pour un unimorphe :

$$\delta_L(p) = \frac{K_1 F(p) + K_2 V(p)}{\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} p + 1} \quad (3.47)$$

dans laquelle ω_n désigne la pulsation naturelle et ξ l'amortissement. Les expressions de K_1 , K_2 , ω_n et ξ sont :

$$\begin{aligned}
K_1 &= e_{22} \\
K_2 &= e_{24} \\
\omega_n &= \frac{1}{\sqrt{me_{22}}} \\
\xi &= \frac{c}{2\sqrt{me_{22}}}
\end{aligned}$$

La déflexion de l'extrémité de la poutre mesurée à l'aide d'un capteur laser de position en réponse à un échelon de force a montré clairement que la réponse est apériodique. Les pôles de la fonction de transfert sont donc réels et :

$$\xi > 1 \quad (3.48)$$

d'où :

$$c > 2\sqrt{me_{22}} \quad (3.49)$$

Les constantes de temps du système sont alors données par :

$$\begin{aligned}
T_1 &= \frac{1}{\xi\omega_n} \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}} \\
T_2 &= \frac{1}{\xi\omega_n} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}}
\end{aligned} \quad (3.50)$$

Par ailleurs, la masse volumique équivalente ρ est donnée par :

$$\rho = \frac{h_p \rho_p + h_{\text{laiton}} \rho_{\text{laiton}}}{h_p + h_{\text{laiton}}} \quad (3.51)$$

avec les valeurs numériques suivantes :

- $\rho_p = 7800 \text{ Kg/m}^3$ (masse volumique du PZT),
- $\rho_{\text{laiton}} = 8450 \text{ Kg/m}^3$ (masse volumique du laiton),

- $s_{11}^p = 15.10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ (souplesse du PZT),
- $s_{11}^{\text{laiton}} = 1.10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ (souplesse du laiton).

A partir des expressions de e_{22} et e_{24} exprimées par les relations :

$$\begin{aligned} e_{22} &= \frac{4AL^3}{K_w} \\ e_{24} &= \frac{3d_{31}ABL^2}{K} \end{aligned} \quad (3.52)$$

on calcule leurs valeurs théoriques :

$$\begin{aligned} e_{22} &= 1,45.10^{-4} \text{ m} / \text{N} \\ e_{24} &= 4,0.10^{-8} \text{ m} / \text{V} \end{aligned}$$

Par ailleurs, en considérant un coefficient d'amortissement c tel que :

$$c = 2 \times (2\sqrt{me_{22}}) \quad (3.53)$$

on peut calculer numériquement les valeurs des constantes de temps :

$$\begin{aligned} T_1 &= 2,38 \text{ ms} \\ T_2 &= 0,17 \text{ ms} \end{aligned}$$

Ces résultats correspondent donc bien aux valeurs identifiées à partir d'essais indiciels.

12. Forme finale de la fonction de transfert

Après avoir identifié les différents paramètres et validé expérimentalement notre modélisation dynamique, les unimorphes piézoélectriques utilisés peuvent donc raisonnablement être représentés par le modèle suivant en considérant que V et F agissent en sens opposés :

$$\delta(p) = \frac{5,55e^{-4}}{1 + 2,15e^{-3}p + 2,05e^{-7}p^2} F(p) - \frac{4,2e^{-8}}{1 + 2,15e^{-3}p + 2,05e^{-7}p^2} V(p) \quad (3.54)$$

Ce modèle est très proche de celui établi analytiquement.

13. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté deux types de micropinces que nous avons conçus. Ils sont tous deux actionnés par effet piézoélectrique. Le premier type exploite le concept d'électrodes en « S » et est destiné à être réalisé sur un substrat en PZT en utilisant des techniques d'usinage en salle blanche. Un procédé de fabrication a été mis au point à cet effet. Les prototypes n'ont pu être finalisés en raison de difficultés technologiques liées à l'usinage du PZT. Le second type utilise des unimorphes piézoélectriques. Les unimorphes permettent d'obtenir des déplacements relativement importants. Ils présentent des caractéristiques très intéressantes pour une utilisation en microrobotique. La nature apériodique de la réponse indicielle permet l'utilisation de la micropince conçue en boucle ouverte pour réaliser des tâches de micromanipulation par un opérateur humain si ce dernier possède un retour visuel de l'environnement de travail. Un modèle dynamique de l'unimorphe piézoélectrique a été établi. Diverses expérimentations ont été réalisées pour vérifier sa validité. Le modèle décrit de manière suffisamment précise le comportement des unimorphes piézoélectriques et peut être utilisé pour l'élaboration de lois de commande. Il est également possible d'employer des bimorphes piézoélectriques pour actionner la micropince. Nous avons utilisé des unimorphes pour des raisons de disponibilité.

Chapitre 4
Commande en position de la micropince
et mesure de forces d'interaction

Table des matières

1. Introduction.....	117
2. Commande en position d'un unimorphe piézoélectrique	117
2.1 Régulateur PID	117
2.2 Régulateur à retour d'état avec intégrateur.....	119
2.2.1 Représentation d'état du système	119
2.2.2 Mise en place de la régulation d'état avec intégrateur	120
2.2.3 Observateur d'ordre réduit pour l'estimation de la vitesse de déplacement de l'extrémité de l'unimorphe.....	122
2.2.4 Implémentation du régulateur.....	124
3. Mesure de forces.....	125
3.1 Utilisation d'un unimorphe piézoélectrique en capteur de force.....	125
3.2 Manipulation à effort contrôlé	127
3.3 Utilisation d'organes terminaux divers.....	129
3.4 Observateur de force.....	131
3.5 Implémentation de l'observateur de force	133
3.5.1 Variation de force à tension électrique nulle	133
3.5.2 Variation de tension électrique à force nulle	134
3.5.3 Variation de tension électrique à force constante	136
3.5.4 Conclusion	138
4. Conclusion du chapitre	138

Table des illustrations

Fig. 4. 1 : Commande en boucle fermée de la position d'un unimorphe piézoélectrique en utilisant un régulateur PID	118
Fig. 4. 2 : Comportement du système asservi par un régulateur PID.....	118
Fig. 4. 3 : Régulateur à retour d'état avec intégrateur.....	120
Fig. 4. 4 : Structure de l'observateur réduit pour l'estimation de la vitesse	124
Fig. 4. 5 : Régulateur complet.....	124
Fig. 4. 6 : Comportement du système asservi par retour d'état.....	125
Fig. 4. 7 : Utilisation d'un unimorphe en capteur de force	126
Fig. 4. 8 : Structure d'un amplificateur de charge.....	126
Fig. 4. 9 : Mesure de forces à l'aide d'un unimorphe piézoélectrique.....	127
Fig. 4. 10 : Manipulation d'une microsphère par une micropince	128
Fig. 4. 11 : Contact à force nulle entre la micropince et la microsphère	128
Fig. 4. 12 : Saisie de la microsphère	129
Fig. 4. 13 : Organes terminaux pour la manipulation de micro-roues dentées	130
Fig. 4. 14 : Utilisation d'organes terminaux adaptés	130
Fig. 4. 15 : Unimorphe piézoélectrique soumis à une perturbation F	131
Fig. 4. 16 : Structure de l'observateur réduit pour l'estimation de la force et de la vitesse...	132
Fig. 4. 17 : Variation de force à tension électrique nulle	133
Fig. 4. 18 : Estimation de la force appliquée ($V=0$).....	134
Fig. 4. 19 : Variations de tension électrique ($F=0$)	135
Fig. 4. 20 : Déflexion de l'unimorphe ($F=0$).....	135
Fig. 4. 21 : Force estimée ($F=0$).....	136
Fig. 4. 22 : Variations de tension électrique ($F=12\text{ mN}$)	137
Fig. 4. 23 : Force estimée ($F=12\text{ mN}$).....	137

1. Introduction

La réalisation de tâches dans le micromonde requiert des outils capables d'atteindre de hautes résolutions. Si, dans le domaine macroscopique, manipuler des objets de tailles métrique et centimétrique nécessite des résolutions millimétriques voire micrométriques, la manipulation de micro-objets ne peut se faire qu'avec des résolutions nanométriques. Saisir des micro-objets pose de nombreux problèmes. Outre les forces d'adhésion décrites dans le chapitre 1, certaines difficultés pratiques liées à la faible taille des objets altèrent le bon déroulement des manipulations :

- Les micro-objets réagissent par à-coups à une sollicitation mécanique.
- Les surfaces des micro-objets supposées planes dans la quasi totalité des modèles ne le sont que très rarement.
- Les moyens de visualisation utilisés en microrobotique (microscopes optiques, microscopes à champ proche...) ont un champ de vision très limité. Les micro-objets sont faciles à perdre et difficiles à retrouver.
- Les micro-objets sont fragiles. Ils se brisent ou subissent des déformations importantes sous l'effet d'efforts trop importants.

Il est donc dans la plupart des cas extrêmement important de pouvoir contrôler précisément non seulement la position du préhenseur, mais également les forces exercées sur les objets manipulés.

Dans ce chapitre, nous abordons les questions liées à la commande des unimorphes piézoélectriques. La première partie sera consacrée au contrôle de la position de l'extrémité de l'unimorphe. Dans la seconde, nous apportons des solutions au problème de la mesure des efforts appliqués sur les objets manipulés.

2. Commande en position d'un unimorphe piézoélectrique

Dans le but d'étudier les performances des unimorphes en boucle fermée, nous avons mis en œuvre deux régulateurs. Le premier, un régulateur de type PID, permet une estimation rapide des résolutions atteintes. Le second est fondé sur l'utilisation du modèle dynamique établi pour réaliser un retour d'état.

2.1 Régulateur PID

Les premiers essais réalisés ont porté sur l'utilisation d'un régulateur PID pour asservir la position de l'extrémité de l'unimorphe piézoélectrique. L'emploi de ce type de régulateurs constitue un moyen simple qui a permis dans un premier temps de tester les performances de l'unimorphe en boucle fermée. Cette solution présente également souvent l'avantage d'être peu coûteuse. Cet argument est extrêmement important dans le cas où les unimorphes sont utilisés pour fabriquer un manipulateur destiné à remplir des tâches en milieu industriel.

La figure 4.1 présente le montage utilisé. La régulation est réalisée à l'aide d'un PID numérique. Le capteur permettant de mesurer la déflexion de l'unimorphe est un capteur laser présentant une résolution de 10 nm.

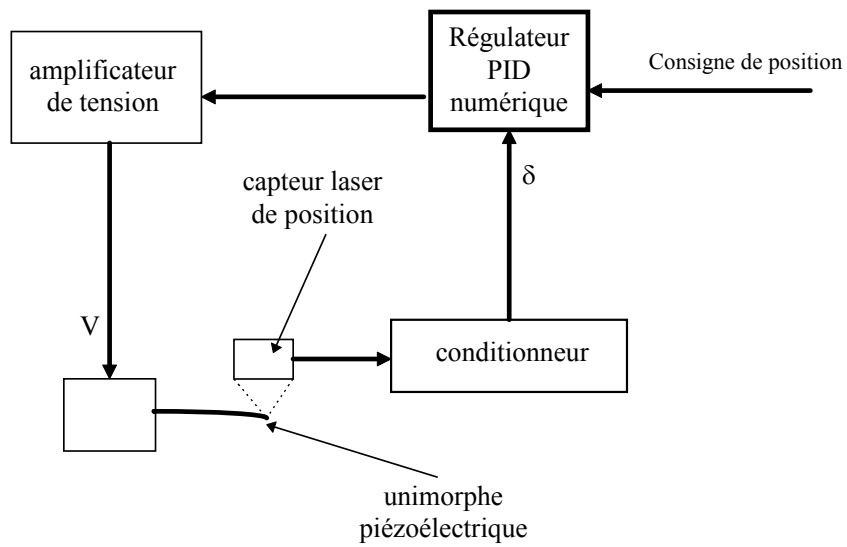


Fig. 4. 1 : Commande en boucle fermée de la position d'un unimorphe piézoélectrique en utilisant un régulateur PID

La réponse du système à une consigne constituée d'un signal rectangulaire est représentée sur la figure 4.2.

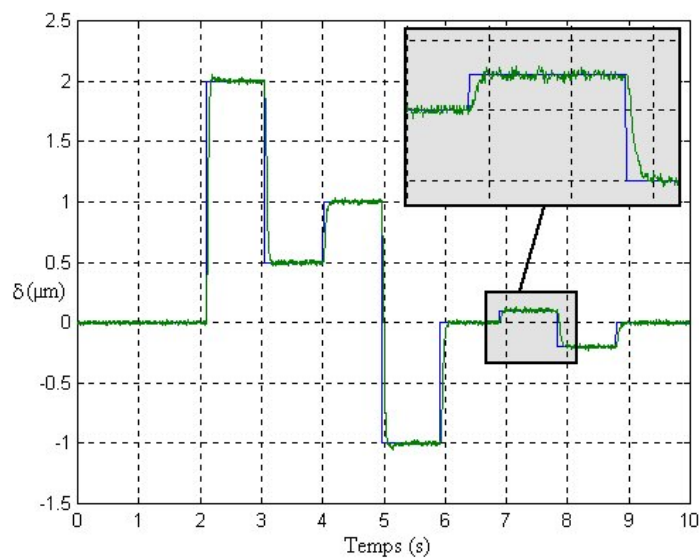


Fig. 4. 2 : Comportement du système asservi par un régulateur PID

La résolution de positionnement atteinte est de 10 nm. Notons qu'il s'agit de la limite du capteur de position utilisé. Cette résolution pourrait donc être plus finement estimée en utilisant un capteur encore plus précis.

2.2 Régulateur à retour d'état avec intégrateur

2.2.1 Représentation d'état du système

Dans le cas où la force F appliquée à l'extrémité de l'unimorphe par l'environnement est nulle, le transfert $V \rightarrow \delta$ établi au paragraphe 11.3 du chapitre 3 est donné par :

$$\delta(p) = \frac{k}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} V(p) \quad (4.1)$$

L'équation différentielle régissant le fonctionnement du système est donc, à conditions initiales nulles :

$$T_1 T_2 \ddot{\delta}(t) + (T_1 + T_2) \dot{\delta}(t) + \delta(t) = kv(t) \quad (4.2)$$

Ecrivons le modèle du système sous la forme d'une représentation d'état. On prendra comme vecteur d'état :

$$X = \begin{pmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{pmatrix}$$

Les composantes δ et $\dot{\delta}$ du vecteur d'état représentent respectivement la position (déflexion) et la vitesse de déplacement de l'extrémité de l'unimorphe piézoélectrique.

En considérant une représentation d'état linéaire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU \end{aligned} \quad (4.3)$$

nous pouvons l'écrire dans le cas du système considéré ici :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k}{T_1 T_2} \end{pmatrix} v \\ Y &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

La commande étant destinée à être réalisée sur calculateur numérique, il est nécessaire d'écrire un modèle discret du système sous la forme :

Commentaire IL11 :

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= PX_k + QU_k \\ Y_k &= CX_k + DU_k \end{aligned} \quad (4.5)$$

Les matrices P et Q sont calculées de manière classique à l'aide des expressions suivantes :

$$\begin{aligned} P &= e^{AT} \\ Q &= \int_0^T e^{A(T-\tau)} d\tau B \end{aligned} \quad (4.6)$$

T représente la période d'échantillonnage.

Afin de ne pas alourdir les équations, nous utiliserons les notations suivantes pour les éléments des matrices P et Q :

$$\begin{aligned} P &= \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} \\ Q &= \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2.2.2 Mise en place de la régulation d'état avec intégrateur

L'asservissement en position est confié au régulateur représenté sur la figure 4.3.

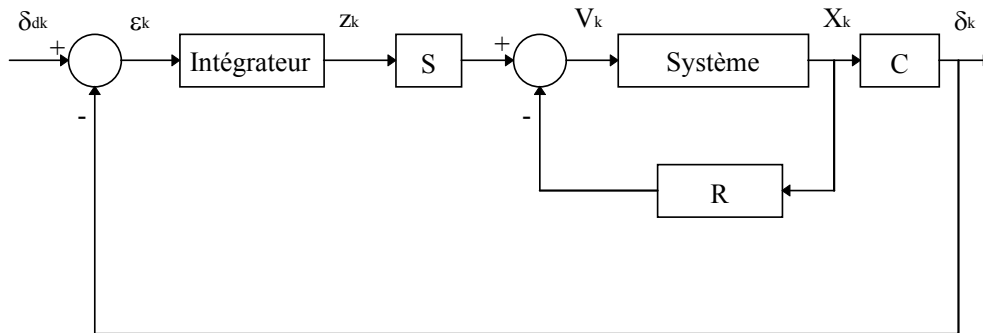


Fig. 4.3 : Régulateur à retour d'état avec intégrateur

Cette configuration permet d'une part d'annuler l'erreur statique grâce à l'intégrateur et d'autre part de déterminer la dynamique du système grâce à un placement convenable des pôles.

Le nouveau système obtenu a pour entrée la consigne de position δ_{dk} . Etablissons un modèle d'état pour ce nouveau système.

A partir des équations :

$$X_{k+1} = PX_k + QU_k \quad (4.7)$$

et

$$V_k = Sz_k - RX_k \quad (4.8)$$

sachant que $U_k = V_k$, nous pouvons écrire que

$$X_{k+1} = (P - QR)X_k + QSz_k \quad (4.9)$$

S et R sont des vecteurs respectivement à une et deux composantes, que nous notons :

$$S = (s)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 \end{pmatrix}$$

L'intégrateur, qui a pour entrée l'erreur ε_k , est représenté par la relation suivante :

$$z_{k+1} = z_k + T\varepsilon_k = z_k + T(\delta_{dk} - \delta_k) \quad (4.10)$$

La représentation du système global nécessite d'augmenter le vecteur d'état X_k de la variable z_k . Le nouveau vecteur d'état devient donc :

$$\hat{X}_k = \begin{pmatrix} \delta_k \\ \dot{\delta}_k \\ z_k \end{pmatrix}$$

et le système a pour équation :

$$\hat{X}_{k+1} = \begin{pmatrix} \dot{\delta}_k \\ \ddot{\delta}_k \\ \dot{z}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P - QR & QS \\ [-T & 0] & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ \dot{\delta}_k \\ z_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} \delta_{dk} \quad (4.11)$$

$$\hat{Y}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ \dot{\delta}_k \\ z_k \end{pmatrix}$$

En développant les expressions des matrices P, Q, R et S, nous obtenons :

$$\hat{X}_{k+1} = \begin{pmatrix} \dot{\delta}_k \\ \ddot{\delta}_k \\ \dot{z}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} - r_1 q_1 & p_{12} - r_2 q_1 & s q_1 \\ p_{21} - r_1 q_2 & p_{22} - r_2 q_2 & s q_2 \\ -T & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ \dot{\delta}_k \\ z_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} \delta_{dk} \quad (4.12)$$

$$\hat{Y}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ \dot{\delta}_k \\ z_k \end{pmatrix}$$

La stabilité et la dynamique du système sont maintenant définies par l'équation caractéristique de la nouvelle matrice :

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} p_{11} - r_1 q_1 & p_{12} - r_2 q_1 & s q_1 \\ p_{21} - r_1 q_2 & p_{22} - r_2 q_2 & s q_2 \\ -T & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Nous avons choisi ici un comportement en boucle fermée apériodique et sans dépassement, avec le choix d'un pôle triple :

$$p_1 = p_2 = p_3 = -\frac{a}{T_1}$$

qui correspond à des valeurs propres de la matrice $\hat{P}$:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = e^{-\frac{aT}{T_1}}$$

Avec T_1 la constante de temps dominante du système en boucle ouverte. La constante a est choisie supérieure à 1, de manière à obtenir une réponse plus rapide en boucle fermée.

La mise en place du retour d'état nécessite la connaissance des composantes δ_k et $\dot{\delta}_k$ du vecteur d'état. Dans notre cas, seule la position δ_k est accessible. Elle est mesurée à l'aide d'un capteur laser de position. Il est alors nécessaire de reconstruire la variable vitesse $\dot{\delta}_k$. On utilisera pour cela un observateur d'ordre réduit permettant d'estimer la seule variable $\dot{\delta}_k$ afin d'alléger la charge de calcul du processeur.

2.2.3 Observateur d'ordre réduit pour l'estimation de la vitesse de déplacement de l'extrémité de l'unimorphe

L'équation :

$$X_{k+1} = P X_k + Q U_k \quad (4.14)$$

permet d'écrire :

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{k+1} &= p_{21}\delta_k + p_{22}\dot{\delta}_k + q_2v_k \\ \delta_{k+1} &= p_{11}\delta_k + p_{12}\dot{\delta}_k + q_1v_k\end{aligned}\quad (4.15)$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{k+1} &= p_{22}\dot{\delta}_k + p_{21}\delta_k + q_2v_k \\ \delta_{k+1} - p_{11}\delta_k - q_1v_k &= p_{12}\dot{\delta}_k\end{aligned}\quad (4.16)$$

En posant :

$$\begin{aligned}P_1 &= p_{22} \\ Q_1 &= 1 \\ C_1 &= p_{12} \\ U_{1k} &= p_{21}\delta_k + q_2v_k \\ Y_{1k} &= \delta_{k+1} - p_{11}\delta_k - q_1v_k\end{aligned}$$

les équations précédentes peuvent être réécrites comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{k+1} &= P_1\dot{\delta}_k + Q_1U_{1k} \\ Y_{1k} &= C_1\dot{\delta}_k\end{aligned}\quad (4.17)$$

Le restructeur d'état a pour équation :

$$\begin{aligned}\hat{\delta}_{k+1} &= P_1\hat{\delta}_k + Q_1U_{1k} + G(Y_{1k} - \hat{Y}_{1k}) \\ \hat{Y}_{1k} &= C_1\hat{\delta}_k\end{aligned}\quad (4.18)$$

En remplaçant les variables P_1 , Q_1 et C_1 par leurs expressions respectives nous pouvons écrire :

$$\hat{\delta}_{k+1} - G\delta_{k+1} = (p_{22} - Gp_{12})\dot{\delta}_k + (p_{21} - Gp_{11})\delta_k + (q_2 - Gq_1)v_k\quad (4.19)$$

En posant :

$$z_{k+1} = \hat{\delta}_{k+1} - G\delta_{k+1}\quad (4.20)$$

l'observateur réduit correspond alors à la relation :

$$\begin{aligned}z_{k+1} &= (p_{22} - Gp_{12})z_k + \begin{pmatrix} (p_{22} - Gp_{12})G + p_{21} - Gp_{11} \\ q_2 - Gq_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ v_k \end{pmatrix} \\ \hat{\delta}_k &= z_k + \begin{pmatrix} G & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_k \\ v_k \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (4.21)$$

La structure de l'observateur est représentée sur la figure 4.4.

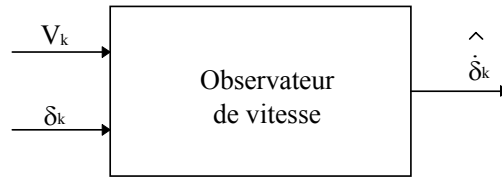


Fig. 4. 4 : Structure de l'observateur réduit pour l'estimation de la vitesse

Finalement, le système global est représenté sur la figure 4.5.

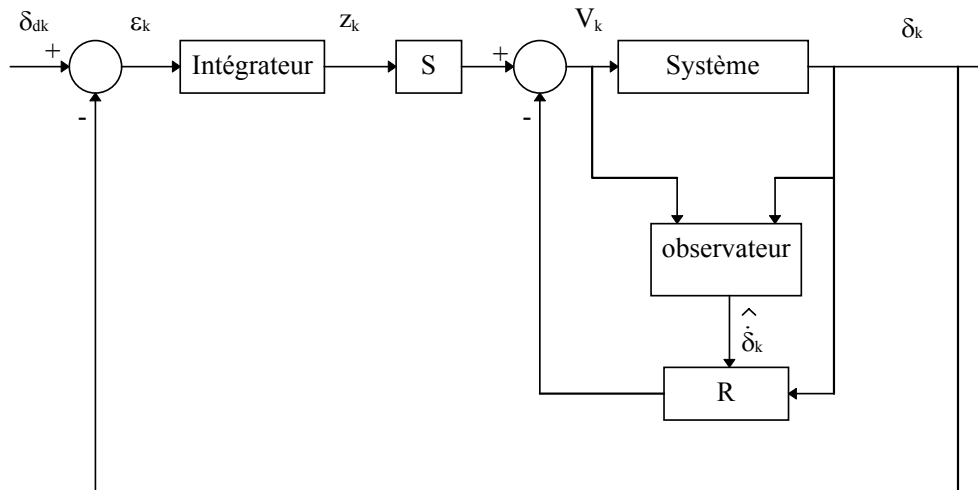


Fig. 4. 5 : Régulateur complet

2.2.4 Implémentation du régulateur

L'implémentation du régulateur est réalisée à partir du même système que celui présenté en figure 4.1.

Le système est cadencé à une fréquence de 20 kHz, soit une période d'échantillonnage $T=50 \mu s$. Cette fréquence ne peut être assurée avec un ordinateur de type PC utilisant un système d'exploitation de haut niveau tel que Microsoft Windows. Pour pouvoir à la fois bénéficier des nombreux avantages de ce système d'exploitation et utiliser des fréquences

d'échantillonnage élevées, nous avons utilisé un système externe à DSP, en l'occurrence un rack DSPACE, programmé sous l'environnement Matlab/Simulink de Scientific Software.

La figure 4.6 présente le comportement réel et attendu du système en boucle fermée en réponse à un signal de consigne carré variant entre -1 et 1 μm .

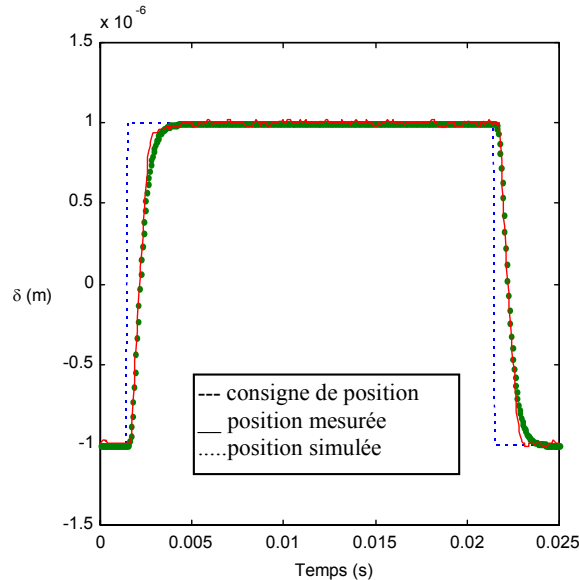


Fig. 4. 6 : Comportement du système asservi par retour d'état

Là encore, la résolution de positionnement est de 10 nm (limitée par celle du capteur). Le temps de réponse est de 1 ms. La réponse est sans dépassement.

3. Mesure de forces

La connaissance des forces exercées sur les micro-objets manipulés est souvent très importante (parfois indispensable) pour le bon déroulement de la tâche de micromanipulation. Certains micro-objets sont très fragiles (cellules biologiques, organismes vivants, microcomposants mécaniques, microcircuits électroniques...). La mesure des forces exercées permet d'éviter de les endommager ou de les détruire.

Dans cette partie, nous proposons deux méthodes pour l'évaluation de ces forces. La première consiste en l'utilisation de l'un des deux doigts de la micropince comme capteur de force. La seconde, utilise un observateur calculé à partir du modèle dynamique de l'unimorphe précédemment établi pour estimer la force.

3.1 Utilisation d'un unimorphe piézoélectrique en capteur de force

Dans ce cas, la micropince est actionnée par un seul unimorphe. Le second est utilisé en capteur de force (voir figure 4.7).

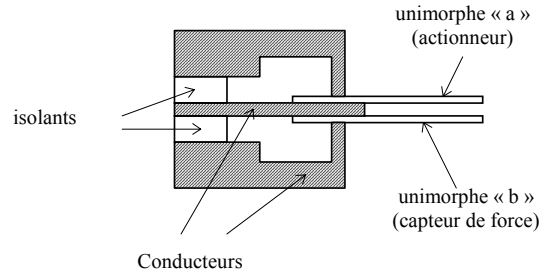


Fig. 4. 7 : Utilisation d'un unimorphe en capteur de force

Lorsqu'une force F^b est appliquée à l'extrémité de l'unimorphe « b », la charge qui apparaît entre les électrodes est donnée par (voir le paragraphe 9 du chapitre 3) :

$$Q^b = e_{42} F^b + e_{44} V^b \quad (4.22)$$

La force F_b peut être connue par la mesure de la charge Q^b . On utilise pour cela un circuit électronique appelé amplificateur de charge. Cette dénomination n'est pas très appropriée dans la mesure ou ce circuit ne réalise pas une amplification de la charge électrique mais une conversion charge $\rightarrow$ tension. La figure 4.8 présente le schéma de principe d'un tel montage.

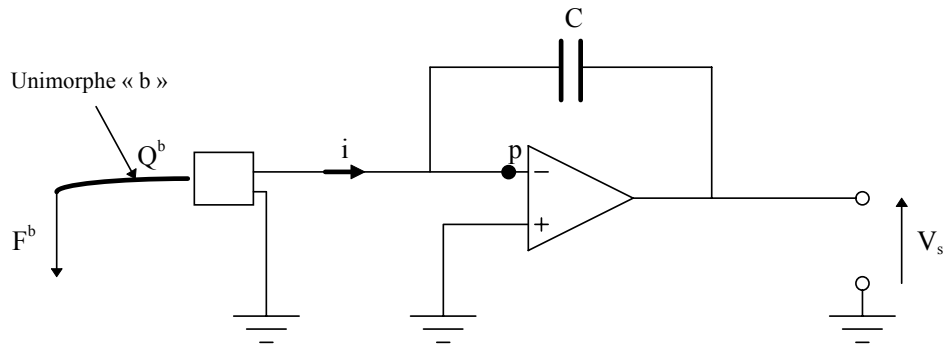


Fig. 4. 8 : Structure d'un amplificateur de charge

Le point noté p sur le schéma est un point de masse virtuelle. Cette propriété impose une tension V^b nulle. La charge apparaissant aux bornes de l'unimorphe ne dépend donc plus que de la force appliquée. Cela impose que cet unimorphe ne joue alors, comme précédemment indiqué, plus que le rôle de capteur, sans possibilité d'actionnement (le mouvement de préhension n'étant dans ce cas réalisé que par l'autre doigt) :

$$Q^b = e_{42} F^b \quad (4.23)$$

Une variation de la charge provoque l'apparition d'un courant i :

$$i = \frac{\partial Q^b}{\partial t} \quad (4.24)$$

La tension de sortie V_s est donnée par :

$$V_s = -\frac{1}{C} \int i \cdot dt = -\frac{Q^b}{C} \quad (4.25)$$

La réalisation d'un amplificateur de charge requiert une attention particulière. Les composants électroniques utilisés doivent être de très bonne qualité car ils conditionnent la fiabilité de la mesure. Le condensateur C doit avoir une résistance de fuite aussi grande que possible et l'amplificateur une impédance d'entrée très élevée. Un mauvais circuit provoque la décharge rapide du condensateur et altère la qualité de la mesure.

La figure 4.9 présente le résultat de mesures que nous avons effectué sur un unimorphe. La courbe représente la charge Q^b mesurée en fonction de la force appliquée.

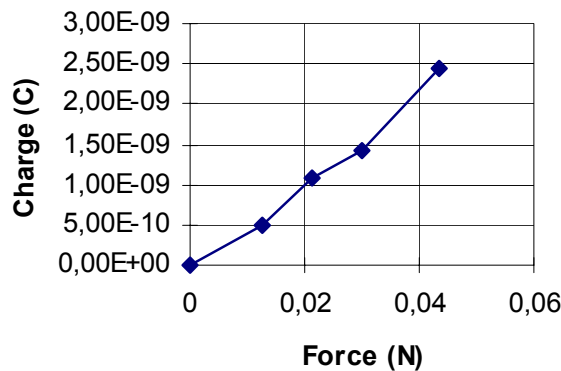


Fig. 4. 9 : Mesure de forces à l'aide d'un unimorphe piézoélectrique

3.2 Manipulation à effort contrôlé

L'emploi d'un unimorphe piézoélectrique en capteur d'effort permet de réaliser des micromanipulations non destructives en contrôlant les efforts exercés sur les objets manipulés. Considérons le cas typique où une microsphère déformable est manipulée par la micropince présentée sur la figure 4.7. On suppose que le diamètre de la microsphère est inférieur à l'écartement au repos entre les deux doigts de la pince (voir figure 4.10).

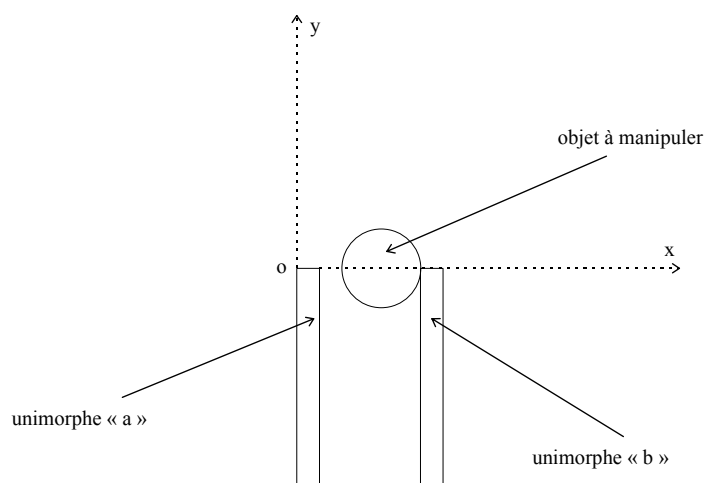


Fig. 4. 10 : Manipulation d'une microsphère par une micropince

Au repos, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}\delta^a &= 0 \\ Q^b &= 0\end{aligned}\tag{4.26}$$

La saisie de la microsphère s'effectue en actionnant l'unimorphe « a ». Soit d_1 le déplacement de la poutre « a » pour lequel les deux doigts sont en contact avec la microsphère sans appliquer de force et V_1^a la tension électrique correspondante (voir figure 4.11).

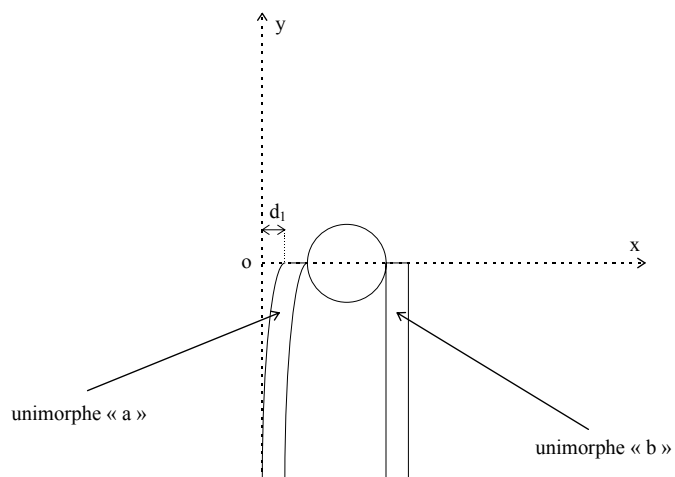


Fig. 4. 11 : Contact à force nulle entre la micropince et la microsphère

Dans cette situation :

$$\begin{aligned}\delta^a &= d_1 = e_{24}^a V_1^a \\ Q^b &= 0\end{aligned}\quad (4.27)$$

En augmentant la tension V^a , une force F est appliquée sur la microsphère. Une force identique est appliquée par la microsphère sur l'unimorphe « b » (voir figure 4.12).

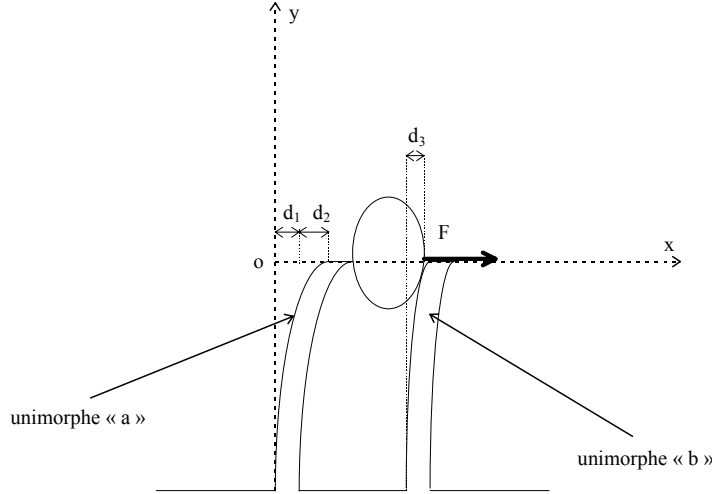


Fig. 4. 12 : Saisie de la microsphère

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned}\delta^a &= d_1 + d_2 = e_{24}^a V^a + e_{22}^a F \\ Q^b &= e_{42}^b F\end{aligned}\quad (4.28)$$

Outre l'information concernant la force exercée, cette méthode permet d'évaluer la souplesse du micro-objet saisi. Les équations précédentes permettent d'établir que la microsphère se déforme d'une quantité d_2 - d_3 sous l'effet d'une force de compression F .

La possibilité de connaître à chaque instant la force exercée sur le micro-objet manipulé permet de réaliser des opérations délicates. Par exemple, si les caractéristiques des objets manipulés sont connues, il est possible d'évaluer la force minimale à partir de laquelle on considère que le micro-objet est convenablement maintenu. Dans le cas où ces objets sont très fragiles, on pourra également asservir la force de maintien plutôt que la position des doigts.

3.3 Utilisation d'organes terminaux divers

Les unimorphes piézoélectriques actuellement réalisés possèdent une épaisseur de 250 μm . Ils peuvent paraître trop volumineux pour saisir des objets très petits ($<20\mu\text{m}$). Il peut

s'avérer utile de pouvoir fixer à leur extrémité des poutres de section plus faible. De plus, dans certains cas, la manipulation de micro-objets nécessite l'emploi d'organes terminaux ayant des formes appropriées. C'est souvent le cas lorsqu'un manipulateur est destiné à saisir un type d'objets de forme géométrique prédéfinie. A titre d'exemple, la figure 4.13 présente deux organes terminaux adaptés à la manipulation de micro-roues dentées.

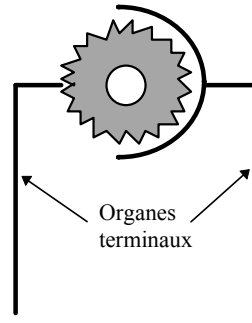


Fig. 4. 13 : Organes terminaux pour la manipulation de micro-roues dentées

Dans le cas où un organe terminal est fixé à l'extrémité de l'unimorphe, il convient de considérer le moment des forces exercées en bout de pince par rapport aux points P_a et P_b (voir figure 4.14).

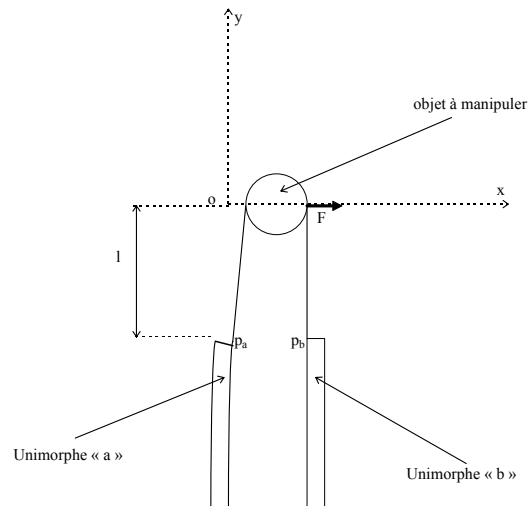


Fig. 4. 14 : Utilisation d'organes terminaux adaptés

Dans ce cas, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}\delta^a &= d_1 + d_2 = e_{24}^a V^a + e_{21}^a M \\ Q^b &= e_{41}^b M\end{aligned}\tag{4.29}$$

Avec $M=F.l$.

3.4 Observateur de force

L'utilisation de l'un des deux doigts de la micropince en capteur de force présente l'inconvénient de réduire de moitié la course de la pince et par suite l'échelle des dimensions des objets manipulables. Afin de pouvoir conserver la possibilité de mouvement indépendant de chacun des doigts tout en évaluant les efforts de contact avec les objets manipulés, une autre méthode que celle précédemment proposée consiste à utiliser les deux unimorphes comme actionneur et à évaluer la force exercée à l'aide d'un observateur de force.

Le transfert liant F , δ et V est donné par (voir paragraphe 11.3, chapitre 3):

$$\delta(p) = \frac{k_1}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} F(p) + \frac{k_2}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} V(p) \quad (4.30)$$

L'équation différentielle décrivant le comportement du système s'écrit, à conditions initiales nulles :

$$T_1 T_2 \ddot{\delta}(t) + (T_1 + T_2) \dot{\delta}(t) + \delta(t) = k_1 F(t) + k_2 V(t) \quad (4.31)$$

En considérant la force extérieure F comme une perturbation, le système peut être vu comme un processus à une entrée de commande, une entrée de perturbation et une sortie mesurée, comme indiqué sur la figure 4.15.

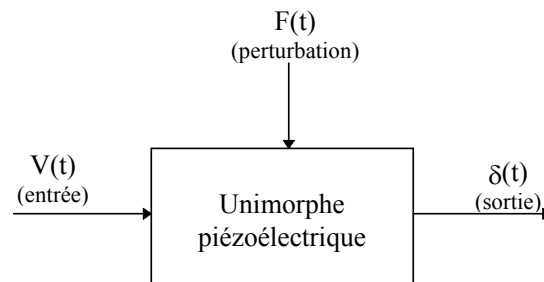


Fig. 4. 15 : Unimorphe piézoélectrique soumis à une perturbation F

La micropince est destinée à manipuler des micro-objets. Afin de ne pas endommager ceux-ci, la réalisation de ces tâches délicates peut être facilitée si les mouvements d'ouverture et de fermeture des doigts sont lents. On peut alors admettre dans un premier temps que la vitesse de variation des forces apparaissant aux contacts entre les unimorphes et l'objet manipulé est extrêmement faible, soit :

$$\dot{F}(t) \approx 0$$

L'état du système peut alors être représenté par le vecteur :

$$X = \begin{pmatrix} F \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{pmatrix}$$

La représentation d'état du système est ainsi :

$$\begin{aligned} \dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{F} \\ \ddot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ k_1 & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} & -\frac{1}{T_1 T_2} \\ T_1 T_2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_2}{T_1 T_2} \\ 0 \end{pmatrix} V \\ Y &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.32)$$

On construit un observateur réduit d'ordre 2 pour estimer la force F et la vitesse de déplacement $\dot{\delta}$. Le calcul de l'observateur est donné en annexe.

La structure de l'observateur réduit est représentée sur la figure 4.16.

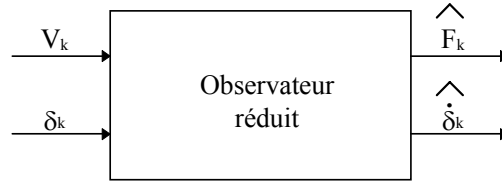


Fig. 4. 16 : Structure de l'observateur réduit pour l'estimation de la force et de la vitesse

La déflexion de l'extrémité de l'unimorphe est mesurée à l'aide d'un capteur laser de position dont la résolution est de 10 nm. Or en régime permanent, la relation entre la force F et la déflexion δ est donnée par :

$$F = \frac{\delta}{e_{22}} = \frac{\delta}{5,55 \cdot 10^{-4}} \quad (4.33)$$

En absence de toute perturbation, la résolution de l'estimation de la force est donnée par :

$$F_{\min} = \frac{1 \cdot 10^{-8}}{5,55 \cdot 10^{-4}} = 18 \mu N$$

Pour une déflexion maximale (sans casser l'unimorphe) $\delta_{\max}=20\text{ }\mu\text{m}$, la force maximale mesurable vaut :

$$F_{\max} = \frac{2.10^{-5}}{5,55.10^{-4}} = 36\text{ mN}$$

3.5 Implémentation de l'observateur de force

Dans le but de mettre en œuvre l'observateur de force, nous avons utilisé le même montage que celui précédemment évoqué (figure 4.1), avec une période d'échantillonnage $T=50\text{ }\mu\text{s}$. Nous avons procédé à plusieurs essais afin de vérifier le fonctionnement de l'observateur et en évaluer les performances.

3.5.1 Variation de force à tension électrique nulle

Dans ce cas, pour une tension électrique V nulle, une masse m de 1.2 g est suspendue manuellement à l'extrémité de l'unimorphe, puis retirée (voir figure 4.17). Cette action correspond à l'application d'une force F valant :

$$F = m \cdot g = 1,2.10^{-3} \times 9,81 \approx 12\text{ mN}$$

g représente l'accélération de la pesanteur ($g=9,81\text{ m/s}^2$).

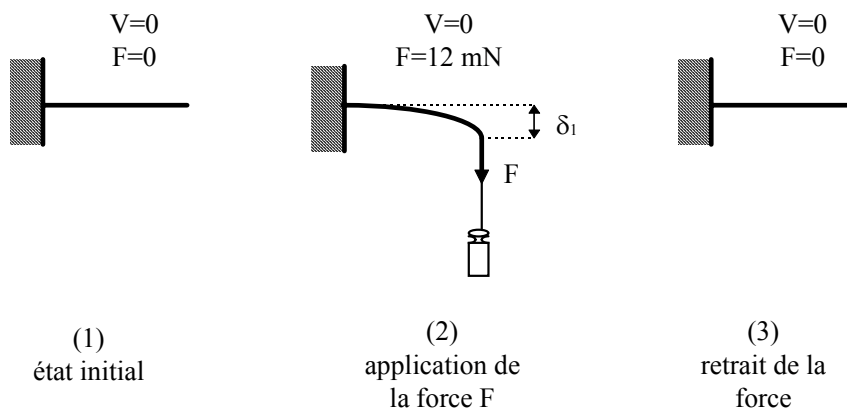


Fig. 4. 17 : Variation de force à tension électrique nulle

La figure 4.18 représente la force estimée.

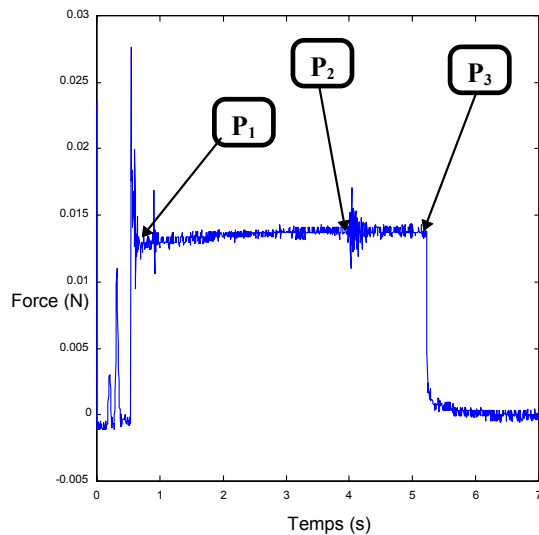


Fig. 4. 18 : Estimation de la force appliquée (V=0)

Le point P_1 correspond à l'instant de l'application de la force. Le pic qui apparaît est dû à l'accélération produite au moment où le poids est lâché. Au point P_2 , une perturbation est produite par le contact entre la main et le poids. Le point P_3 correspond à l'instant où la force est retirée.

Le graphe montre que l'observateur est suffisamment sensible pour détecter les imperfections dues à l'application manuelle de la force. La valeur de la force estimée est de :

$$\hat{F} = 13 \text{ mN}$$

3.5.2 Variation de tension électrique à force nulle

Dans cet essai, l'extrémité de l'unimorphe est libre (aucune force n'est appliquée). L'application d'une tension électrique variable produit une déflexion.

Les figures 4.19 et 4.20 représentent respectivement la tension électrique appliquée et la déflexion mesurée en fonction du temps.

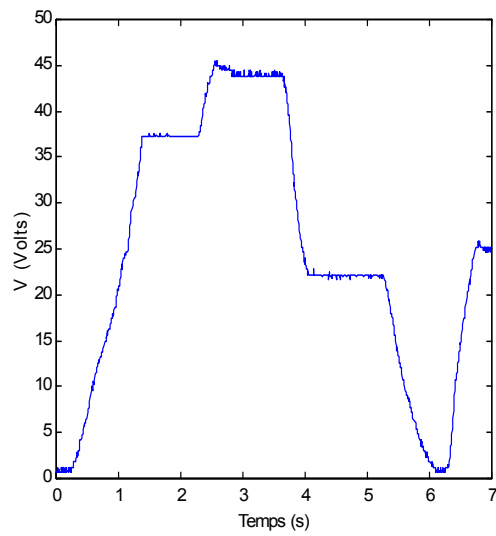


Fig. 4. 19 : Variations de tension électrique ($F=0$)

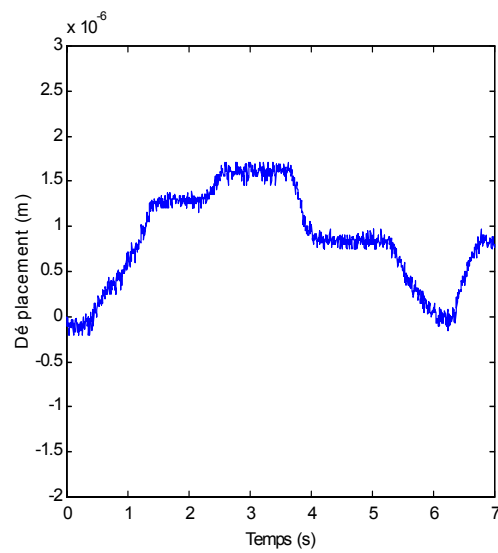


Fig. 4. 20 : Déflexion de l'unimorphe ($F=0$)

La figure 4.21 représente la force estimée.

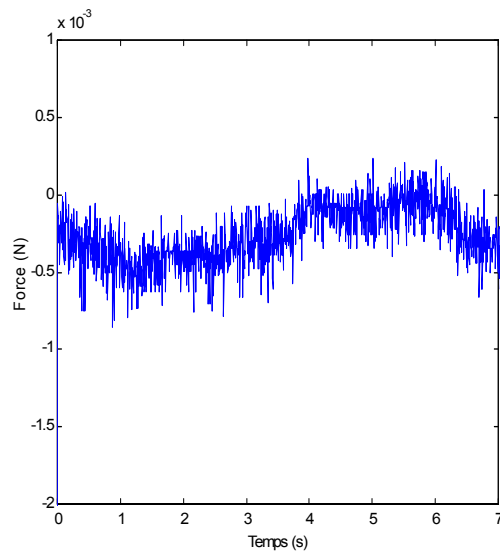


Fig. 4. 21 : Force estimée ($F=0$)

On constate que la force estimée est très peu sensible aux variations de la tension électrique appliquée aux bornes de l'unimorphe. En considérant les variations extrêmes de la force estimée, l'erreur d'estimation est au maximum de 1 mN.

3.5.3 Variation de tension électrique à force constante

Cette fois-ci une force constante ($F = 12$ mN) est appliquée en permanence à l'extrémité de l'unimorphe. Les figures 4.22 et 4.23 représentent respectivement la tension électrique appliquée et la force estimée en fonction du temps.

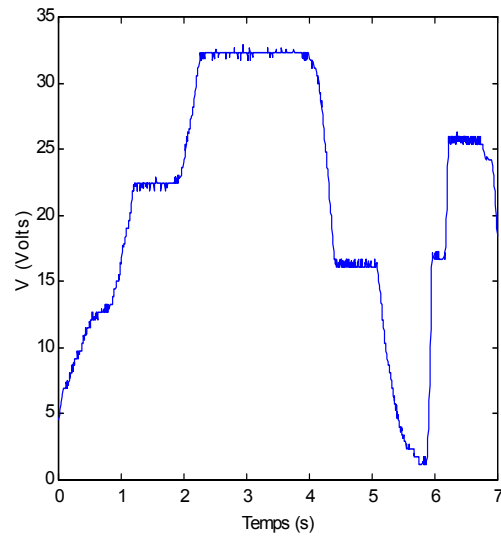


Fig. 4. 22 : Variations de tension électrique ($F=12$ mN)

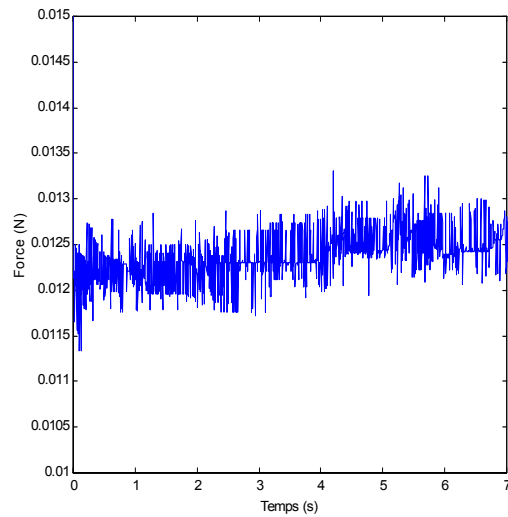


Fig. 4. 23 : Force estimée ($F=12$ m N)

Comme dans le cas précédent, la force estimée est très peu sensible aux variations de la tension électrique appliquée aux bornes de l'unimorphe.

3.5.4 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'observateur de force permet une bonne estimation de la force appliquée sur les micro-objets manipulés et que les résolutions obtenues sont largement compatibles avec les applications de micromanipulation. L'erreur maximale d'estimation de la force est de 1mN.

4. Conclusion du chapitre

La commande en boucle fermée de la position de l'extrémité de l'unimorphe piézoélectrique permet d'atteindre des résolutions de positionnement de 10 nm (actuellement limitée par la résolution du capteur). Cette résolution ouvre des perspectives très intéressantes pour la manipulation de micro-objets dans une large gamme de dimensions. L'asservissement en position nécessite cependant pour le moment l'emploi d'un capteur laser externe. La rapidité des réponses pour une excitation en tension ou en force (temps de réponse de l'ordre de la milliseconde) permet l'emploi de la micropince réalisée pour effectuer des travaux en milieu industriel (prise-dépose...). L'estimation dynamique de la force exercée entre les doigts de la micropince et les objets manipulés, caractérisée par une erreur maximale de 1 mN, permet de réaliser des manipulations non destructives et d'éviter les mouvements non désirés du micro-objet manipulé (glissements, mouvements brusques...). L'utilisation d'un observateur de force fondé sur le modèle dynamique de l'unimorphe permet d'estimer les forces d'interaction sans réduire l'échelle des dimensions des micro-objets manipulés.

Chapitre 5

Expériences de micromanipulation

Table des matières

1. Introduction.....	143
2. Système de positionnement 3D.....	143
2.1 Table de micropositionnement X-Y	144
2.2 Bras de positionnement (axe Z)	146
3. Station de micromanipulation	148
4. Application à des travaux de micromanipulation	149
4.1 Déplacement de fils de 100 μm de diamètre	150
4.2 Contribution au montage de mécanismes de montres	152
5. Micro-outils de découpe	153
6. Perspectives concernant l'utilisation des unimorphes piézoélectriques	155
6.1 Manipulations en milieu aqueux.....	155
6.2 Test de microcircuits.....	156
6.3 Augmentation de l'échelle des dimensions des micro-objets manipulés	156
6.4 Utilisation de modules supplémentaires	157
6.5 Micromanipulation par adhésion	159
7. Vers le concept de micro-usine.....	161
8. Conclusion du chapitre	163

Table des illustrations

Fig. 5. 1 : Principe de la table de micropositionnement X-Y actionnée par des fils en AMF	144
Fig. 5. 2 : Premier prototype de table X-Y	145
Fig. 5. 3 : Prototype final de table X-Y	145
Fig. 5. 4 : Structure du bras de positionnement (axe Z)	146
Fig. 5. 5 : Prototype de bras de positionnement suivant l'axe Z portant une micropince	146
Fig. 5. 6 : Système de micromanipulation complet	147
Fig. 5. 7 : Déroulement d'une tâche de micromanipulation	148
Fig. 5. 8 : Constitution de la station de micromanipulation	149
Fig. 5. 9 : Exemple d'interface graphique pour la commande du micromanipulateur	150
Fig. 5. 10 : Manipulation d'un fil de 100 μm de diamètre	151
Fig. 5. 11 : Manipulation de composants de montre	152
Fig. 5. 12 : Manipulation d'une roue dentée de mécanisme de montre	153
Fig. 5. 13 : Diverses configurations de micro-outils de découpe	154
Fig. 5. 14 : Vue de l'extrémité d'un micro-scalpel	154
Fig. 5. 15 : Microcoupure réalisée sur une feuille en carton	155
Fig. 5. 16 : Micromanipulation en milieu aqueux	156
Fig. 5. 17 : Système de test de microcircuits	156
Fig. 5. 18 : Contrôle de l'écartement entre les doigts en utilisant un élément piézoélectrique	157
Fig. 5. 19 : Contrôle de l'écartement entre les doigts en utilisant une vis sans fin	157
Fig. 5. 20 : Modules actionnés par des fils en AMF	158
Fig. 5. 21 : Utilisation de modules supplémentaires	158
Fig. 5. 22 : Modèle pour la manipulation par adhésion	159
Fig. 5. 23 : Micromanipulation par adhésion	161
Fig. 5. 24 : Microcellule de découpe	162
Fig. 5. 25 : Station de test de microcircuits	162
Fig. 5. 26 : Microcellule de tri	163

1. Introduction

Dans ce chapitre nous abordons les questions relatives à l'interaction de la micropince avec l'environnement extérieur dans le cadre de manipulations réelles. L'exécution de tâches de micromanipulation complètes nécessite de pouvoir positionner la micropince dans un espace à trois dimensions.

La première partie sera consacrée à la présentation d'un système de positionnement à trois degrés de liberté en translation réalisé pour être utilisé conjointement avec la micropince et actionné par des fils en alliage à mémoire de forme (AMF). Ce prototype permet d'atteindre des résolutions adaptées aux exigences du travail dans le micromonde et présente par rapport aux systèmes de micropositionnement commercialisés l'avantage d'être très peu coûteux.

Dans la deuxième partie, nous donnons des exemples des résultats de micromanipulations appliquées à des cas concrets.

Enfin, nous exposons plusieurs idées permettant d'élargir le domaine d'application des unimorphes piézoélectriques. Certaines ont été mises en oeuvre et sont actuellement utilisées. D'autres pourront servir à des travaux futurs et comme point de départ pour de nouvelles voies à explorer.

2. Système de positionnement 3D

La micropince réalisée permet de saisir et de lâcher des micro-objets en contrôlant les efforts exercés. Cependant les actions d'ouverture et de fermeture de la micropince ne permettent pas à elles seules de réaliser des tâches de micromanipulation complètes. Il faut également assurer des fonctions de transport, de positionnement... C'est pourquoi la micropince doit être associée à un système de micropositionnement 3D offrant un nombre suffisant de degrés de liberté.

Comme première solution, la micropince peut être fixée à l'extrémité d'un bras de positionnement polyarticulé. Cette solution présente de nombreux inconvénients. En effet si la micropince est liée à un porteur de taille « normale » (bras de robot), la résolution de l'ensemble est limitée par les performances de bras. Pour obtenir de bonnes performances, il faudrait réaliser un bras miniaturisé adapté au micromonde. On se heurte alors aux difficultés liées à la microfabrication et au micro-assemblage.

L'utilisation d'un microbras pose des problèmes relatifs à l'environnement. Par exemple, dans le cas où l'on utilise un système de vision (microscope, caméra...), le champ de vision est souvent très limité. Pour visualiser la totalité de l'opération de micromanipulation il faudrait motoriser le système de vision pour suivre les mouvements de l'extrémité de la micropince. Les systèmes de vision motorisés sont souvent volumineux et surtout très coûteux.

Une autre approche consiste à utiliser une table de positionnement X-Y sur laquelle seront déposés les micro-objets à manipuler. Plusieurs fabricants proposent des tables de micropositionnement caractérisées par des résolutions très élevées. Ces tables sont souvent actionnées par des éléments piézoélectriques et en général assez coûteuses.

Dans le but de réaliser des tâches de micromanipulation complètes, nous avons conçu un système de micropositionnement constitué d'une table de positionnement X-Y (plan horizontal) et d'un bras de positionnement pour les déplacements selon l'axe Z (axe vertical).

Cette méthode permet de répartir les différents mouvements à réaliser sur différents éléments de conception simple. Notre objectif est de réaliser une première version d'un système suffisamment performant pour nous permettre de réaliser nos essais dans de bonnes conditions et pouvant être fabriqué pour un coût très faible. A terme, l'ensemble micropince-système de positionnement 3D pourrait ainsi constituer un système à bas prix, argument important particulièrement dans le cas d'une utilisation industrielle.

2.1 Table de micropositionnement X-Y

Les déplacements le long des axes X et Y sont réalisés par la table de micropositionnement. Notre objectif est de pouvoir déplacer un objet dans un carré de surface 4 mm^2 (2 mm en X et 2 mm en Y). La table est actionnée par quatre fils en AMF (NiTi). Les déplacements dans les directions X et Y sont réalisés en commandant électriquement (effet Joule) la température des fils en AMF (voir figure 5.1).

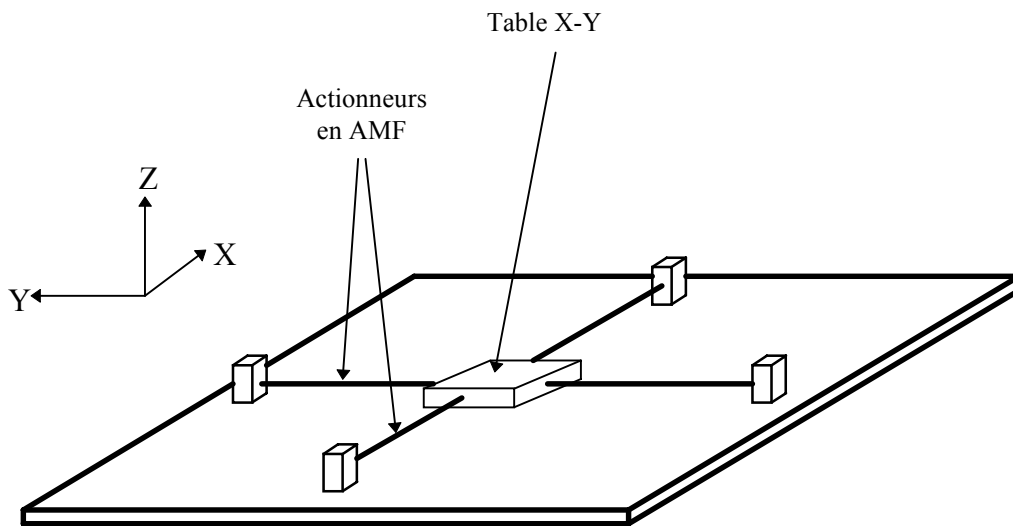


Fig. 5. 1 : Principe de la table de micropositionnement X-Y actionnée par des fils en AMF

Si on considère que la déformation maximale d'un fil en AMF à force constante est de l'ordre de 3%, les fils doivent avoir une longueur minimale de 33 mm. Nous avons opté pour des fils de 50mm de long.

La figure 5.2 présente le premier prototype réalisé.

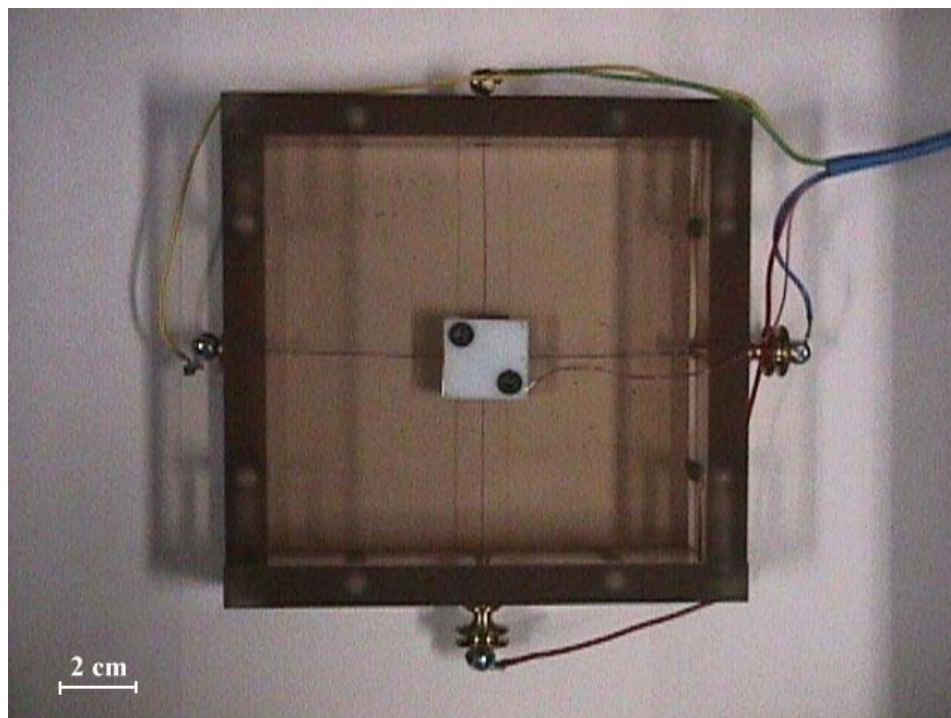


Fig. 5. 2 : Premier prototype de table X-Y

Certaines erreurs de conception apparues sur ce premier prototype réalisé, notamment les problèmes liés au système de fixation des fils et à l'arrivée de fils de masse nous ont poussé à réaliser un second prototype présenté en figure 5.3.

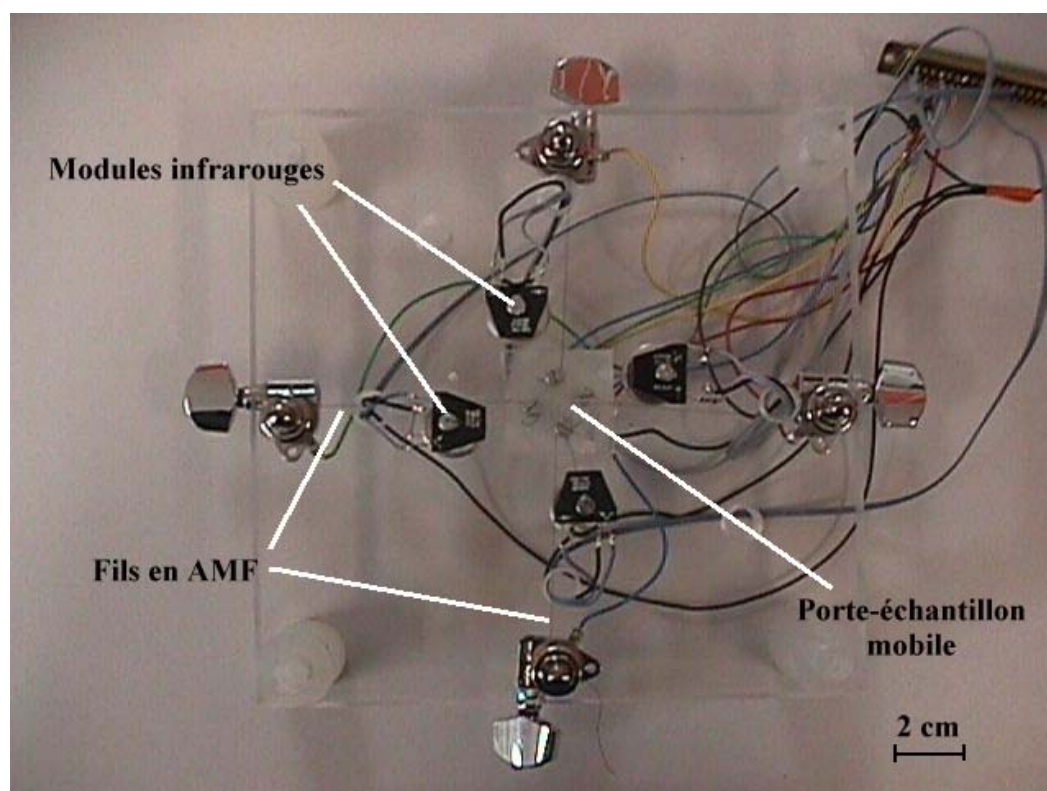


Fig. 5. 3 : Prototype final de table X-Y

Sur cette seconde version, les fils en AMF sont maintenus par des systèmes de fixation utilisant le frottement exponentiel. Les connections de masse sont réalisées sous la table. Quatre module infrarouges permettent de mesurer en permanence la position de la table. Ces modules servent également pour l'asservissement en position de la table. L'utilisation de régulateurs de type PID permet d'atteindre une résolution de positionnement de $1\mu\text{m}$.

2.2 Bras de positionnement (axe Z)

Les déplacements de la micropince le long de l'axe Z sont assurés par le bras représenté sur la figure 5.4.

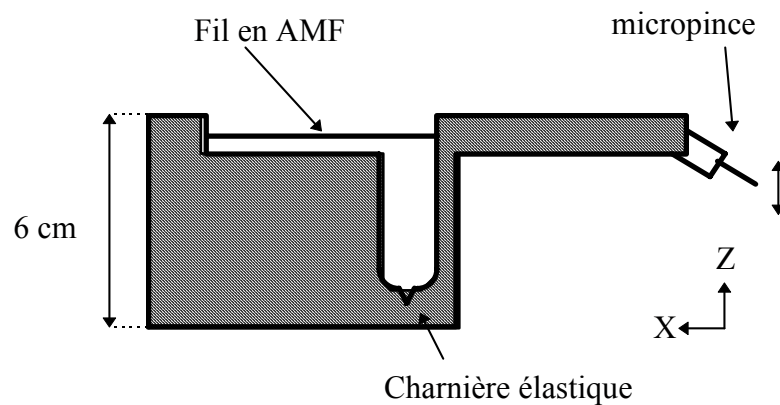


Fig. 5. 4 : Structure du bras de positionnement (axe Z)

Ce bras est actionné par un fil en AMF. La force de rappel est générée par une charnière élastique. Lorsque la température du fil en AMF croît, la micropince est déplacée hors de l'environnement de travail. Le déplacement maximal suivant l'axe Z est de 1,5 mm avec une résolution de $1\mu\text{m}$. La figure 5.5 présente une photographie du prototype réalisé portant la micropince. On y distingue le module infrarouge qui permet d'asservir la position du bras.

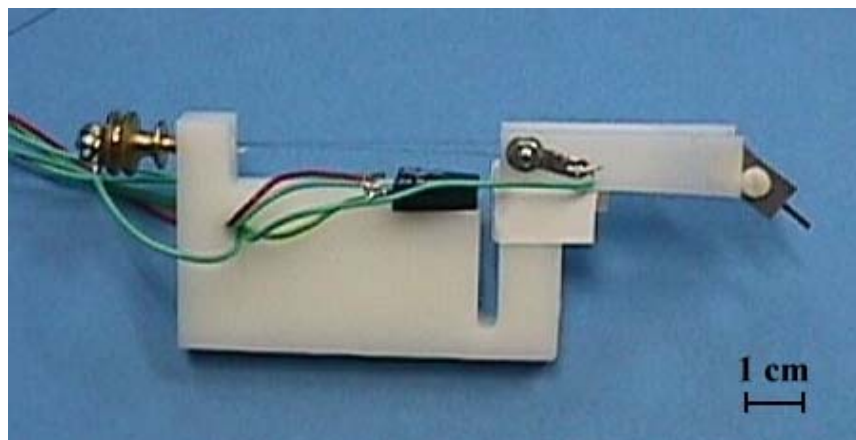


Fig. 5. 5 : Prototype de bras de positionnement suivant l'axe Z portant une micropince

Le bras ne fournit pas un déplacement pur suivant la direction Z. En effet il existe également une composante en rotation autour de l'axe Y que l'on néglige dans le cas des manipulations que nous réalisons.

La figure 5.6 représente le système de micromanipulation complet [35]. Le domaine accessible est de 6 mm^3 ($=2 \times 2 \times 1,5 \text{ mm}^3$).

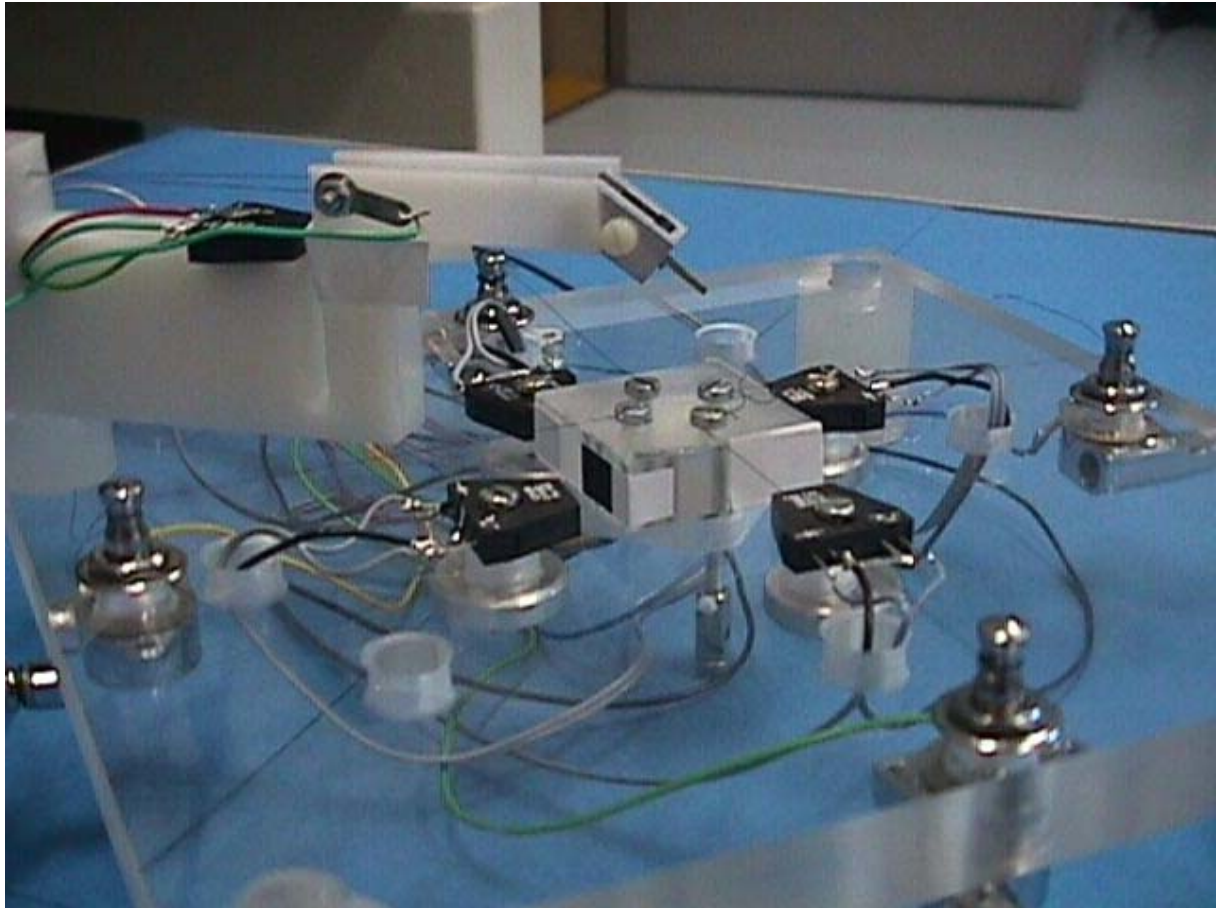


Fig. 5. 6 : Système de micromanipulation complet

Le porte-échantillon est posé sur la table X-Y.

Pour réaliser une tâche de micromanipulation, le système doit exécuter les opérations suivantes (voir figure 5.7) :

- l'objet cible est positionné sous le microscope en actionnant la table X-Y,
- la micropince est abaissée au moyen du bras de micropositionnement,
- l'objet est saisi par la micropince,
- la nouvelle localisation est positionnée sous le microscope,
- enfin, l'objet est posé ou lâché à cette nouvelle position.

Cette manière de procéder permet de garder le microscope à une position fixe tout au long de la manipulation.

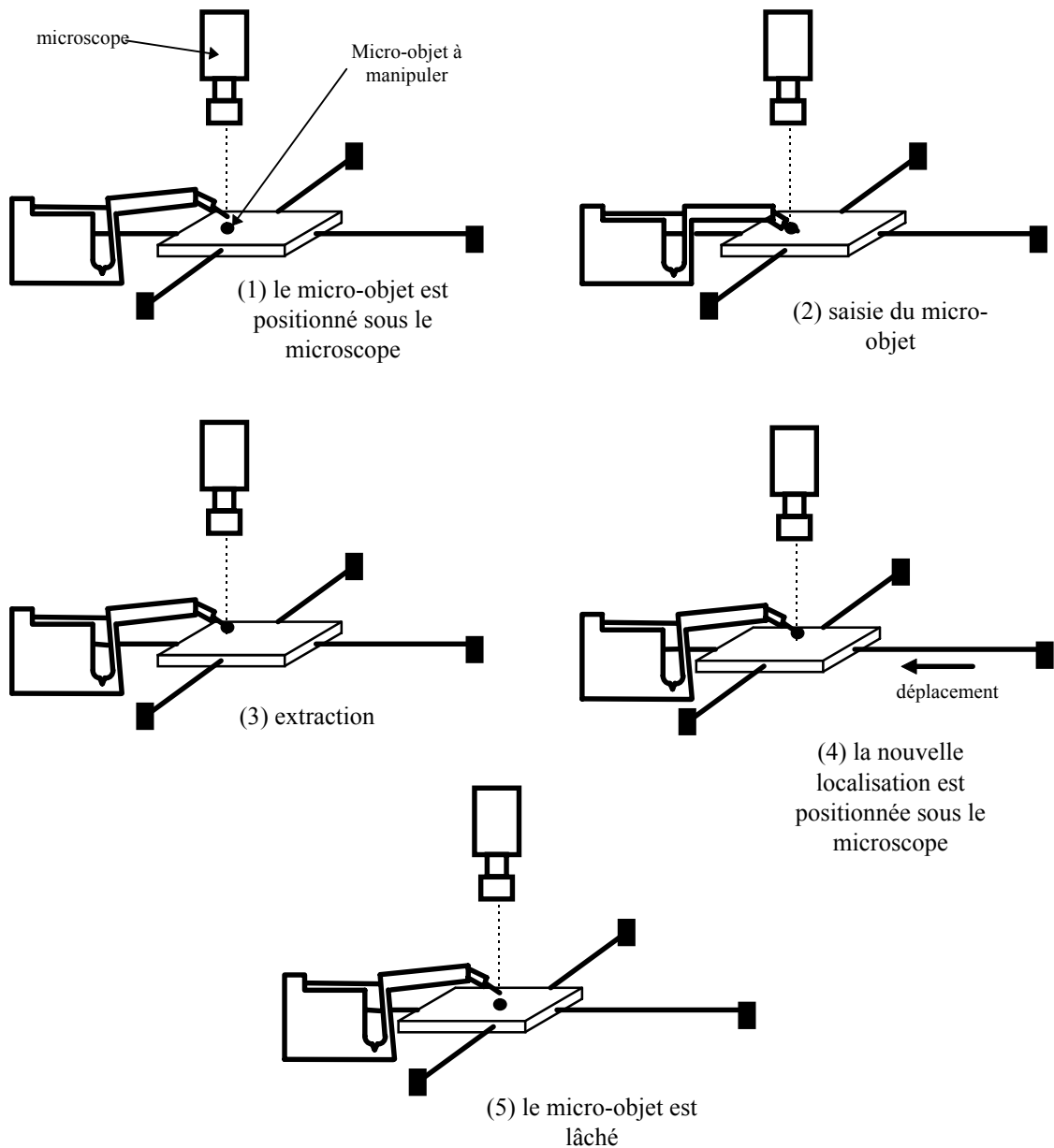


Fig. 5. 7 : Déroulement d'une tâche de micromanipulation

3. Station de micromanipulation

La figure 5.8 présente la station de micromanipulation mise en place pour réaliser des opérations dans le micromonde. Outre les éléments précédemment cités (micropince, table X-Y et axe Z), cette station contient :

- un calculateur de type PC associé à une unité temps réel pour effectuer les calculs de commande,
- un système complet de vision constitué d'un microscope optique équipé d'une caméra CCD et d'un moniteur permettant à l'opérateur humain d'avoir un retour visuel de l'environnement de travail,
- un élément haptique (joystick à retour d'effort) permettant de commander les différents mouvements,

- divers circuits électroniques de commande et d'interfaçage.

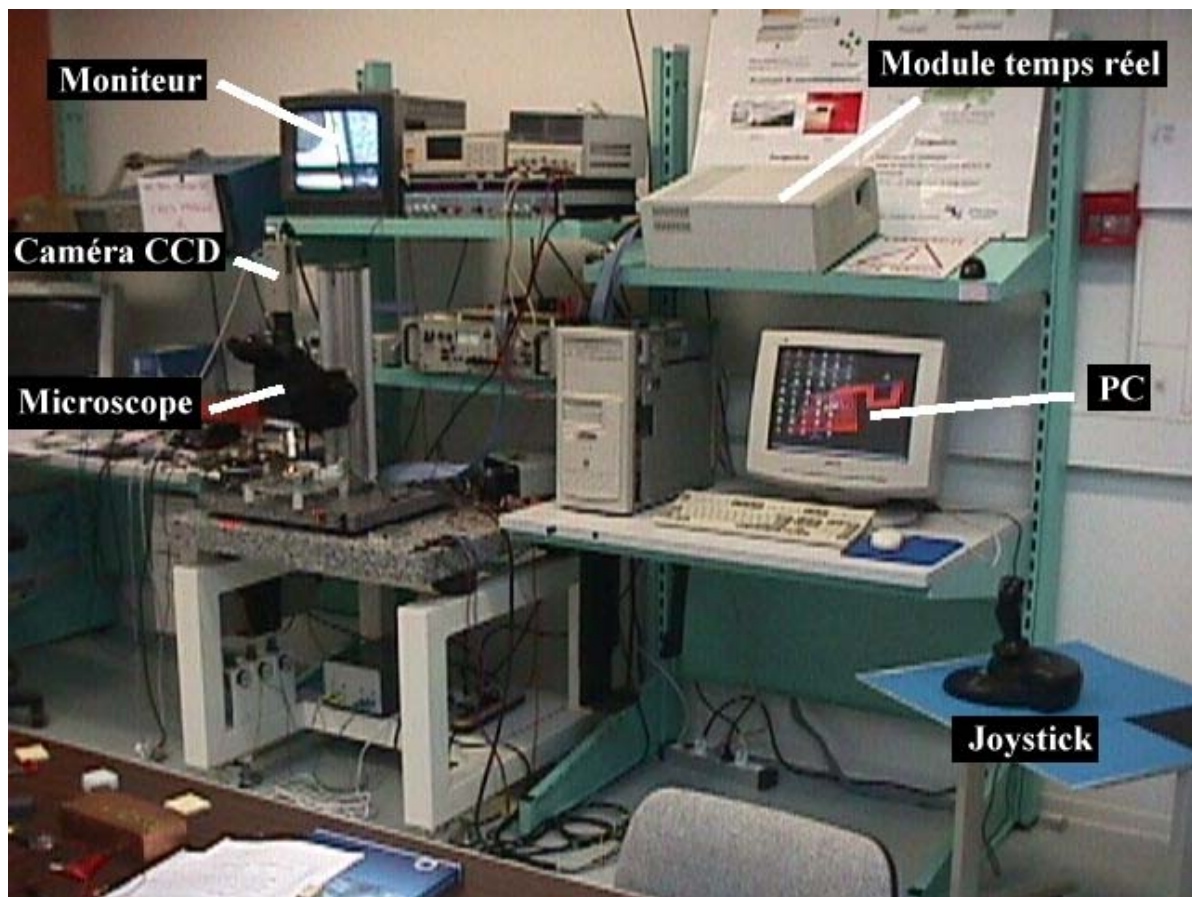


Fig. 5. 8 : Constitution de la station de micromanipulation

4. Application à des travaux de micromanipulation

La station de micromanipulation permet à un opérateur humain de réaliser diverses tâches de micromanipulation. Les déplacements peuvent être contrôlés soit à l'aide du joystick soit en utilisant des interfaces graphiques. La figure 5.9 présente un exemple d'interface graphique pour le contrôle manuel des différents mouvements.

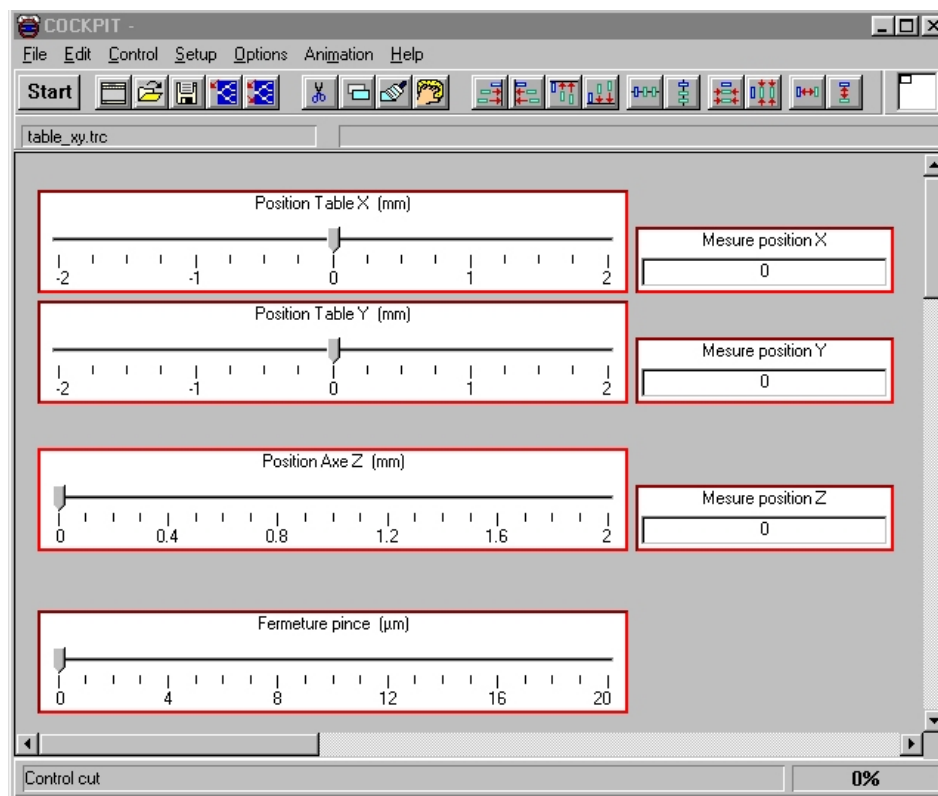


Fig. 5. 9 : Exemple d'interface graphique pour la commande du micromanipulateur

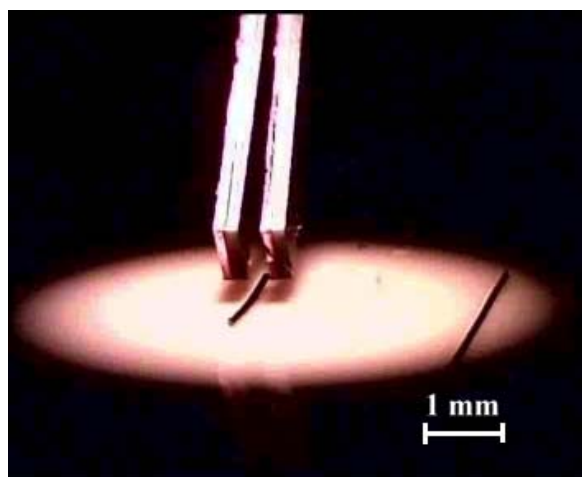
De plus l'opérateur a accès à diverses informations issues de l'environnement microscopique (visualisation de la scène sur un moniteur, mesures de position issues des différents capteurs...).

La station peut également être utilisée de manière automatique pour réaliser des successions d'actions. Cette possibilité permet de satisfaire des exigences de tâches répétitives (opérations de prise-dépose, d'insertion...).

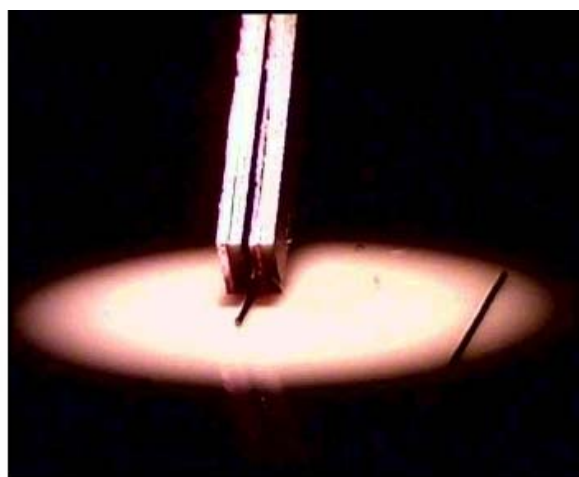
Dans la suite du paragraphe, nous présentons deux applications de micromanipulation. La première consiste à déplacer des morceaux de fils métalliques posés sur un plan. La seconde concerne la manipulation d'engrenages entrant dans la fabrication de mouvements de montres.

4.1 Déplacement de fils de 100 µm de diamètre

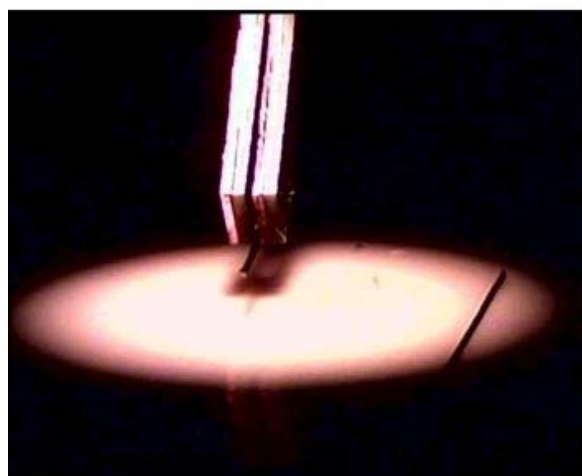
L'objectif est ici de manipuler des morceaux de fils métalliques de section circulaire de 100 µm de diamètre posés à plat sur une surface plane (une telle disposition rend plus difficile l'opération de saisie). La manipulation consiste à saisir fermement un fil, le déplacer et le poser en un point donné. La table X-Y ainsi que le bras de micropositionnement axe Z sont asservis en position par des régulateurs PID. La micropince est ici utilisée en boucle ouverte. Elle est commandée par l'opérateur qui possède un retour visuel de la scène. La figure 5.10 présente les différentes étapes de la manipulation.



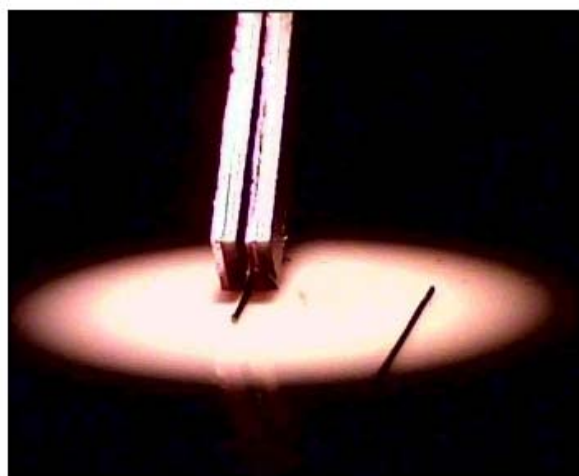
(a) état initial



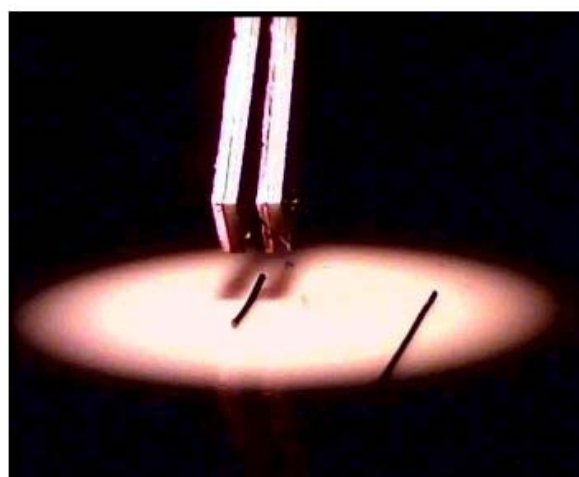
(b) saisie du fil



(c) extraction



(d) transport et positionnement



(e) libération du fil

Fig. 5. 10 : Manipulation d'un fil de 100 µm de diamètre

Une séquence vidéo disponible sur le CD-ROM joint montre l'opération de manipulation complète (voir annexe).

4.2 Contribution au montage de mécanismes de montres

Le manipulateur est utilisé pour déplacer une roue dentée d'un trou d'axe à un autre sur un mécanisme de montre. L'axe manipulé a un diamètre de 150 μm . La figure 5.11 donne un aperçu de l'environnement de travail.



Fig. 5. 11 : Manipulation de composants de montre

Les opérations successives nécessaires à la réalisation de la tâche sont présentées sur la figure 5.12.

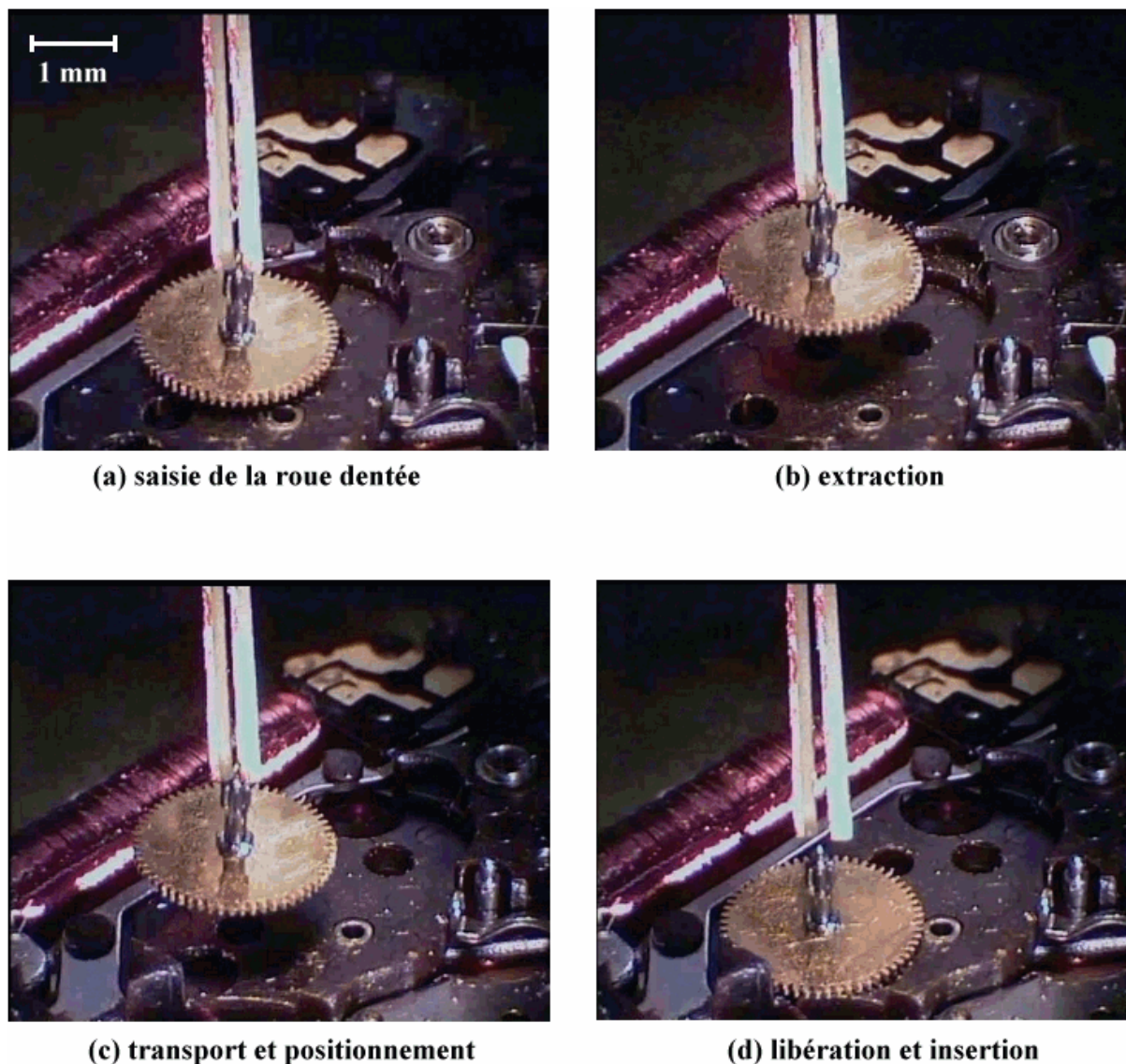


Fig. 5. 12 : Manipulation d'une roue dentée de mécanisme de montre

Ce type de manipulation peut jouer un rôle important dans des chaînes de micro-assemblage automatique.

Une séquence vidéo montrant la manipulation est également disponible sur le CD-ROM joint (voir annexe).

5. Micro-outils de découpe

Certains travaux dans le micromonde nécessitent en plus des actions de préhension et de manipulation, la possibilité d'exécuter d'autres tâches telles que couper, percer, souder, visser... Dans ce but, les unimorphes piézoélectriques peuvent également être utilisés pour réaliser des micro-outils de découpe (scalpels, couteaux, haches...). En fixant un élément tranchant à leur extrémité, les unimorphes peuvent servir à diverses fonctions telles que :

- réaliser des micro-incisions,
- effectuer des microgreffes,
- sectionner des cables,
- introduire des substances dans des micro-organismes,
- prélever des échantillons.

Diverses configurations ont été testées (voir figure 5.13).

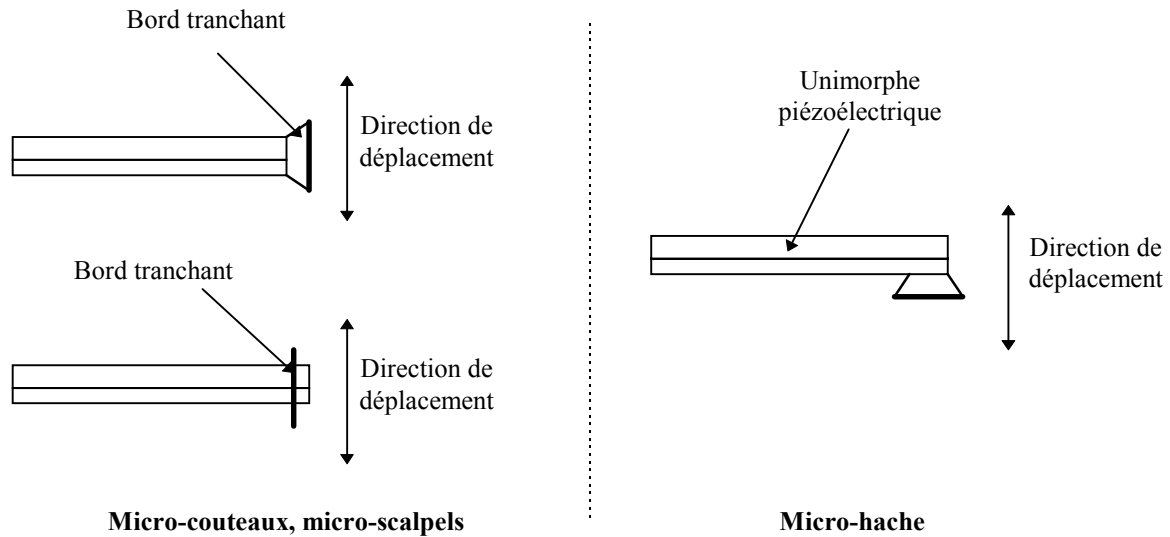


Fig. 5. 13 : Diverses configurations de micro-outils de découpe

La figure 5.14 montre une photographie de l'extrémité d'un unimorphe piézoélectrique sur lequel a été fixé un élément tranchant.

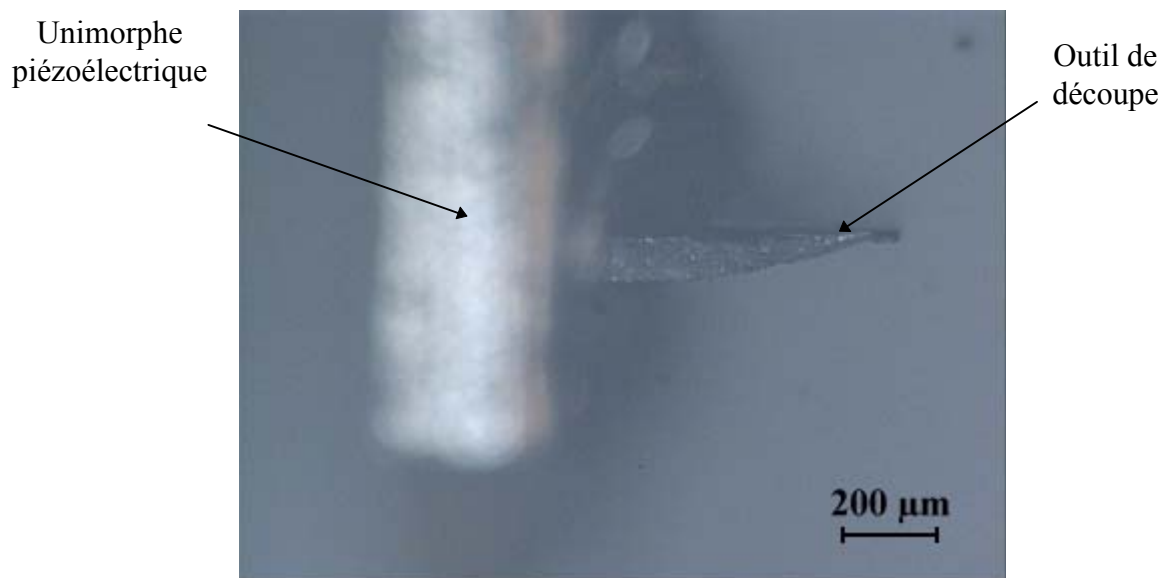


Fig. 5. 14 : Vue de l'extrémité d'un micro-scalpel

Cet outil permet par exemple de réaliser des entailles d'environ 20 μm de diamètre (voir figure 5.15).

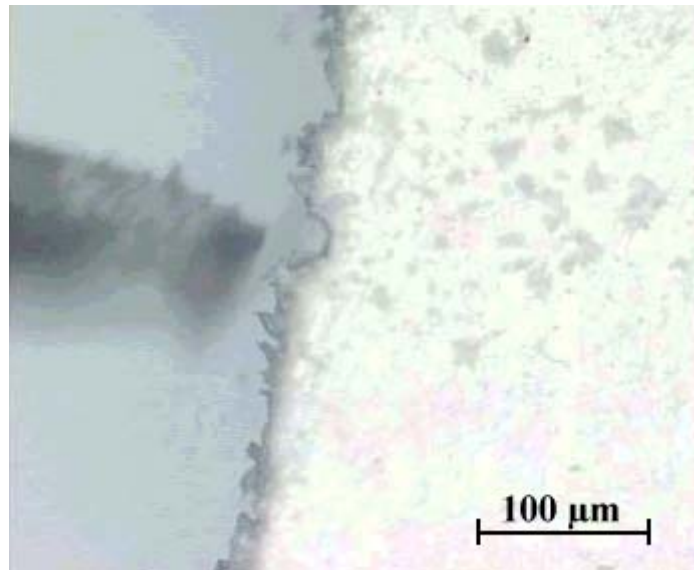


Fig. 5. 15 : Microcoupure réalisée sur une feuille en carton

Une séquence vidéo est présentée sur le CD-ROM joint (voir annexe).

6. Perspectives concernant l'utilisation des unimorphes piézoélectriques

Dans ce paragraphe nous avons rassemblé quelques éléments relatifs à l'utilisation des unimorphes dans des cas particuliers. Certaines idées permettent d'améliorer les performances de la micropince conçue. D'autres autorisent l'emploi des unimorphes pour réaliser des tâches particulières.

6.1 Manipulations en milieu aqueux

Le principe même d'actionnement de la micropince empêche l'immersion d'une partie des unimorphes dans un liquide en raison des court circuits qui pourraient se produire entre les électrodes. Or, la majorité des tâches de micromanipulation en biologie se fait en milieu liquide. Deux solutions sont alors possibles :

- utiliser des organes terminaux isolants,
- recouvrir les unimorphes d'un matériau isolant (voir figure 5.16).

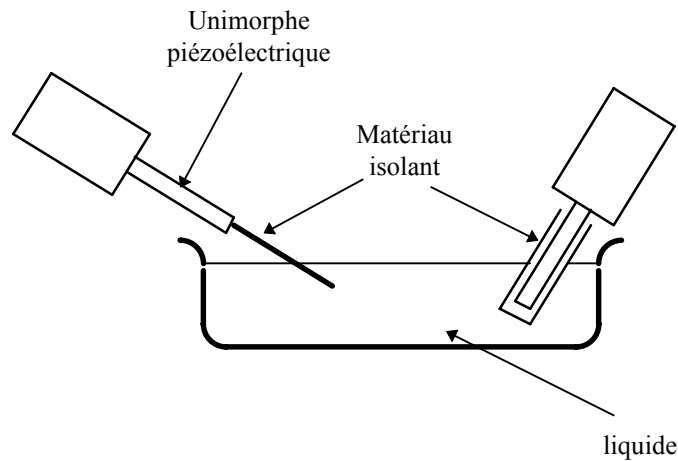


Fig. 5. 16 : Micromanipulation en milieu aqueux

Certains matériaux sont particulièrement bien adaptés pour être utilisés comme couche d'isolation. C'est le cas notamment du parylène. Le parylène se présente sous la forme de couches très fines de polymère transparent, uniforme et bio-compatible. Par des techniques de déposition, il est possible de recouvrir un élément d'une couche allant de $0,1\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$.

6.2 Test de microcircuits

Les capacités de positionnement précis des unimorphes permettent d'envisager leur utilisation dans des systèmes de test de micro-circuits (tests de continuité, mesures électriques...). Si les extrémités des unimorphes sont équipées de pointes ou de sondes, des mesures peuvent être réalisées sur des microcircuits voir figure 5.17.

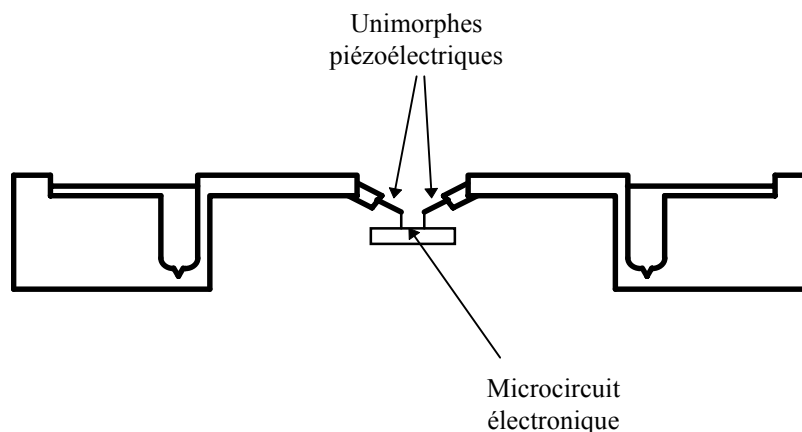


Fig. 5. 17 : Système de test de microcircuits

6.3 Augmentation de l'échelle des dimensions des micro-objets manipulés

La micropince permet de manipuler des micro-objets de tailles diverses. En effet les unimorphes se déplacent de part et d'autre d'une position initiale conditionnée par l'épaisseur de la couche métallique insérée entre les deux doigts (voir figure 3.21, chapitre 3). Cependant pour manipuler dans un même environnement des objets présentant une trop grande

différence de taille, il sera parfois nécessaire de démonter la pince pour y insérer une couche métallique d'épaisseur différente. L'utilisation de matériaux actifs entre les deux doigts permet d'éviter le démontage de la pince. La figure 5.18 présente une configuration dans laquelle l'écart au repos entre les deux doigts est contrôlé par un actionneur piézoélectrique. L'utilisation d'un actionneur piézoélectrique à empilement permet d'obtenir de larges déplacements.

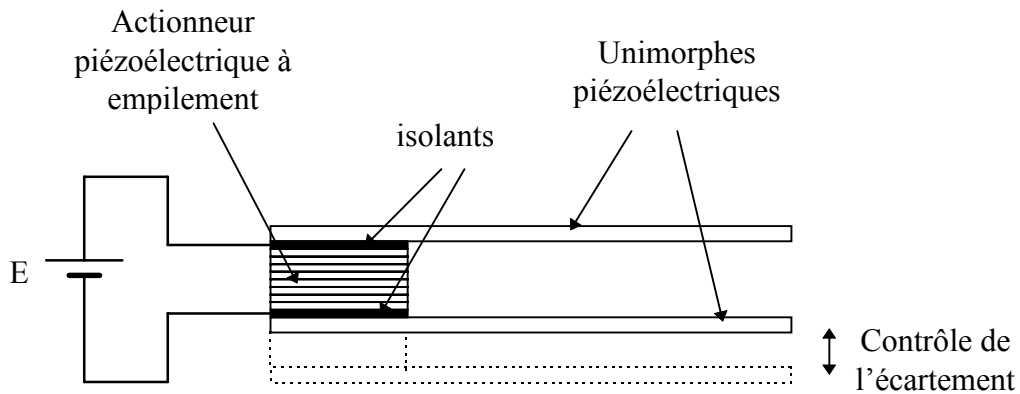


Fig. 5. 18 : Contrôle de l'écartement entre les doigts en utilisant un élément piézoélectrique

Une autre méthode consiste à utiliser une vis sans fin actionnée par un moteur électrique de petite taille (voir figure 5.19) l'écart entre les deux doigts est contrôlé en actionnant le moteur.

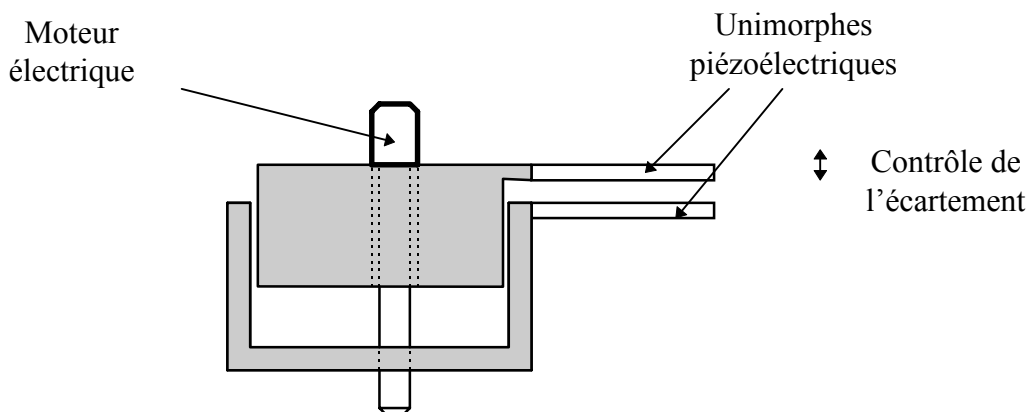


Fig. 5. 19 : Contrôle de l'écartement entre les doigts en utilisant une vis sans fin

6.4 Utilisation de modules supplémentaires

L'exécution d'une tâche de micromanipulation peut être compliquée par des événements inattendus. Par exemple, si le micro-objet à manipuler est positionné « de travers », inaccessible, ou trop proche d'un micro-objet voisin, l'opération de saisie devient difficile. L'adjonction au système de micromanipulation réalisé d'un module supplémentaire permet

d'améliorer la dextérité du manipulateur. La figure 5.20 présente deux prototypes de modules actionnés par des fils en alliages à mémoire de forme.

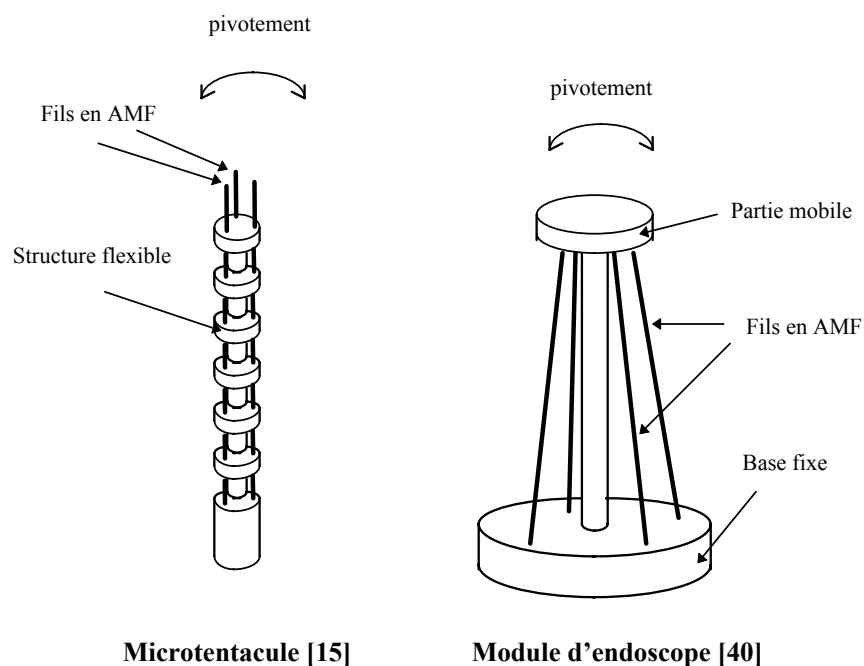


Fig. 5. 20 : Modules actionnés par des fils en AMF

Ces modules peuvent être insérés entre le bras de micropositionnement et la micropince. La micropince peut ainsi être caractérisée par une plus grande mobilité (voir figure 5.21).

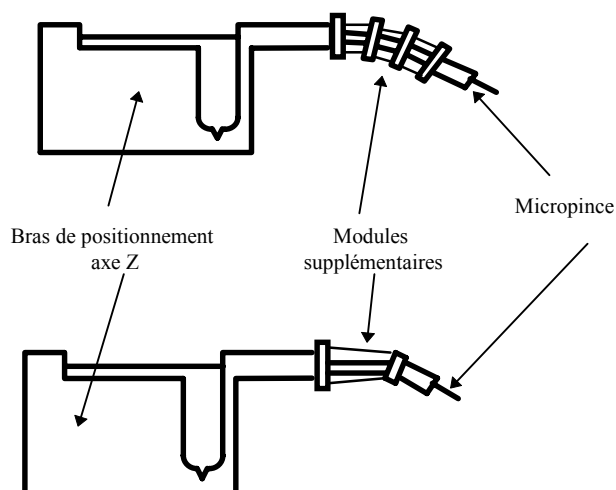


Fig. 5. 21 : Utilisation de modules supplémentaires

6.5 Micromanipulation par adhésion

Jusqu'à présent, nous avons considéré des manipulations dans lesquelles la saisie se fait par serrage entre deux doigts d'une pince. Il est possible sous certaines conditions de manipuler des micro-objets en utilisant un doigt unique et en exploitant les forces d'adhésion [33][47]. Cependant cette méthode impose certaines contraintes qui limitent en pratique l'emploi de ce procédé à quelques cas assez particuliers. A titre d'exemple, la figure 5.22 représente un unimorphe en contact avec une microsphère posée sur un plan.

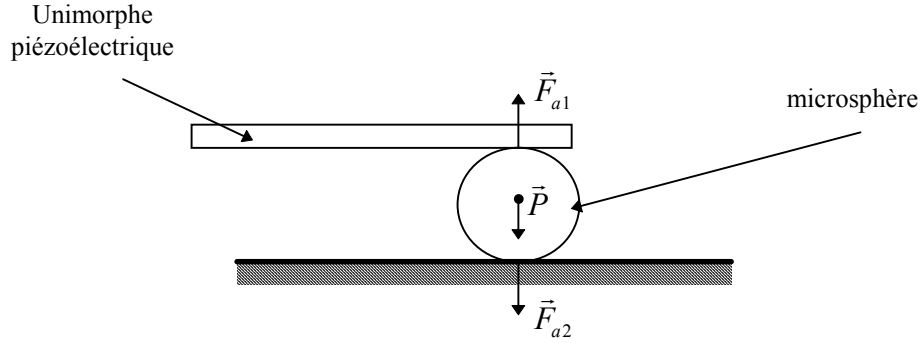


Fig. 5. 22 : Modèle pour la manipulation par adhésion

Les forces $\vec{F}_{a1}$ et $\vec{F}_{a2}$ représentent respectivement les résultantes des forces d'adhésion microsphère-unimorphe et microsphère-plan.

La force $\vec{P}$ représente le poids de la microsphère.

La microsphère peut être soulevée si l'équation suivante est vérifiée :

$$F_{a1} > F_{a2} + P \quad (5.1)$$

Dans ce cas, la microsphère ne peut plus être lâchée sur la même surface. En effet, l'opération de lâcher de l'objet nécessite de vérifier la condition inverse. L'objet peut toutefois être lâché sur une surface ayant des caractéristiques différentes de la première de telle sorte que la résultante des forces d'adhésion microsphère-plan notée $\vec{F}_{a3}$ vérifie :

$$F_{a1} < F_{a3} + P \quad (5.2)$$

Pour lâcher la microsphère sur la même surface, il est nécessaire de produire une force motrice $\vec{F}_m$ générant une accélération de l'extrémité de l'unimorphe piézoélectrique et qui doit vérifier l'équation :

$$F_{a2} + (m_u + m_s)g > F_m > F_{a1} + m_u g \quad (5.3)$$

m_u et m_s désignent respectivement la masse de l'unimorphe et la masse de la microsphère.

La force F_m est donnée par :

$$F_m = m_u \ddot{\delta} \quad (5.4)$$

Dans le cas où l'on applique aux bornes des électrodes de l'unimorphe un échelon de tension d'amplitude V , la force motrice générée est donnée par :

$$F_m(t) = m_u \frac{e_{24}V}{T_2 - T_1} \left[\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \quad (5.5)$$

T_1 et T_2 sont les constantes de temps.

Cette expression est obtenue à partir de la fonction de transfert $V \rightarrow \delta$ (voir paragraphe 2.2.1, chapitre 4):

$$\delta(p) = \frac{e_{24}}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} V(p) \quad (5.6)$$

La force maximale est obtenue à l'instant $t=0$ et vaut :

$$F_m(0) = m_u \frac{e_{24}}{T_1 T_2} V = \frac{e_{24}}{e_{22}} V = 7,57 \cdot 10^{-5} \cdot V \quad (5.7)$$

Pour une tension de 100 volts, une force motrice de 7,57 mN est appliquée.

Si les conditions de prise et de dépose précédentes sont vérifiées, les opérations de manipulation peuvent être réalisées comme indiqué sur la figure 5.23.

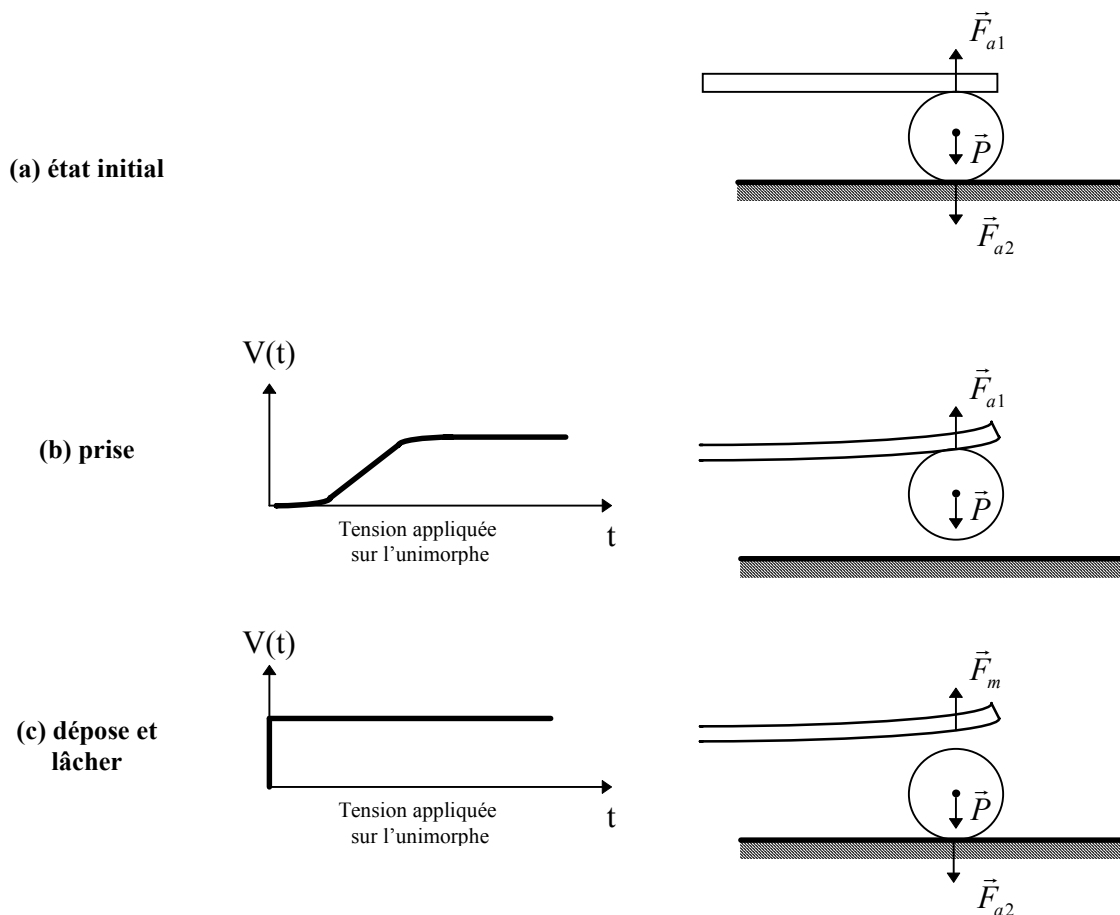


Fig. 5. 23 : Micromanipulation par adhésion

Une séquence vidéo disponible sur le CD-ROM joint montre un essai de micromanipulation par forces d'adhésion que nous avons réalisé (voir annexe).

7. Vers le concept de micro-usine

L'une des idées les plus ambitieuses et qui passionne les microroboticiens concerne la réalisation d'une micro-usine. En résumé, il s'agit d'envisager la réalisation d'une unité de production qui tiendrait dans une valise et qui serait capable de réaliser toutes les tâches nécessaires à la fabrication d'un ou plusieurs microsystèmes ! Outre les avantages de portabilité, d'économie d'énergie, de fiabilité et de réduction des coûts de fabrication, une telle réalisation représente un enjeu économique et stratégique majeur dans l'industrie mondiale actuelle caractérisée par l'omniprésence de la micro-électronique et des systèmes miniaturisés.

Bien qu'ils ne permettent pas de réaliser toutes les fonctions utiles en milieu industriel, les éléments décrits (micropince, système de positionnement 3D, micro-outils de découpe et de test...) peuvent, en poursuivant leur développement, jouer un rôle important dans la perspective de réalisation d'une micro-usine.

A titre d'exemple, la figure 5.24 représente une microcellule de découpe. Deux micropinces permettent de maintenir l'objet à découper. Un troisième bras porte un microcouteau destiné à effectuer l'opération de découpe. La figure 5.25 montre une station de test de microcircuits. Deux unimorphes équipés de sondes permettent de scruter la surface d'un microcircuit électronique pour effectuer des mesures électriques. Sur la figure 5.26, une

micropince est utilisée pour trier des micro-objets. L'utilisation de la mesure de force permet par exemple de réaliser des opérations de tri exploitant la compliance des micro-objets. On pourra ainsi séparer les objets métalliques de ceux en matériaux plus souples.

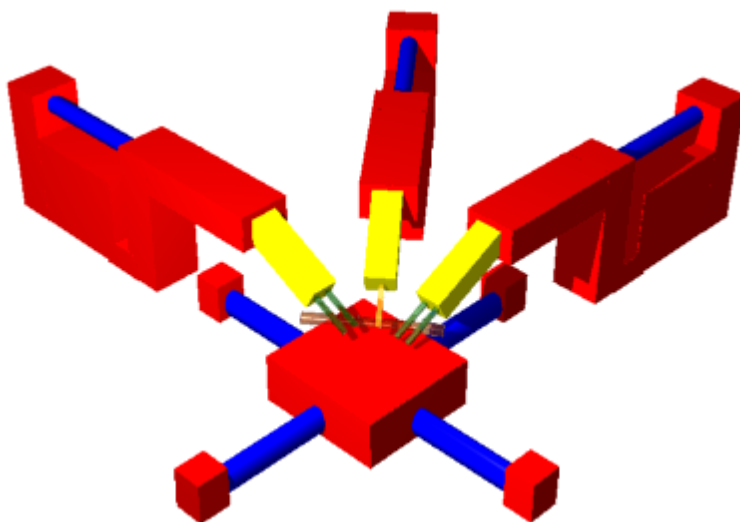


Fig. 5. 24 : Microcellule de découpe

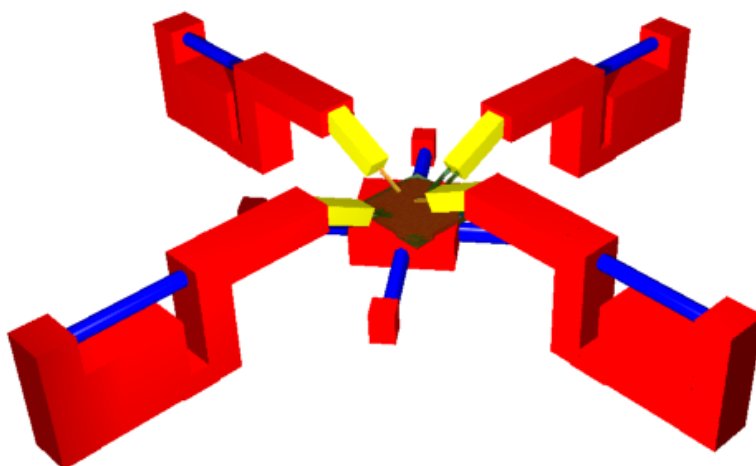


Fig. 5. 25 : Station de test de microcircuits

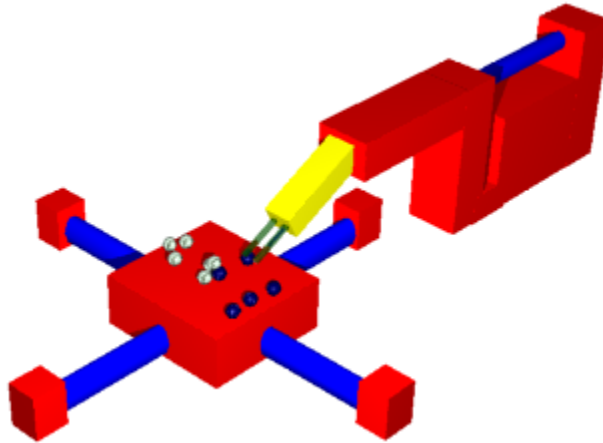


Fig. 5. 26 : Microcellule de tri

8. Conclusion du chapitre

L'exécution des actions de transport et de positionnement rentrant dans la réalisation d'une tâche de micromanipulation a nécessité le développement d'un système de positionnement dans un espace à trois dimensions. Ce système est actionné par des fils en AMF et peut être réalisé à très faible coût. La stratégie que nous avons adoptée consiste à répartir les degrés de liberté sur plusieurs éléments.

Les travaux effectués sur des cas réels ont montré que le système de micromanipulation conçu, constitué de la micropince, de la table de micropositionnement X-Y et de l'axe Z, permet de réaliser de manière efficace des tâches de micromanipulation. La table X-Y et l'axe Z permettent d'atteindre actuellement des résolutions de l'ordre du micron pour un domaine accessible de 6 mm^3 . Une prochaine version de cette table est en cours d'étude. La station complète de micromanipulation constitue un outil puissant et très flexible. Elle peut être utilisée soit par un opérateur humain par l'intermédiaire d'un joystick, soit de manière automatique. Outre leur utilisation pour la micropince, les unimorphes piézoélectriques peuvent servir à d'autres applications en microrobotique (micro-outils de découpe...).

Diverses améliorations peuvent être apportées au système réalisé pour améliorer ses performances. Par exemple, l'utilisation de matériaux isolants pour recouvrir l'extrémité des unimorphes ouvre des perspectives d'utilisation dans des milieux liquides.

Enfin, Les différents éléments conçus peuvent être utilisés pour réaliser des micromachines.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail mené dans le cadre de cette étude propose la conception et la réalisation d'un système de micromanipulation. Après avoir recensé les principaux actionneurs utilisables en microrobotique, notre choix s'est porté sur l'effet piézoélectrique. L'utilisation d'actionneurs piézoélectriques, plus particulièrement d'unimorphes piézoélectriques pour la réalisation d'une micropince s'est révélée être un bon choix (simplicité de fabrication, précision, rapidité...). La micropince est caractérisée par une résolution de positionnement largement compatible avec l'exécution de tâches dans le micromonde (10 nm) et une flexibilité qui autorise son utilisation dans diverses configurations. La mesure des forces appliquées sur les micro-objets manipulés est un autre grand atout de cette micropince. L'évaluation dynamique de ces forces permet d'intervenir dans des domaines mettant en œuvre des objets très fragiles (biologie, microélectronique...).

Au delà de son utilisation pour la micropince, l'unimorphe piézoélectrique constitue un actionneur performant pouvant jouer des rôles importants pour la réalisation de travaux dans le micromonde de manière plus générale. Ses qualités de rapidité et de précision en font un candidat potentiel pour l'emploi dans d'autres fonctions de la microrobotique. Le modèle dynamique développé permet de décrire de manière précise le comportement de l'unimorphe et facilite l'élaboration de lois de commande.

La micropince ne permet pas à elle seule de réaliser des tâches complètes de micromanipulation. Il faut également assurer des tâches de transport et de positionnement. Cette constatation nous a poussé à développer un système de micropositionnement constitué d'une table X-Y et d'un bras de positionnement (axe Z), tous deux actionnés par des fils en alliage à mémoire de forme. Pour cette partie, nous avons adopté une approche plus axée sur la fonction souhaitée que sur une modélisation précise de ces deux éléments. La stratégie qui consiste à répartir les degrés de liberté sur plusieurs éléments de conception simple semble bien adaptée à l'exécution de tâches de micromanipulation délicates. Le prototype conçu permet d'accéder à un espace de travail de 6 mm³ avec une résolution actuelle de l'ordre du micron. Le système de micropositionnement réalisé représente une alternative intéressante aux systèmes commercialisés utilisant des actionneurs piézoélectriques. Son point fort est son coût extrêmement faible.

Si les performances atteintes permettent déjà de réaliser des tâches de micromanipulation, diverses améliorations peuvent être apportées pour aboutir à un système encore plus compact et plus performant. La plus importante, concerne l'intégration de microcapteurs de position sur les unimorphes piézoélectriques. La commande en boucle fermée de la position des doigts de la micropince nécessite actuellement l'emploi d'un capteur laser externe. Cette contrainte réduit considérablement la mobilité de la micropince.

L'intégration de capteurs permettrait d'obtenir une micropince directement instrumentée, utilisable dans des environnements confinés. On peut également envisager d'intégrer l'électronique de commande sur la micropince pour en faire une pince intelligente, certainement plus attractive pour les applications industrielles. Par ailleurs, la table ainsi que le bras de micropositionnement nécessitent une modélisation complète fondée sur des modèles d'actionneurs à alliages à mémoire de forme afin d'améliorer les résolutions obtenues et d'augmenter l'immunité au bruit. L'utilisation de capteurs infrarouges pour l'asservissement en position ne semble pas être la meilleure solution. Ils doivent être remplacés par des capteurs plus précis.

Enfin nous pensons que les éléments réalisés tout au long de ce travail (micropince, table X-Y, bras de positionnement axe Z, micro-outils de découpe...) sont particulièrement bien adaptés à la réalisation de micromachines pour des micro-usines que certains considèrent déjà comme l'industrie du troisième millénaire.

Bibliographie

- [1] J. Abadie, N. Chaillet, C. LExcellent and A. Bourjault. Thermoelectric control of shape memory alloy microactuator : a thermal model. Proc. of SPIE, Smart Structures and Materials, Vol. 3667 pp. 326-336, Newport Beach CA USA, 1-5 mars, 1999.
- [2] J. Agnus, A. Bonvilain, N. Chaillet, Y. Haddab, P. Rougeot. Study and Development of a Station for Micromanipulation Tasks in the Microworld. Proc. of SPIE Microrobotics and Microassembly Symposium, 21-22 septembre 1999, Boston, Etats-Unis.
- [3] R. Allen Bowling. A Theoretical Review of Particle Adhesion. Particles on Surfaces I, K. L. Mittal, editor, pp. 129-142. 1988.
- [4] T. Arai and al. Basic Motion of a Micro Hand Module. Proc. Of the International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM), Tokyo, Japon, 1993, pp. 92-97.
- [5] T. Arai and al. Micro Hand Module Using Parallel Link Mechanism. Proc. Of the Japan U.S.A. Symposium on Flexible Automation, San Fransisco, U.S.A., 1992, pp. 163-168.
- [6] F. Arai, M. Ogawa and T. Fukuda. Indirect Manipulation and Bilateral Control of the Microbe by the Laser Manipulated Microtools. Proc. Of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2000, 31 octobre-5 novembre, 2000, Takamatsu, Japon.
- [7] F. Arai, T. Fukuda, H. Iwata and K. Itoigawa. Integrated Micro Endeffector for Dexterous Micromanipulation. Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, 1996
- [8] F. Arai and T. Fukuda. Microrobotics Based on Micro Physics - Design and Control Strategy Based on Attractive Force Reduction. Proc. SPIE Vol. 2906, pp. 184-195, Microrobotics: Components and Applications, Armin Sulzmann Ed., décembre 1996.
- [9] J.P. Aubry. Matériaux et composants piézoélectriques, Collection des techniques de l'Ingénieur, E 1 890.
- [10] A. Ballato, J.G. Smits. Network Representation for Piezoelectric Bimorphs. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol : 38, N° : 6 , pp. 595-602, 1991.
- [11] Y. Bellouard, R. Clavel, R. Gotthardt, J. E. Bidaux and T. Sidler. A New Concept of Monolithic Shape Memory Allow Micro-Devices Used in Micro-Robotics. Actuator 98. 6th International Conference on New Actuators, 17-19 juin 1998, Bremen, Allemagne.
- [12] H. Benzaoui. Modélisation thermomécanique et commande d'actionneurs en alliages à mémoire de forme pour la microrobotique. Thèse de doctorat N°710, Université de Franche-Comté, 1998.
- [13] K. Böhringer and al. Parallel Microassembly with Electrostatic Force Fields. Proc of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mai 1998.
- [14] B. Bona, M. Indri and A. Tornambè. Piezoelectric materials : continuous-time and discrete-time dynamic models and control. Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control, pp. 1383-1389. San Antonio, Texas, Etats-Unis. Décembre 1993.
- [15] M.C. Carrozza and al. Manipulating Biological and Mechanical Micro-Objects Using LIGA-Microfabricated End-Effectors. Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgique, 1998, pp.1811-1816.

- [16] M. Calin, N. Chaillet, J. Agnus, A. Bourjault and A. Janex. Compliant Microrobots with Two and Three Degrees of Mobility. *Journal of Condensed Matter News*, Vol. 7, n° 2-3, pp34-38, 1999.
- [17] N. Chaillet. La microrobotique : un nouveau champ d'investigations pour la robotique. *Revue Industrielle « J'automatise »*, N° 2, pp. 31-36, février-mars 1999.
- [18] N. Chaillet. La Microrobotique : Rencontre de la Robotique et des Microsystèmes. Deuxièmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'99, 27-29 septembre 1999, Montpellier.
- [19] N. Chaillet, J. Agnus, Y. Haddab, P. Rougeot, A. Bourjault. Components for the development of a station for manipulation tasks in the microworld. *Proc of the 3rd International Workshop on Microrobotics and Systems, IARP, Moscou, Russie.*
- [20] S.H. Chang and C.C. Chou. Electromechanical Analysis of an Asymmetric Piezoelectric/Elastic Laminate Structure : Theory and Experiment. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. Vol. 46, N° 2, pp. 441-451. Mars 1999.
- [21] P.B. Chu and K.S.J. Pister. Analysis of Closed-loop Control of Parallel-Plate Electrostatic MicroGrippers. *IEEE*, 1994, pp. 820-825.
- [22] A. Codourey, W. Zesch, R. Büchi and R. Siegwart. A Robot System for Automated Handling in Micro-World. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS '95, IEEE*, 1995.
- [23] E. F. Crawley and J. De Luis. Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures. *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10.
- [24] S. Fatikow and al. A Piezoelectric Mobile Robot for Handling of Microobjects. *Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japon*, 1995.
- [25] S. Fatikow, U. Rembold. *Microsystem Technology and Microrobotics*. Editions Springer-Verlag, 1997.
- [26] S. Fatikow, A. Buerkle, S. Fahlbusch and H. Woern. Sensor-Based Microrobot Control in a Micromanipulation Desktop-Station. *Proc. Of the International Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems*, pp. 43-48. 24-25 novembre, 1999, Moscou, Russie.
- [27] R. S. Fearing. Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling.
- [28] A. Ferreira, P. Minotti, P. Le Moal : New Multi-degree of Freedom Piezoelectric Mobile Robot for Handling of Microobjects. *Proceedings of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, pp. 189-192. Sendai, Japon, 27-29 septembre 1995.
- [29] M. Géraldin and D. Rixen. *Mechanical Vibration. Theory and Application to Structural Dynamics*. Ed Wiley. ISBN : 2-225-84168-3.
- [30] C. Girard, D. Van Labeke and J.M. Vigoureux. Van Der Waals Force Between a Spherical Tip and a Solid Surface. *Physical Review*, volume 40, number 18, The American Physical Society, 1989.
- [31] G. Greitmann and R. A. Buser. A micromachined Gripper with Force Feedback. *Proceedings of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, 27-29 septembre, 1995, Sendai, Japon.

- [32] G. Greitmann and R. A. Buser. A tactile Microgripper for Application in Microrobotics. Proc. SPIE Vol. 2906, pp. 2-12, Microrobotics: Components and Applications, Armin Sulzmann Ed., décembre 1996.
- [33] H. Grutzeck and L. Kiesewetter. Downscaling of Adhesive and Capillary Grippers for Micro Assembly. 6th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, Potsdam, 1-3 décembre, 1998.
- [34] Y. Haddab, N. Chaillet, A. Bourjault. A Microgripper Using Smart Piezoelectric Actuators. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2000, 30 octobre-5 novembre 2000, Kagawa University, Takamatsu, Japon.
- [35] Y. Haddab, N. Chaillet, G. Cabodevila, A. Bourjault. Devices for a Micromanipulation System. International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE'2000, Symposium on Microrobotics, 5-10 novembre 2000, Orlando, Floride, Etats-Unis.
- [36] Y. Haddab, M. Arous, M. Hoummady, N. Chaillet, A. Bourjault. Survey on Micromanipulation : Comparison between Physical Principles and Considerations on Future Micromanipulation Systems. Proc. of the 4th Japan-France, 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, 6-8 octobre 1998, Kitakyushu, Japon.
- [37] IEEE Standard on Piezoelectricity. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Std 176-1978, septembre 1978.
- [38] T. Inoue and al. Micromanipulation Using Magnetic Field. IEEE international Conference on Robotics and Automation, 1995, pp. 679-984.
- [39] IROS96 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop : Working in the micro-world : Systems to enable the manipulation and machining of micro-objects. 4-8 novembre, 1996 Osaka, Japon.
- [40] A. Krupa, G. Morel and M. de Mathelin. Modeling and vision based control of a micro endoscope head actuated with shape memory alloy wires. Proc. Of the International Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems. 24-25 novembre, 1999, Moscow, Russie.
- [41] H. Lehr and al. Microactuators as driving units for microrobotic systems Proc. SPIE Vol. 2906, pp. 202-210, Microrobotics: Components and Applications, Armin Sulzmann Ed., décembre 1996.
- [42] V. Loubere, S. Monneret and S. Corbel. Microfabrication par stéréolithographie. Actes des Deuxièmes Journées du pôle Microrobotique, Poitiers, Futuroscope, 4-5 février 1999.
- [43] M. MacKenzie, N. An, M. Giere, J. Stori and P. Wright. Experiences with shape memory alloy : robot grippers for sub-millimeter hard disc drive components. Proc. SPIE Vol. 2906, pp. 25-36, Microrobotics: Components and Applications, Armin Sulzmann Ed., décembre 1996.
- [44] E. Pernet, and al. Micromanipulateur pour l'alignement optique. 6^{ème} Congrès Européen de Chronométrie, Bienne, octobre 1996.
- [45] Recherches en microtechniques : réalités et perspectives. Institut des microtechniques et CETEHOR. Collection du livre vert. Janvier 1992.
- [46] N.N. Rogacheva, C.C. Chou and S.H. Chang. Electromechanical Analysis of a Symmetric Piezoelectric/Elastic Laminate Structure : Theory and Experiment. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol. 45, N° 2, pp. 285-294. Mars 1998.

- [47] Y. Rollot, S. Régnier, S. Haliyo, L. Buchaillot, J.C. Guinot and P. Bidaud. Experiments on micromanipulation using adhesion forces in unconstrained environment. Proc. Of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2000, 31 octobre -5 novembre, 2000, Takamatsu, Japon.
- [48] D. Royer et E. Dieulesaint. Ondes élastiques dans les solides, Tome 1, Propagation libre et guidée. Ed. Masson, Paris, 1996
- [49] R. A. Russell. A Robotic System for Performing Sub-millimetre grasping and Manipulation Tasks. Elsevier Science 1994.
- [50] R. Salim and H. Wurmus. Flexible Microgrippers for Manipulation of Microstructures. 6th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, Potsdam, 1-3 decembre, 1998.
- [51] J. G. Smits, W. Choi : The Constituent Equations of Piezoelectric Heterogeneous Bimorphs, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric and Frequency control, vol. 38, No. 3, Mai 1991, pp. 256-270.
- [52] M. R. Steel, F. Harrison and P. G. Harper. The piezoelectric bimorph : An experimental and theoretical study of its quasistatic response. J. Phys. D : Appl. Phys. Vol. 11, 1978.
- [53] A. Sulzmann, J.-M. Breguet and J. Jacot. Microvision system (MVS) : a 3D computer graphic-based microrobot telemanipulation and position feedback by vision. SPIE Vol. 2593, 1995.
- [54] M. Tabib-Azar. Microactuators, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [55] M. Tanaka, S. Chonan and Z.W. Jiang. Force Control of a Flexible Finger with Distributed Sensors and Piezoelectric Actuators. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 7, pp. 301-306. Mai 1996.
- [56] T. Tanikawa, K. Kaneko and K. Tanie. Researches on Micro Manipulation at MEL. Proc. Of the International Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems, pp. 127-132. 24-25 novembre, 1999, Moscou, Russie.
- [57] Y. Tatsue and T. Kitahara. Micro-Grip System. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 3, N°1, pp. 57-59.
- [58] H. Toshiyoshi, H. Fujita, T. Kawai and T. Ueda. Piezoelectrically Operated Actuators by Quartz Micromachining for Optical Application. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '93. Lauderdale, Floride. 7-10 février, 1993.
- [59] M. Touaibia. Conception et réalisation d'un micro véhicule capable de se déplacer dans un tuyau de très faible diamètre en vue de réaliser des tâches d'inspection. Thèse de Docteur de L'Université de Franche-Comté. N° d'ordre : 809. Année 2000.
- [60] Y. Yamagata and T. Higuchi. A Micropositioning Device for Precision Automatic Assembly using Impact Force of Piezoelectric Elements. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1995.
- [61] M. Yamaguchi and Al. Distributed Electrostatic Micro Actuator. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '93. Lauderdale, Floride. 7-10 février, 1993.

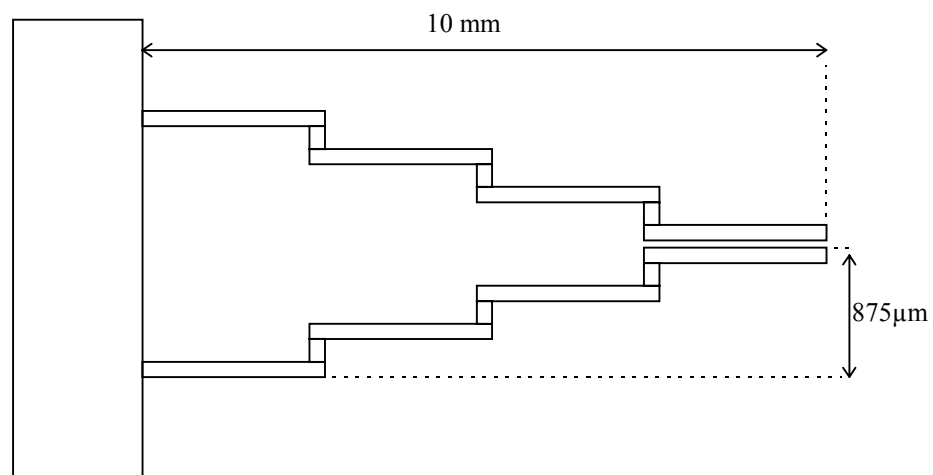
- [62] Y. Zhou and B. J. Nelson. Adhesion Force Modeling and Measurement for Micromanipulation. SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation. Boston, Massachusetts, Novembre 1998. (SPIE Vol. 3519)
- [63] Y. Zhou and B. J. Nelson. Lessons Learned in Characterizing Surface Effect Forces for Micropart Manipulation. Proc. Of the IARP 2nd Workshop on Microrobotics and Systems, pp. 77-88, 1998.
- [64] H. Seki. Modeling and Impedance Control of a Piezoelectric Bimorph Microgripper. Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 958-964. Raleigh, Juillet 1992.

Annexes

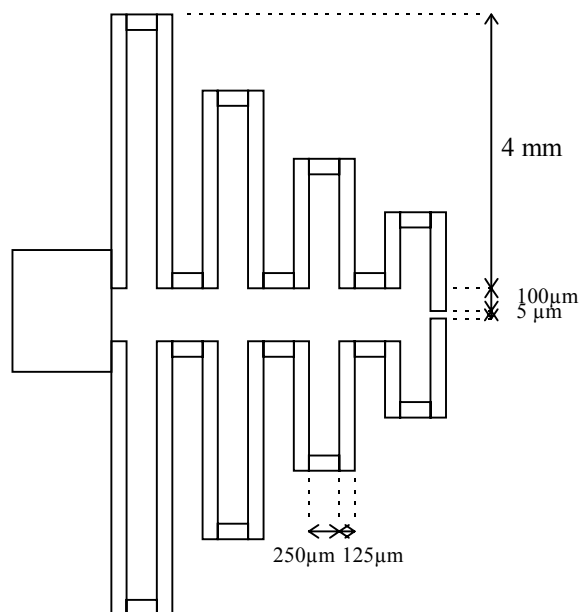
Annexe 1 :

Structure de micropinces sur substrat en matériau piézoélectrique

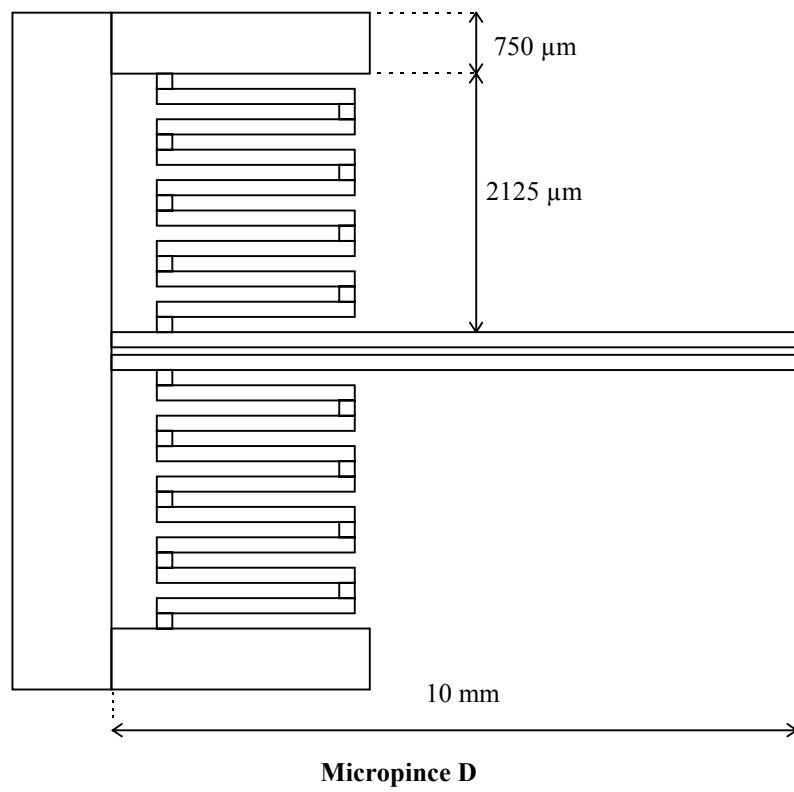
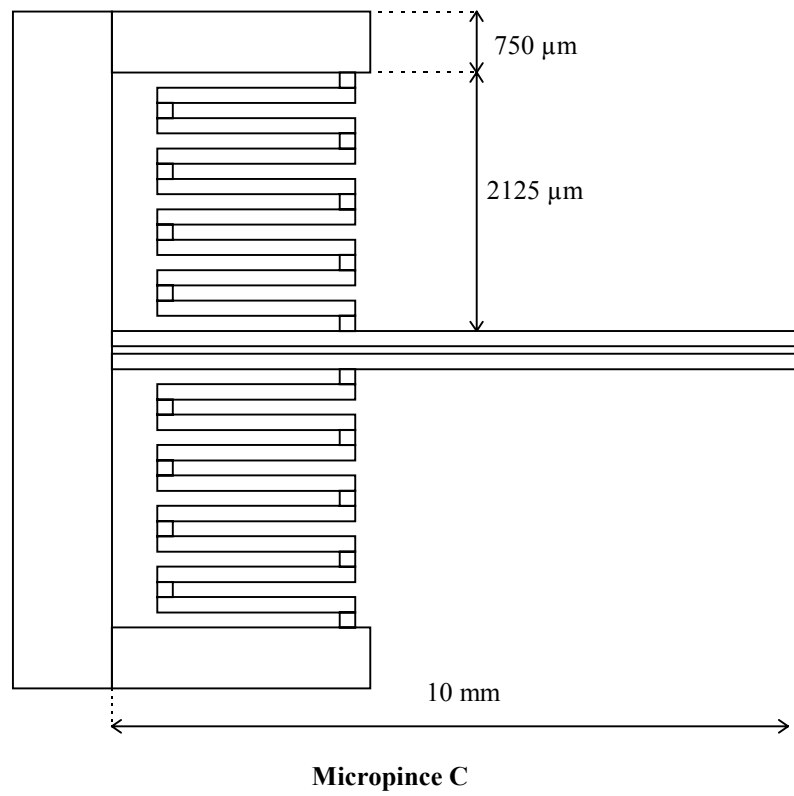
Dimensions des prototypes



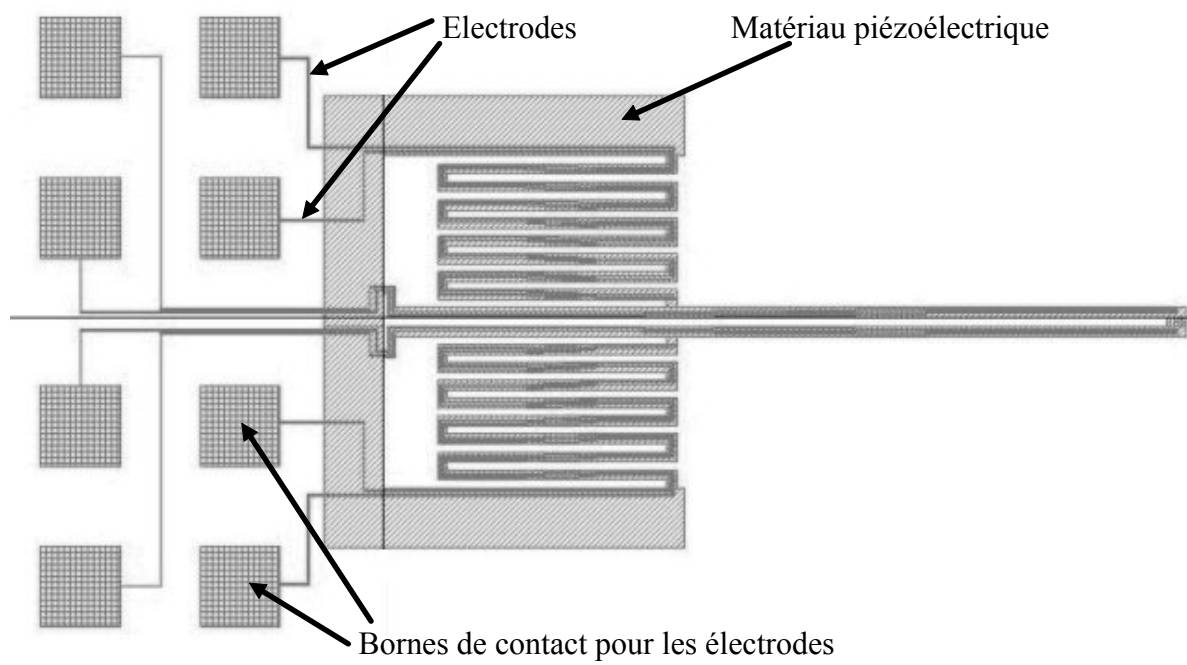
Micropince A



Micropince B



Exemple de structure complète



Annexe 2 : Calcul de l'observateur de force

Représentation d'état du système :

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{F} \\ \ddot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ k_1 & -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} & -\frac{1}{T_1 T_2} \\ T_1 T_2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ k_2 \\ 0 \end{pmatrix} V$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ \dot{\delta} \\ \delta \end{pmatrix}$$

Construisons un observateur réduit d'ordre 2 pour estimer la force F et la vitesse de déplacement $\dot{\delta}$.

La commande étant destinée à être réalisée sur calculateur numérique, on établit un modèle discret du système sous la forme :

$$X_{k+1} = P X_k + Q U_k$$

$$Y_k = C X_k + D U_k$$

Les matrices P et Q sont calculées à l'aide des expressions suivantes :

$$P = e^{AT}$$

$$Q = \int_0^T e^{A(T-\tau)} d\tau B$$

T représente la période d'échantillonnage.

Afin de ne pas alourdir les équations, nous utiliserons les notations suivantes pour les éléments des matrices P et Q :

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}$$

En définissant le vecteur $\underline{R}_k$ tel que :

$$R_k = \begin{pmatrix} F_k \\ \dot{\hat{\delta}}_k \end{pmatrix}$$

Nous pouvons réécrire l'équation d'état discrète précédente comme suit :

$$X_{k+1} = \begin{pmatrix} R_{k+1} \\ Y_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_k \\ Y_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} V_k$$

Dans cette expression :

$$P_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

$$P_{12} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_{23} \end{pmatrix}$$

$$P_{21} = \begin{pmatrix} p_{31} & p_{32} \end{pmatrix}$$

$$P_{22} = \begin{pmatrix} p_{33} \end{pmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}$$

$$Q_2 = \begin{pmatrix} q_3 \end{pmatrix}$$

on en déduit donc les relations :

$$R_{k+1} = P_{11}R_k + P_{12}Y_k + Q_1V_k$$

$$Y_{k+1} - P_{22}Y_k - Q_2V_k = P_{21}R_k$$

Pour observer R_k , on considère les équations précédentes comme étant celles d'un système qui aurait :

- R_k comme état,
- $P_{12}Y_k + Q_1V_k$ comme entrée,
- $Y_{k+1} - P_{22}Y_k - Q_2V_k$ comme sortie.

L'observateur a pour équation :

$$\hat{R}_{k+1} = P_{11}\hat{R}_k + (P_{12}Y_k + Q_1V_k) + G[(Y_{k+1} - P_{22}Y_k - Q_2V_k) - P_{21}\hat{R}_k]$$

G est le vecteur de l'observateur :

$$G = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix}$$

en posant :

$$z_k = \hat{R}_k - GY_k$$

l'équation de l'observateur peut s'écrire :

$$z_{k+1} = (P_{11} - GP_{21})z_k + [(P_{11} - GP_{21})G + P_{12} - GP_{22}]Y_k + (Q_1 - GQ_2)V_k$$

$$\hat{R}_k = z_k + GY_k$$

Que l'on peut encore écrire sous la forme :

$$z_{k+1} = (P_{11} - GP_{21})z_k + \begin{pmatrix} [(P_{11} - GP_{21})G + P_{12} - GP_{22}] \\ (Q_1 - GQ_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_k \\ V_k \end{pmatrix}$$

$$\hat{R}_k = z_k + \begin{pmatrix} G & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_k \\ V_k \end{pmatrix}$$

La dynamique de l'observateur est déterminée par les valeurs propres de la matrice :

$$F = (P_{11} - GP_{21}) = \begin{pmatrix} 1 - g_1p_{31} & -g_1p_{32} \\ p_{21} - g_2p_{31} & p_{22} - g_2p_{32} \end{pmatrix}$$

Ces valeurs propres peuvent être choisies en affectant des valeurs convenables aux variables g_1 et g_2 du vecteur de l'observateur G .

Annexe 3 :

Séquences vidéos disponibles sur CD-ROM

Le CD ROM joint contient des séquences vidéos d'opérations de micromanipulation et de microdécoupe. La liste des fichiers est donnée dans le tableau suivant :

Séquence	Nom du fichier	Format	durée
micromanipulation de fils métalliques de 100 μm de diamètre	micromanip1.mpg	mpeg	0mn53s
micromanipulation d'engrenages de montres d'axe 150 μm	micromanip2.mpg	mpeg	0mn52s
opération de microdécoupe	microdecoupe.mpg	mpeg	2mn41s
micromanipulation par adhésion d'un objet de 300 microns de diamètre	adhesion.mpg	mpeg	0mn39s

Résumé :

La micromanipulation constitue l'une des fonctions principales de la microrobotique. Elle concerne la manipulation d'objets dont la taille est comprise globalement entre 1 μm et 1 mm. La maîtrise de la manipulation d'objets à ces dimensions représente des enjeux stratégiques et économiques majeurs. La conception et la réalisation de micromanipulateurs se heurtent à un grand nombre de difficultés liées d'une part aux problèmes de fabrication et d'autre part à la complexité des interactions qui se produisent dans le micromonde. Le travail mené dans le cadre de cette étude concerne la conception et la réalisation d'un système de micromanipulation constitué d'une micropince à actionneurs piézoélectriques et d'un micropositionneur utilisant des fils en alliage à mémoire de forme (AMF). La micropince, pour laquelle un modèle physique du comportement dynamique a été développé, est caractérisée par une résolution de positionnement de chaque doigt meilleure que 10 nm, largement compatible avec l'exécution de tâches dans le micromonde. Elle permet également la mesure ou l'estimation des forces exercées sur les objets manipulés. Cette propriété est particulièrement intéressante lorsqu'il s'agit de saisir des micro-objets fragiles (organismes biologiques, microcomposants optiques, électroniques...). Le micropositionneur réalisé est constitué d'une table de micropositionnement et d'un bras portant la micropince. Un micro-objet peut être déplacé dans un volume de 6 mm³ avec une résolution de 1 μm . Plusieurs essais de micromanipulation ont été réalisés avec succès. Le système conçu est caractérisé par une grande simplicité de réalisation et par un coût extrêmement bas ce qui permet d'envisager son utilisation dans des applications industrielles et biomédicales.

Mots-clés :

microrobotique, micromanipulation, micropince, piézoélectricité.

Abstract :

The manipulation of very small objects is one of the most important tasks in microrobotics. Actually, mastering the manipulation of objects of a size from 1 μm to 1 mm is a big challenge. Micromanipulators are required in all fields where precise manipulation of very small objects must be performed. Designing tools able to handle small objects is a hard task because a lot of problems must be solved before obtaining operational micromanipulators. In this work, we propose the design and fabrication of a micromanipulation system made up of a piezoelectrically actuated microgripper and a micropositioning system actuated by SMA (Shape Memory Alloy) wires. The designed microgripper is characterised by a positioning resolution of each finger better than 10 nm. It allows the measurement or the estimation of the forces applied on the manipulated object. This is very important particularly when handling very fragile objects (biological cells, optical and electronic microcomponents...). A dynamic model of the microgripper has been developed. The designed micropositioning system is made up of a micropositioning table and a micropositioning arm. A microobject can be moved in a volume of 6 mm³ with a resolution of 1 μm . Various micromanipulation tasks have been successfully performed. Our system can be built easily with a very low cost and can be used to perform micromanipulation tasks in industrial and biomedical applications.

Keywords :

microrobotics, micromanipulation, microgripper, piezoelectricity.