## NMT

# Micro-nanomanipulation à distance avec rétroaction visuelle et tactile sous MEB par utilisation d'un levier d'AFM piézorésistif.

J.-M. Friedt<sup>\*</sup> – C. Thiébaud<sup>\*\*</sup>

\* LPMO CNRS, 32 avenue de l'observatoire, 25044 Besançon Cedex, FRANCE \*\* LOPMD UMR 6603, 16 route de Gray, 25030 Besançon Cedex, FRANCE

RÉSUMÉ. Nous avons développé un micro-nanomanipulateur basé sur un levier de microscope à force atomique (AFM) piézorésistif. Nous analysons les avantages de la commande à distance de notre instrument et de la rétroaction visuelle en temps réel à l'échelle nanométrique par introduction de notre montage dans un microscope à balayage électronique (MEB). Nous évaluons finalement les forces appliquées par la pointe d'AFM.

ABSTRACT. We have developed a micro-nanomanipulator based on a piezoresistive atomic force microscope (AFM) cantilever. We investigate the advantages of remote control of our instrument and of real time visual feedback at the nanometric level by including our setup in a scanning electron microscope (SEM). We evaluate forces acting on the AFM tip too.

MOTS-CLÉS : AFM, MEB, nanomanipulation, commande à distance

KEYWORDS: AFM, SEM, nanomanipulation, remote control

NMT. Volume xx - n° xx/2000, pages 1 à X

## NMT

# Micro-nanomanipulation à distance avec rétroaction visuelle et tactile sous MEB par utilisation d'un levier d'AFM piézorésistif.

J.-M. Friedt<sup>\*</sup> – C. Thiébaud<sup>\*\*</sup>

\* LPMO CNRS, 32 avenue de l'observatoire, 25044 Besançon Cedex, FRANCE \*\* LOPMD UMR 6603, 16 route de Gray, 25030 Besançon Cedex, FRANCE

RÉSUMÉ. Nous avons développé un micro-nanomanipulateur basé sur un levier de microscope à force atomique (AFM) piézorésistif. Nous analysons les avantages de la commande à distance de notre instrument et de la rétroaction visuelle en temps réel à l'échelle nanométrique par introduction de notre montage dans un microscope à balayage électronique (MEB). Nous évaluons finalement les forces appliquées par la pointe d'AFM.

ABSTRACT. We have developed a micro-nanomanipulator based on a piezoresistive atomic force microscope (AFM) cantilever. We investigate the advantages of remote control of our instrument and of real time visual feedback at the nanometric level by including our setup in a scanning electron microscope (SEM). We evaluate forces acting on the AFM tip too.

MOTS-CLÉS : AFM, MEB, nanomanipulation, commande à distance

KEYWORDS: AFM, SEM, nanomanipulation, remote control

NMT. Volume xx - n° xx/2000, pages 1 à X

# 1. Introduction

Les développements récents dans le domaine de la micro-nanomanipulation visent à inclure la réalité virtuelle pour faciliter un accès intuitif au monde des forces agissant entre des agrégats de particules [HAR 99], virus et cellules biologiques [GUT 99], nano-tubes de carbone [AUS 99, YU 99] et même entre atomes individuels. Faire resentir les forces microscopiques qui ne suivent pas les lois macroscopiques qui nous sont intuitives (la force de gravité devient négligeable alors que les interactions électrostatiques et de capillarité sont prédominantes) n'est pas une tâche triviale : le partage de l'expérience de manipulation et de l'équipement nécessaire au travers d'instruments virtuels distribués grâce à Internet peut largement accélérer les expériences visant à utiliser un AFM pour la nano-manipulation. Une bonne compréhension et des modèles adéquats de l'interaction entre la pointe et l'échantillon sont requis pour un rendu précis des forces de rétroactions issues de l'AFM durant le processus de manipulation.

Nous avons utilisé un levier d'AFM piézorésistif pour la télémanipulation d'objets micrométriques avec retour d'efforts, et pour la manipulation d'objets nanométriques avec retour simultané de force et visuel en introduisant notre instrument dans un microscope à balayage électronique. Nous avons développé les aspects théoriques de l'interaction selon la mécanique classique entre la pointe de silicium et un couche épaisse (100 nm) d'or.

# 2. Micro-manipulateur contrôlé à distance

Les applications dans des domaines ultra-propres ou corrosifs où la présence humaine n'est pas souhaitable requièrent la capacité de contrôler à distance notre micro/nanomanipulateur.

Nous avons utilisé un levier piézorésistif (et non pas une méthode plus classique [FAN 00] de mesure de déflection du levier au moyen d'un photo-détecteur 4-quadrants ou d'un interféromètre de Michelson dans lequel un des bras finit sur la surface réfléchissante du levier) pour les raisons suivantes :

- absence de réglages complexes d'alignement d'éléments optiques,

- faible volume occupé : aucun élément optique externe n'est requis (lame semitransparente, objectif de microscope, miroirs),

- signal de sortie compatible avec une acquisition électronique.

L'utilisation d'un levier piézorésistif permet la réalisation d'un AFM simple en introduisant la pointe dans un pont de Wheatstone dont la tension de sortie est alors une fonction de la déflection du levier (figure 1). Cette tension est amplifiée et translatée de façon à être lue par un convertisseur analogique-numérique connecté à un ordinateur PC compatible IBM fonctionnant sous Linux (figure 2). La translation du signal (*offset*) est déterminée par un convertisseur numérique-analogique, permettant de to-

# 4 NMT. Volume xx - n° xx/2000



**Figure 1.** Circuit électronique utilisé pour la mesure de déflection du levier piézorésistif. La sortie du pont de Wheatstone est connectée à un amplificateur opérationnel d'instrumentation AD620. La sortie de cet amplificateur opérationnel est soit connectée à un oscilloscope numérique à mémoire ou à une série de circuits de translation et d'amplification du signal pour une lecture par un convertisseur analogiquenumérique AD574.

talement automatiser les réglages préalables de l'AFM (le gain étant constant ou fixé parmi quelques valeurs pré-définies par un multiplexeur analogique).



**Figure 2.** *Montage expérimental du dispositif de micro-manipulation contrôlé à distance.* 



**Figure 3.** Image prise sous un microscope optique au cours de la manipulation d'un agrégat de particule micrométrique de Ni déposées sur la surface d'un dispositif à ondes de surface (alternance de bandes sombres et claires en arrière plan). Noter les agrégats collés au levier alors que ce dernier ce déplace vers le bas de l'image.

Une caractéristiques de micro-systèmes électro-mécaniques (*MEMS*) est que les capteurs et les actuateurs contrôlant le déplacement des dispositifs micro-mécaniques sont totalement automatique et inclus dès le développement de l'instrument. Un contrôle totalement électronique est donc requis, et la commande totalement réalisée par ordinateur peut facilement être atteinte, tel que nous l'avons obtenu avec notre instrument basé sur un levier d'AFM. La disponibilité de librairies de programmation pour l'accès à un réseau TCP/IP dans les systèmes d'exploitation de type Unix permettent l'extension à la commande à distance aisée à implémenter.

Nous avons développé les cartes informatiques d'acquisition et de contrôle ainsi que les logiciels associés pour la commande à distance. La rétroaction visuelle se fait aux longueurs d'ondes visibles au moyen d'une Connectix Quickcam (figure 3) adaptée à un microscope optique (objectifs longues focales permettant des grossissements jusqu'à 1000 fois). Pour toutes ces expériences, l'échantillon est manuellement positionné sous le microscope optique et la mise au point de la caméra est réalisée manuellement par l'opérateur (figure 4), tandis que toutes les opérations suivantes sont dirigées par ordinateur (utilisation d'une table de positionnement commerciale possédant une résolution nanométrique, linéarisée par l'utilisation en boucle fermée de capteurs capacitifs de position, et définition de la translation du signal électrique issu du levier d'AFM).

Le logiciel est divisé en trois parties : le serveur contrôle l'expérience dans le laboratoire et exécute les ordres reçus, le client est exécuté sur l'ordinateur distant et affiche les images successives envoyées par le serveur (figure 3), et le logiciel de contrôle tourne sur un ordinateur distant sécurisé : il s'agit d'une interface graphique simple chargée d'émettre des ordres de contrôle de la caméra et de la position de l'échantillon situés dans le laboratoire. Cette division en trois parties est dictée par un



**Figure 4.** En haut : vue d'ensemble du système de micro-manipulation contrôlé à distance. Un microscope optique à longue focale est utilisé pour une visualisation optique de l'opération de déplacement en cours. En bas : vue rapprochée de l'échantillon fixé à la table de positionnement, et du levier d'AFM suivi des circuits électroniques associés fixés à une table de positionnement micrométrique manuel 1D (direction verticale).

souci de sécurité de l'expérience (n'importe qui peut observer passivement la manipulation en cours mais seuls les utilsateurs habilités peuvent envoyer des commandes) et de division des fonctionnalités (le serveur exécute des commandes de bas niveau et doit pouvoir accéder au niveau matériel de l'ordinateur situé dans le laboratoire, tandis que le client et le logiciel de contrôle doivent pouvoir facilement accéder à un réseau TCP/IP tout en étant aussi portables que possible d'une architecture d'ordinateur à l'autre et d'un système d'exploitation à l'autre). Tous ces logiciels ont dans un premier temps été écrit en C, et nous avons dans un souci de portabilité tenté une écriture en Java du client et du logiciel de contrôle. Ces dernières étaient cependant si lentes (apparemment à cause de l'algorithme de décompression des images transmises) qu'elles étaient inutilisable.

#### 3. Introduction d'un nanomanipulateur dans un MEB

Grâce au faible encombrement de notre circuit de mesure de déflection du levier d'AFM, nous avons pu introduire le dispositif de manipulation décrit dans le chapitre précédent dans un MEB dans le but de manipuler des objets de très petites dimensions tout en conservant la rétroaction visuelle (figure 5).

Le travail décrit précédemment sur la manipulation en milieu aérien à distance n'a pas pu être transposé lors de l'introduction de notre dispositif dans le MEB car notre logiciel de contrôle aurait dû être fusionné avec le logiciel de contrôle du MEB dont nous ne possédons pas les sources.

Le travail dans un MEB comporte deux avantages :

1. travail dans le vide qui retire les forces indésirables de capillarité (figure 3) et facilite l'interprétation de la rétroaction tactile,

2. rétroaction visuelle en temps réel avec des résolutions allant jusqu'à quelques dizaines de nanomètres.

Les méthodes classiques incluent l'utilisation d'une image, obtenue par balayage de la pointe d'AFM sur l'échantillon en appliquant une force aussi faible que possible, dans un environnement de réalité virtuelle qui modélise la manipulation en cours, et la mise à jour régulière du modèle par l'état réel de l'échantillon par un nouveau balayage [GUT 99]. Cette méthode a l'avantage de pouvoir fonctionner en milieu liquide et est donc compatible avec la manipulation d'échantillons biologiques. Cependant, notre positionneur étant trop lent pour l'imagerie (bande passante de la boucle de rétroaction en position : 30 Hz), nous avons trouvé nécessaire d'inclure l'AFM dans le MEB pour une rétroaction visuelle en temps réel des résultats des opération effectuées par le manipulateur.

Nous avons utilisé deux types d'échantillons au cours de nos manipulations : des billes de silice de 250 à 400 nm de diamètre et une couche de Cr/Au de 100 nm d'épaisseur. Nous avons tenté d'introduire des échantillons biologiques dans le MEB sans processus de polymérisation (de façon à ne pas modifier les propriétés mécaniques de la membrane que nous voulions analyser), sans succès.



**Figure 5.** Dispositif installé dans le MEB : le levier d'AFM et l'électronique de traitement du signal sont fixés au porte-échantillon de MEB (degrés de liberté :  $\theta$ ,  $\varphi$ , z) tandis que l'échantillon à analyser est fixé à 3 tables de micro-positionnement manuelles auxquelles est attaché un long tube piézoélectrique. La combinaison {échantillon+AFM} peut être positionnée dans les directions x et y sous la faisceau d'électrons. L'absence de parallélisme entre le porte-échantillon du MEB (auquel est fixée la pointe d'AFM) et le tube piézoélectrique (auquel est fixé l'échantillon) introduit un angle noté  $\alpha$  au cours du processus de manipulation.



**Figure 6.** À gauche : les points notés A et B indiquent la position de trous réalisés par un contact unique de la pointe de l'AFM avec la couche d'or (épaisseur de 100 nm). Les points notés C et D présentent la destruction de la couche d'or après plusieurs contacts successifs de la pointe d'AFM. À droite : courbe de déflection du levier (traduisant la force pointe-échantillon) observée au cours de la phase d'approche, contact et retrait de la pointe sur l'échantillon électriquement conducteur.

Un impact unique de la pointe d'AFM sur la couche d'or perce un petit trou de 800 nm de diamètre, tandis que plusieurs impacts au même endroit fait rapidement



**Figure 7.** À gauche : image MEB prise au cours de la gravure au moyen de la pointe d'AFM d'un motif dans un échantillon formé de quatre couches en épaisseur de billes de silice de 400 nm de diamètre sur un wafer de silicium. À droite : courbe de retour d'effort observée à la sortie du pont de Wheatstone au cours du tracé du motif. Le contact de la pointe sur l'échantillon est facilement observable. Cependant, le signal devient très bruité au cours de la variation manuelle de résistance des potentiomètres contrôlant la tension de polarisation du tube piézoélectrique.



**Figure 8.** Pointe d'AFM après avoir gravé un motif sur un échantillon formé d'une mono-couche de billes de silice de 250 nm de diamètre sur un wafer de silicium. Remarquer le grand nombre de billes collées au levier et à la pointe (gauche). La pointe a été très rapidement usée (demi-angle théorique : 12°).

croître le diamètre du trou (figure 6, à gauche). La courbe de retour de force présente des comportements différents selon que la pointe soit en contact ou non avec la surface de l'échantillon électriquement conducteur (figure 6, droite).

Les forces d'adhésion entre les petites billes de silice (400 et 250 nm de diamètre) et entre les billes et la surface du wafer de silicium sont très faibles : graver des motifs sur ce type d'échantillons est aisé et les résultats sont visibles au MEB. Nous avons tracé avec succès des motifs géométriques dans un échantillon de billes agencées en réseau compact hexagonal multi-couches (figure 7, à gauche). La force appliquée au

levier varie au cours du processus de manipulation comme prévu par la mécanique classique du contact (figure 7, à droite).

Le problème majeur que nous avons rencontré est d'obtenir un angle adéquat entre l'échantillon et le levier d'AFM : pour un angle trop important, le contact entre le levier et l'échantillon ne se fait pas au niveau de la pointe de dimensions nanométrique mais de l'extrémité du levier. Dans ce cas, le motif tracé est beaucoup plus large que prévu par la largeur de la pointe. La pointe présentée ici avait avant manipulation un cône de demi-angle de  $12^{\circ}$ , et de 3  $\mu$ m de long. Cependant, l'usure de la pointe étant très rapide, ce problème d'angle optimum devient rapidement une limitation majeure après avoir gravé des motifs de seulement quelques microns de longueur (figure 8).

# 4. Évaluation des forces agissant sur la pointe d'AFM

L'interprétation des images prises au MEB de nos manipulations est relativement aisée car la mécanique considérée à ces échelles est encore la mécanique classique puisque nous considérons des objets de dimensions supérieures à 10 nm. Nous considérerons toutes les surfaces mises en jeu uniformes et ne subissant pas de transition de phase au cours de la manipulation [CHE 00].

La principale surprise a été notre capacité à graver des traits fins dans les billes de silice (jusqu'à une bille de largeur de trait) alors qu'il nous a été impossible de graver un motif géométrique dans l'or. Notargiacomo et al ont pu tracer, avec des méthodes similaires, des traits de l'ordre de 100 nm de large dans le polymère qui sert de résine aux masques pour la lithographie [NOT 99]. Nous avons tenté d'interpréter ce résultat en terme de différences de forces d'adhésion. Le levier que nous utilisions a une constante de raideur donnée par le fabriquant de 2,5 N/m (levier prévu pour le contact mode). Sachant que nos pas de déplacement vertical (définis par la résolution de la table de positionnement du MEB) sont de 2  $\mu$ m, la force normale maximale que nous appliquons est de 5 µN. Nous avons pu trouver (http://intranet.siu.edu/~ cafs/surface/file9.html, réalisée par Dr. Marx) que la force latérale subie par une pointe de silicium appuyant sur une couche d'or avec une force normale de l'ordre de 60  $\mu$ N (au moyen d'un levier de raideur 2500 N/m) est de l'ordre de 600 nN, soit un coefficient de frottement dynamique de l'ordre de  $10^{-2}$ , que nous considérons égal au coefficient de frottement statique. D'autres estimations [AND 95] proposent des coefficients de frottement entre 2,5 (pour une force normale d'environ 10  $\mu$ N) à 0,5 (pour une force normale supérieure à 100  $\mu$ N). Ceci signifie que la force latérale que subit notre pointe lors des manipulations sur la couche d'or est au moins de l'ordre de 50 nN, voir avec les plus grandes valeurs de l'ordre de 10  $\mu$ N. Ce résultat peut être comparé à la force d'adhésion capillaire (normale à la surface) qui s'exprime par  $F \simeq 4\pi R \gamma_L \cos(\vartheta)$ , R étant le rayon de la sphère en contact avec le plan (R est supposé petit, dans notre cas R = 10 nm),  $\gamma_L$  l'énergie superficielle du liquide (par exemple pour l'eau,  $\gamma_{eau} = 72 \text{ mJ.m}^{-2}$ ) et  $\vartheta$  l'angle de contact du ménisque d'eau (qu'on approximera comme nul) [BEC 99]. Dans notre cas particulier l'application numérique donne une force de capillarité lors d'expériences en milieu aérien de F = 9 nN, du même ordre de grandeur que la force de frottement dans le vide entre la pointe de silicium et la surface d'or  $(600 \times 10^{-2} = 6 \text{ nN})$ . Nous comprenons là la complexité des interprétations des images obtenues en milieu aérien des images d'AFM : un grand nombre de phénomènes de même ordre de grandeur se superposent. La figure 8 illustre l'adhésion de particules de silice de 250 nm de diamètre au levier d'AFM sous l'effet des forces électrostatiques ou de Van der Waals (absence de force de capillarité lors du travail sous vide).

D'autre part, nous savons que la raideur d'un levier se calcule par la formule  $K_L = \frac{Eh^3l}{4L^3}$ ,  $h = 3 \ \mu\text{m}$  étant l'épaisseur du levier,  $l = 50 \ \mu\text{m}$  sa largeur et  $L = 305 \ \mu\text{m}$  sa longueur tandis que E est le module d'Young du matériau utilisé pour réaliser le levier  $(E_{Si} = 131 \text{ GPa}$  dans notre cas, ou  $E_{Si_3N_4} = 400 \text{ GPa}$ ). Nous avons déjà mentionné que  $K_L = 2, 5 \ \text{N/m}$  pour une flexion du levier (d'après les données du constructeur), qui est proche de la valeur attendue par le calcul de 1,6 N/m (l'écart est certainement dû à des différences de configurations entre le levier réel et le modèle et l'incertitude sur l'épaisseur du levier qui est donnée par le constructeur entre 1,5 et 5  $\ \mu\text{m}$ : avec ces incertitudes,  $K_L$  est dans l'intervalle  $[0, 2; 5, 4] \ \text{N/m}$ ). La raideur de torsion s'écrit quant à elle  $K_t = \frac{Eh^3l}{6(1+v)LH^2}$  où v est le coefficient de Poisson (v = 0, 27) et H la hauteur de la pointe ( $H \simeq 2 \ \mu\text{m}$ ). Donc  $\frac{K_t}{K_L} = \frac{2L^2}{3(1+v)H^2}$  qui vaut dans notre cas particulier ( $L = 305 \ \mu\text{m}$ ) 5425 (avec  $K_L \simeq 2, 5 \ \text{N/m}$ ). Si le déplacement latéral est de l'ordre de 5  $\ \mu\text{m}$ , nous constatons que la force de torsion du levier est de l'ordre de 27 mN, très supérieure à la force de frottement dynamique (qui se situait entre 50 nN et 10  $\ \mu\text{N}$ ). Il y a donc bien glissement de la pointe de silice sur la couche d'or, et non pas adhésion comme ce serait le cas si la force de torsion était de l'ordre de grandeur de la force de frottement.

Le calcul précédent peut être affiné en tenant compte de la géométrie de la pointe et de la nature de l'échantillon. Nous savons [BEC 99] que pour une pointe de forme conique, la force F appliquée au levier nous est donnée en fonction de la profondeur p dont s'est enfoncée la pointe dans l'échantillon par  $F = \frac{2E^*p^2}{\pi \tan(\alpha)}$  où  $\alpha$  est le demiangle au sommet de la pointe (la valeur donnée pour  $\alpha$  par le constructeur de nos pointes est  $12^o$ ) et  $E^*$  est le module d'Young équivalent tenant compte des propriétés mécaniques des deux matériaux mis en contact.  $E^*$  s'exprime par  $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ ,  $E_i$  étant le module d'Young du matériau et  $\nu_i$  son coefficient de Poisson (rappelons que  $\nu_{Au} = 0, 42, \nu_{Si} = 0, 27, E_{Si} = 131$  GPa et  $E_{Au} = 82$  GPa). Pour une pointe parabolique de révolution, on a  $F = \frac{4}{3}E^*pa$ , a étant le rayon de la pointe à la surface de l'échantillon (ou rayon de contact). Dans notre expérience, le contact est siliciumor, et nous avons ainsi  $E^* = 55 \pm 5$  GPa, et  $h = \sqrt{\frac{\pi \tan(\alpha)F}{2E^*}} = 3$  nm dans le modèle de la pointe conique, pour une force appliquée  $F = 2 \mu N$ , et  $h = \frac{3F}{4E^*a} = 2, 5$  nm pour  $a \simeq 10$  nm. Nous constatons donc que l'indentation effectuée par le levier dans l'or est très faible (en dessous de la résolution de notre MEB), et que les trous que nous observons dans nos images proviennent très certainement d'un arrachement de la couche d'or qui tient mal sur le verre (malgré quelques nm de Cr qui doit servir de couche d'attache). Nous avons tenté d'utiliser des leviers plus rigides (20 N/m) conçus

pour le mode dynamique, mais leur positionnement par rapport à l'échantillon est très délicat (leviers très courts). Nous n'avons pas pu vérifier si l'utilisation de ces leviers de constante de raideur plus élevée permet d'indenter l'or plus profondément.

Les forces régissant l'adhésion entre billes de silice est un problème complexe qui n'a pas été abordé.

#### 5. Conclusion

Nous avons pu développer:

- un manipulateur commandé à distance d'objets micrométriques totalement contrôlé au travers d'un réseau TCP/IP, avec retour d'informations tactiles et visuelles.

- un manipulateur d'objets nanométriques sous vide avec retour d'informations tactiles et visuelles en introduisant notre montage à base de levier d'AFM dans un MEB.

Nous avons évalué les forces agissant sur la pointe d'AFM et avons pu expliquer notre capacité à graver des motifs dans une couche de billes de silice tandis que la couche d'or a été à peine modifiée par nos tentatives de manipulations.

La réalisation de micro-dispositifs électromécaniques (*MEMS*) est aujourd'hui basée sur une extension à trois dimensions de techniques de fabrication de circuits intégrés qui sont intrinsèquement deux-dimensionnels (2D – réalisation d'un masque précis puis gravure ou diffusion dans la  $3^{ème}$  dimension). Ces méthodes, basées sur les principes de la lithographie et de l'attaque chimique, sont limitées par la longueur d'onde utilisée pour tracer les motifs sur la couche photosensible (UV ou rayons X au mieux [ROT 99]) et par l'isotropie des méthodes d'attaque. De meilleurs outils sont donc requis pour la fabrication et l'assemblage de dispositifs réellements 3D. L'utilisation de produits commercialement disponibles que sont les leviers de microscopes à champ proche est une façon directe de tester la possibilité de réaliser de structure micro/nanométriques [HAR 99].

Cette étude est une première étape vers la réalisation d'instruments réellement 3D travaillant aux échelles micro et nanométriques. Les développements ultérieurs incluent la réalisation d'outils adaptés à une tâche spécifique selon nos modèles macroscopiques.

## 6. Bibliographie

- [AND 95] ANDO Y., ISHIKAWA Y., KITAHARA T., « Friction characteristics and adhesion force under low noraml load », *Journal of Tribology*, vol. 117, 1995, p. 569-574.
- [AUS 99] AUSMAN K. D., ROHRS H. W., YU M., RUOFF R. S., « Nanostressing and mechanochemistry », Nanotechnology, vol. 10, 1999, p. 258-262.

- [BEC 99] BEC S., ODINI O., LOUBET J. L., « Pratique de la microscopie à force atomique (AFM), nanodureté et méanique du contact », Formation permanente, École Centrale de Lyon, , 1999.
- [CHE 00] CHEONG W., ZHANG L., « Molecular dynamics simulation of the phase transformations in silicon monocrystals due to nano-indentation », *Nanotechnology*, vol. 11, 2000, p. 173-180.
- [FAN 00] FANG T.-H., WENG C.-I., CHANG J.-G., « Machining characterization of the nano-lithography process using atomic force microscopy », *Nanotechnology*, vol. 11, 2000, p. 181-187.
- [GUT 99] GUTHOLD M., FALVO M. R., MATTHEWS W. G., PAULSON S., WASHBURN S., ERIE D., SUPERFINE R., JR. F. B., II R. M. T., « Controlled Manipulation of Molecular Samples with the NanoManipulator », AIM'99, 1999.
- [HAR 99] HARTMANN E., CARLSSON S., CEHOVIN A., JUNNO T., KORTEGAARD C., LING T., MONTELIUS L., SAMUELSON L., THELANDER C., « Moving Au colloidal particles with the tip of an atomic force microscope for the assembly of prototype nanometer-scale devices », EUSPEN'99, 1999.
- [NOT 99] NOTARGIACOMO A., FOGLIETTI V., CIANCI E., CAPELLINI G., ADAMI M., FA-RACI P., EVANGELISTI F., NICOLINI C., « Atomic force microscopy lithography as a nanodevice development technique », *Nanotechnology*, vol. 10, 1999, p. 458-463.
- [ROT 99] ROTCHILD M., BLOOMSTEIN T. M., CURTIN J. E., DOWNS D. K., FEDYNYSHYN T. H., HARDY D. E., KUNZ R. R., LIBERMAN V., SEDLACEK J. H. C., UTTARO R. S., BATES A. K., PESKI C. V., « 157 nm: deepest deep-ultraviolet yet », *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, n° 6, 1999, p. 3262-3267.
- [YU 99] YU M., DYER M. J., SKIDMORE G. D., ROHRS H. W., LU X., AUSMAN K. D., EHR J. R. V., RUOFF R. S., « Three-dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope », *Nanotechnology*, vol. 10, 1999, p. 244-252.