

# Conception modulaire de station de micro-assemblage, intérêt pour la commande

D. GENDREAU, P. LUTZ

*Institut FEMTO-ST, Département AS2M, 24 rue Alain Savary, 25000 BESANCON (France)*

## Résumé :

*L'assemblage des microproduits est une succession d'opérations complexes, souvent perturbées par les phénomènes physiques du micromonde. Les systèmes de production, permettant d'effectuer ces opérations, sont organisés en stations modulaires constituées de microrobots et de systèmes de perception, notamment de vision, qu'il convient de rendre opérationnels. Le travail de conception et l'étude de fiabilité d'une station de micro-assemblage fait partie d'un projet commun Musine® avec le LIFC, laboratoire d'informatique de l'Université de Franche-Comté. L'article porte sur la méthodologie de conception et les possibilités de commande de la station.*

## Abstract:

*The assembly of microproducts consists in several complex operations, often disturbed by the physical phenomena of the microworld. Manufacturing systems to perform these operations are organized into modular stations consisting of microrobots and perception systems, including vision. The Musine® project, developed with the LIFC lab, is dedicated to the design of a micro-assembly station and its reliability. The paper focuses to the design methodology and the control of the station.*

**Mots clefs : Conception de système de production, micro-assemblage, micro-usine, conception modulaire**

## 1 Introduction

Depuis une vingtaine d'années, la conception de système de production ne relève plus d'une démarche de spécialistes du domaine mais d'un processus plus global, appelé ingénierie concourante, visant à concevoir de manière simultanée le produit et son système de production. Les méthodes développées considèrent une démarche descendante qui s'appuie sur des points de vue fonctionnels, organiques et opérationnels. La production de masse est particulièrement adaptée à cette approche quand le système de production est conçu pour permettre la fabrication d'un seul type de produit. Dès lors qu'on envisage la fabrication d'une famille de produits, il convient de donner une flexibilité au système de production. Par ailleurs, cette approche présuppose un ensemble de moyens disponibles qu'il convient d'organiser selon des règles de production (lignes de flux, îlots...) et dont il faut optimiser l'utilisation (réduction des en-cours, réduction des temps opératoires, gestion des outils...), et assurer une disponibilité maximale par une gestion rigoureuse de la maintenance.

L'étude de la fabrication de produits de petite taille est soumise à des contraintes de production semblables en termes de délai, de qualité (mais parfois plus sévères) et de coût. Les procédés de fabrication traditionnels, dans leurs limites techniques, peuvent convenir à la fabrication des miniproducts ; une réduction d'échelle des machines, des outils et des outillages est parfois suffisante pour obtenir, à moindre coût, des produits satisfaisants ; le roulement présenté dans [1] a une longueur de 3mm pour un diamètre de 900 $\mu$ m, avec un diamètre des billes de 200 $\mu$ m. En dessous d'une limite dimensionnelle, typiquement de 100 $\mu$ m, ces systèmes de production n'ont plus l'efficacité suffisante. Par exemple, le principe de l'insertion verticale est remis en cause par la présence des forces surfaciques prédominantes (forces de Van der Waals, forces électrostatiques, tensions de surface) au regard de la gravité [2] [3]. Dès qu'un lâcher de pièce ne se traduit plus nécessairement par la chute verticale de l'objet, il faut envisager de nouveaux dispositifs et de nouvelles stratégies adaptées pour échanger l'objet sans qu'il n'adhère au préhenseur.

## 2 Problématique des microsystemes de production

Classiquement, la conception des systemes de production s'effectue à partir d'une approche descendante. Elle s'appuie sur une analyse fonctionnelle, à partir de laquelle on identifie les différentes parties du systeme : systemes continus, systemes séquentiels, systemes de traitement de l'information... qui font appel à des outils de résolution adéquats (par exemple et respectivement équations différentielles, modèle à états finis, algorithmes...). La démarche de conception envisage une organisation en modules fonctionnels pour lesquels on décrit le comportement sous forme de tâches, lesquelles sont décomposées au niveau élémentaire en actions.

Les techniques de production usuelles vont utiliser des moyens de production existants en les paramétrant de telle sorte à satisfaire le besoin pour la transformation du produit. Dans ces systemes à échelle humaine, il existe des techniques et procédures connues et maîtrisées pour fabriquer ces produits (outils et outillages standards ou spécifiques, programmes de robot ou de machine d'usinage avec instructions prédéfinies...).

Les systemes de production à échelle micrométrique ne sont pas adaptés à ce type d'organisation pour les raisons suivantes :

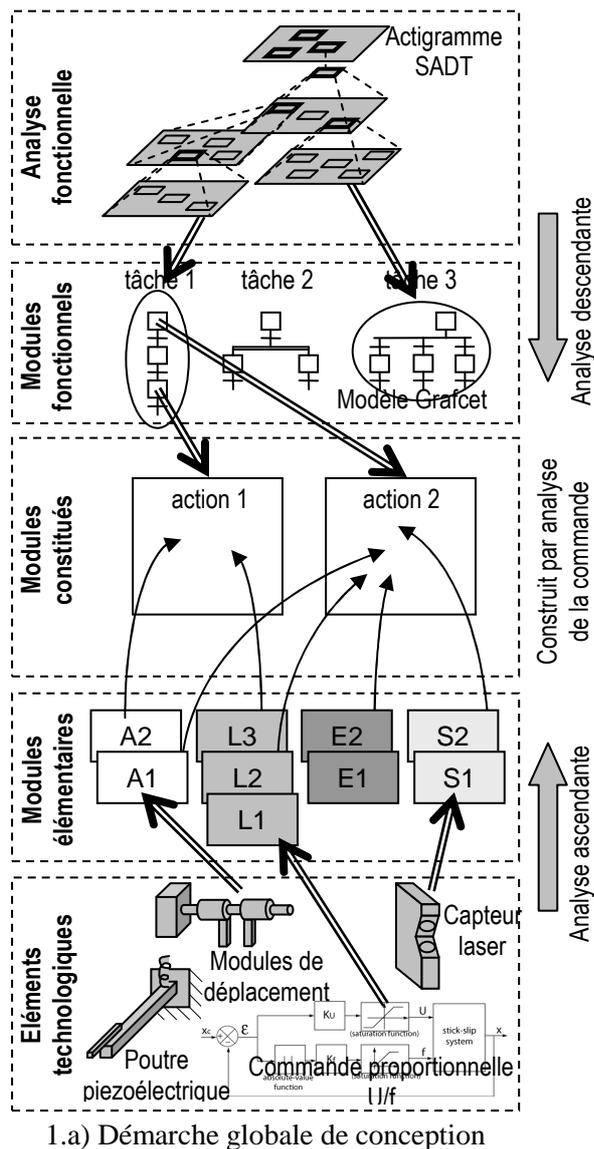
- Les micro-actionneurs sont très sensibles à leur environnement et leur comportement est souvent non linéaire (hystérésis, dérive) [4].
- Les techniques de micromanipulation sont fortement perturbées par les effets des forces de surface largement prédominantes au regard des forces volumiques : la pesanteur [5]. De plus, le matériau des pièces et les revêtements de surface perturbent les micromanipulations.
- Des modélisations existent aux niveaux macroscopiques et nanoscopiques ; à l'échelle considérée, les modélisations spécifiques n'ont pas été réalisées si bien que la réussite d'une micromanipulation n'est pas garantie [6]. Pour tenter de s'approcher d'un taux de succès en production de 100% de pièces bonnes, il faut être en permanence capable de modifier le systeme de production ou d'ajuster les paramètres de ce systeme.
- La précision de positionnement des micro-objets requise va bien au-delà des possibilités de techniques de commande usuelles [7]. La répétabilité des déplacements dans le cas des robots ou d'autres systemes de positionnement n'est pas garantie avec la précision souhaitée à cette échelle (jeux, chaînes d'actionnement).
- La fragilité des pièces, les difficultés de préhension des pièces plates, dont la plupart sont issues de technologie "salle blanche" sont autant d'autres paramètres influençant les micromanipulations.

Toutes ces particularités montrent que les choix effectués lors de la conception d'un microsysteme de production peuvent être remis en cause à tout instant de par les contraintes du micromonde et les comportements très aléatoires des systemes y opérant. En bilan, on peut conclure en disant qu'il est nécessaire de pouvoir disposer d'un systeme de production parfaitement adaptatif, c'est-à-dire à la fois flexible, agile et réactif. C'est la raison pour laquelle, nous avons développé une méthode de conception du systeme de production qui permet de répondre aux multiples contraintes du micromonde dans lequel il doit opérer.

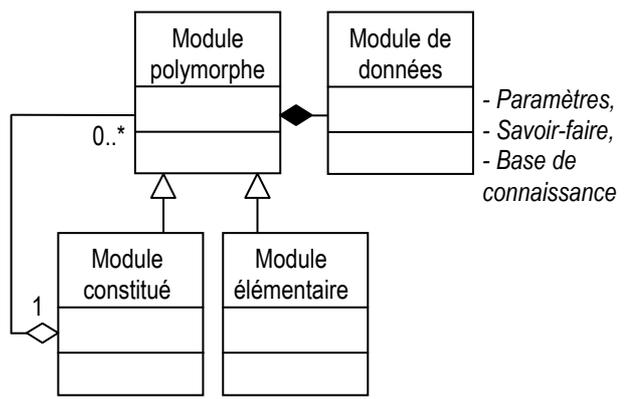
## 3 Description de la modularité

Nous avons développé une méthode de conception modulaire (figure 1a) [8], basée sur une approche duale. Cette approche s'appuie sur une analyse descendante, telle qu'elle existe pour la plupart des méthodes de conception de systeme, complétée par une approche ascendante qui prend en compte les différents aspects technologiques du micromonde.

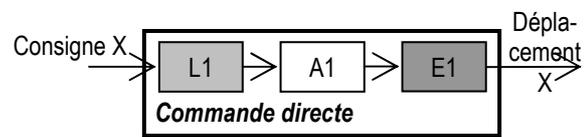
Une analyse fonctionnelle externe (de type méthode APTE) exprime le cahier des charges et la démarche d'analyse aboutit à un modèle SADT du microsysteme de production, dans lequel sont détaillées les différentes fonctions. Chacune des fonctions est exprimée par une tâche représentée par un modèle à états finis, dans notre cas par un grafcet. La séquence de grafcet comporte plusieurs actions qui conviennent d'exécuter pour animer notre microsysteme de production. Nous ne détaillerons pas cette partie qui ne constitue pas l'originalité de notre démarche. Nous avons concentré notre travail sur la détermination du systeme opératif et sur la commande associée de telle sorte à ce qu'ils soient le mieux à même à satisfaire l'action à exécuter. C'est le complément obtenu par la démarche ascendante qui est associée.



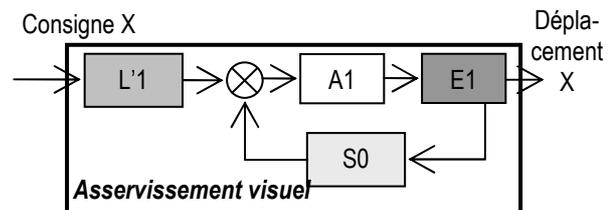
1.a) Démarche globale de conception



1.b) Modèle générique de conception des modules constitués



1.c) Module constitué de commande de déplacement en boucle ouverte



1.d) Module constitué de commande de déplacement en boucle fermée référencée vision

FIG. 1 – principe d'élaboration des modules constitués.

Les actionneurs utilisés pour effectuer des mouvements précis, de faible amplitude, avec des forces minimales, sont principalement basés sur des technologies piézoélectriques. Les comportements de ces micro-actionneurs sont souvent non linéaires et très sensibles à l'environnement, ce qui nécessite des lois de commandes appropriées (lois de commande robustes, contrôle actif des vibrations...). Un même actionneur peut être commandé de différentes manières et une interchangeabilité est nécessaire à ce niveau. Les organes terminaux (qui sont portés par les actionneurs et en contact avec les micro-objets) doivent pouvoir être changés avec toute la précision nécessaire à ce dispositif, et mettant en œuvre des techniques de positionnement et de solidarisation adéquates. Les capteurs sont aussi très spécifiques et opèrent souvent sans contact, leur intégration étant difficile compte-tenu de la taille des microrobots : mesure de position par technologie laser, mesure de force par analyse visuelle de la déformée d'un préhenseur, reconstruction de vue virtuelle en raison d'une zone d'inaccessibilité visuelle... Une tâche de micromanipulation peut combiner en même temps ou séquentiellement plusieurs systèmes de capteurs, d'où la nécessité de pouvoir changer le dispositif de mesure.

Une telle diversité de composition nécessite une organisation adaptée. Une architecture modulaire permettant d'ajouter, d'enlever, d'échanger des modules est rendue nécessaire ; la définition de modules élémentaires a permis de classer les éléments technologiques en quatre catégories :

- les modules élémentaires micro-actionneurs, notés  $A_i$ ,
- les modules élémentaires organes terminaux ou effecteurs, notés  $E_j$ ,
- les modules élémentaires microcapteurs, notés  $S_k$ ,
- les modules élémentaires lois de commandes, notés  $L_l$ .

L'exécution des actions est prise en charge par un module constitué, réalisé à partir de modules élémentaires et d'autres modules constitués (figure 1b) ; un module de données permet de préciser les paramètres qui sont physiquement contenus dans le module polymorphe, synthèse de cette association. L'organisation en boucle de commande de chaque module constitué permet l'exécution de différentes actions, comme par exemple une commande en boucle ouverte (figure 1c) ou en boucle fermée (figure 1d).

## 4 Application à une station de micromanipulation

### 4.1 Composition organique de la station

Nous développons une station de micromanipulation composée d'éléments modulaires (figure 2a). Cette station comporte quatre microrobots identiques nommés Tring et notés  $T_i$ , possédant une technologie d'actionneurs piézoélectriques et offrant chacun deux degrés de liberté (une rotation et une translation). Deux d'entre eux,  $T_1$  et  $T_2$ , sont en liaison pivot glissant sur un axe fixe et servent à constituer une pince permettant de saisir tout type d'objet (ce type de préhenseur permet de saisir toute taille d'objet, variant de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres), de les déplacer et de les déposer. Les deux autres microrobots fixes,  $T_3$  et  $T_4$ , sont reliés à deux axes parallèles reliés par une bande transporteuse ; ils réalisent un mouvement plan, utile pour déplacer une cible (autre objet à assembler, support d'assemblage...). Les lois de commande sont adaptables pour chaque microrobot ou pour chaque couple de microrobots pour des manipulations synchronisées. Les doigts de la pince, quant à eux, sont constitués de poutres piézoélectriques également commandables et permettant de contrôler la prise et le maintien d'un objet. L'objectif de cette station est de réaliser des assemblages de microcomposants par des stratégies de "pick and place" (figure 2b).

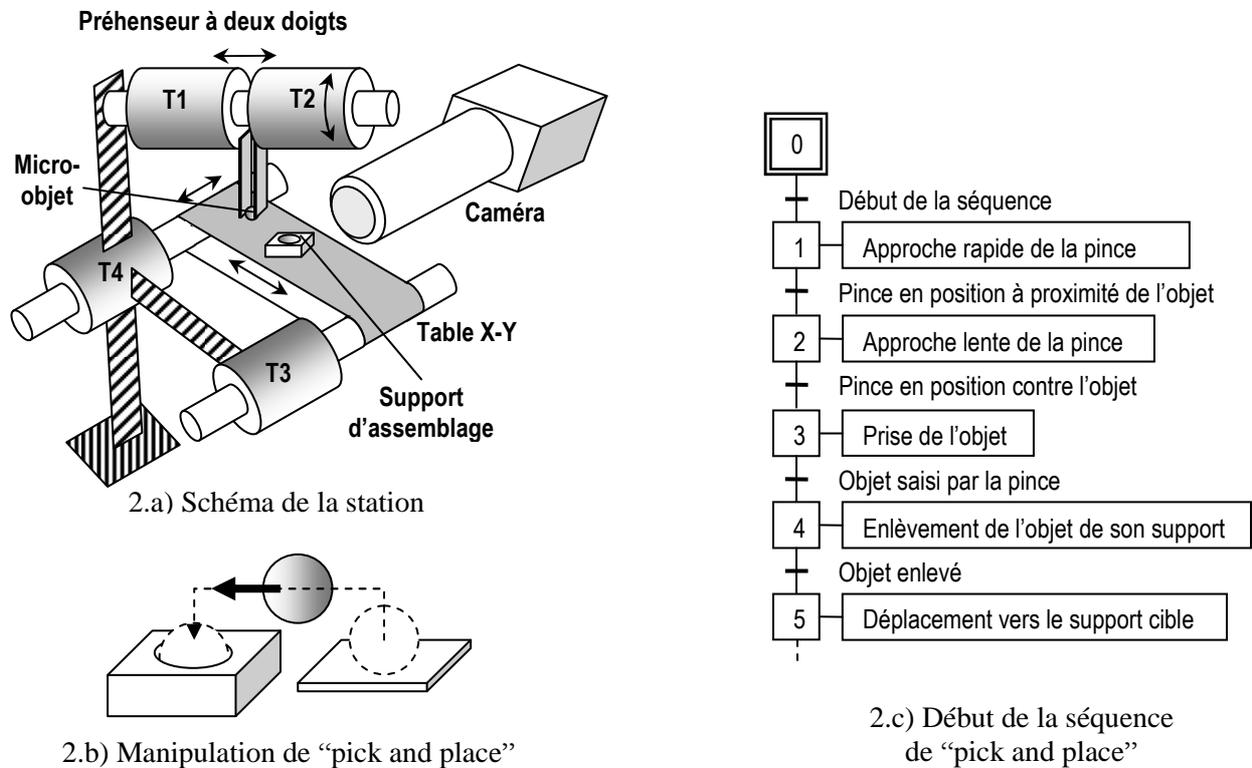


FIG. 2 – station de micromanipulation "Musine".

Une caméra permet de visualiser la scène et de fournir des indications sur la position et/ou la déformation de chaque élément : position du micro-objet, déflexion des organes terminaux... De plus, sur chacune des deux poutres piézoélectriques, une jauge de contrainte informe de la force exercée sur chacune d'elle. Si bien que

l'on dispose de plusieurs moyens pour connaître la force de maintien d'un objet : soit par position des deux microrobots (écart mesuré entre les deux / dimension de saisie de l'objet), soit par mesure de l'image de la déformation d'une poutre piézoélectrique, soit par mesure du courant de la poutre piézoélectrique (effet direct), ou encore par mesure avec la jauge de contrainte disposée sur une poutre.

## 4.2 Conception de la commande de la station

À partir de ce dispositif, nous allons envisager la conception de la structure de commande de la cellule. Dans cette station, il a été défini deux modules d'actionneur : un module élémentaire A1 caractérisant une poutre piézoélectrique (modèle inverse) et un module constitué A2 correspondant au microrobot, appelé Tring. On note que ce dernier est réalisé à partir de trois micro-actionneurs piézoélectriques dont la commande est déjà couplée et qu'il n'y a pas lieu de considérer une décomposition en modules élémentaires.

Trois lois de commande sont nécessaires : L1 pour la commande de la poutre, L2 pour la commande individuelle d'un Tring et L3 pour la commande synchronisée de deux Trings. Les capteurs utilisés sont S1 pour la poutre piézoélectrique utilisée en capteur (modèle direct), S2 pour la jauge de contrainte et S3 pour la caméra. L'élément servant à la préhension du micro-objet est la poutre piézo-électrique, ainsi, lorsqu'elle n'est pas commandée ni utilisée en capteur, elle sera qualifiée d'organe terminal et définie E1. Une particularité est que le même élément poutre piézoélectrique est défini comme A1 ou S1 ou E1 suivant le choix d'architecture de commande pour le système.

Une tâche de prise d'objet s'effectuera par une séquence d'actions (figure 2c). Chacune de ces actions sera exécutée par un module constitué. Une première étape (état 1) est une approche rapide de la pince vers l'objet à saisir. La précision n'est pas nécessaire et l'exécution d'un module par une commande directe (comme vu dans la figure 1.c) est suffisante. La seconde étape (état 2) est une approche précise pour arriver en contact avec l'objet sans le perturber et la mise en œuvre d'un module constitué (comme vu dans la figure 1.d) est requise. Ensuite, l'étape suivante (état 3) de la prise de l'objet va mettre en œuvre un autre module constitué gérant l'effort de saisie permettant le maintien de l'objet sans endommagement de celui-ci. Ensuite, la séquence de déplacement puis la séquence de dépose pourra faire l'objet de plusieurs modules constitués.

Nous avons identifié, pour une même séquence de manipulation consistant à saisir un micro-objet et à le déplacer sur un support, 27 stratégies différentes pour une commande en boucle fermée ; ces stratégies sont issues des associations possibles des différents actionneurs et capteurs disponibles pour notre station de micromanipulation ; l'introduction d'une nouvelle technologie peut augmenter ce nombre de cas. De plus, chacune des stratégies accepte plusieurs lois de commande différentes, ce qui représente une augmentation considérable du nombre de combinaisons possibles et des paramètres de réglage sont associés à chaque combinaison : la commande d'un actionneur piézoélectrique en mode "stick-slip" s'effectue par une alimentation générant différents signaux périodiques, chacun pouvant être réglé en fréquence et en amplitude.

A titre d'exemple, l'action de déplacement de la pince permettant d'approcher un objet à saisir (tel que décrit dans l'étape 1 du grafctet de la figure 2.c) peut s'obtenir sans contrôle de position (boucle ouverte non répertoriée dans le tableau). L'action d'approche (étape 2 du même grafctet) nécessite la mise en œuvre de la stratégie n°3.

Stratégie n°	Action	Micro-actionneur	Microcapteur	Nature d'information	Module constitué utilisé, composé de...
1	Mouvement du doigt1 seul	Tring1	Caméra	Position	A2 / L2 / S3 / E2
2	Mouvement du doigt2 seul	Tring2	Caméra	Position	A3 / L2 / S3 / E3
3	Mouvement de la pince seule	Tring1 + Tring2	Caméra	Position	A2 / A3 / L3 / S3 / E2 / E3
4	Prise d'un objet	Tring1	Jauge sur Piezo1	Force	A2 / L2 / S2
5	Prise d'un objet	Tring1	Jauge sur Piezo2	Force	A2 / L2 / S2
6	Prise d'un objet	Tring1	Jauge sur Piezo1 + Jauge sur Piezo2	Force	A2 / L3 / S2* S2* couplage de deux S2
...					

TAB. 1 – extrait de stratégies de commande de la station "Musine".

### 4.3 Intérêt de la structure modulaire

Il est possible de piloter cette station avec une multitude de possibilités. L'intérêt de pouvoir changer de mode aussi facilement et aussi rapidement permet d'une part d'évoluer dans la séquence (figure 2.c) et d'autre part de s'adapter aux contraintes du micromonde. Si au cours de l'assemblage d'un microproduit, la dérive d'un paramètre fait échouer la manipulation, il est permis de changer de stratégie. Par exemple, une évolution de température de quelques degrés ou encore un changement d'hygrométrie peut influencer considérablement sur les forces surfaciques et perturber le lâcher d'un objet qui adhère sur le préhenseur. Dans ce cas, plusieurs possibilités peuvent être envisagées :

- modifier l'accélération de la pince pour dégager plus rapidement de l'objet ; dans ce cas, le module constitué sera conservé, car le changement ne porte que sur les paramètres de la loi de commande ;
- modifier les organes terminaux par d'autres ayant une surface de contact plus petite ou ayant un revêtement hydrophile limitant l'effet de l'humidité ou limitant l'accumulation de charges électriques ; le remplacement de  $E_i$  par  $E_i'$  nous amène à définir un autre module constitué ;
- créer des vibrations pour décoller l'objet (changement de stratégie de lâcher) ; soit on peut agir en modifiant la loi de commande, remplacement de  $L_j$  par  $L_j'$  ; une autre possibilité est d'agir sur un autre élément actif tel que la poutre piézoélectrique qui fera l'objet d'un autre module constitué ;
- modifier la trajectoire de dépose (changement de sens de dépose) ; la loi de commande est ainsi modifiée et l'impact de reconfiguration est le même que dans le cas précédent ;
- utiliser un outil aidant à échapper l'objet à la dépose (utilisation d'un composant supplémentaire) ; la prise en compte de ce composant fera l'objet d'un autre module constitué si cet outil nécessite un actionnement particulier ou alors si sa présence entraîne une autre trajectoire de dépose.

Il n'est pas développé dans cet article les critères et stratégies de choix conduisant à l'une ou l'autre des solutions. Une expertise, liée à l'évolution de la connaissance des phénomènes observés, est nécessaire [9].

## 5 Conclusion

La méthode de conception des microsystèmes de production nous permet de pallier l'insuffisance des méthodes traditionnelles en apportant une dimension technologique et répondant à l'intégration des composants des microsystèmes de production. L'encapsulation des composants et des lois de commandes spécifiques dans des modules permet d'envisager des structures de commande organisables et paramétrables ; ces modules sont de ce fait rendus interchangeables et adaptables aux contraintes du micromonde, où les comportements incertains nécessitent des remises en causes fréquentes de l'outil de production.

## Références

- [1] Tanaka M., "Development of desktop machining microfactory", RIKEN Review, N° 34 Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Techniques, April, 2001
- [2] Girard C., Van Labeke D., Vigoureux J.M., "Van Der Waals Force Between a Spherical Tip and a Solid Surface", Physical Review, Vol. 40 n°18, The American Physical Society, 1989
- [3] Zhou Y. and Nelson B.J., "Adhesion Force Modeling and Measurement for Micromanipulation", SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation Vol. 3519, Boston, Massachusetts, November, 1998
- [4] Rakotondrabe M., Clévy C., Lutz P., "Hysteresis and vibration compensation in a NonLinear Unimorph Piezocantilever", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, France, 2008
- [5] Gauthier M., Regnier S., Rougeot P., Chaillet N., "Forces analysis for micromanipulation in dry and liquid medium", Journal of Micromechatronics, vol. 3, n°3-4, pp. 389-413, 2006
- [6] Daflon M., "Préhenseurs, conditions et stratégies pour une micromanipulation de précision", Thèse EPFL, n° 4160, 2008
- [7] Dombre E., "Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators", Hermes Science Publishing, ISBN 978-1-905209-10-1, 2007
- [8] Gendreau D, et al. "Modular architecture of the microfactories for automatic micro-assembly", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26 (2010) 354-360
- [9] Descourvieres E., "Contribution à l'évaluation de la reconfigurabilité et réorganiséabilité d'un micro système de production" Thèse de Doctorat, Besançon, France, soutenue le 7 Octobre 2010