

Microrobotique : micromanipulation et microrobots autonomes

Equipe microrobotique, rédacteur : A. Hubert

LAB UMR CNRS 6596
25 rue Alain Savary
F-25000 Besançon, France
arnaud.hubert@ens2m.fr

Microrobotique : micromanipulation et microrobots autonomes.

Equipe microrobotique, rédacteur : A. Hubert
LAB UMR CNRS 6596
25 rue Alain Savary
25000 Besançon

E-mail : . arnaud.hubert@ens2m.fr

Résumé

Cet article se propose de résumer les principales activités du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) en matière de micromanipulation et microrobotique mobile. En effet, le développement de plus en plus rapide de composants de taille submillimétrique nécessite de disposer d'outils de manipulation adaptés à ces petites dimensions. Les principes mis en œuvre pour développer ces microrobots sont assez nombreux car, à chaque échelle de dimensions, correspondent des principes d'action différents : pour une bonne adéquation et pour générer des efforts et déplacements acceptables, il est souvent nécessaire de changer de principe physique et de technologie. Des robots mobiles et autonomes sont également en cours d'études au LAB car, à de telles dimensions, le problème d'alimentation ainsi que la liaison mécanique ou par fils devient un problème conséquent qu'il est nécessaire de résoudre. De même, il est intéressant de profiter des avancées de la microélectronique et d'utiliser autant que possible de l'intelligence embarquée dans ces microsystèmes.

1. Introduction

Les avancées technologiques des deux décennies précédentes en matière de microtechnologie et même actuellement de nanotechnologies ont conduit à la réalisation de systèmes de plus en plus intégrés et aux dimensions de plus en plus réduites. Intervenir directement sur ces éléments micros à l'aide de processus macroscopiques est extrêmement délicat. Le problème de manipuler des objets microscopiques à l'aide d'actionneurs macroscopiques avait été souligné par W.S.N. Trimmer, il y a maintenant presque quinze ans, dans un article visionnaire [1]. Ce papier résumait bien le problème de la manipulation d'objets de dimensions millimétriques – en l'occurrence des chips – à l'aide d'un robot de taille métrique :

« cette différence d'un millier de fois entre la taille d'un macrorobot et du chip est équivalente à utiliser un bulldozer pour déplacer un morceau de sucre. La précision correspondante requise est équivalente à positionner ce morceau de sucre avec une précision de l'épaisseur d'un cheveu ».

Ce simple exemple montre qu'utiliser des systèmes de manipulation d'un ordre de grandeur comparable à l'objet manipulé semble inéluctable. Les gains attendus ne le sont pas seulement en terme de précision mais également en

terme de prix, de consommation – rendement – et même au niveau de la place gagnée dans les locaux (notamment les salles blanches où sont réalisés les microsystèmes). C'est dans cette optique que le LAB s'est intéressé à la microrobotique dès le milieu des années 90.

Manipuler, assembler et même fabriquer des objets dans de telles dimensions impose d'utiliser les lois de la physique d'une manière différente de celle que nous utilisons à l'échelle macroscopique. En effet, les lois d'échelle font que, bien souvent, certains phénomènes négligeables à notre échelle ne le sont plus dans des dimensions plus réduites. L'exemple le plus frappant est l'influence des forces d'adhésion en micromanipulation. Inversement, d'autres forces, notamment celle de gravité, deviennent souvent négligeables dans ce micromonde. Les activités microrobotiques couvertes par le LAB concernent essentiellement deux domaines : la micromanipulation et la microrobotique mobile. Ces deux thèmes seront développés dans cette article.

2. Micromanipulation

Le premier axe de recherche en microrobotique du LAB regroupe non seulement la micromanipulation dite « classique » de micro-objets (développement de préhenseurs et de positionneurs) mais également la manipulation en milieu liquide.

2.1 Micromanipulation « classique »

Par « classique », nous entendons une manipulation dans un milieu non liquide ; ce milieu particulier sera abordé au paragraphe suivant. Entre les robots de taille classique et le monde atomique, il existe toute une échelle de dimension. A chacune de ces dimensions, correspondent des éléments et principes physiques qui sont plus ou moins bien adaptés à la création d'efforts et de mouvements. Cette plus ou moins bonne adaptation est en grande partie due aux facteurs d'échelles mis en jeu dans les lois physiques (forces de surface, de volume...). Pour exploiter au mieux les avantages de chacun de ces principes d'action, il est nécessaire d'en étudier et d'en utiliser un certain nombre [2].

En partant des plus grandes dimensions vers les plus réduites, nous décrirons d'abord une table de positionnement utilisant des alliages à mémoire de forme (AMF), un translateur piézoélectrique au fonctionnement

sensiblement similaire aux moteurs à ultrasons (dimensions millimétriques); un micropréhenseur piézoélectrique, nommé microrobot « on chip » (taille milli et submillimétrique); enfin l'utilisation d'un microscope à force atomique (AFM) comme micromanipulateur pour le monde micro et submicrométrique.

2.1.1 Micropositionnement et translateurs

A cette échelle de dimension, deux technologies sont actuellement développées. Tout d'abord, une table de type XY actionnée par des alliages à mémoire de forme (AMF, essentiellement NiTi) [3]. Ces matériaux ont la particularité de changer de forme – ici, de longueur – par modification de leur structure cristallographique (martensite/austénite) sous l'action d'un échauffement ou d'un refroidissement. Nous avons réalisé une table de taille réduite dont la principale caractéristique est de pouvoir être produite à de très faibles coûts et ceci pour des résolutions et précisions de l'ordre du micron. Cette table est actionnée par des fils en AMF dont la température – et donc la longueur – peuvent être contrôlées par le courant injecté. La dernière version de cette table est représentée sur la Figure 1.

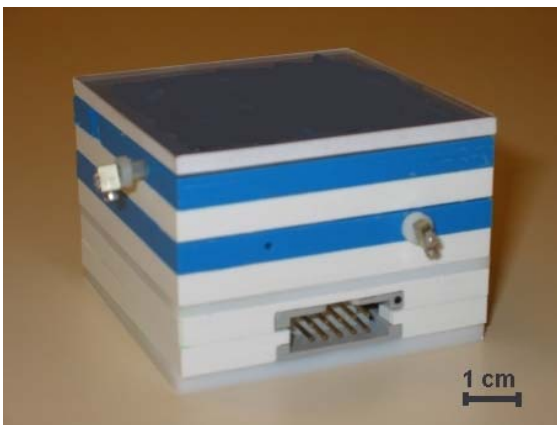


Figure 1. Table de micropositionnement

Suite à des travaux du laboratoire LMARC de Besançon, nous avons conçu la structure fonctionnelle initiale d'un translateur piézoélectrique puis nous l'avons réalisé (Figure 2) [4]. Ce dernier est composé d'une plaque rectangulaire dont différents modes de vibrations peuvent être excités par des céramiques PZT collées en surface. Par une combinaison judicieuse de ces différents modes de résonance et une transmission du mouvement au sol au travers de pieds et d'un effet « stick and slip », nous pouvons contrôler les trois degrés de liberté du plan d'évolution du translateur : deux translations X et Y et une rotation autour de l'axe Z. Ce système de déplacement est actuellement utilisé comme palette de transport dans une cellule de micro-assemblage (Figure 3) [5].

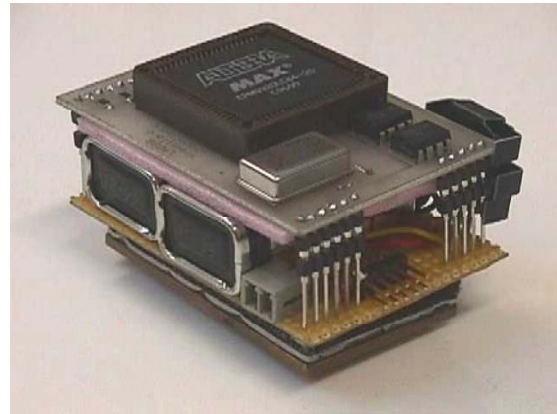


Figure 2. Piézotranslateur.

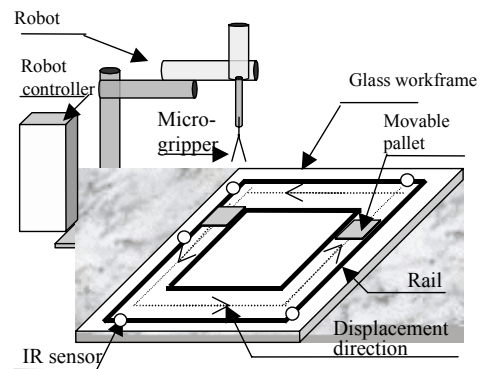


Figure 2. Cellule de micro-assemblage

L'effort de recherche sur ces deux systèmes a principalement porté sur le développement de la commande. En effet, pour le premier système, les AMF sont de matériaux au comportement fortement non-linéaire (hystérésis fort); une commande spécifique a du être développée pour obtenir un contrôle fin de la déformation. De plus, si l'échauffement est facilement contrôlable par un contrôle en courant, le refroidissement l'est beaucoup moins puisqu'il provient essentiellement d'une convection naturelle, donc d'un phénomène non contrôlé. Afin d'élargir la bande passante relativement basse de tels systèmes (quelques hertz), une commande innovante du refroidissement basé sur l'effet Peltier a été développée et mise en œuvre sur un démonstrateur spécifique. Pour le système du translateur, la difficulté rencontrée est liée à l'utilisation d'un effet « stick and slip » entre le pied et la surface. Rappelons que lors de l'utilisation d'un effet « stick and slip », une bonne maîtrise ou modélisation des propriétés tribologiques de ce contact est nécessaire pour pouvoir garantir une précision suffisante.

2.1.2 Le microrobot « on chip »

A une dimension inférieure, le LAB développe un préhenseur utilisant une technologie de type bilame – ou bimorphe – piézoélectrique à 4 degrés de liberté : deux translations sur chaque doigt. Contrairement au fonctionnement « stick and slip », ce système permet un

déplacement continu. Le nom de microrobot « on chip » lui a été donné car il est la première version d'un concept récemment développé au LAB : la volonté de réaliser des composants microrobotiques interchangeables à l'image de ce que sont les puces et composants électroniques (cf. Figure 4). Ce système est actuellement contrôlé par un processeur DSP et une interface PC qui permet de l'actionner à l'aide d'un simple joystick. Ce dispositif a récemment été récompensé d'un micron d'or au salon international des microtechniques MICRONORA 2002.

Ce préhenseur est actuellement adapté pour la mise en œuvre d'un système de chargement d'échantillons dans un microscope électronique à balayage. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un programme de recherche européen. Notons également que ce composant est conçu de manière essentiellement monolithique avec de nombreux process issus des microtechnologies et des techniques dites de salle blanche.

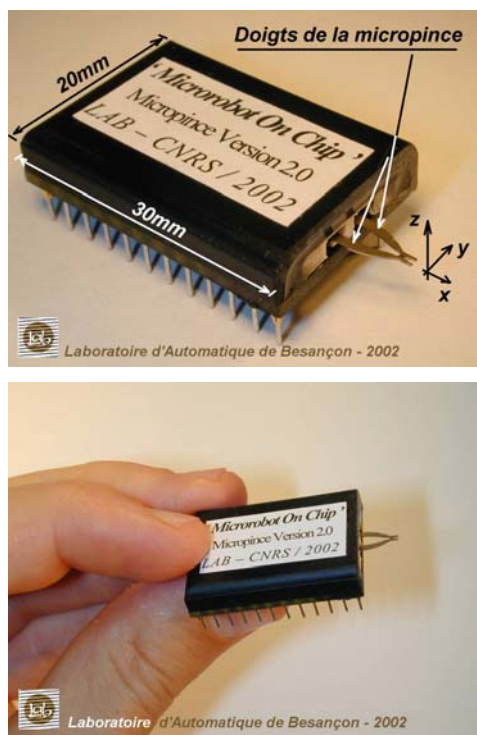


Figure 4. Microrobot « on chip »

2.1.3 Utilisation de microscope à force atomique

Bien qu'en principe utilisé comme moyen de mesure et de visualisation à l'échelle nanométrique, le microscope à force atomique (AFM) peut également être utilisé comme un générateur ou capteur d'effort. C'est essentiellement dans cette seconde application qu'est employé l'AFM du LAB. Dans l'introduction de cet article, nous avons rappelé que, dûs aux lois d'échelle, les principes d'action utilisés dans le micromonde étaient généralement différents de ceux utilisés à l'échelle macroscopique. Ainsi, en raison de la relative jeunesse du secteur microrobotique, il existe actuellement, des lacunes certaines dans la modélisation et la compréhension des efforts intervenants à l'échelle micro ou submicrométrique. L'AFM est alors l'un des instruments les mieux adaptés à la caractérisation et à la

mesure de ces différents efforts. Notre système de mesure se compose d'un AFM commercial accouplé à un porte-échantillons motorisé à trois degrés de liberté. Une image optique est obtenue au moyen d'un microscope et d'une caméra CCD. Un système haptique reposant sur un joystick permet d'obtenir un retour de l'effort appliqué par l'AFM. Ce dispositif permet une meilleure sensation lors de manipulations, notamment pour détecter des contacts entre objets déplacés sous l'AFM.

2.2 Manipulation en milieu liquide

Un des secteurs les plus demandeurs en termes de micromanipulateurs est le secteur biomédical. Une des particularité de ce secteur d'activité est qu'une grande partie des manipulations doivent être réalisées en milieu liquide. En effet de nombreux objets biologiques ne peuvent survivre que dans un milieu liquide adapté (liquide sanguin, sérum physiologique, eau...).

Les actionneurs décrits précédemment sont assez mal adaptés aux milieux liquides, c'est la raison pour laquelle de nouveaux concepts ont été développés. En milieu liquide, l'alimentation et le contrôle direct d'un préhenseur ou d'un pousseur n'est pas toujours aisé, voir même dans certains cas impossible ; le mieux est alors de développer, soit des systèmes autonomes, soit des systèmes téléopérés. Parmi les différentes solutions envisageables, un principe d'action électromagnétique a été retenu. Les lois d'échelle n'étant pas particulièrement favorable aux forces d'origine électromagnétique (de l'ordre de quelques dizaine de micromètres minimum), une contrainte minimale doit être appliquée aux dimensions des objets manipulables. Cette limitation n'est cependant pas très contraignante puisque de nombreux objets biologiques sont dans cette plage de dimensions (pour les objets plus petits, il existe d'autres systèmes performants, notamment le « laser trapping »). Le système développé se compose de deux plaques transparentes entre lesquelles est emprisonnée l'objet à manipuler. Ce dernier baigne dans un liquide adéquat. Un pousseur électromagnétique (actuellement, une pastille de Nickel de dimensions variables) est également présent dans le liquide. Ce dernier déplace l'objet biologique par poussée lorsqu'il est entraîné par un aimant permanent placé sous la plaque. Cet aimant est lui-même entraîné par une table de positionnement de grande résolution (Figure 5) [6].

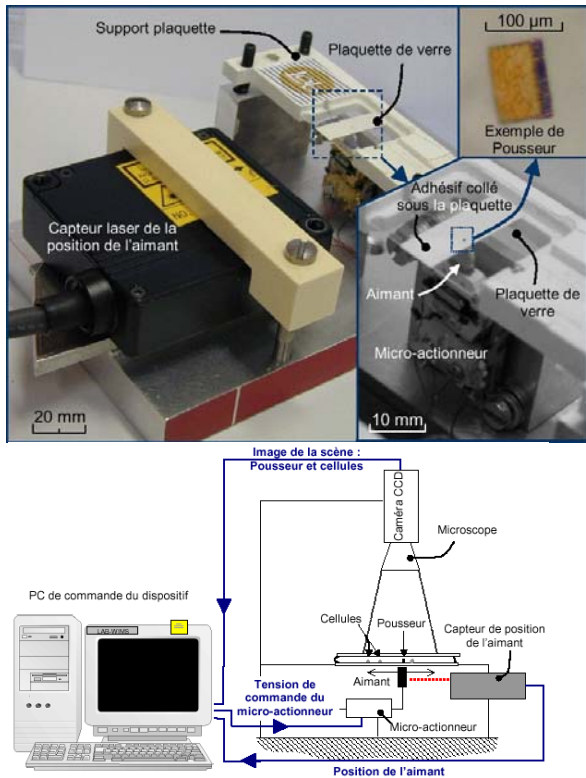


Figure 5. Système de manipulation en milieu liquide

Un dispositif de vision permet une surveillance de la tâche de manipulation. Dans la première version, un capteur laser permettait une mesure précise de la position de l'aimant, le remplacement du premier système de positionnement par une table XY motorisée et instrumentée nous permet désormais de nous affranchir de ce capteur laser. Un système de commande original de type micro/macro a été développé afin de résoudre les problèmes de précision qu'induisait l'interaction aimant/pousseur. La précision, de l'ordre du micron, est tout à fait acceptable, elle pourrait cependant être améliorée si nous pouvions minimiser les frottements pousseur/plaque qui provoquent des mouvements en saccades et réduisent la régularité du mouvement. Des études sont actuellement en cours pour trouver des solutions techniques permettant de minimiser au maximum ces frottements parasites et notamment par des principes de lévitation.

Quelques exemples de fonctionnement sont représentés sur la figure 6. La première partie de la figure montre la manipulation de billes en polystyrène de 50 microns. La seconde partie de la figure montre un exemple d'applications biomédicale: la manipulation d'ovocytes humains pour la fécondation in vitro.

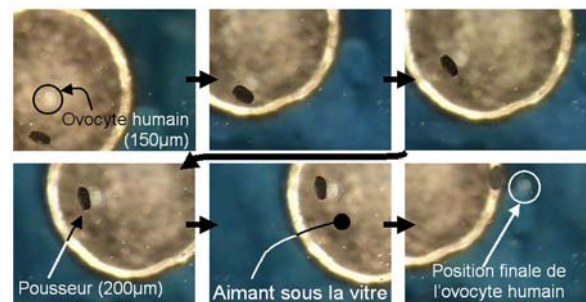
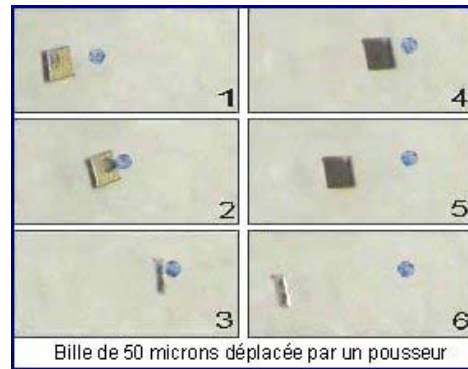


Figure 6. Micromanipulation d'une bille en polystyrène et d'un ovocyte

3. Microrobotique mobile

Les applications de microrobotique mobile du LAB sont essentiellement inspirées du monde biologique et, en particulier, de la source inépuisable d'inspiration que sont les insectes. Ainsi, les activités récentes du LAB dans ce domaine portent sur la réalisation, d'une part, de microrobots à pattes de type insecte et d'autre part sur le développement de leurs artères artificielles permettant de proposer aux biologistes une interface entre le monde humain et le monde des insectes.

3.1 Développement de microrobots insectes

Ce projet très ambitieux a pour but, non seulement de développer le plus petit microrobot insecte possible mais également d'apporter au LAB une compétence dans les processus issus des microtechniques et de la microélectronique. Le concept à la fois simple et ambitieux est de réaliser un microrobot à 6 pattes d'une taille millimétrique (Figure 7) [7].

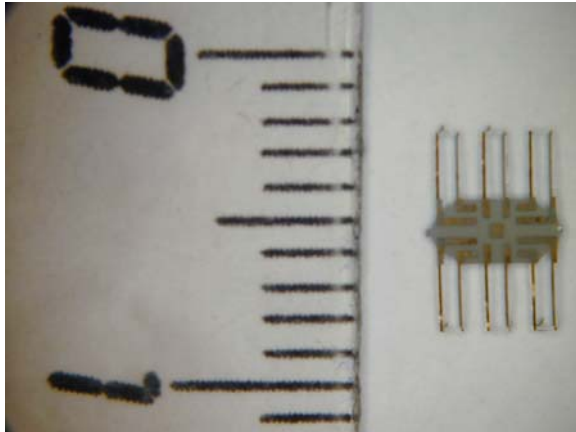


Figure 7. Microrobot à pattes de type insecte

Après différents essais, le principe d'action qui a retenu notre attention est celui du bilame thermique. Celui-ci est constitué de deux couches superposées, une en résine SU8 et une seconde en silicium ; les deux étant séparées par une couche mince de matériaux conducteurs (or ou cuivre) (voir figure 8). Ce microrobot, pour l'instant non autonome en énergie et en commande, n'a pas encore pu être testé en fonctionnement réel sur sol. Il a cependant été testé en l'alimentant de l'extérieur par des pointes de touches. Les caractéristiques géométriques de ce robot sont une surface de $0,21 \text{ cm}^2$ pour une hauteur de $0,05 \text{ cm}$. Sa vitesse théorique est de $102 \text{ microns par seconde}$ pour un poids propre de $2,33 \text{ mg}$ et une charge transportable de $5,3 \text{ g}$. A vide, chaque patte consomme 360 mW par pas pour une longueur de pas de 37 microns . Ces résultats placent notre microrobot de manière très convenable vis à vis de l'état de l'art dans ce domaine. Nous pouvons notamment dire qu'il est, à notre connaissance, le plus petit robot à pattes du monde.

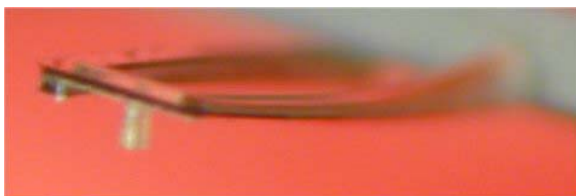


Figure 8. Photographie d'une patte

3.2 Développement de leurres artificielles

L'objectif de cette étude est la conception et la réalisation de microrobots reproduisant les modalités sensorielles des insectes afin de permettre aux biologistes d'étudier les interactions insectes/microrobots et de comprendre comment sont modifiés les comportements collectifs des insectes (phénomènes d'agrégation, déplacements collectifs) lorsque ces microrobots sont insérés au sein de la colonie.

Les progrès de l'électronique et de la microrobotique permettent aujourd'hui de disposer pour la première fois de leurres autonomes, d'une taille compatible avec celle d'espèces grégaires et sociales d'insectes et dotés de comportements réactifs aux stimuli émanant de l'environnement. La mise au point de ces leurres passe par le développement d'interfaces insecte/robot en exploitant différentes modalités sensorielles (tactile, vibratoire, chimique...) utilisées par les insectes considérés. Si l'on prend l'exemple des blattes, la communication entre les individus passe par le biais de l'échange de signaux tactiles, vibratoires ou chimiques (phéromones).

Il a été décidé, dans un premier temps, de focaliser nos recherches sur la conception d'antennes. Les blattes disposent d'antennes de $4 \text{ à } 5 \text{ cm}$ de longueur battant à une fréquence de quelques hertz avec un battement de $1 \text{ à } 2 \text{ cm}$. Nous étudierons par la suite la communication par vibration. En revanche, la communication chimique étant trop complexe à reproduire, elle ne sera pas développée. Il a également été décidé de recouvrir le robot d'une cire imprégnée des phéromones de blatte pour permettre une acceptation du robot dans la colonie. La plate-forme de base utilisée pour intégrer l'ensemble des capteurs et actionneurs est le microrobot ALICE développé à l'EFPL avec lesquels nous allons collaborer sur la mise au point de leurres artificiels (Figure 9).



Figure 9. Photographie d'un leurre

Le premier système antennaire développé a consisté à utiliser une fibre optique recouverte d'un dépôt métallique (or) afin de la rendre conductrice. Cette «antenne» passe dans un anneau conducteur, et lors d'un contact avec un obstacle, celle-ci se déforme et vient toucher l'anneau, fermant ainsi un circuit électrique. La fibre optique a été

choisie pour ses caractéristiques mécaniques, à la fois souple et résistante, même pour une fibre de faible diamètre (de 125 μm à 250 μm pour celles employées ici).

L'actionnement retenu pour le déplacement de l'antenne est un moteur électromagnétique. Il s'agit du schéma classique bobine/aimant faisant appel aux forces de Laplace. L'utilisation d'un moteur de montre de type LAVET semble intéressante à plus d'un titre. D'abord, nous savons qu'il consomme peu d'énergie. Ensuite, il est possible d'obtenir un déplacement et une vitesse de battements conforme au cahier des charges. L'implantation des stratégies de comportement inspirées des insectes, notamment des blattes, a été réalisée sur les microcontrôleurs des microrobots Alice. Ces travaux sont encore en cours de développement.

4. Conclusions

Cet article s'est proposé de faire une synthèse de différentes activités microrobotiques de LAB. Comme il a été mentionné précédemment, un grand nombre de principes d'action sont mis en œuvre. Ceci souligne le besoin de multidisciplinarité que requière la conception de microrobots. Concevoir et réaliser de tels systèmes nécessite des connaissances, non seulement en mécanique et robotique, mais également en physique, en électronique, en commande ainsi qu'une certaine maîtrise des process de fabrication microtechniques et microélectroniques. Cette pluridisciplinarité en fait un domaine à la fois complexe et très intéressant où la possibilité d'innovation est importante. Parmi les différents systèmes exposés, certains sont fonctionnelles et font déjà l'objet d'un transfert technologiques, d'autres n'en sont encore qu'au stade de la recherche. Cependant, ils sont complémentaires et forment un tout nécessaire à la maîtrise de ce domaine complexe. Ils permettent ainsi de développer la compétence globale du LAB en terme de microrobotique et de micromanipulation.

Références

- [1] W.S.N. Trimmer, "Microrobots and micromechanical systems", *Sensor and actuators*, 19 :267-287, 1989.
- [2] Alain Bourjault, Nicolas Chaillet (Editeurs), "La microrobotique", Hermes-Lavoisier, Paris, 2002.
- [3] Y. Haddad, N. Chaillet, G. Cabodevila, A. Bourjault "Device for a micromanipulation system", *Proc. of the Int mechanical engineering congress and exposition – symposium on microrobotics*, Orlando Floride USA, nov. 2000.
- [4] K. Rochdi, S. Dembélé, "Static behavior of a piezoelectric microrobot", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Nanotechnology*, Maui Hawaii USA, pp 28-30, oct. 2001.
- [5] K. Rochdi, Y. Haddad, S. Dembélé, N. Chaillet, "A microassembly workcell", *Proc. of the Int. precision assembly seminar*, Bad Hofgastein Austria, march 2003.
- [6] M. Gauthier, E. Piat, "Control of a particular coarse-fine micropositioning system based on a magnetic actuation", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and systems*, Lausanne Switzerland, pp 1748-1753, vol 2, sept. 2002.

- [7] A. Bonvilain, N. Chaillet, " Microfabricated thermally actuated microrobot", to be published in the *Proc. of the IEEE ICRA2003 Conference*, Taipei Taiwan, May 2003.