



**HAL**  
open science

## Microrobotique pour composants micrométriques : les challenges pour leur manipulation et leur assemblage.

Philippe Lutz, Michaël Gauthier, Stéphane Régnier

### ► To cite this version:

Philippe Lutz, Michaël Gauthier, Stéphane Régnier. Microrobotique pour composants micrométriques : les challenges pour leur manipulation et leur assemblage.. 7è Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'09., Nov 2009, Neuvy-sur-Barangeon, France. pp.1-14. hal-00433232

**HAL Id: hal-00433232**

**<https://hal.science/hal-00433232>**

Submitted on 18 Nov 2009

**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.

# Microrobotique pour composants micrométriques : les challenges pour leur manipulation et leur assemblage

Philippe Lutz, Michaël Gauthier

FEMTO-ST

Département AS2M, 24 rue Alain Savary

25000 Besançon

Tél. : 0381402785,

E-mail : philippe.lutz@femto-st.fr

Stéphane Régnier

ISIR

4 place Jussieu, boîte courrier 173

75252 Paris Cedex 05

Tél : 0144272879,

E-mail : stephane.regnier@upmc.fr

*Résumé* - La miniaturisation de nombreux produits manufacturés est une réalité et ce processus s'accroît. Ceci conduit la communauté scientifique à proposer des systèmes de production permettant de fabriquer des systèmes hybrides, c'est-à-dire dont les composants proviennent de plusieurs processus de fabrication ou de microfabrication, et ayant des structures 3D complexes afin d'intégrer plusieurs fonctions dans des volumes les plus réduits possibles. Le micro-assemblage réalisé avec des systèmes microrobotiques est une réponse pertinente à ce besoin de produits micromécatroniques.

A travers une présentation des principales activités dans ce domaine dans le monde, on peut constater que la mise en œuvre réelle de systèmes pour manipuler et assembler de façon automatisée (ou en partie) des composants sous-millimétriques reste un véritable challenge si l'on veut cumuler des propriétés de haute précision, de fiabilité, de productivité et de flexibilité. D'autre part, l'intérêt de groupes industriels Européens et l'émergence de start-ups montrent que l'assemblage de composants de taille sous-millimétrique est un enjeu sociétal.

En terme de prospective, le passage de la barrière dimensionnelle des 100  $\mu\text{m}$  est étudié mais également celui des 10  $\mu\text{m}$  qui représente encore une nouvelle étape à franchir du fait notamment de la nécessité d'utiliser des moyens de microscopie sous vide pour visualiser les objets à manipuler ou assembler. Que ce soit pour la manipulation de nanotubes de carbone, de lamelles d'échantillons pour la microscopie à transmission ou encore de cellules biologiques, le besoin est de plus en plus pressant pour certains laboratoires de recherche publics ou privés. Quelques exemples sont donnés.

*Mots-clé* – **micromanipulation, micro-assemblage, microrobotique.**

## I. INTRODUCTION

Nombreux sont les produits manufacturés pour lesquels la miniaturisation est un objectif. Cela est vrai dans de nombreux domaines d'application : des produits grand public aux produits très spécialisés, par exemple ceux du domaine médical. La figure 1 montre un spectromètre assemblé à l'institut ARRI (Automation and Robotics Research Institute) au Texas et constitué d'éléments optiques microfabriqués, dans un volume total de 1 cm x 1 cm x 0,15 cm. Un premier impact de la miniaturisation se porte sur les composants de ces produits qui atteignent des dimensions sous-millimétriques. Lorsque les produits reposent sur des processus de fabrication différents et parfois incompatibles ou sur des architectures véritablement volumiques, l'assemblage de leurs constituants devient incontournable. Lorsque ces composants ont des dimensions sous millimétriques, leur manipulation se heurte à des effets d'échelle qui vont croissant au fur et à mesure que la taille diminue. En effet, l'échelle physique de la micromanipulation, que l'on définit comme la manipulation d'objets d'une taille de l'ordre de 10 à 10<sup>4</sup>  $\mu\text{m}^3$  ou dont leur plus grande dimension varie de quelques dizaines à quelques centaines de  $\mu\text{m}$ , se trouve proche de la limite inférieure de la mécanique classique. En général, les lois de la physique newtonienne sont toujours valables et les effets quantiques négligés : l'échelle considérée se situe donc à la lisière des

deux espaces classiques dont les limites sont mal connues. La différence majeure avec l'échelle macroscopique est due aux origines des forces considérées. Si l'on considère une longueur  $L$  caractéristique d'un problème, la valeur de  $L^3$  étant inférieure à celle de  $L^2$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ , les forces volumiques deviennent négligeables devant les forces surfaciques pour les objets de dimensions microscopiques. Ainsi, ces forces surfaciques, dont les effets sont négligeables à l'échelle macroscopique, excepté pour les forces de frottements, modifient de façon drastique la mécanique du contact et les interactions entre les différents milieux. L'état d'adhérence entre deux corps microscopiques est prédominant à cette échelle, engendré par les différents phénomènes d'adhésion. Ce type d'effet est décrit en détail dans [1] et [2].

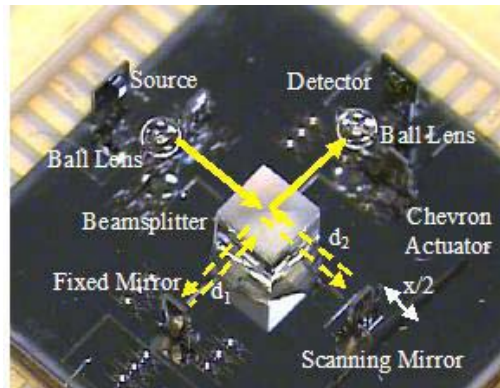


Figure 1 : spectromètre assemblé à l'institut ARRI.

L'effet d'échelle affecte l'ensemble des fonctions robotiques, l'actionnement, la perception, la préhension et la commande. Ces fonctions ne peuvent donc être directement transférées de la robotique conventionnelle et nécessitent l'étude de nouveaux principes adaptés à ce paradigme.

L'intégration de ces fonctions dans des systèmes complets de micromanipulation et de micro-assemblage est également une ambition sur laquelle de nombreux développements ont été faits mais pour laquelle l'obtention d'une cellule ou d'un ensemble de cellules associant précision, répétabilité, sûreté de fonctionnement, efficacité et flexibilité reste un challenge. De tels systèmes complets sont appelés micro-usine.

Dans cet article, les principales fonctions à remplir par une telle cellule et entrant dans le champ de la robotique et de la péri-robotique sont passées en revue (manipulation, préhension, transport, perception) et un focus sur quelques travaux en cours est donné. Cette partie se conclue par une liste des propositions de micro-usines à travers le monde.

Le passage sous la barrière des  $10 \mu\text{m}$  pour les objets manipulés est un enjeu scientifique car des nouvelles difficultés apparaissent du fait de l'effet d'échelle. On entre ici dans le domaine de la nanorobotique comme solution à la manipulation de tels objets. Dans ce papier sont indiqués des axes scientifiques relatifs à cette nanorobotique et une solution de nanomanipulateur est présentée.

## II. QUELQUES ACTIVITES A TRAVERS LE MONDE ET EN FRANCE

### A. La fonction de manipulation – microrobots

Deux types de microrobots sont conçus : une première catégorie est fondée sur l'utilisation d'actionneurs continus, des matériaux actifs dont la déformation est utilisée directement ou amplifiée, et une seconde sur l'utilisation d'actionneurs incrémentaux. Pour les premiers, la réalisation est simple et présente une très grande dynamique de déplacement mais leur course est limitée, leur commande est complexe (modèles non-linéaires et non stationnaires), leur utilisation oblige à mettre en œuvre des capteurs et le travail d'intégration peut être complexe. Pour les seconds, basés sur l'actionnement incrémental (stick slip comme décrit sur la figure 1c) ou inch worm), les courses sont en théorie infinies et la commande est numérique mais ils sont lents, ils ont une forte sensibilité à l'environnement et

demandent également des capteurs et une intégration parfois complexe. La figure 2 donne deux exemples de microrobots à actionneur incrémental. Une perspective importante est l'obtention de microrobots associant haute précision (sous micrométrique), vitesse importante et flexibilité (et bien naturellement petite taille).

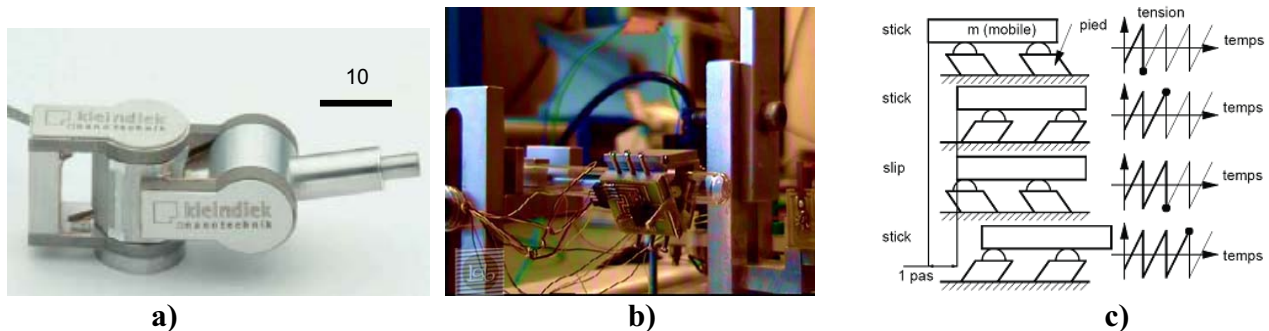


Figure 2 : a) et b) microrobots utilisant des actionneurs piézoélectriques incrémentaux : microrobot Kleindiek Nanotechnik et le Tring module de FEMTO-ST [3, 4] c) principe d'actionnement stick slip [5]

Une nouvelle approche pour la conception de microrobots (appelée microrobotique numérique) a été récemment proposée par FEMTO-ST [6]. Elle vise à réaliser des microrobots entièrement microfabriqués et pouvant être commandés en boucle ouverte. Ces robots sont constitués de modules bistables associés dès la microfabrication. Le nombre de bascules (qui peut être grand compte tenu de la taille réduite des bascules) et leur mode d'association (en série ou en parallèle) autorisent l'expérimentation de cinématiques nouvelles mieux adaptées aux tâches à réaliser. La microfabrication de l'ensemble de la structure permet une réduction forte des dimensions des microrobots. Cette approche présente de nombreux avantages qui permettent à ces microrobots de travailler dans des environnements confinés, d'atteindre des résolutions élevées et d'agir de façon robuste dans un espace de travail discret. Les premiers travaux engagés sur ce sujet ont permis de montrer l'originalité de ce concept au niveau international et de produire des premières propositions de conception de structures. La figure 3 présente une bascule bistable en silicium microfabriquée en salle blanche. Le module bistable constitué d'un cadre, d'actionneurs thermiques, d'une structure bistable et de systèmes de blocage est fabriqué de manière monolithique (sans aucun assemblage) sur un wafer SOI (Silicon On Insulator). Cette bascule a été caractérisée statiquement, notamment pour évaluer les forces de blocage, et en dynamique ce qui a conduit à proposer des modes de commande du basculement. Ainsi, pour éviter les oscillations du système lorsque le shuttle (élément central de la bascule comme montré sur la figure 3 arrive sur la butée haute (indiquée « système de blocage sur la figure 3 et également pour qu'il n'y ait pas de dépassement de la position finale, l'actionneur thermique n'ayant pas servi à actionner la structure bistable pour qu'elle bascule est utilisé pour « réceptionner » la structure en train de basculer et l'amener à sa position finale, c'est-à-dire en butée.

### B. La fonction de préhension

Les stratégies usuelles de préhension dans le micromonde doivent être adaptées aux comportements des micro-objets. Alors qu'aux échelles conventionnelles, la phase de préhension la plus délicate est la prise de l'objet, dans le micromonde, il s'agit de la phase de lâcher. En effet, celle-ci est particulièrement sensible du fait de l'impact des effets d'adhésion. Ainsi, lors de la tentative de lâcher d'un micro-objet par une pince, l'objet peut rester « collé » sur les doigts de la pince, le poids n'étant pas suffisant pour vaincre les forces d'adhésion. La fonction de préhension doit par conséquent être entièrement repensée pour s'adapter à ce nouveau monde de manipulation. Deux grandes approches méthodologiques sont ainsi explorées en choisissant soit d'exploiter les phénomènes physiques spécifiques au micromonde soit en cherchant à minimiser ces phénomènes.

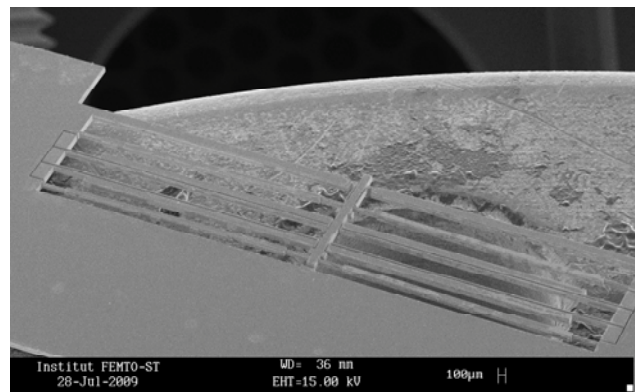
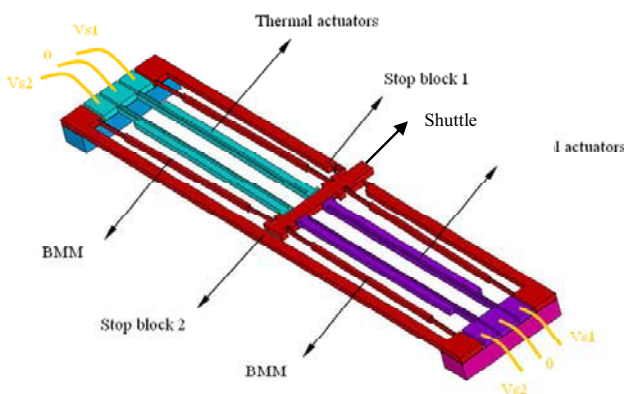
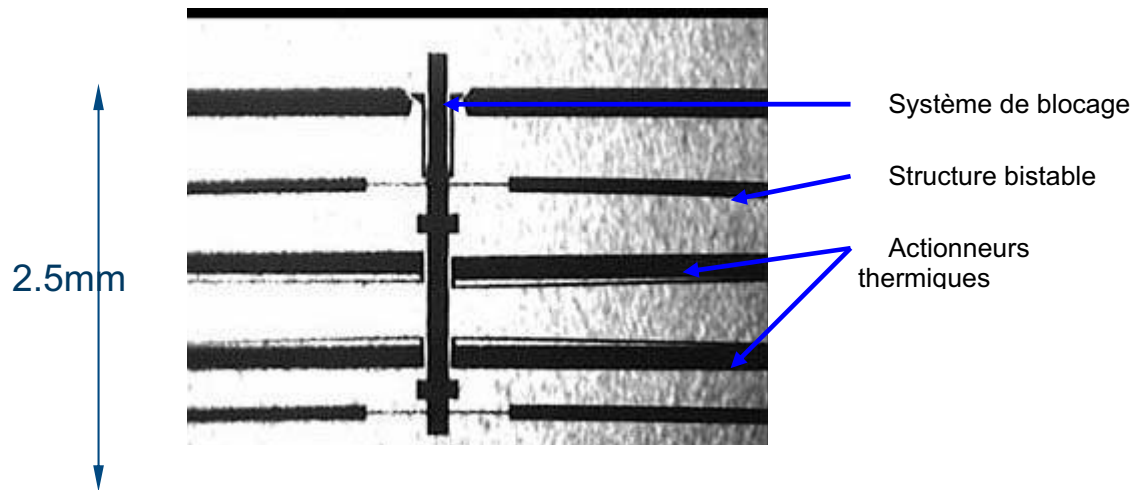


Figure 3 : module bistable monolithique fabriqué sur un wafer SOI

Les stratégies de préhension peuvent également être classifiées suivant deux types :

- les solutions sans contact comme les pinces optiques [7,8,9], les systèmes à diélectrophorèse ou les pinces magnétiques [10,11] qui présentent l'avantage de ne jamais créer de contact entre l'effecteur et l'objet annulant ainsi l'effet d'adhésion. Les forces de blocage sur les micro-objets sont toutefois faibles et ces procédés sont souvent limités des formes d'objets et/ou à des propriétés physiques particulières ;
- les solutions de préhension par contact comme les préhenseurs capillaires [12], les préhenseurs à changement de phase comme les préhenseurs à glace, les micropinces ou les préhenseurs par adhésion permettent la manipulation d'un grand type de matériau et de forme de micro-objets. Ils sont également capables d'engendrer une force importante pouvant être intéressante par exemple dans le cadre d'une opération d'insertion. Notons également des propositions de nouvelles structures adaptroniques fondées sur une optimisation topologique [13].

Ces principes sont en général perturbés par les effets d'adhésion et des stratégies innovantes de lâcher doivent être développées pour assurer une relâche contrôlée et précise de l'objet. Un état de l'art des stratégies de micromanipulation par contact est proposé dans [14].

L'activité française dans ce domaine est illustrée ici par deux exemples d'étude de principes de micropréhension portant sur une approche consistant à réaliser les tâches de micro-assemblage en milieu liquide [12].

Malgré la réduction des effets perturbateurs dans un liquide (électrostatique, adhésion), la problématique du lâcher des micro-objets subsiste. Une autre voie utilisée couramment en manipulation d'objets biologiques consiste à déplacer les objets sans contact dans un champ de force. Dans ce cadre, nous proposons d'utiliser l'effet de diélectrophorèse usuellement mis en œuvre pour la manipulation de cellules biologiques. Dans ce cas, le bassin est équipé d'électrodes fixes et les objets sont généralement

positionnés dans des zones stables en utilisant une tension d'amplitude constante (voir figure 4). L'approche proposée consiste à commander en boucle fermée la position de l'objet grâce à une mesure par vision de celle-ci. Les micro-objets possédant une inertie faible, leur trajectoire est régie par une dynamique très rapide (jusqu'au kHz) alors que le système de mesure est lent (typiquement 50 Hz). L'étude de la commande de tels systèmes porte sur un problème transverse en micromanipulation sans contact dépassant le simple cadre applicatif de la diélectrophorèse.



Figure 4 : Bille de polystyrène de 80 micromètres en lévitation au dessus des quatre électrodes.

La modélisation de la trajectoire de l'objet après lâcher est essentielle si l'on souhaite contrôler avec précision la position de l'objet. Le comportement d'un objet de masse  $m$  est classiquement défini par le principe fondamental de la dynamique :

$$m\vec{a} = \vec{F}_{HYDRO} + \vec{F}_{DEP} \quad (10)$$

avec  $\vec{a}$  son accélération,  $\vec{F}_{HYDRO}$  l'effort hydrodynamique,  $\vec{F}_{DEP}$  l'effort de diélectrophorèse. Dans le cas d'un objet sphérique de rayon  $r$  dans un milieu de constante diélectrique  $\epsilon_m$  soumis à un champ électrique sinusoïdal de valeur efficace  $E$ , la force de diélectrophorèse (DEP) s'exprime par :

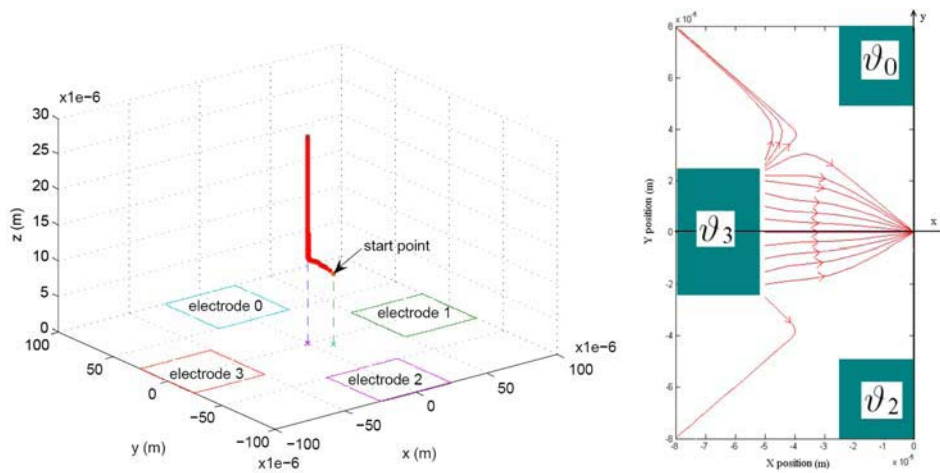
$$\vec{F}_{DEP} = 2\pi r^3 \epsilon_m K_{DEP} \nabla E^2 \quad (11)$$

où  $K_{DEP}$ , le facteur de Claussis-Mosotti dépend des constantes diélectriques du milieu et de l'objet. Suivant le signe de  $K_{DEP}$ , la force de DEP peut être répulsive (DEP négative) ou attractive (DEP positive).

Nous avons montré que le terme dynamique  $m\vec{a}$  dans l'équation (10) de la trajectoire de l'objet engendre une constante de temps négligeable devant celle liée à la force hydrodynamique qui dépend de la vitesse de l'objet. La trajectoire de l'objet est donc caractérisée par l'équation :

$$0 = \vec{F}_{HYDRO} + \vec{F}_{DEP} \quad (12)$$

Les travaux dans le monde en diélectrophorèse se contentent en général d'un modèle statique basé sur l'équation (11). Un simulateur dynamique complet de l'équation (12) a été réalisé permettant de simuler le comportement d'un objet en fonction des tensions appliquées sur les électrodes d'un dispositif. Des exemples de trajectoire simulées sont présentés en figure 5. Sur la base de ce modèle, l'automatisation de cette stratégie de micromanipulation peut maintenant être abordée. La mise en place d'un contrôle prédictif basé sur le modèle et l'utilisation de la vision est en cours d'étude.



(a) trajectoire tridimensionnelle de l'objet

(b) faisceau de trajectoire en fonction de la position initiale de l'objet

Figure 5 : Résultats issus du simulateur de trajectoire.

Le deuxième exemple porte sur un micropréhenseur immergé à changement de phase [15]. Les études portant sur le positionnement de micro-objets dans un liquide trouvent historiquement leur domaine applicatif dans la manipulation de cellules biologiques. Les méthodes actuellement développées en milieu liquide sont donc contraintes par les critères de biocompatibilité cellulaire comme la minimisation de la variation de la température. L'utilisation du milieu liquide pour la réalisation de tâches d'assemblage de micro-objets artificiels ouvre donc la voie à de nouvelles techniques et méthodes non-biocompatibles peuvent être étudiées. Dans ce cadre, l'utilisation de changement de phase du liquide (solidification et liquéfaction) à proximité d'un micro-objet peut permettre de le saisir et le libérer. Ce mode de saisie par glace est également étudié en micromanipulation dans l'air. Son principal inconvénient dans l'air tient à l'apparition d'un pont capillaire entre l'objet et le préhenseur lors de la fonte de la glace perturbant le lâcher de l'objet. Cet inconvénient est levé avec l'utilisation d'un milieu liquide, puisque la fonte de la glace immergée ne crée pas de pont de capillaire et n'engendre donc pas de force capillaire susceptible de perturber le lâcher de l'objet. L'architecture du dispositif est présentée figure 6. Le système est composé de deux modules à effet Peltier pour générer le refroidissement nécessaire à la réalisation contrôlée d'une surface de glace sur le préhenseur (voir figure 6). Le principe a été validé par des opérations de prise-dépose de micro-objets en silicium (voir figure 7). Le contrôle de la formation de la glace nécessite l'étude d'une stratégie de commande des deux courants électriques dans les deux modules à effet Peltier et requiert l'établissement d'un modèle réaliste et aisément manipulable (ce qui n'est pas le cas des équations à paramètres réparties décrivant la physique mise en œuvre ici).

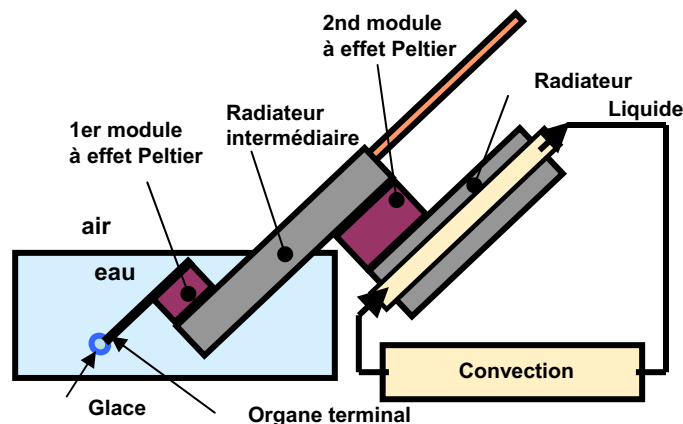


Figure 6 : architecture du préhenseur à glace immergé.

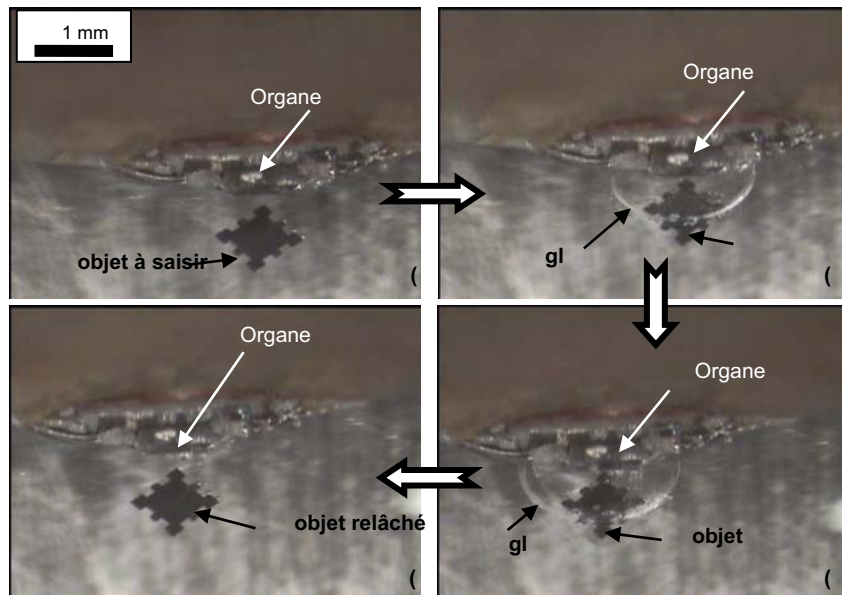


Figure 7 : micropréhension par glace en milieu immergé d'un objet en silicium.

Les travaux scientifiques ont porté sur la construction et l'identification d'un modèle thermique basé sur l'analogie thermo-électrique. Le modèle (figure 8) est ainsi composé d'un assemblage de modèle élémentaire correspondant à chacun des éléments. L'analogie thermique permet ainsi de construire un modèle simple du système complet, à même d'être utilisé pour la synthèse de lois de commande.

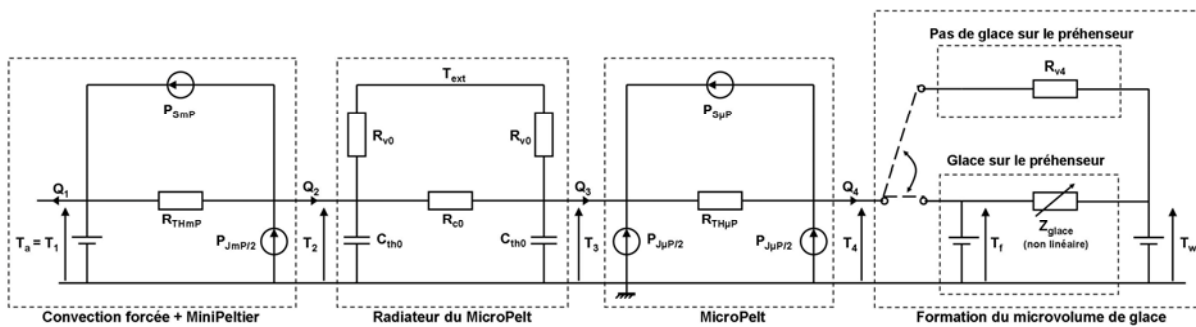


Figure 8 : modèle thermique du préhenseur à glace immergé.

### C. Les fonctions de transport, de positionnement et d'alimentation et la péri-microrobotique

Le contexte de la manipulation de micro-objets ne permet pas l'utilisation des systèmes traditionnellement utilisés pour les fonctions de transport et d'alimentation en composants. L'exemple de la fonction d'alimentation en microcomposants est assez symbolique : dès lors que les dimensions caractéristiques passent sous le millimètre, l'utilisation de bols vibrants tels qu'ils sont proposés actuellement devient inadéquate car l'effet du poids n'est pas suffisant pour assurer un déplacement de l'objet par vibrations. En effet, ces systèmes ne permettent pas d'obtenir les accélérations nécessaires, généralement supérieure à  $100 \text{ m.s}^{-2}$ , pour briser l'adhésion entre les micro-objets et les surfaces transporteuses.

Ainsi, ces fonctions sont à ré-étudier à la lumière des connaissances acquises sur la dynamique du micromonde. Si l'on considère le cas particulier du transport de composants de taille microscopique, on peut constater que de nombreuses études ont été menées pour réussir cette fonction par des solutions avec contact ou des solutions sans contact avec une structure porteuse. FEMTO-ST a proposé plusieurs solutions de systèmes d'alimentation pour microcomposants, dont une solution basée sur la vibration.

Lorsque la taille des objets diminue, l'effet du poids s'amenuise et il devient plus difficile d'évaluer la force à produire sur l'objet pour briser le contact avec son support. L'objectif est alors d'évaluer le



mieux possible cette force de friction pour commander un système qui sera apte à la briser. Une simple approche par une évaluation de type Amontons-Coulomb qui suppose que la friction est uniquement proportionnelle à la charge et est indépendante de l'aire réelle de contact n'est pas suffisante. Concevoir un tel système demande donc un travail de modélisation de l'interaction micro-objet/support et une proposition de structure actionnée donnant les performances voulues. Pour calculer la force de friction, une modélisation de Tabor [16] peut être utilisée, elle relie la force de friction  $F_f$  à l'aire réelle  $A_r$  de contact entre les deux surfaces :  $F_f = \tau A_r$ , où  $\tau$  est le coefficient de Tabor, constant pour un couple de matériaux donnés. Il faut donc déterminer  $\tau$  et  $A_r$  [17]. Pour déterminer l'aire réelle de contact, un modèle multi-aspérités proposé par Greenwood-Williamson peut être utilisé. Il permet à partir de la connaissance de la topologie réelle des surfaces en contact d'évaluer l'aire réelle de contact [18]. L'utilisation de ces approches à l'échelle microscopique a été validée de façon expérimentale et permet ainsi d'avoir une méthode de détermination de la force de friction entre un micro-objet et une surface support à cette échelle à partir de la connaissance des topologie des surface en contact qui peut être obtenu par un scan avec un AFM. Pour un contact entre un objet en silicium de  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  et une surface support en silicium, la force de friction est évaluée avec cette méthode à  $0,49 \mu\text{N}$  avec une incertitude de 15% résultant de l'erreur de détermination de  $\tau$ . Il a été proposé le système de la figure 9 pour déplacer un micro-objet quelconque. Sur ce système, un actionneur piézoélectrique constitué d'un empilement de couches piézoélectriques, actionneur appelé stack piézoélectrique, permet de générer l'accélération nécessaire pour briser la force de friction et les structures compliantes permettent d'assurer le guidage dans une direction. D'autre part, pour réaliser un mouvement de type stick-slip entre le micro-objet et la surface transporteuse, il fallait éliminer les oscillations du système ce qui a été réalisé en contrôlant le stack piézoélectrique par la méthode d'input shaping [19,20]. La figure 10 donne les réponses mesurées de ce système à un échelon de  $0,8 \mu\text{m}$  pour différentes méthodes d'input shaping.

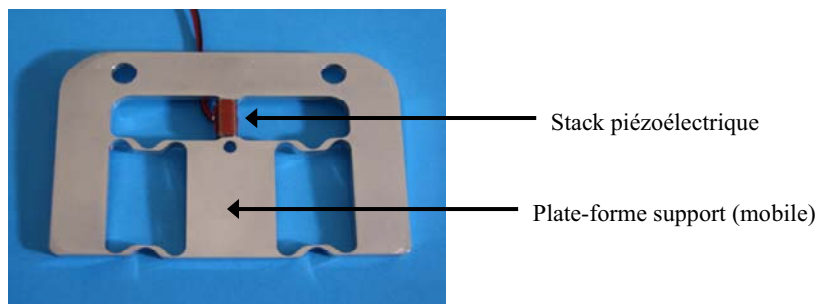


Figure 9 : système de feeding par vibrations

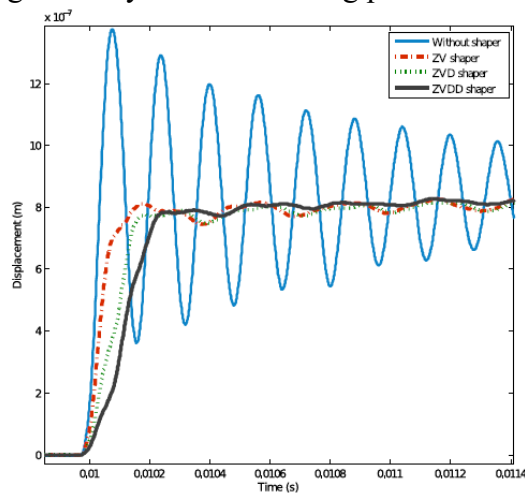


Figure 10 : réponses mesurées du déplacement de la plate forme mobile du système de feeding pour différentes méthodes d'input shaping et réponse sans contrôle d'entrée.

#### *D. La fonction de perception*

Lorsque les dimensions des objets manipulés sont très petites, il devient difficile d'avoir une perception de la scène qui soit suffisante pour permettre la commande des systèmes microrobotiques. En effet, il est nécessaire d'associer différents points de vue sur les opérations pour obtenir les informations de position, d'orientation et d'efforts en jeu suffisamment précises. La perception multisensorielle est donc une fonction fondamentale pour le développement de cellules de micro-assemblage automatisées.

La perception visuelle [21] permet de caractériser et localiser les pièces manipulées et les outils de manipulation et de contrôler la qualité des assemblages réalisés. Les travaux menés dans ce domaine concernent le développement d'algorithmes de vision prenant en compte les spécificités de l'imagerie à cette échelle (faible champ de vision, faible profondeur de champ, faible distance de travail, grande dépendance à l'éclairage) [22,23,24,25]. La commande référencée vision a permis l'automatisation des tâches de micro-assemblage pour des objets dont les dimensions caractéristiques sont supérieures à 100  $\mu\text{m}$  [26].

La perception des efforts permet de maîtriser l'interaction outil-composant et de sauvegarder l'intégrité aussi bien des pièces manipulées que et les outils utilisés qui sont des éléments très fragiles du fait de leur taille. Les travaux menés dans ce domaine sont fondés sur deux approches : la première concerne la caractérisation et le développement de capteurs de déformation à intégrer sur les outils de micromanipulation et le traitement des mesures d'effort qui à cette échelle sont très bruitées, la deuxième approche concerne l'estimation de l'effort par retour d'état (synthèse d'observateurs). Les travaux sont nombreux pour proposer des capteurs d'efforts adaptés au micromonde, c'est-à-dire à des mesures d'efforts du microNewton à quelques dizaines de milliNewton. La mesure peut être capacitive [27,28], piézoélectrique [29,30], fréquentielle (sur une poutre vibrante) [31,32,33] ou à base de jauges de déformations [34,35,36]. Il faut également noter des travaux menés sur l'utilisation de l'impédancemétrie pour la mesure de position et de force. Assez naturel du fait de l'utilisation de matériaux actifs, elle est cependant complexe à mettre en œuvre notamment du fait des non linéarités et de la forte sensibilité à l'environnement (la température par exemple pour les matériaux piézoélectriques) [37].

#### *E. Les systèmes robotisés complets – les micro-usines*

Comme cela a été mentionné précédemment, la manipulation d'objets micrométriques nécessitent l'utilisation de techniques particulières adaptées aux forces en présence à cette échelle. Les solutions présentées apportent des réponses satisfaisantes mais leur intégration dans des systèmes de production représente un nouveau challenge. Il s'agit de passer de la capacité à micromanipuler à la capacité à microassembler, c'est-à-dire à manipuler des microcomposants de façon référencée pour être capable de les positionner et de les solidariser ou encore de créer une mobilité entre eux avec un haut niveau de précision.

Cette intégration peut être considérée à plusieurs niveaux depuis la cellule téléopérée jusqu'au système de production totalement automatisé. Le concept de micro-usine est la réponse au besoin de systèmes microrobotiques intégrés dans des cellules de production automatisées.

Ci-dessous, les principales réalisations à travers le monde sont présentées. On pourra constater que le nombre de réalisation est très important et permettent de réaliser des manipulations avec de très bons niveaux de précisions. Dans un certain nombre de cas, des micro-assemblages sont également réalisés de façon performante. Même si un grand nombre de ces réalisations sont encore basées sur un principe de miniaturisation des systèmes de taille traditionnelle, les principes répondant à des contraintes du micromonde apparaissent : réduction des chaînes d'actionnement pour augmenter la précision, coopération entre actionneurs, systèmes modulaires, systèmes de préhension adaptés, ... Il n'y a pas vraiment de solutions mise en œuvre exploitant complètement les caractéristiques du micromonde où l'association de la dynamique donc de la vitesse d'exécution et de la flexibilité serait faite. Une telle micro-usine reste donc à inventer.

C'est au Japon que les premières propositions concernant la micro-usine sont apparues. En 1988, le ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) et le Mechanical Engineering Laboratory (MEL), actuellement le National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), ont créé l'organisation de recherche MicroMachine Center. C'est en 1991 qu'a émergé le projet national japonais, Micromachine Technology, visant à proposer des systèmes de production de taille réduite. Ce projet a pris fin en 2000 et a permis le développement des premières micro-usines. Toujours dans le cadre du projet japonais "Micromachine Technology", sept sociétés membres du Micromachine Center (MMC) ont développé une micro-usine expérimentale pour des micro-usinages non-mécaniques et pour du microassemblage. Le consortium japonais Tokatsu-Chiba a développé un mini-système de production composé d'un poste de tournage et d'un poste de meulage dans le cadre du projet national "NEDO" (New Energy and Technology Development Organization). Chaque poste a une surface de 200 mm<sup>2</sup>. En 1998, Olympus a développé une micro-usine de type îlot et automatisée. Elle est destinée au microassemblage de composants optiques pour endoscope. Ce travail faisait partie également du projet national NEDO. En 1999, une équipe de l'AIST a développé une station de micro-usinage multifonction : par changement de la tête de la machine, il est possible de faire du microfraisage, micromeulage, micro-usinage par laser, micro-usinage par électroérosion ou encore du micro-usinage électrochimique. Toujours dans le projet NEDO, le Shinanogawa Technopolis Development Organization a développé un centre de tournage réduit. Il consiste en une station à quatre broches. Encore au Japon, le groupe d'étude DTF (DeskTop Factory) du Nagano Techno Foundation, un consortium de 14 entreprises et de plusieurs institutions, a développé un centre de tournage de taille A3 en 2003. La station a trois axes linéaires et deux broches pour le tournage et le fraisage. Elle est équipée d'un changeur d'outils automatique. Seiko Instrument a également développé une micro-usine. Elle est constituée de trois unités : une unité « procédé », une unité d'assemblage et une unité de convoyage. L'unité de procédé concerne un traitement chimique, des micropompes et un outil de reconnaissance. L'université de Toyo et AJI Co Ltd (précédemment Adept Japan) ont mis au point une machine occupant une surface équivalente à une feuille A4 et permettant la manipulation et l'assemblage de MEMS et de composants optiques particulièrement fragiles et petits.

En Chine, le Harbin Institute of Technology a réalisé un poste de micro-assemblage automatisé.

En Corée, le Ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Energie a financé un grand projet de recherche et de réalisation en micro-usine. Le projet se divise en plusieurs phases d'étude, de test et de réalisation. Il s'agit de réaliser une micro-usine complète : multi-station (usinage mécanique, électroérosion, etc.), gestion de stock, commande et supervision, etc.

Aux Etats-Unis, le Carnegie Mellon University a créé un concept de mini-usines appelé AAA ou *Agile Assembly Architecture*. Toujours aux Etats-Unis, la plate forme  $\mu^3$  développée au « Automation and Robotic Research Institute » de l'Université du Texas à Arlington utilise dix neuf degrés de liberté répartis sur trois manipulateurs ayant des résolutions de 3 nm.

En Allemagne, l'équipe de *Fraunhofer Institute IPA* en collaboration avec des partenaires industriels (*L-A-T Suhl* et *Festo*) a réalisé un système de microassemblage modulaire<sup>15</sup> et reconfigurable dans le cadre du projet « MiniProd ». Ce projet a été financé par le Ministère Fédéral pour l'Education et la Recherche (BMBF). La micro-usine est basée sur des modules qui sont des postes d'assemblage et d'usinage. Ces postes peuvent être mis en place sur la plate-forme et sont « plug-and-produce » en utilisant des interfaces standards.

En Finlande, le Tampere University of Technology et le Helsinki University of Technology ont développé un poste de micro-assemblage à environnement contrôlé. Le but était de caractériser l'influence de l'environnement sur la manipulation et l'assemblage de micro-objets. La température et l'humidité sont les grandeurs contrôlées.

En Suisse, un projet de réalisation d'une micro-usine modulaire a été financé par le Canton de Suisse Centrale ainsi que par le MCCS (Micro Center Central Switzerland). Il réunissait le Laboratoire de Systèmes Robotiques de l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et le CSEM (Centre Suisse d'Etudes Microtechniques). La micro-usine consiste en l'association de modules appelés microbox. Chaque microbox a son environnement propre et est constitué d'un port d'entrée, d'un robot pour le

transfert de composants ou pour le microassemblage, d'un robot d'assemblage de très haute précision, de petites unités de collage et de fixation de composants, d'un système de transfert de composants vers la prochaine microbox et d'un système de filtrage et de circulation d'air. Ce projet commun entre l'EPFL et le CSEM a donné naissance à une spin-off, l'entreprise asyrrill. D'autres projets Suisse ont permis l'émergence de micro-usines monopostes pouvant parfois être intégrée dans un SEM : l'approche est basée sur l'utilisation de microrobots mobiles.

A FEMTO-ST, plusieurs postes de micromanipulation et de micro-assemblage ont été développés. Ils permettent de réaliser des micro-assemblage de composants dont la taille caractéristique va du micromètre au millimètre. De plus, à la fois l'assemblage en milieu sec peut être réalisé et également en milieu liquide.

Un poste est équipé pour traiter des composants dont la taille caractéristique est supérieure à 100 µm. Le poste est composée d'un stéréo-microscope commandé en zoom et focus par ordinateur ce qui permet l'utilisation d'outils de stéréovision et de reconstitution 3D. Une vue de coté pour faciliter la manipulation en mode téléopéré a été adaptée. Concernant l'actionnement, le plateau porte-pièce est doté d'une table compliant pour plus de sécurité et comporte dans la configuration de base 2 translations dans le plan et une rotation. La micro-pince mise en place dispose d'une translation verticale et d'une rotation à 45 degré pour retourner la pièce. Un grand intérêt de l'architecture physique de ce poste est sa capacité d'accueil des développements microrobotiques réalisés dans femto-st. Ce poste est positionné sur une table anti vibration et sous une hotte à flux laminaire permettant le contrôle en température et en humidité de l'environnement de travail.

Un second poste a été équipé pour manipuler en milieu sec ou liquide des objets dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Ce poste comporte huit axes répartis pour 5 axes sur un bras de robot qui oriente une micropince et pour 3 sur une table robotisée qui oriente et positionne des microcomposants dans un plan. Ainsi, des micro-objets à assembler sont placés sur le porte-objet de la table robotisée, dans le plan focal du microscope inversé, puis, à l'aide d'un joystick, on pilote les cinq axes du bras robot pour effectuer des opérations télé-opérées comme la saisie, la dépose et l'assemblage d'objets. La figure 11a) donne une vue de la zone de micro-assemblage. Ce poste est également disposé en environnement contrôlé. Sur la figure 11b), une autre station est utilisée pour assembler des composants optiques pour constituer des microbanco optiques. Dans cette dernière manipulation, le problème du guidage à l'échelle micrométrique est étudié.

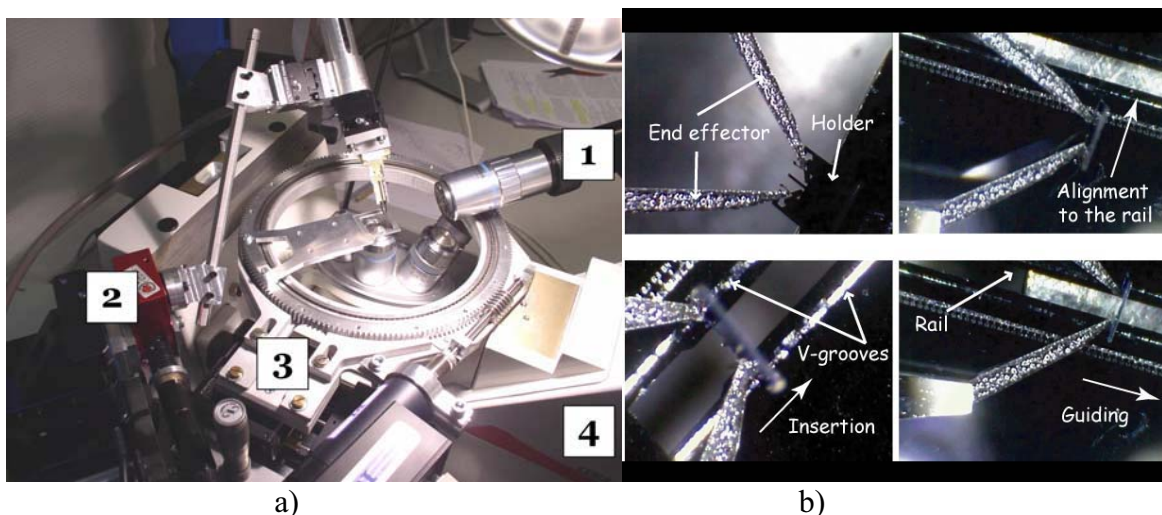


Figure 11 : a) vue d'ensemble du poste « PRONOMIA » de FEMTO-ST (1 : vidéomicroscope, 2 : bras robot 5 axes, 3 : table robotisée 3 axes, 4 : microscope inversé) b) assemblage d'un support d'élément optique (1) saisie du miroir (2) déplacement après rotation (3) guidage dans un rail (4) lâcher

### III. EN ROUTE POUR LA NANOROBOTIQUE :

#### EXEMPLE DE NANOMANIPULATION ET MICROSCOPIE EN PARALLELE SOUS AFM

Pour manipuler des nano-objets tels que des nanotubes de carbone, à l'effet d'échelle précédemment décrit s'ajoute le problème de la « visualisation » de la scène de travail. Il est nécessaire d'utiliser les technologies de microscopie pour obtenir des informations sur le positionnement des micro-objets. Les opérations devront donc être réalisées sous MEB (Microscope à Balayage) ou TEM (microscope à Transmission) ou encore en utilisant la capacité à scanner des surfaces par un AFM (Microscope à Force Atomique). Les besoins portant sur la manipulation et l'assemblage d'objets ayant une dimension nanométrique commencent à être exprimés. Ils viennent encore majoritairement de laboratoire de recherche en physique ou d'entreprise ayant un besoin de caractérisation de matériaux ou de nanostructures. Il est essentiel de comprendre que sans l'invention de moyen de nanomanipulation, certaines propriétés physiques (mécanismes de propagation de dislocations suite à des contraintes fortes sur des couches métalliques fines ou la déformation lors d'une indentation des matériaux durs en couches pour l'analyse de comportement de semi-conducteurs) des nano-objets ne pourront pas être étudiées. En effet, cette analyse des propriétés se heurte aujourd'hui non pas aux outils de mesure des phénomènes mais à la manipulation des échantillons.

Les principaux axes scientifiques permettant le développement d'une nanorobotique sont :

- des propositions de stratégies de manipulation et d'assemblage intégrables dans des environnements où les nano-objets peuvent être visualisés, c'est-à-dire dans des environnements très contraints ;
- des propositions de commande permettant d'atteindre des précisions inférieures aux nanomètres ;
- des propositions de solutions robotiques permettant la téléopération puis l'automatisation des opérations sur les nano-objets ;
- et également l'invention d'une robotique elle-même d'échelle nanométrique.

Pour illustrer les travaux menés en France sur la nanomanipulation, l'exemple d'un système robotique réalisé à l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotique (ISIR) de l'Université Pierre et Marie Curie est donné. Le microscope à force atomique est un outil extrêmement usité pour sa capacité à imager des surfaces avec une résolution pouvant atteindre le niveau atomique. Celui-ci se compose d'une sonde soumise à une excitation par un tube piézoélectrique et d'un détecteur qui mesure la réponse de cette sonde aux phénomènes physiques. Ainsi, on peut scanner un substrat avec des actionneurs piézoélectrique et ainsi obtenir une image avec une résolution d'une dizaine de nanomètres.

La recherche en nanorobotique s'est beaucoup focalisée sur la robotisation de ce système et sa commande pour manipuler de façon répétable dans le nanomonde. L'une des difficultés majeures réside dans la commande de cette sonde dont le rôle est multiple puisqu'elle est à la fois utilisée comme imageur et comme outil de manipulation. Le système de nanomanipulation résout ce problème en proposant un système dual composé de deux sondes avec des degrés de liberté indépendants et de deux détecteurs de mesure des déflexions de ces outils. Ainsi, l'une des sondes peut être utilisée comme imageur et la seconde comme outil en utilisant la mesure de la déflexion comme spectroscopie de force en temps réel.

Comme présenté en figure 12, un actionneur piezoélectrique (MCL Nano-Bio2M) permettant une plage de scan de  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  et un piezotube (PI P-153.10H) de plage de scan de  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  sont utilisés [38]. Les travaux de FEMTO-ST sur la compensation des non-linéarités des actionneurs piézoélectriques ont été utilisés et permettent de compenser les défauts de l'actionneur PI [39,40]. Les leviers AFM avec une pointe (ATEC-FM) que l'on voit sur la partie incrustée de la figure 10 sont employés. Deux ensembles de mesure optique, composés d'un laser et d'une photodiode quatre quadrants sont disposés sur deux plans verticaux et utilisés pour détecter les déplacements des leviers lors des manipulations. Un tel système peut être utilisé efficacement pour réaliser des nanomanipulations en trois dimensions. Ce système, appelé PIMM (parallel imaging/manipulation force microscope) permet de réaliser en parallèle le scan de la scène de travail et la nanomanipulation par l'intermédiaire d'une collaboration entre les deux leviers. L'efficacité du système PIMM en utilisant une vitesse normale de scan de la scène de travail a été validée par la réalisation de motifs avec des nanoparticules [41]. Un

exemple de manipulation est aussi proposé sur la figure 12. Des manipulations de nanotubes de carbone ont également été réalisées, notamment la prise, le transport et la dépose d'un nanotube de carbone sur un autre pour réaliser une jonction [42].

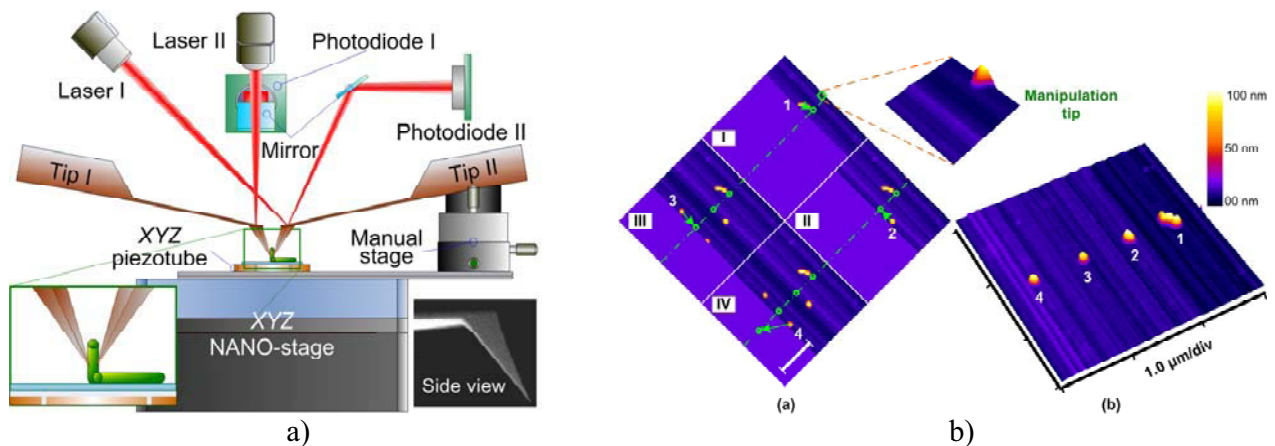


Figure 12 : a) système de nanomanipulation à 2 leviers AFM b) résultat d'une imagerie et nanomanipulation en // (a) 4 particules de diamètres de 74 à 82 nm sur quatre images (I à IV) (b) le résultat d'une nanomanipulation. 4 particules positionnées le long d'une ligne en moins d'une minute.

#### IV. CONCLUSION

On a pu constater que le domaine de la micromanipulation/microassemblage est très complexe du fait des dimensions et des phénomènes physiques prépondérants. De nombreuses solutions robotiques sont proposées et testées pour améliorer la précision, la répétabilité et la fiabilité dans la réalisation des fonctions de transport, de manipulation, de préhension et de perception. Cependant, les travaux en cours sur la modélisation, la caractérisation et l'identification des interactions et des effets physiques aux échelles micrométriques et nanométriques permettront d'augmenter les performances des solutions existantes et de proposer de nouvelles voies. De nombreux travaux sont encore à mener avec une finalité à l'échelle micrométrique, que ce soit dans le domaine de la compréhension et de la modélisation des phénomènes, dans le domaine de l'analyse, de la modélisation et de la commande de matériaux actifs, dans le domaine des structures robotiques (la microrobotique numérique en est un exemple), dans le domaine de la commande avancée pour des structures distribuées (les « smart surfaces » ou encore les structures distribuées) et enfin le domaine de la perception (visuelle et en effort).

En parallèle du champ de la microrobotique, le champ de la nanorobotique est maintenant clairement ouvert afin de proposer des outils pour les nanotechnologies. Les domaines de recherche précédemment cités sont présents et la complexité est parfois accrue. Cependant, des solutions émergent et permettent de montrer la capacité de la communauté à répondre à ces problèmes difficiles. C'est en effet la capacité à mobiliser des approches multiphysiques et intégratrices qui permet de proposer des systèmes traitant des interactions modélisées au nanoniveau et dont la commande apporte la précision nécessaire.

#### REFERENCES

- [1] "La microrobotique", Hermès science, Lavoisier 2008, ISBN 978-2-7462 - 1885-7, sous la direction de Stéphane Régnier et Nicolas Chaillet, 521 pages.
- [2] M. Gauthier, S. Régnier, P. Rougeot et N. Chaillet, "Forces analysis for micromanipulations in dry and liquid media," *Journal of Micromechanics*, vol. 3, no. 3-4, pp. 389-413, 2006.
- [3] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, P. Lutz : "Voltage/Frequency proportional Control of Stick-Slip Microsystems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 6, Nov. 2008, 8 pages.
- [4] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, P. Lutz, "Development, Modelling and Control of Micro/Nano Positioning 2 DoF Stick- Slip Device," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi: 10.1109/TMECH.2009.2011134, 13 pages.
- [5] J.M. Breguet, "Actionneurs stick slip pour micromanipulateurs", PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998

- [6] Chen Q., Haddab Y., Lutz P., "Digital microrobotics based on bistable modules : Design of compliant bistable structures." IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, IEEE/ASME MESA'08.
- [7] Kishan Dholakia, a Peter Reece and Min Gub, Optical micromanipulation, Chemical Society REviews, 2008, 37, 42–55 DOI: 10.1039/b512471a
- [8] Kishan Dholakia and Peter J. Reece, Near Field Optical Micromanipulation, Chapter 5, in Structured Light and Its applications, Editor DAvid L. Andrews, Elsevier 2008.
- [9] Maruyama, H. Arai, F. Fukuda, T. , Gel-tool Sensor Positioned by Optical Tweezers for Local pH Measurement in a Microchip in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy page 806-811, 10-14 April 2007
- [10] Keir C Neuman & Attila Nagy, Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy Nature Methods - 5, 491 - 505 (2008), doi:10.1038/nmeth.1218
- [11] Z. Zhang, Magnetic Tweezers: Actuation, measurement and Control at nanometer scale, PHd Thesis of the Ohio State University, 2009
- [12] M. Gauthier, and M. Nourine, "Capillary Force Disturbances on a Partially Submerged Cylindrical Micromanipulator," IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, no 3, 600–604, 2007.
- [13] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet, M. Boukallel, "Mechanical and control-oriented design of a monolithic microgripper using a new topological optimization method," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.14, no.1, pp 32–45, 2009.
- [14] Savia M., Koivo H., "Contact Micromanipulation-Survey of Strategies", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, IEEE TMECH, Vol 14, NO 4, August 2009.
- [15] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet, "Principle of a Submerged Freeze Gripper for Micro-assembly," IEEE Trans. on Robotics, vol. 24, no. 4, pp. 897–902, 2008.
- [16] K. N. G. Fuller and D. Tabor, "The effect of surface roughness of the adhesion of elastic solids," in Proceedings of the Royal Society of London, ser. A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 345, 1975, pp. 327–342.
- [17] J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson, "Contact of normally flat surfaces," in Proceedings of the Royal Society of London, ser. A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 295, December 1966, pp. 300–319
- [18] Paris M., Haddab, Y., Lutz P., "Practical Characterization of the force friction for the positioning and orientation of micro-components", in proc. of the IEEE/RSJ IROS Conference, Nice, France, 2008
- [19] N. Singhose, N. Singer, and W. Seering, "Comparison of command shaping methods for reducing residual vibration," Third European Control Conference, pp. 1126–1131, 1995.
- [20] W. Singhose and L. Pao, "A comparison of input shaping and timeoptimal flexible-body control," Control Eng. Practice, 1997.
- [21] J. Bert, S. Dembele, N. Lefort-Piat, "Trifocal transfer based novel view synthesis for micromanipulation," Book Series: Lecture Notes in Computer Science-Volume: 4291, Pages: 411–420, 2006.
- [22] Barmeshwar Vikramaditya et Bradley J. Nelson : Visually servoed micropositioning for robotic micromanipulation. Microcomputer Applications, 18:23–31, 1999.
- [23] Stephen Ralis, Barmeshwar Vikramaditya et Bradley J. Nelson : Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to- ne visual servoing strategies. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 23 (2):123–131, 2000.
- [24] S Fatikow, T Wich, H Hulsen, T Sievers et M. Jahnisch : Microrobot system for automatic nanohandling inside a scanning electron microscope., IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 12:244–252, june, 2007. 111
- [25] John T. Feddema et Ronald W. Simon : Visual servoing and cad-driven microassembly. IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 5 (4):18–24, 1998.
- [26] B. Tamadazte, S. Dembele, N. Lefort-Piat, "A Multiscale Calibration of a Photon Video Microscope for Visual Servo Control: Application to MEMS Micromanipulation and Microassembly," Sensors & Transducers Journal, vol. 5, pp37–52, 2009
- [27] E.T. Enikov and B. Nelson, Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling, Journal of Micromech. And Microeng., Vol. 10, pp 492-497, 2000.
- [28] Y. Sun, B. Nelson, D. P. Potasek and E. Enikov, A bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drive, Journal of Micromech. And Microeng., Vol. 12, pp 832-940, 2002.
- [29] D. Campolo, R. Sahai and R. S. Fearing, Development of piezoelectric bending actuators with embedded piezoelectric sensors for micromechanical flapping mechanisms, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 3339-3346, 2003
- [30] D.-H. Kim, B. Kim and H. Kang, Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation, Journal of Microsystem Technologies, Vol. 10, pp 275-280, 2004.
- [31] F. R. Blom, S. Bouwstra, J. H. J. Fluitman and M. Elwenspoek, Resonating silicon beam force sensor, Journal of Sensors and Actuators, Vol. 17, pp 513-519, 1989.
- [32] T. Fabula, H.-J. Wagner and B. Schmidt, Triple-beam resonant silicon force sensor based on piezoelectric thin films, Journal of Sensors and Actuators, Vol. A41-A42, pp 375-380, 1994.
- [33] F. Arai, K. Motoo, T. Fukuda and T. Katsuragi, High sensitive microtouch sensor with piezoelectric thin film for micro pipetting works under microscope, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1352-1357, New Orleans, 2004.
- [34] F. Arai, D. Daisuke, Y. Nonoda, T. Fukuda, H. Iwata and K. Itoigawa, Integrated microendeffector for micromanipulation, Journal of IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 3, n° 1, March 1998.
- [35] J. Park and W. Moon, A hybrid-type micro-gripper with and integrated force sensor, Journal of Microsystem Technologies, Vol. 9, pp 511-519, 2003
- [36] K. Molhave and O. Hansen, Electro-thermally actuated microgrippers with integrated force-feedback, Journal of Micromech. and Microeng., Vol 15, pp 1265-1279, 2005.
- [37] I. A. Ivan, M. Rakotondrabe, P. Lutz, N. Chaillet, "Quasistatic displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators," Review of Scientific Instruments , vol. 80, no. 6, 2009.
- [38] H. Xie, and S. Régnier, "Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip gripper with multi-feedback," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 19, pp. 075009, 2009.
- [39] M. Rakotondrabe, C. Clévy, P. Lutz, "Complete open loop control of hysteretic, creeped and oscillating piezoelectric cantilevers," IEEE Transaction Automation Science and Engineering, to appear in IEEE TASE, accepted (July 2009).
- [40] H. Xie, M. Rakotondrabe, and S. Régnier, "Characterization of the piezoscanner with an optical lever and a reference nanopositioning stage," Review of Scientific Instruments, 80, 046102, 2009.
- [41] H. Xie, S. Haliyo, and S. Régnier, "Parallel imaging/manipulation force microscopy," Applied Physics Letters, 94, 153106, 2009.
- [42] H. Xie, S. Haliyo, and S. Régnier, "A versatile atomic force microscope for 3D nanomanipulation," Nanotechnology, 20, 215301, 2009.