

Interface haptique pour nanomanipulateur AFM

Pierre Letier, Thierry Saive, Ioan Burda
Université Libre de Bruxelles, Laboratoire de Structures Actives
Avenue F.D. Roosevelt, 50 CP 165/42
B-1050 Bruxelles
E-mail : scmero@ulb.ac.be , WebSite : <http://www.ulb.ac.be/scmero/>

Abstract: Cet article présente les recherches menées par le Laboratoire de Structure Active de l'ULB sur le développement d'une interface haptique pour un microscope à force atomique (AFM). Celle présentée ici possède trois degrés de liberté et permet de commander une pointe AFM suivant les trois axes de translation. Par l'intermédiaire de ses moteurs, elle transmet également à l'utilisateur des forces proportionnelles à celles appliquées sur la pointe du microscope. Le tout est commandé par un environnement Matlab.

Il est également fait question des implications d'une application au niveau micro/nanométrique telle que « l'effet d'échelle » responsable de l'importance des forces de capillarité et électrostatiques par rapport aux forces volumiques.

Keywords: haptique, nanomanipulation, AFM

I. INTRODUCTION

Les nanotechnologies constituent actuellement un domaine scientifique en pleine expansion [1]. Désireux de prendre part à cette nouvelle discipline, le laboratoire de construction mécanique et robotique de l'ULB oriente une partie de ses recherches vers la construction d'un nanomanipulateur. Le terme nanomanipulation prend ici en compte toutes les applications liées à l'interaction avec la matière au niveau nanométrique (déplacement d'objets ou molécules, lithographie,...).

Suite à l'apparition de nouveaux outils comme les SPM (*Scanning Probe Microscope*), il est en effet possible aujourd'hui d'interagir avec la matière au niveau atomique. Dans cette optique, le laboratoire s'est doté d'un microscope à force atomique (AFM NT-MDT) et étudie son adaptation à des applications de nanomanipulation.

Appartenant à la famille des SPM, l'AFM a été conçu initialement pour topographier des surfaces de petite taille (1nm à quelques μm de côté) avec une résolution descendant sous le nanomètre. Lors d'un relevé topographique, une pointe pilotée en trois dimensions par des actionneurs piézo-électriques, balaye la surface étudiée. Une méthode optique, basée sur la flexibilité du support de la pointe permet de mesurer en temps réel les forces d'interaction pointe - surface (Capillarité, forces de Van der Waals, électrostatiques,...) Ainsi doté de capteurs et d'actionneurs, un microscope à force atomique semble bien conditionné pour effectuer des tâches de nanomanipulation.

La résolution des meilleurs microscopes optiques étant de l'ordre de $0.5 \mu\text{m}$, le sens de la vue ne peut être utilisé par l'opérateur dans le cadre de nanomanipulations. Les capteurs de force de l'AFM constituent la seule information permettant à celui-ci de connaître en temps réel la configuration du nano-monde. Dans cette perspective, une interface haptique a été développé au sein du service. Ce système articulé permet entre

autre à un utilisateur de déplacer la pointe de l'AFM tout en ressentant en temps réel les forces agissant sur celle-ci.

Cet article, détaillera dans un premier temps le principe de fonctionnement et les particularités du microscope à force atomique utilisé au laboratoire ainsi que les interactions spécifiques au nano-monde. Un deuxième point abordera la conception de l'interface haptique et présentera ses caractéristiques. Ensuite, différentes applications envisageables avec le microscope seront examinées (manipulation, lithographie, topographie) de même que les méthodes d'interfaçage adéquates avec l'interface haptique.

II. AFM ET MICRO/NANO-MONDE

Afin d'envisager des applications avec l'AFM dans le nano-monde, il est nécessaire en premier lieu de connaître et comprendre l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu. Pour ce faire, nous devons décrire d'une part les différents composants du microscope et ses modes d'utilisation et d'autre part les interactions entre celui-ci et les objets manipulés/modifiés.

A. Principe de l'AFM

Le microscope à force atomique est constitué de différentes parties : la sonde qui interagit avec la matière, le système de scanner piézoélectrique et le système optique de mesure de déflexion (Fig. 1).

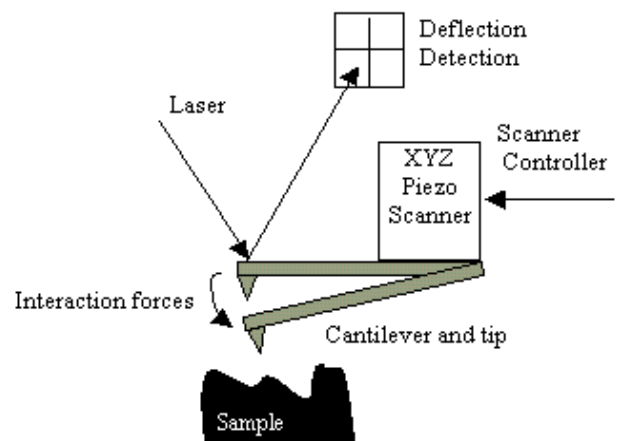


Fig. 1. Principe de l'AFM

1) La sonde

La sonde consiste en un cantilever, une pointe rigide (tip) et un substrat. Le cantilever est une poutre encastée-libre. Elle est fixée au substrat solide inséré dans le système d'attache du scanner. La pointe rigide se situe à l'extrémité libre du cantilever. La plupart des cantilevers sont de forme triangulaires ou rectangulaires avec une orientation horizontale

par rapport au substrat. Il est néanmoins possible de trouver dans la littérature d'autres types de formes ou orientations pour des applications spécifiques [2][3][4]. Ils sont en grande majorité fabriqués sur base des techniques de couches de Silicium utilisées en microélectronique. Les paramètres importants qui définissent la probe dans le cadre de topographie ou de manipulation sont la rigidité du cantilever, sa première fréquence de résonance, le rayon de courbure de la pointe, sa hauteur et son angle de cône. Les deux premiers sont directement déterminés par les dimensions géométriques et les matériaux utilisés. La rigidité peut s'étendre entre 0.01 et 100 N/m et la fréquence de résonance entre 40 et 400 kHz. La pointe rigide d'une hauteur habituellement comprise entre 5 et 15 μm possède un rayon de courbure situé aux alentours des 10 nm. Celle-ci peut être également recouverte de matériaux divers pour des applications par exemple électrostatiques ou magnétiques. Le choix des paramètres du cantilever dépend de l'application envisagée avec la microscope.

2) Le système de scanner

Une deuxième partie importante de l'AFM est le système piézoélectrique du scanner. Celui installé sur l'AFM de NT-MDT permet un déplacement du cantilever parallèlement à la surface étudiée dans le plan X,Y et un mouvement perpendiculaire le long de l'axe Z. Ceux-ci sont proportionnels aux tensions appliquées sur les piézos. Avec notre appareil, la gamme de déplacement est de 50 μm suivant X et Y et 2,5 μm suivant Z. La commande des tensions des piézos est réalisée par des DAC de 22 bits. Cela permet donc en théorie d'atteindre des pas de scannage autour du dixième d' A° . Le système de positionnement du cantilever ne possède pas directement de système de mesure. Il travaille donc en boucle ouverte. L'utilisation des piézos implique cependant certains problèmes d'hystérésis et de drift thermique. Dans le cadre de nanomanipulation il est important de pouvoir se positionner avec précision à n'importe quel point de la zone de travail en étant certain de sa position. L'utilisation d'un étage additionnel de positionnement en boucle fermée semble donc nécessaire.

3) Le système optique

La troisième partie importante de l'AFM est le système de mesure optique de déflexion (Fig 2). Celui-ci consiste en un laser qui est réfléchi par le cantilever sur une cellule de quatre photodiodes. En fonction du sens de la déflexion du cantilever (verticale et latérale) et de l'importance de celle-ci, la position du point d'impact varie sur le détecteur. Une mesure de l'intensité lumineuse de chaque photodiode permet de déduire les déflexions verticales et latérales (signaux appelés DFL) et d'en déduire les forces verticales et latérales qui agissent sur le cantilever (1). La résolution verticale de déflexion annoncée par le constructeur est de 0.05nm.

$$F = K\xi \quad (1)$$

avec ξ la déflexion du cantilever et K sa raideur.

4) Modes de fonctionnement

Dans le cadre de nanomanipulation du nano-monde, il est également intéressant de se faire une idée des différents modes d'opération de l'AFM et de leurs implications pour les

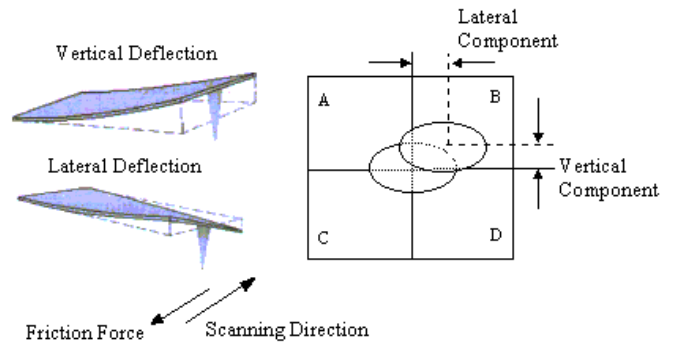


Fig. 2. Système optique de déflexion (Instruction Manual SMENA NT-MDT)

applications envisagées. Nous pouvons distinguer deux grandes familles de technique : le mode contact et le mode vibratoire. Dans le premier cas, la pointe rigide est mise en contact avec l'échantillon avec une déflexion définie du cantilever. En balayant la surface, le système de contrôle du microscope va essayer de garder cette valeur constante en modifiant la position en Z du cantilever. En enregistrant cette information, il récupère ainsi directement la topographie de l'échantillon. Dans le mode vibratoire, le cantilever est excité aux alentours de sa fréquence de résonance. Là deux techniques sont envisageables. La première, appelée semi-contact mode ou tapping mode, consiste à réaliser de grandes oscillations et à venir toucher ponctuellement l'échantillon. L'autre, appelée non-contact mode, utilise de plus petites oscillations et n'entre pas en contact avec la surface étudiée. Dans les deux cas, le système mesure l'amplitude et la phase du signal d'oscillation qui sont modifiées par les interactions avec la matière afin de réaliser une boucle similaire à celle du contact mode. En ce qui concerne la topographie, chaque technique possède ses avantages et ses inconvénients. Le mode contact permet d'atteindre des résolutions supérieures mais peut endommager l'échantillon lors de la mesure (surtout dans les applications biologiques) [5]. De plus, l'existence d'une couche de liquide induisant des forces de capillarité, ou des forces latérales lors du scannage peuvent induire des distorsions.

D'autres modes liés à des interactions électrostatiques ou magnétiques existent également. Ils sont cependant moins répandus et destinés à des applications plus spécifiques.

B. Les influences du nano-monde

1) L'effet d'échelle

A côté de la description de l'outil AFM en lui-même, il est également primordial de déterminer ses interactions avec l'environnement dans lequel il travaille. Le fait de considérer des applications au niveau micro/nanométrique nous oblige à considérer le phénomène « d'effet d'échelle ». Celui-ci trouve son origine dans le fait que les grandeurs physiques ont des dépendances différentes par rapport à la variable de dimension. La conséquence majeure de ce phénomène est l'augmentation de l'importance des forces de surface proportionnellement aux forces inertielles (volumiques). Les forces de Van der Waals (bien que pas exactement de surface), de capillarité et électrostatiques quasi non perceptibles à l'échelle humaine

deviennent largement prépondérantes par rapport par exemple aux forces de gravité.

Une autre influence de l'effet d'échelle est la différence de dynamique entre le nano et le macromonde. Celle-ci est en effet beaucoup plus rapide au niveau nanométrique, ce qui peut engendrer des problèmes d'instabilité au niveau du contrôle par une interface haptique en l'occurrence [6]. Il faut également noter la modification de toute une série de théories lorsque l'on considère des dimensions de plus en plus petites (friction, chimie de surface,...). Ces problèmes étant très vastes et nécessitant des spécialités fort différentes, il ne sera présenté dans ce papier d'introduction qu'une brève description des trois forces citées plus haut qui sont les plus importantes lorsque l'on considère l'interaction cantilever/surface [7].

2) La force de Van der Waals

La force de Van der Waals trouve son origine dans les interactions entre atomes et molécules. Elle regroupe un ensemble de forces attractives et répulsives. Elle peut être modélisée par la force de Lennard-Jones (2), avec les paramètres σ et ϵ les facteurs de Lennard-Jones, caractéristique des matériaux mis en jeu et r la distance entre la pointe et le substrat ($F > 0$ pour une force d'attraction).

$$F_{vdW} = -24\epsilon \left[2 \left(\frac{\sigma^{12}}{r^{13}} \right) - \left(\frac{\sigma^6}{r^7} \right) \right] \quad (2)$$

3) La capillarité

Lorsque le microscope est utilisé dans une atmosphère ambiante, sur la plupart des matériaux se dépose une fine couche d'eau. Lorsque le cantilever rencontre cette couche, il se crée un pont liquide qui exerce une force de capillarité sur la poutre. La théorie qui détermine cette force est assez complexe. Cependant, dans notre cas, il est possible de ramener l'interaction pointe/substrat à une interaction sphère/plan et ainsi approcher la force de capillarité par (3).

$$F_{Cap} = 4\pi\gamma_L R \left(1 - \frac{h-2e}{2r_1} \right) \cos(\theta) u(-h+L) \quad (3)$$

Avec h la distance pointe/substrat, θ l'angle de contact du ménisque (caractéristique des matériaux en présence), γ_L la tension de surface du liquide (eau : 72mJ/m^2), e la hauteur du film liquide, R le rayon de courbure de la pointe du microscope, $L=2e$ pour l'approche et δ (distance de rupture du ménisque) pour le retrait, r_1 le rayon de courbure du ménisque déterminé par les conditions ambiantes d'humidité et $u(x)=1$ si $x > 0$, $=0$ si $x < 0$ (Fig 4.). Cette force est attractive pour des valeurs de θ inférieures à 90° .

Une courbe d'approche/retrait, mettant en évidence cette force, est représentée à la Fig. 3. Nous pouvons remarquer, d'une part, le comportement linéaire du signal DFL (proportionnel à la force sur le cantilever) après le contact avec la support et d'autre part, la force de capillarité lors du retrait. Celle-ci s'annule brusquement lorsque le pont liquide est cassé (pour une élongation trop importante). La différence visible sur le relevé entre la phase d'approche et de retrait en contact est à l'étude. Elle est sans doute due à l'hystérésis du piézo Z.

La force de capillarité est la principale responsable du phénomène de « snap down » au niveau du cantilever. En effet, si la rigidité du cantilever n'est pas suffisante et que la capillarité induit un gradient de force trop important, celui-ci peut rester collé au substrat. Dans le cas de manipulation par exemple par pushing, les particules manipulées peuvent également s'accrocher et ainsi rendre impossible la réussite du déplacement.

Pour éviter ce type de phénomène, il est possible soit d'utiliser des matériaux hydrophobes ($\theta > 90^\circ$) soit de travailler en milieu liquide (technique utilisée en microbiologie).

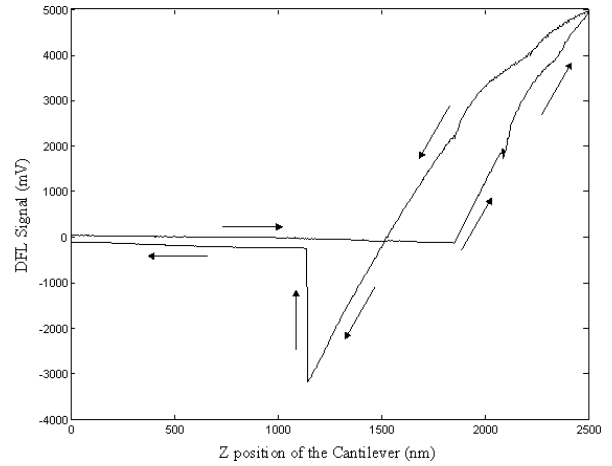


Fig. 3. Signal DFL en fonction de la position en Z du cantilever durant la phase d'approche et de retrait d'un support de CD (relevé expérimental)

4) Les forces électrostatiques

De manière volontaire ou par triboélectrification lors du déplacement de la pointe sur le substrat (dans le cas de polymères par exemple), il peut apparaître des charges sur les objets. Celles-ci peuvent alors engendrer des forces électrostatiques. De même que pour la capillarité, elles peuvent être à l'origine du phénomène de « snap down ». Jusqu'à une certaine proximité de la matière, cette force peut être approchée par (4).

$$F_{Elec} = -\frac{\epsilon_0 U^2 S}{2h^2} u(h-h^*) \quad (4)$$

Avec ϵ_0 la permittivité du milieu de travail, U la différence de potentiel entre la pointe et la surface, S la surface d'échange considérée et h la distance (h^* est la distance à partir de laquelle cette formule est valable) (Fig4.).

Parmi les trois forces présentées, c'est cette dernière qui est la plus forte (d'un ordre de grandeur). Cependant, elle peut être plus facilement supprimée par exemple en plaçant la pointe et le support au même potentiel.

A partir de la compréhension de ces forces et de la description du cantilever, il est envisagé de développer un modèle virtuel pour pouvoir l'intégrer dans des études modélisant les applications possibles de l'AFM.

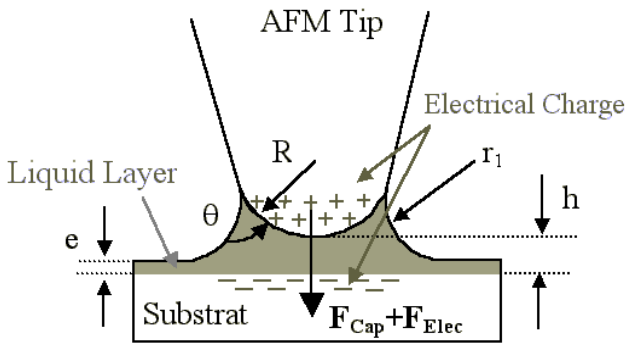


Fig. 4. Représentation de la force de capillarité et électrostatique

C. Liaison AFM-PC

Actuellement, une toolbox Matlab a été développée intégrant toutes les commandes importantes du microscope (à partir d'une bibliothèque dll fournie par le constructeur). Elle permet facilement de communiquer avec la DSP de l'AFM afin de déplacer le microscope et récupérer l'ensemble des informations de mesure (déflexion, ...). Elle est également intégrée dans un environnement logiciel Matlab qui regroupe l'ensemble du système AFM-haptique. L'objectif de cet environnement est de pouvoir facilement intégrer de nouvelles fonctionnalités en utilisant directement ce qui a déjà été développé.

III. INTERFACE HAPTIQUE

Dans tout type d'applications, il est important pour l'opérateur d'avoir un retour d'information du système qu'il manipule. Souvent, c'est le sens de la vue qui est sollicité. Cependant, dans le cas des nanotechnologies, les microscopes optiques atteignent leurs limites. Il faut donc se tourner vers d'autres sens comme celui du touché. A cette fin, la technique est d'utiliser une interface haptique qui à l'aide de moteurs permet de transmettre des efforts à l'opérateur. Ce type d'outil a fait son apparition depuis une vingtaine d'années avec pour application première les tâches de télémanipulation en environnement critique (nucléaire, chimique, ...). Il en existe de toutes sortes classés suivant différents critères comme le nombre de degrés de liberté, le type de cinématique, la portabilité, ... Leur objectif premier est de solliciter chez l'opérateur au moins l'un des récepteurs mécaniques du touché. Une description de ces derniers et des différentes interfaces existantes peut être trouvée dans [8].

Bien qu'il n'existe pas de règles de construction pour ce type d'appareil (ils doivent être adaptés à l'application pour laquelle ils sont conçus), on peut cependant mettre en évidence certains critères qui doivent toujours être pris en compte. Nous pouvons citer entre autre la notion de transparence de l'interface, lié au fait que les efforts ressentis par l'opérateur doivent correspondre parfaitement à ceux du monde étudié sans être affectés par des perturbations comme des effets d'inertie ou de frottements dans le système mécanique ; la notion de stabilité, de fidélité et de sécurité (surtout avec des systèmes portables ou munis de moteurs puissants). Une tentative de mesure de ces performances est présentée dans [9][10].

A. La mécanique de l'interface haptique

L'interface haptique développée au laboratoire possède trois degrés de liberté (Fig. 5). Elle est constituée de trois bras articulés montés en série sur une plaque support horizontale. L'extrémité du bras numéro 3, appelé préhenseur est tenue par l'utilisateur et est positionnable suivant les trois coordonnées spatiales : les bras un et deux s'articulent autour d'axes verticaux et permettent ainsi un déplacement du préhenseur dans un plan parallèle à la plaque du support ; le déplacement vertical est autorisé par l'articulation du troisième bras autour d'un axes horizontal. L'espace de travail ainsi obtenu est représenté à la Fig. 6.

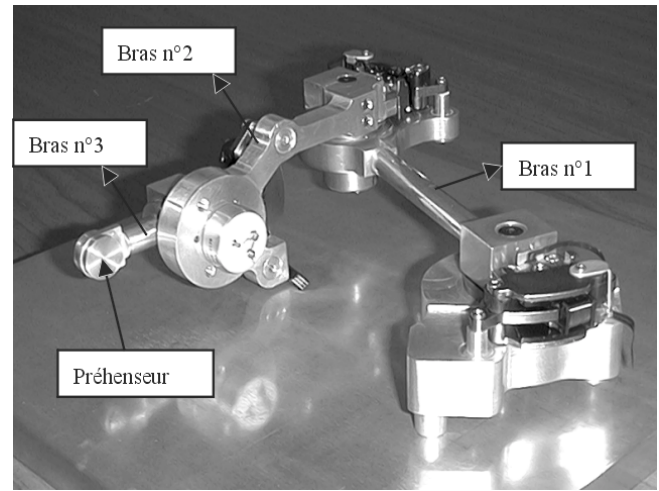


Fig. 5. Interface haptique développée au laboratoire

Au point de vue des actionneurs, l'interface haptique utilise des moteurs linéaires (« voice coil motor ») qui permettent d'appliquer des couples au niveau de chaque articulation. Dans ce type d'actionneur, une bobine placée dans l'entrefer d'un aimant permanent est parcourue par un courant i . L'interaction entre ce courant et le champ magnétique B engendre une force F entre l'aimant et la bobine (l étant la longueur de la bobine) (5).

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{l} \times \vec{l} \quad (5)$$

L'absence de contact au sein de ce type de moteur réduit au maximum les frottements dans les articulations. Par rapport à la notion de transparence citée plus haut et de part la simplicité d'utilisation, cette famille de moteur est très bien adaptée pour le développement de notre prototype. Actuellement, la force applicable sur le préhenseur par les moteurs est de 0.5 N suivant les axes X et Y et 1N suivant l'axe Z. Suivant [11], ces valeurs, qui permettent déjà des sensations tout à fait acceptables, ne sont néanmoins pas suffisantes pour d'une part offrir à l'utilisateur une perception pleine des détails et d'autre part lui fournir une résistance suffisante. Une prochaine évolution de l'interface consistera à y intégrer des moteurs plus puissants, mais de la même famille (afin de préserver leurs avantages). Il est également à noter que vu les forces mises en jeu ici, la notion de sécurité n'est pas une préoccupation majeure.

Au point de vue des capteurs, le système utilise des potentiomètres à haute résolution pour mesurer les orientations relatives des différents bras. Actuellement, l'interface haptique n'intègre pas dans sa structure de capteurs de force. De ce fait,

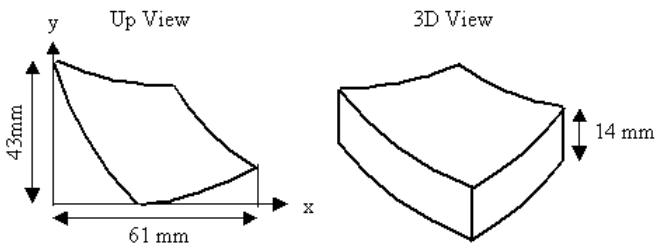


Fig. 6. Espace de travail de l'interface haptique

dans le cas d'une application en « force feedback » (cf. après), il travaille en boucle ouverte. La force ressentie par l'opérateur est donc un peu différente de celle souhaitée à cause des effets possible de gravité, de friction, d'inertie et de bruit. La conception mécanique a néanmoins été étudiée pour compenser au plus ces effets d'une part par le choix des moteurs et d'autre part par un équilibrage du préhenseur. Bien que celle-ci permette déjà de très bonnes sensations, il est envisager d'intégrer prochainement des capteurs de force pour fermer la boucle. Le couple appliqué par les moteurs sera alors donné par (6).

$$\tau = G + J^t(q)(F_{des} + K(F_{des} - F)) \quad (6)$$

avec G le terme de compensation de gravité, F_{des} la force désirée, F la force mesurée et K une matrice de gains.

B. Interfaçage avec le soft

La partie mécanique décrite précédemment est connectée à une carte électronique qui permet l'interfaçage entre l'haptique et le PC qui gère l'application Matlab principale. Cette carte intègre principalement un microcontrôleur PIC qui d'une part communique avec le PC par une communication série RS-232 (155200bps) et d'autre part commande les moteurs par l'intermédiaire de DAC (il permet également un calcul bas niveau des consignes à envoyer). La carte possède aussi trois ADC pour lire les positions des potentiomètres.

Le fait d'échanger les variables entre le PC et la carte, et l'attente d'exécution du microscope lorsqu'il doit réaliser une mesure induisent irrémédiablement des délais. Ceux-ci sont sources de deux problèmes. D'une part, ils déstabilisent le système en engendrant des vibrations importantes dans les articulations de l'haptique. D'autre part, ils produisent un signal de force discontinu dont la mise à jour tourne autour des 200Hz. Le premier problème est actuellement résolu de manière hardware. Un contrôleur analogique de type lead génère une force antagoniste aux variations rapides de la position de l'haptique. Cette technique très efficace induit cependant une force qui diminue la transparence de l'interface.

En ce qui concerne la discontinuité du signal, suivant [8], les capteurs mécaniques de l'être humain sollicités par le type d'interface décrit ici sont capables de distinguer le caractère discontinu d'un signal jusqu'à 320 Hz environ. A 200Hz, bien qu'étant sous cette limite, la perception de notre interface haptique reste de bonne qualité.

Au niveau du PC, comme il l'a été évoqué plus haut, un environnement Matlab intégrant toutes les fonctionnalités de l'AFM et de l'haptique a été implémenté. Le choix d'utiliser

Matlab comme environnement de base est d'une part lié à sa facilité de programmation (fonctions mathématiques, interfaces graphiques) mais également au fait qu'il est largement diffusé dans le milieu académique. L'utilité recherchée est de regrouper l'ensemble du système afin de pouvoir utiliser des fonctions déjà développées. D'un simple clic, il est en effet possible de passer d'un mode d'utilisation à un autre (cf. après) tout en gardant par exemple des mesures de calibrage effectuées précédemment.

IV. MODES D'UTILISATIONS ET APPLICATIONS

Les différentes parties du système étant décrites, il est possible maintenant d'évoquer les différents modes d'utilisation du couple interface haptique/AFM. Actuellement, deux mode sont envisagés : le mode « Force Feedback » et le mode « tactile ».

A. Le mode « Force Feedback »

Dans le premier mode, le contrôle consiste à d'une part commander le microscope en position suivant les trois axes à partir des mesures de position de l'interface haptique (avec une mise à l'échelle), et d'autre part à appliquer sur l'opérateur des forces proportionnelles à celles agissant sur la pointe AFM. Autrement dit, il convient d'atteindre la réponse idéale donnée par (7).

$$\begin{aligned} F_{op} &= \alpha_f F_s \\ X_s &= \alpha_p X_m \end{aligned} \quad (7)$$

Avec, X_s et F_s la position et la force sur la pointe AFM, F_{op} la force de l'opérateur, X_m la position de l'interface haptique, α_f et α_p les facteurs d'échelle en force et position respectivement. Pratiquement, dans notre contrôle, le facteur α_p peut être choisi de manière indépendante suivant chaque axe de translation. Suivant les données numériques fournies précédemment par rapport aux dimensions des systèmes respectifs, ce facteur d'échelle est au maximum de 10^{-3} pour X et Y, et 10^{-4} pour Z. En ce qui concerne la mise à l'échelle des forces, il faut rappeler que le système de mesure actuel de l'AFM ne permet de mesurer la déflexion latérale du cantilever que dans une seule direction (pour une friction suivant X par exemple). De ce fait, pour envisager un feedback complet de toutes les forces suivant toutes les directions, il est nécessaire de concevoir un autre type de cantilever capable de rendre compte des effets dans la direction Y.

Au point de vue des applications envisageables à partir de ce mode, nous pouvons en citer trois. Premièrement, nous pouvons considérer la simple application de retour de force qui peut consister par exemple à mettre en évidence la capillarité. Elle peut permettre également indirectement à l'utilisateur de ressentir la topographie de la surface scannée. Deuxièmement, nous pouvons utiliser ce mode afin de ressentir les efforts lors d'une lithographie. Une troisième application, et sûrement la plus importante, peut consister à l'utiliser dans le cadre de nanomanipulation proprement dite (mécanique ou biologique). Il est à noter que dans ce dernier cas, l'utilisation du semi-contact mode ou du non-contact mode pour cartographier le nano-système avant et après la manipulation est obligatoire



Fig. 7. Litographie manuelle à l'aide de l'interface haptique (échelle en nm)

afin de ne pas modifier involontairement les positions des éléments à déplacer.

B. Le mode « tactile »

Dans le mode « tactile », l'interface ne commande plus le microscope que suivant X et Y. La pointe de l'AFM reçoit une consigne de déflexion verticale (comme dans le mode contact de topographie). Afin de préserver cette consigne lors du déplacement suivant X et Y, le microscope doit modifier la position en Z du cantilever. Cette dernière information est alors renvoyée vers l'haptique à travers le PIC qui effectue un contrôle en position suivant Z de l'interface haptique. Ce mode permet d'utiliser soit le mode contact soit le mode vibratoire du microscope, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Dans le cas du mode contact, il est également envisageable de récupérer l'information de déflexion latérale pour connaître les forces de friction. Comme application, le mode « tactile » est évidemment adapté pour permettre à un utilisateur de ressentir la topographie de la surface micro/nanométrique.

Actuellement, seulement le premier mode a été implémenté et testé. Sur des échantillons de cuivre ou de CD, il a permis de mettre en évidence de manière qualitative les imperfections du support et les forces de capillarité (étude en milieu ambiant). Nous avons également réussi à réaliser une lithographie manuelle sur le support de CD au niveau micrométrique (Fig.7). Des études plus qualitatives seront publiées ultérieurement.

V. CONCLUSIONS

Cet article a donc réalisé un tour d'ensemble des points importants à prendre en considération dans le cadre du développement de systèmes AFM/haptique. Nous avons présenté le microscope en lui-même ainsi que les conséquences importantes du travail dans le micro/nano-monde. Nous avons également décrit l'interface haptique développée au laboratoire et les différentes applications envisagées.

Cette recherche caractérisée par un champ d'investigation très vaste, va évoluer sur plusieurs fronts. D'une part, des études complémentaires vont être réalisées sur l'AFM pour comprendre plus en profondeur son fonctionnement et également les interactions évoquées plus haut. D'autre part, au

niveau de l'interface haptique, bien que la conception mécanique soit déjà très bonne, certaines améliorations citées précédemment y seront apportées. La possibilité d'intégrer ce système dans une télénanomanipulation par Internet va également être étudiée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier toutes les personnes ayant participé au développement du projet jusqu'à aujourd'hui et tout particulièrement M. Mihaita Horodincu concepteurs de la partie mécanique l'interface haptique décrite dans cet article.

REFERENCES

- [1] M. Wilson, *Nanotechnology, Basic Science and emerging technology*, Chapman&Hall/CRC, 2000.
- [2] J. A. Harley, A High-Stiffness Axial Resonant Probe for Atomic Force Microscopy, *Journal Of Microelectromechanical Systems* Vol 10, N°3, September 2001.
- [3] R. J. Grow, Silicon Nitride Cantilevers With Oxidation-Sharpended Silicon Tips For Atomic Force Microscopy, *Journal of Microelectromechanical Systems* Vol 11, N°4, August 2002.
- [4] W. P. King, Design of Atomic Force Microscope Cantilevers for Combined Thermomechanical Writing and Thermal Reading in Array Operation, *Journal of Microelectromechanical Systems* Vol 11, N°6, December 2002.
- [5] R. Garcia, Dynamic atomic force microscopy methods, *Surface Sciences Reports* 47 (2002) 197-301 (Elsevier).
- [6] M. Sitti, Tele-Nanorobotics Using Atomic Force Microscope, *Proc of the IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, October 98.
- [7] J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, 1992
- [8] G. C. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, 1994
- [9] V. Hayward, Performance Measures for Haptic Interfaces, *Robotics Research, The 7th International Symposium*, Springer Verlag pp.195-207, 1996
- [10] H. Z. Tan, Human Factors for the Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces, *Dynamic Systems and Control* Vol 55-1, 1994
- [11] M. O'Malley, The Effect of Force Saturation on the Haptic Perception of Detail, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* Vol 7, N° 3, September 2002
- [12] V. Hayward, Haptics : a Key to fast Interactivity, *International Conference on Machine Automation*, 25-27 September 2000, Osaka (Elsevier)