



**HAL**  
open science

# Manipulation d'objets microscopiques par adhésion et effet inertiel

Sinan Haliyo, Stéphane Régnier

► **To cite this version:**

Sinan Haliyo, Stéphane Régnier. Manipulation d'objets microscopiques par adhésion et effet inertiel. *Revue de Nano et Micro Technologies*, 2003, 3 (1-2), pp.201-222. hal-03992659

**HAL Id: hal-03992659**

**<https://hal.science/hal-03992659v1>**

Submitted on 16 Feb 2023

**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.

---

# Manipulation d'objets microscopiques par adhésion et effet inertiel

Sinan Haliyo — Stéphane Régnier

Laboratoire de Robotique de Paris  
UPMC-CNRS  
BP 61 92265 Fontenay Aux Roses  
{haliyo,regnier}@robot.jussieu.fr

---

*RÉSUMÉ.* Cet article décrit une stratégie dynamique pour relâcher un objet saisi par adhésion. En effet, si les effets adhésifs peuvent être utilisés pour saisir un objet, ces mêmes effets handicapent considérablement la dépose de ce même objet sur un même substrat. L'idée proposée dans cet article est l'utilisation des effets inertiels du préhenseur pour casser la liaison adhésive objet-préhenseur et ainsi réussir à déposer cet objet. Des manipulations successives, micromanipulations statiques puis dynamiques, montrent le bien fondé de ce choix.

*ABSTRACT.* This paper describes a dynamical strategy for releasing micro objects picked-up by means of adhesion forces. While sticking effects are used in order to capture an object by adequately choosing a high surface energy constitutive material for the end-effector, these same effects handicap considerably the release. We propose to take advantage of the inertial effects of both the end-effector and the manipulated object to overbalance adhesion forces and to achieve the release. Simulations show that for this purpose, accelerations as high as  $10^5 \text{ m/s}^2$  are needed. Successful manipulation of a  $40 \mu\text{m}$  radius glass sphere is experimented.

*MOTS-CLÉS :* manipulation, microobjets, forces d'adhésion, effets inertiels.

*KEYWORDS:* manipulation, microobjects, adhesion forces, dynamical effects.

---

## 1. Introduction

La miniaturisation et ses aspects dérivés, la microélectronique, la microphysique, les MEMS, etc. ont émergé depuis quelques années face à la demande des industries, désireuses et soucieuses de réduire de plus en plus la taille de certains composants. La microrobotique fait partie des nouveaux thèmes pluridisciplinaires de recherche ouverts depuis une petite décennie.

La micromanipulation intègre les problèmes classiques de la préhension et ceux intrinsèques à l'échelle microscopique [SAI 02]. Ce domaine fait l'objet d'études approfondies dans notre laboratoire depuis 1996. Une approche novatrice est apparue, l'utilisation du phénomène d'adhésion comme base possible de la micromanipulation [FEA 95] [ARA 97] [SAT 96].

Un précédent travail [ROL 00a] propose un panorama à la fois vaste et précis de toute l'échelle micrométrique. Des modèles numériques simplifiés et intégrant tous les aspects de la micromanipulation ont été mis en place aboutissant à une fenêtre technologique définissant certaines exigences du mode de manipulation. L'étude théorique de la micromanipulation, la conception et la réalisation d'un prototype ont été présentées. Une expérimentation unique finalise ce travail validant l'utilisation des forces d'adhésion.

Il s'agit ici d'assurer le passage de ce constat de faisabilité à la mise au point d'un dispositif fiable. Le prototype est construit autour d'un micropréhenseur actif, capable d'effectuer les tâches de saisie par adhésion (*statique*) et de déposes par inclinaison (*statique*) ou par effet inertiel (*dynamique*). De nombreuses expérimentations sur la saisie d'objet par adhésion et la dépose en s'affranchissant de cette adhésion avec l'utilisation de l'effet inertiel du préhenseur sont ainsi présentées.

Cet article est consacré à la description de l'étude expérimentale relative à ce projet. Dans un premier temps, un rappel sur le dispositif expérimental est proposé. Puis le préhenseur est soumis à différents essais afin de déterminer ses caractéristiques propres permettant la mise en place des expérimentations. Notamment, le mode de dépose dynamique nécessite la connaissance du comportement dynamique de la pointe AFM et de l'actionneur piézoélectrique associé. Dans un deuxième temps, de nombreuses expérimentations sont présentées pour mettre en avant les avantages du phénomène d'adhésion comme support de manipulation.

## 2. Description du système de micropréhension

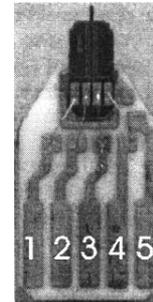
### 2.1. Le préhenseur

Le mode de manipulation par adhésion repose entièrement sur le préhenseur. Il est la partie la plus sensible du manipulateur et doit être capable d'effectuer séparément les tâches de saisie et de dépose. Un autre aspect important du préhenseur est la détection du contact et de l'effort [LUO 01]. En fonction des limitations du tra-

vail sous microscope et de la contrainte de miniaturisation, l'unique moyen de mesure disponible dans ce cas est la mesure directe.

Ainsi, le choix s'est orienté vers l'utilisation d'une pointe AFM comme préhenseur. L'élément retenu est présenté sur la figure 1, il est composé d'une poutre de silicium mono-cristallin d'orientation  $\langle 100 \rangle$ , et de dimensions  $600 \times 140 \times 10 \mu\text{m}^3$ . L'ensemble poutre-pont de Wheatstone, d'une masse totale de  $m_p = 0,1 \text{ g}$ , est fixé à un support en alumine ( $5 \times 8 \text{ mm}^2$ ) sur lequel sont gravées les bornes de connexion du pont.

Pointe	
Longueur	$600 \mu\text{m}$
Largeur	$140 \mu\text{m}$
Épaisseur	$10 \mu\text{m}$
Fréquence de résonance	$\approx 40 \text{ kHz}$
Pont de Wheatstone	
Résistance du pont ( $R_\pi$ )	$1.3 \text{ k}\Omega$
Dissipation de puissance max.	$1 \text{ mW}$



**Figure 1.** Caractéristiques de la pointe piézorésistive utilisée comme préhenseur (produite par la société Nanosensors GmbH)

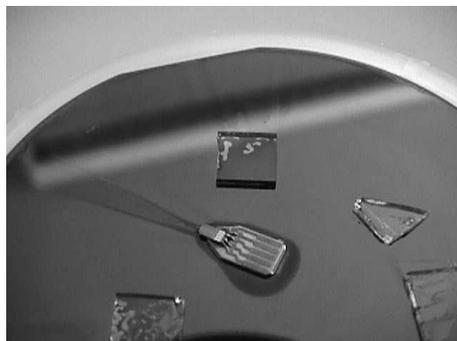
Ces poutres piézorésistives sont originellement dédiées à l'étude de la microtopologie des surfaces, l'interaction poutre-surface s'effectue au travers d'une pointe, collée sur la poutre, qui augmente ainsi la précision des mesures. Afin de disposer d'une surface plane sur le préhenseur, le choix s'est orienté vers des poutres «tipless», dépourvues de cette pointe. Un dépôt d'une pellicule d'or de  $50 \text{ nm}$  d'épaisseur qui est appliquée comme traitement de surface à la poutre doit permettre d'obtenir une surface à constante de Hamaker élevée et donc une forte adhésion à l'interface objet-préhenseur. Les étapes de traitement et de dépôt ont été effectuées à l'IEMN et consistent en un double dépôt par évaporation : un dépôt de  $25 \text{ nm}$  de titane (couche d'accrochage) puis un dépôt de  $50 \text{ nm}$  d'or. La figure 2 illustre la poutre en fin de phase de métallisation.

La raideur  $k$  de la poutre est estimée à :

$$k = \frac{ELe^3}{4l^3} = 21,06 \text{ N/m} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \text{module d'Young } E = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \\ \text{longueur } l = 600 \mu\text{m} \\ \text{largeur } L = 140 \mu\text{m} \\ \text{épaisseur } e = 10 \mu\text{m} \end{cases}$$

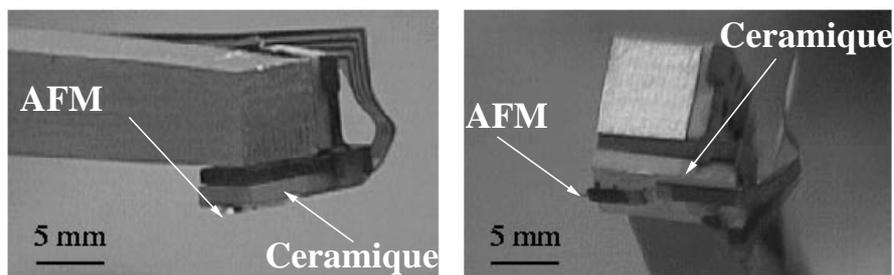
## 2.2. L'actionneur

Les résultats théoriques de simulations des modèles dynamiques ont montré la nécessité de produire une large gamme d'accélération allant de  $100$  à  $10^6 \text{ m/s}^2$



**Figure 2.** *Poutre piézorésistive durant la phase de métallisation*

[ROL 00b]. De plus, un microscope optique est utilisé pour la visualisation de l'opération par l'utilisateur. Ces deux contraintes rendent les systèmes d'actionnement habituels, tels les moteurs et translateurs classiques, inutilisables à cause de leur grand encombrement. Il apparaît donc comme inéluctable de s'orienter vers des technologies d'actionnement alternatives, comme les matériaux actifs. Les différentes possibilités sont : les matériaux optiques, les alliages magnétostrictifs, les alliages à mémoire de forme, les gels polymères, les matériaux piézoélectriques. Parmi toutes ces possibilités, les céramiques piézoélectriques présentent un avantage certain. Outre qu'elles ont les capacités dynamiques et cinématiques requises, elles ne nécessitent pas une force de rappel pour retrouver leur configuration initiale à l'inverse des matériaux magnétostrictifs ou les alliages à mémoire de forme. La figure 3 montre l'état final du préhenseur, réalisé conformément à l'étude effectuée. La céramique est collée sur sa face supérieure à un axe rectangulaire, monté directement sur le bloc déplacement par une liaison pivot glissant. Le dispositif AFM est collé à la surface inférieure de la céramique.

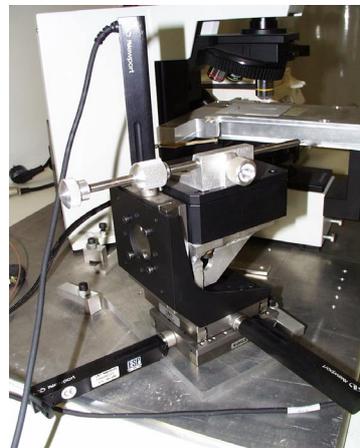
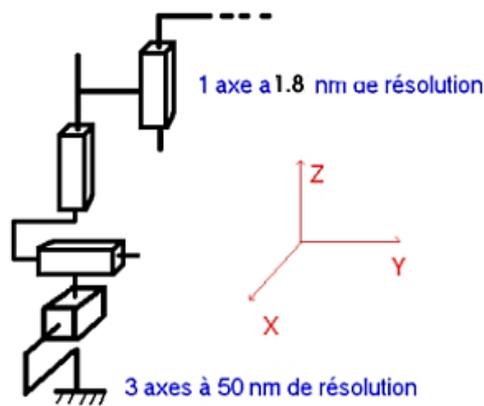


**Figure 3.** *Le préhenseur actif réalisé*

### 2.3. Bloc déplacement

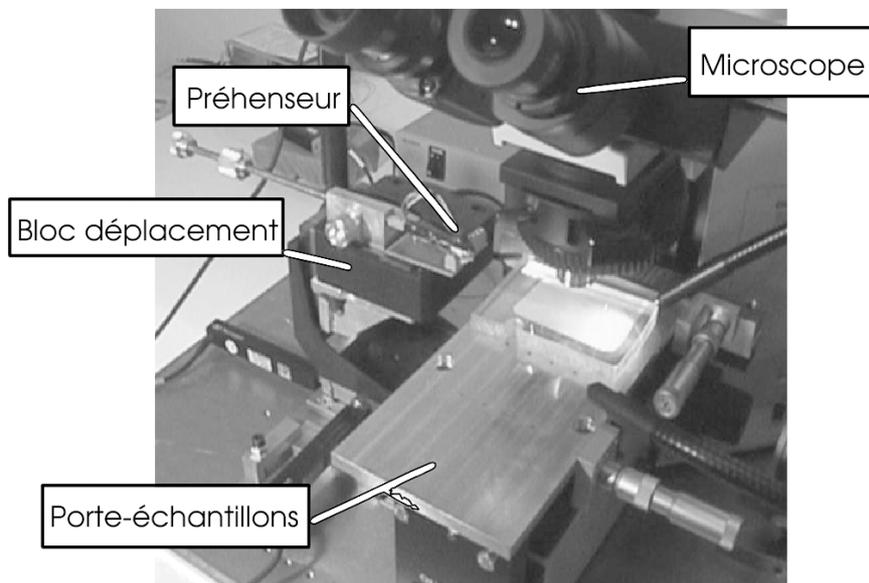
La société Newport Microcontrol commercialise des solutions de positionnement précis. Le système choisi est composé de trois moteurs linéaires montés sur une platine 3 axes. Chacun des actionneurs possède une résolution de  $50\text{nm}$  pour une course de  $2.5\text{cm}$ . Ils sont commandés par une carte contrôleur PCI. Les pilotes logiciels fournis incluent une commande en boucle fermée. Il suffit d'effectuer un réglage PID pour adapter le fonctionnement des actionneurs à la tâche. Ce système permet d'obtenir un très bon positionnement dans l'espace. Par contre, sa précision, comparée aux dimensions des objets à manipuler, n'est pas suffisante pour quantifier la déformation appliquée, ce qui est essentiel à la bonne maîtrise des forces d'adhésion. Notons que pour pouvoir mesurer ces forces avec précision, il est nécessaire de disposer d'une très bonne résolution, inférieure à  $50\text{nm}$ , sur l'axe vertical.

Pour toutes ces raisons, un translateur piézocapacitif est ajouté en série sur l'axe  $z$ . Cet actionneur, qui fonctionne sur le principe des vibrations asymétriques appliquées à un composant piézoélectrique, possède une course de  $120\ \mu\text{m}$  et est commandé proportionnellement à un signal d'entrée de 0 à 10 Volts. Il est utilisé en association avec une carte convertisseur digital analogique de 16 bits. La résolution du translateur est donc de  $120\ 000/2^{16} = 1.83\ \text{nm}$ . La figure 4 représente le schéma cinématique du bloc déplacement.



**Figure 4.** Le schéma cinématique et le bloc de déplacement

La figure 5 montre le site mis en place pour procéder aux expérimentations. Il est placé dans une salle blanche à humidité contrôlée. Dans les paragraphes suivants, les différentes expériences visant à déterminer les capacités du manipulateur et du mode de manipulation sont étudiées.



**Figure 5.** *Le site expérimental et le manipulateur prototype*

### 3. Caractérisation expérimentale du système de préhension

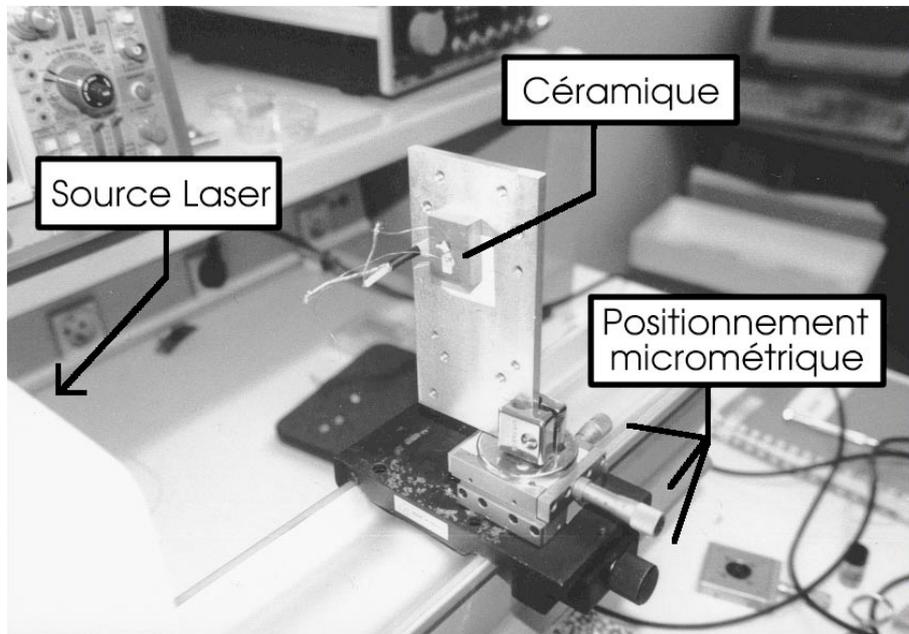
Le préhenseur est la partie la plus sensible du manipulateur. Il se compose d'une céramique piézoélectrique de dimensions  $8 \times 5 \text{ cm}^2$ , collée à un axe de section carrée, utilisée comme actionneur et reliée au bâti par une liaison pivot glissant. Un dispositif AFM, pourvu d'une micropoutre piézorésistive, utilisée comme organe terminal, est collé sous la céramique (figure 3). Ce préhenseur est utilisé pour :

- **la saisie statique** : par simple contact de l'objet avec la pointe AFM ;
- **la dépose statique** : par inclinaison du préhenseur. L'utilisation de la liaison pivot réduit d'un facteur  $\cos \theta$  la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet en projection sur l'axe vertical, assurant ainsi la dépose ;
- **la dépose dynamique** : par production d'une très forte accélération au niveau de l'interface poutre/objet. Elle amplifie l'effet inertiel s'appliquant sur l'objet de manière à vaincre l'adhésion préhenseur/objet.

De toutes ces opérations, la dépose dynamique est la plus délicate. Elle nécessite en effet une bonne maîtrise du comportement dynamique de l'actionneur et de la pointe AFM couplée à des hautes valeurs d'accélération. Une étude théorique par simulations a permis de prévoir ce comportement. Il s'agit donc de vérifier et de valider ces résultats par expérimentations.

### 3.1. Comportement dynamique de l'actionneur

Dans un premier temps, l'actionneur seul est étudié. Des expériences ont été réalisées à l'IEMN de Lille et au Laboratoire d'Ondes Acoustiques de l'ESPCI. La méthode utilisée est l'interférométrie par laser hétérodyne. Cette méthode consiste à focaliser un rayon laser de caractéristiques connues sur la surface étudiée. L'observation du rayon réfléchi par cette surface et son déphasage par rapport au rayon originel permet de déduire la variation de distance entre la source du rayon et la surface cible. La figure 6 montre le site expérimental. La céramique est collée sur une plaque métallique raccordée à une molette micrométrique ce qui permet d'effectuer la focalisation du rayon laser.

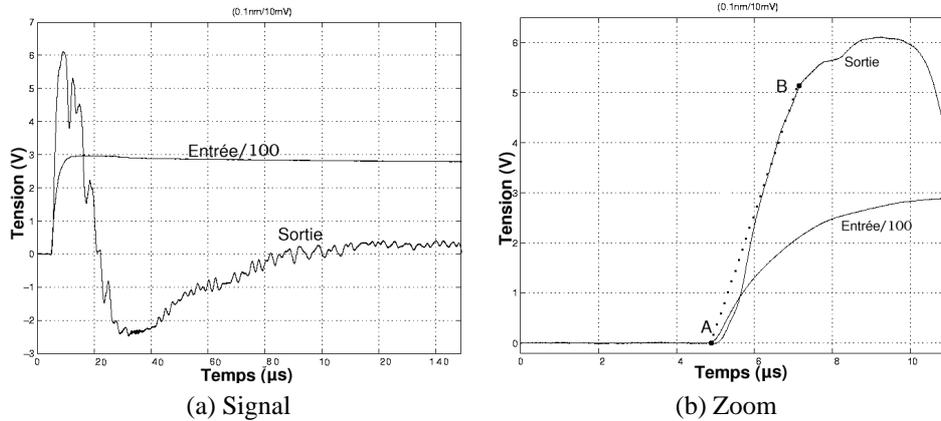


**Figure 6.** Montage de l'actionneur pour l'interférométrie laser

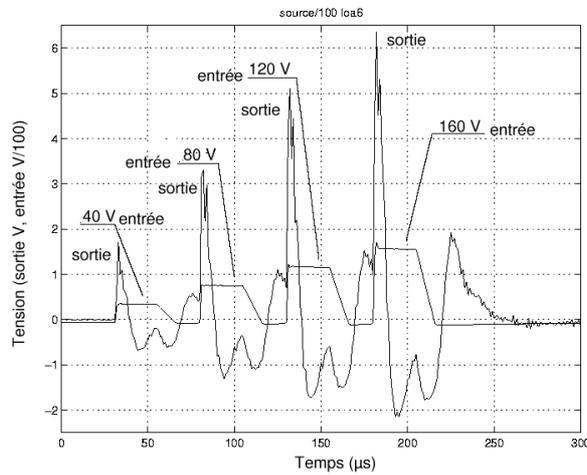
Il est à noter que ce système de mesure possède une particularité notable : le signal de sortie est soumis à un filtre passe-haut de  $20\text{ kHz}$  en post-traitement. Ce filtre élimine donc la visualisation de la composante continue du signal. Il est alors impossible d'obtenir directement le déplacement de la face supérieure de la céramique. Malgré cela, le signal filtré est suffisant pour déduire assez précisément le mouvement de l'actionneur. De plus, l'information la plus importante est préservée : la valeur de l'accélération initiale. Cette valeur peut être obtenue en observant le début du signal, de haute fréquence, donc non filtré et conforme aux déplacements de l'actionneur. Plusieurs essais sont effectués de manière à déterminer la dynamique du système. Dans le premier essai, le signal utilisé est le suivant :

- une montée en  $1 \mu s$  de 0 à 300 V,
- une tension de 300 V pendant  $100 \mu s$ ,
- une descente de 300 à 0V en  $50 \mu s$ .

La figure 7a montre le signal de commande et le signal de mesure. Pour une meilleure visualisation, la figure 7b est zoomée sur le début du signal afin de bien appréhender la réponse initiale de la céramique. Cette réponse est une tension directement proportionnelle au déplacement selon la relation linéaire  $10 \text{ nm/V}$ .



**Figure 7.** Mesures de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser



**Figure 8.** Calibrage de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser

Avec la courbe (b), on calcule le déplacement relatif de la surface de la céramique. L'information concernant l'accélération initiale est contenue dans les premiers instants

du signal de mesure. Avec l'hypothèse que le premier pic est de fréquence supérieure à la fréquence de coupure du filtre et donc qu'il décrit parfaitement le déplacement de l'actionneur, la valeur de l'accélération initiale (fig. 7, entre les points "A" et "B") est estimée à  $50 \cdot 10^{-9} / (2 \cdot 10^{-6})^2 = 2.5 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$ . Afin de calibrer la gamme d'accélération disponibles, plusieurs essais sont effectués avec des signaux de même profil mais d'amplitudes différentes.

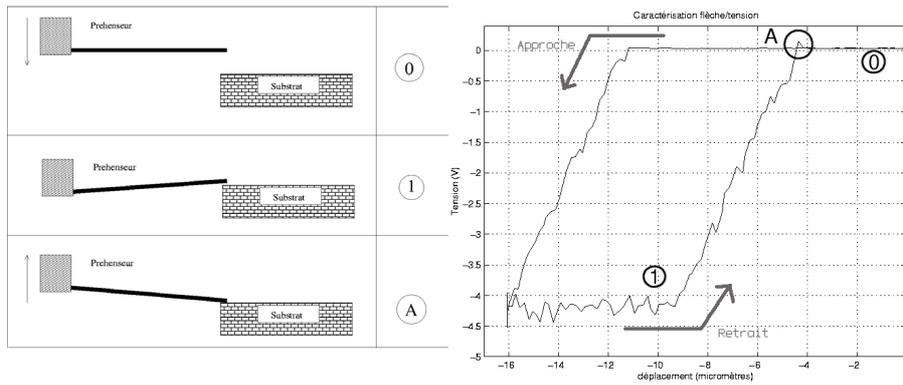
Ces expériences démontrent la capacité de l'actionneur piézoélectrique à produire une gamme d'accélération allant jusqu'à  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$ . Pour déterminer totalement le comportement dynamique du préhenseur, il faut aussi prendre en compte la pointe du dispositif AFM. En effet, les simulations avec la méthode des éléments finis avaient prédit un comportement vibratoire. Le déplacement (et implicitement l'accélération), à l'extrémité de la poutre n'est donc pas identique au déplacement de l'actionneur.

### 3.2. Pointe AFM

Il est très difficile d'utiliser une méthode de mesure directe pour déterminer le déplacement de l'extrémité de la pointe AFM avec une précision suffisante pour l'application étudiée. La méthode d'interférométrie laser utilisée pour l'actionneur n'est plus applicable dans ce cas : la surface de la pointe AFM étant très petite, la focalisation du rayon laser sur ce dernier devient hasardeuse. De plus, à cause de sa couleur noire, la poutre en silicium ne réfléchit pas suffisamment le laser. Pour toutes ces raisons, il a été décidé d'utiliser le pont de Wheatstone intégré au dispositif AFM pour déterminer le comportement de la poutre. Cette méthode a un inconvénient majeur : l'information fournie par ce dispositif dépend de la flexion à la base de la poutre et non à son extrémité libre. La tension lue est directement proportionnelle à la flèche si et seulement si le mode observé est le premier mode de vibration. Il faut donc vérifier la fréquence du signal de sortie pour déterminer le mode de vibration de la pointe et en déduire la flèche à son extrémité. Dans un premier temps, un essai statique est réalisé afin de déterminer le rapport flexion/tension du dispositif AFM. En utilisant le nanotranslateur, d'une précision de  $2.6 \text{ nm}$ , la poutre est appuyée contre le substrat. Lorsque la tension du pont atteint  $\sim 4 \text{ V}$ , le préhenseur est éloigné jusqu'à la rupture du contact. La courbe obtenue est présentée sur la figure 9.

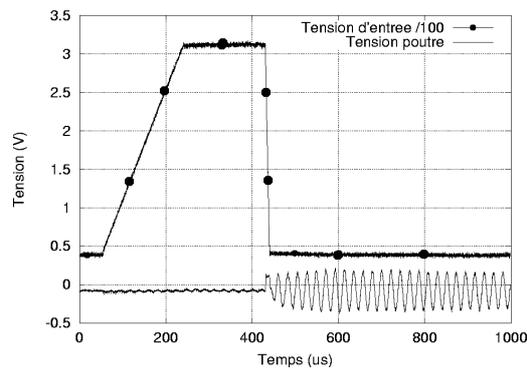
Cette courbe montre la tension du pont de Wheatstone en fonction du déplacement du nanotranslateur, pour les phases d'approche et de retrait de la pointe. Le décalage de  $7 \text{ }\mu\text{m}$  entre ces deux phases est dû au jeu de montage du dispositif. En effet, pour cette expérience, le dispositif n'est pas collé mais maintenu en place par un clip mécanique. Le même comportement, avec une valeur de décalage sensiblement identique est observé sur plusieurs essais. Il est à noter que la déformation de l'extrémité de la poutre s'effectue dans le sens inverse du déplacement de sa base. Le rapport de tension/flexion est identique dans la phase d'approche et de retrait. La relation entre la tension et la flexion est linéaire. La pente de la courbe est estimée à :  $\alpha = \frac{-4}{5} = -0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ . Cette courbe témoigne aussi du phénomène d'adhésion entre le substrat et la pointe : à la fin de la phase de retrait, une flexion négative de la pointe

est observée (figure 9-«A »). C'est-à-dire que l'extrémité de la pointe reste collée au substrat bien que le nanotranslateur ait dépassé la position où le contact est établi entre la poutre et le substrat en phase d'approche.



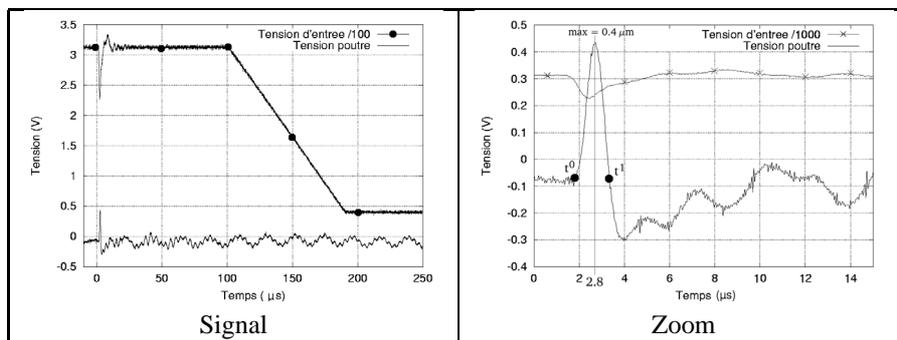
**Figure 9.** *Calibrage de la flexion de la pointe AFM*

La détermination du comportement dynamique du préhenseur est effectuée en fonction de cette caractérisation flexion/tension du dispositif AFM. L'actionneur piézoélectrique est alors excité par différents profils de signaux. La tension, liée à la flexion de la poutre, est observée simultanément aux signaux envoyés. Le premier signal est utilisé pour déterminer la sensibilité du dispositif aux déplacements lents de l'actionneur. En effet, son constructeur conseille une précompression pour empêcher la fatigue prématurée du composant et précise que cette manœuvre améliore les capacités dynamiques. Il faut donc être capable de compresser la céramique sans créer de perturbation sur la poutre. La figure 10 montre le signal de commande de céramique et la tension de pont de Wheatstone de la poutre pendant l'expérience.



**Figure 10.** *Caractérisation dynamique du préhenseur (1)*

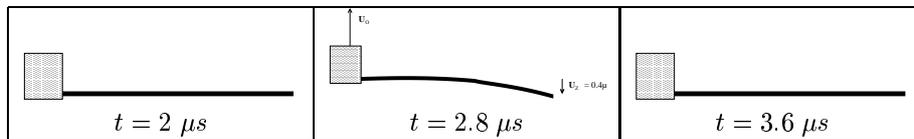
Cette expérience montre qu'un signal avec une pente 'lente' (de 280 V en 200  $\mu s$ ), cause de très faibles oscillations à la poutre. En revanche, la descente, effectuée en 10  $\mu s$ , induit des oscillations de l'ordre de 0.5 V, équivalent à un déplacement relatif de 0.4  $\mu m$ . Ce profil de pente lente sera donc utilisé pour précompresser l'actionneur. L'objectif est de pouvoir produire une très grande accélération initiale à l'extrémité de la poutre. Le profil le plus adapté à cet objectif est un signal de type Dirac. Deux expériences sont réalisées avec ce profil. La céramique est préalablement compressée. Pour la première expérience, une impulsion d'amplitude 80 V est envoyée. La figure 11 montre les courbes obtenues.



**Figure 11.** Caractérisation dynamique du préhenseur (2)

La tension du pont de Wheatstone permet de reconstruire la déformation de la poutre. On observe tout d'abord un grand pic en réponse à l'impulsion de l'actionneur. Puis, après un bref régime transitoire, la poutre oscille sur sa fréquence propre.

D'après les simulations par éléments finis, un comportement à phase non minimale devrait être observé. De plus, l'essai de caractérisation réalisé préalablement a montré qu'une flèche vers le haut (donc une flexion positive) créait une tension négative. On peut donc en déduire que le pic correspond à un abaissement de l'extrémité de la poutre dû à sa réponse inertielle. Ce comportement est explicité sur la figure 12.



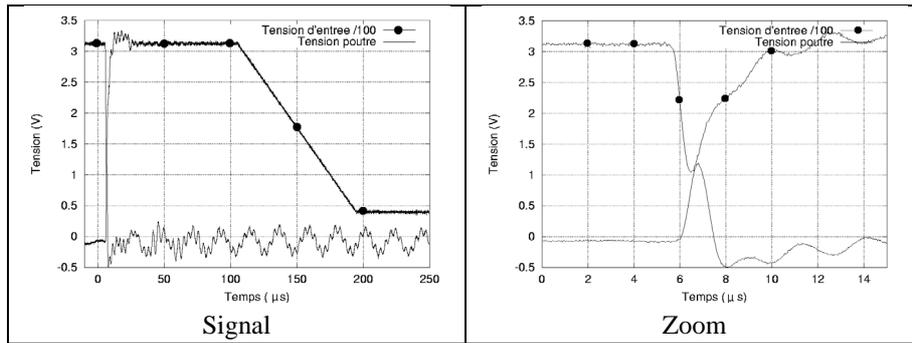
**Figure 12.** Comportement à phase non minimale de la poutre

L'accélération nécessaire pour détacher l'objet doit être dirigée vers le haut. Il faut donc calculer l'accélération à l'extrémité de la poutre quand cette dernière commence à s'élever, soit autour de l'instant  $t = 2.8 \mu s$ . L'amplitude du pic est de 0.5V, donc la flèche est sensiblement de  $-0.4 \mu m$ . La valeur minimale de cette flèche est atteinte

à  $t = 2,8 \mu s$ . La variation entre les instants  $t = 2 \mu s$  et  $t = 2.8 \mu s$  étant quasiment linéaire, on peut considérer que la vitesse de déplacement est constante. Elle est égale à  $\frac{-4 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-7}} = -0.5 \text{ m/s}$ . Cette vitesse est identique pour la phase de décroissance de tension (soit l'accroissement de la flèche), entre les instants  $t = 2.8$  et  $t = 3.6 \mu s$ . La vitesse passe donc de  $-0.5 \text{ m/s}$  à  $0.5 \text{ m/s}$ . En considérant que ce changement de vitesse intervient dans un intervalle de  $1 \mu s$  autour du maximum du pic de tension, une valeur approximative de l'accélération peut être obtenue :

$$\ddot{u}_z \simeq \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1 \text{ m/s}}{1 \mu s} = 10^6 \text{ m/s}^2$$

Cette valeur est nettement supérieure à l'accélération fournie par l'actionneur seul. Le comportement à phase non minimale, dû à la flexibilité et à la réponse inertielle de la poutre, permet donc d'amplifier considérablement cette dernière. Cette expérience est renouvelée, en augmentant l'amplitude de l'impulsion jusqu'à  $200 \text{ V}$ . La figure 13 représente les courbes obtenues.



**Figure 13.** Caractérisation dynamique du préhenseur (3)

Pour ce signal, l'amplitude du premier pic est de  $1.25 \text{ V}$ . Il faut remarquer que dans cet exemple, la tension d'entrée est de  $200 \text{ V}$ , donc le rapport entre les maxima des tensions de l'impulsion et de la déformation est de  $200/1.25 = 160$ . Dans le cas précédent, la tension de déformation mesurée était de  $0.5 \text{ V}$  pour une tension d'entrée de  $80 \text{ V}$ . Le même rapport est retrouvé :  $80/0.5 = 160$ . Il semble donc possible d'obtenir une relation linéaire entre le signal d'entrée et la flèche :

$$u_z = A \cdot K_d \quad \text{avec } K_d = 128 \mu m/V \quad [1]$$

avec  $u_z (\mu m)$  la flèche à l'extrémité de la poutre,  $A$  l'amplitude de l'impulsion ( $V$ ), et  $K_d$  appelée la constante de déplacement. En utilisant la même approche, une relation équivalente est déduite pour l'accélération. La valeur estimée de cette dernière, selon le même mode de calcul, est de  $2.5 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$  pour une impulsion de  $200 \text{ V}$ . La relation obtenue est donc de la forme :

$$\ddot{u}_z = A \cdot K_a \quad \text{avec } K_a = 12500 \text{ m/V s}^2 \quad [2]$$

avec  $\ddot{u}_z$  l'accélération initiale à l'extrémité de la poutre ( $m/s^2$ ),  $A$  l'amplitude du Dirac ( $V$ ), et  $K_a$  appelée la constante d'accélération. Ces expériences montrent que le préhenseur actif réalisé est bien capable de produire la gamme d'accélération désirée. De plus, une relation permettant d'obtenir la valeur de l'accélération en fonction de l'impulsion envoyée à l'actionneur est déduite de cette étude. Cette information est précieuse car elle permet de prévoir et de produire précisément l'accélération nécessaire. Il est à noter que les deux relations obtenues sont indépendantes du rapport flexion/tension de la poutre, qui est sujet à des variations : en effet, ce dernier dépend du réglage du préamplificateur du dispositif AFM. Ce réglage est renouvelé avant chaque campagne d'expérimentation. Les relations 1 et 2 permettent de déterminer le déplacement et l'accélération quel que soit le réglage du préamplificateur.

#### 4. Saisie et dépose statiques en milieu sec

Une première expérience est proposée pour justifier l'utilisation des forces d'adhésion pour la micromanipulation. L'objectif est de réussir la saisie par un simple contact d'un objet préalablement placé sur un substrat, puis, de relâcher cet objet sur ce même substrat. Les conditions statiques à satisfaire pour accomplir cette tâche ont été déterminées [HAL 02] :

- **pour la saisie** : la force d'adhésion à l'interface objet/préhenseur doit être supérieure à celle à l'interface objet/substrat ;
- **pour la dépose**, la force d'adhésion à l'interface objet/substrat doit être supérieure à celle à l'interface objet/préhenseur.

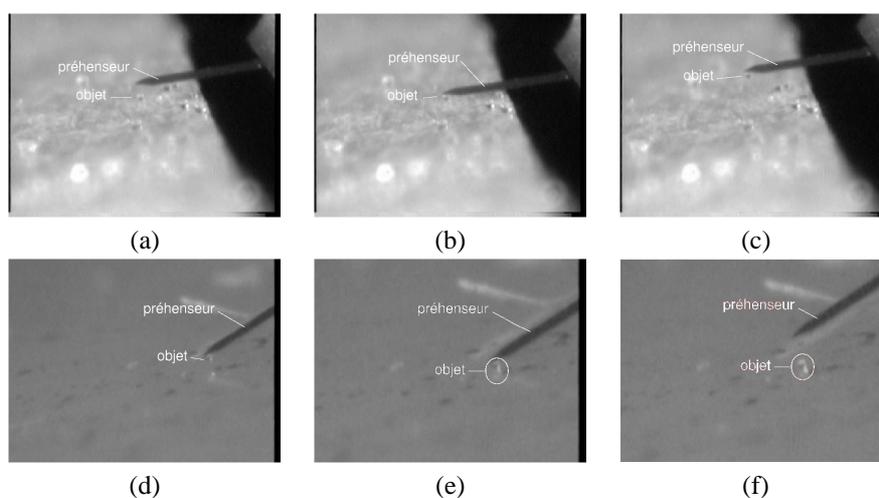
Comme le même substrat est utilisé pour la saisie et la dépose, il est clair qu'il n'est pas possible de satisfaire ces deux conditions. Il a donc été proposé d'incliner le préhenseur pour réduire la force d'adhésion entre l'objet et le préhenseur, en projection sur l'axe vertical, pour la phase de dépose. Cette méthode est utilisée dans l'expérience. Le substrat choisi est en polystyrène. En utilisant l'approximation de Lifshitz, sa constante de Hamaker est estimée à  $7.29 \cdot 10^{-20} J$ . Afin d'éliminer les charges électrostatiques, ce substrat est traité avec du méthanol. L'objet à manipuler est une sphère en verre, de diamètre  $\sim 40 \mu m$ , choisie pour sa géométrie et son état de surface presque parfait. De plus, la géométrie sphérique, par opposition aux formes prismatiques, permet l'utilisation d'une inclinaison quelconque. La constante de Hamaker de l'objet est estimée à  $6.20 \cdot 10^{-20} J$ . Le préhenseur ou plus particulièrement la pointe du dispositif AFM qui sera en contact avec l'objet est en silicium, de constante de Hamaker  $25.80 \cdot 10^{-20} J$ . En utilisant les relations de combinaison, la constante de Hamaker de l'interface objet/substrat et de l'interface objet/préhenseur sont estimées respectivement à  $7.17 \cdot 10^{-20} J$  et à  $10.10 \cdot 10^{-20} J$ . Les forces d'adhésion sont donc  $F_{adh}^{so} = 4.70 \mu N$  et  $F_{adh}^{po} = 6.80 \mu N$ .

L'objet étant de forme sphérique, l'aire de sa surface de contact avec le préhenseur et celle avec le substrat sont égales. A distance d'interaction égale, en particulier à  $D = D_0 = 0.4 nm$ , le rapport des forces d'adhésion *Substrat/Préhenseur* dépend uniquement des constantes de Hamaker des deux matériaux et est égal à :  $R_A =$

$\frac{A_s}{A_p} = 0.7$ . En prenant en compte l'inclinaison  $\theta$ , pour réussir la dépose l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$F_{adh}^{so} > \cos \theta \cdot F_{adh}^{po} \quad F_{adh}^{so} = R_A \cdot F_{adh}^{po}$$

L'inclinaison  $\theta$  nécessaire à la dépose doit donc satisfaire la condition  $\cos \theta < R_A$ . Par conséquent, une inclinaison estimée à  $45^\circ$  doit permettre la dépose statique. La figure 14 représente le déroulement de l'opération, obtenue sur le site expérimental :



**Figure 14.** Manipulation par saisie et dépose statique

- le préhenseur, parallèle au substrat, est placé au dessus de l'objet à saisir (a) ;
- le préhenseur est mis en contact avec l'objet (b) ;
- L'objet adhère au préhenseur et est saisi en soulevant verticalement le préhenseur (c). La mise en contact de l'objet avec le substrat sans incliner la préhenseur ne permet pas la dépose.
- le préhenseur est incliné d'un angle de  $45^\circ$  (d) ;
- l'objet est mis en contact avec le substrat (e) ;
- la dépose est effectuée en retirant verticalement le préhenseur (f).

Pour éviter d'endommager l'objet et surtout la pointe AFM, très fragile, une vitesse de descente lente est utilisée pour la phase de dépose. De plus, le logiciel de commande arrête automatiquement la progression du préhenseur si la flexion de la pointe dépasse une valeur seuil. Cette propriété est utilisée avec une faible valeur (1 V) pour détecter le contact de l'objet avec le substrat. La réussite de cette expérience démontre la validité du mode statique de manipulation par adhésion. Les limites de ce mode de manipulation seront explorées dans la suite.

## 5. Saisie et dépose statiques avec prédominance capillaire

Dans le domaine, par exemple, de la microélectronique, où les applications nécessitant la micromanipulation sont nombreuses, les composants à manipuler sont rarement de forme sphérique ou cylindrique. Ce sont souvent des pièces de forme parallélépipédique ou prismatique à surface plane. De plus, pour une opération d'assemblage de microcircuits par exemple, la dépose s'effectue sur un substrat différent de celui où l'objet est initialement placé. Pour toutes ces raisons, la deuxième expérience proposée correspond à une application industrielle. Il s'agit de manipuler des disques en étain d'un diamètre de  $300 \mu m$ , utilisés pour le soudage de microdiodes par la société Thompson. Le substrat cible est une pièce métallique (*covar*) sur lequel l'emplacement prévu pour les diodes doit être préalablement couvert de disques. Cette opération diffère de la première manipulation effectuée sur plusieurs aspects :

- l'objet étant plat et de dimensions relativement grandes pour assurer la prédominance des forces d'adhésion, la réussite de la phase de saisie peut être compromise. En effet, cette expérimentation atteint les limites dimensionnelles pour la prédominance des forces d'adhésion ;

- l'objet manipulé et le substrat cible sont de nature métallique. Une forte adhésion entre ces deux médias est prévisible. La phase de dépose semble donc simplifiée.

L'estimation des forces d'adhésion entre les différents composants est donnée ci-dessous :

- la rugosité de l'objet est estimée, par observation, à  $0.1 \mu m$ .

### – Interaction préhenseur/objet :

- l'aire de la zone de contact, en l'approchant par un rectangle de longueur égale au diamètre du disque et de largeur égale à la largeur de la poutre, est de :

$$S_{cont}^p = 300 \times 140 = 42000 \mu m^2.$$

- le coefficient de Hamaker de l'interaction étain/silicium, obtenu expérimentalement et par les relations de combinaison, est de  $\sim 53 \cdot 10^{-20} J$ .

La force d'adhésion, en prenant en compte la rugosité, est donc de  $272 \mu N$ .

### – Interaction substrat/objet :

- l'aire de la zone de contact est égale à la superficie de l'objet :

$$S_{cont}^s = 150^2 \times \pi = 70650 \mu m^2.$$

- le substrat choisi est le même, en polystyrène. Le coefficient de Hamaker de l'interaction polystyrène/étain, obtenu expérimentalement et par les relations de combinaison, est de  $\sim 30 \cdot 10^{-20} J$ . La force d'adhésion estimée est de donc de  $261 \mu N$ .

Un premier essai de manipulation utilise le mode opératoire décrit au paragraphe précédent. Dans ce cas, la phase de saisie n'est pas réussie. **Bien que l'adhésion estimée à l'interface préhenseur/objet soit supérieure à celle de l'interface substrat/objet**, le disque n'adhère pas suffisamment à la pointe et reste accroché au substrat. Cet échec est principalement dû à une mauvaise estimation de la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet. En effet, les deux surfaces étant planes, il est très difficile

d'obtenir un contact parfait entre les deux milieux. De légers défauts d'orientations du préhenseur diminuent considérablement la surface de contact. Ce phénomène montre qu'une légère différence d'orientation réduit l'adhésion de façon non négligeable. Il est donc nécessaire de trouver une «astuce» pour corriger l'orientation, deux approches sont possibles :

- la première consiste à augmenter les degrés de liberté du préhenseur en ajoutant des rotations actives supplémentaires afin de corriger le défaut d'orientation. Cette solution implique une complication au niveau de la commande et une éventuelle perte de précision. De plus, l'angle du défaut étant très petit, il est très difficile de prévoir une commande active détectant et corrigeant cette erreur ;

- la deuxième approche propose d'ajouter des degrés de liberté au porte-échantillon. Une correction active n'est toujours pas possible pour les raisons déjà citées. Néanmoins, l'ajout de degrés de liberté passifs au porte-échantillon semble la seule solution envisageable.

Cette dernière est mécaniquement assez difficile à mettre en œuvre : il faut ajouter au moins deux rotations autour des axes horizontaux. De plus, si une réorientation automatique de la pièce en fonction de la surface de la pointe en contact est désirée, les axes de rotation de ces liaisons doivent coïncider avec l'objet pour que le mouvement de ce dernier soit une rotation simple sans translation. Les difficultés sont importantes pour réaliser des pièces mécaniques à cette échelle satisfaisant ces consignes. C'est pourquoi une «astuce» de coussinet passif est proposée.

Il s'agit d'utiliser une goutte d'eau de taille microscopique. Une petite quantité d'eau est placée sur le substrat à l'aide d'une seringue. Le disque en étain surnage alors à la surface de cette goutte d'eau. L'objet étant libre de tangage et de roulis dans une certaine mesure, le défaut d'orientation est automatiquement levé au moment de la mise en contact du préhenseur. La goutte semble donc remplir parfaitement son office de coussinet passif.

Il faut noter que cette solution change radicalement les conditions de saisie. En effet, il ne s'agit plus d'une adhésion entre l'objet et le substrat mais entre l'objet et l'eau. Dans ce type d'interface, les forces capillaires et l'effet visqueux sont dominants. De plus, la formation d'un ménisque aqueux sous l'objet est un autre facteur clef pour la saisie. L'estimation des forces d'adhésion modifiées par la présence de l'eau est donnée ci-dessous :

– **Interface préhenseur/objet :**

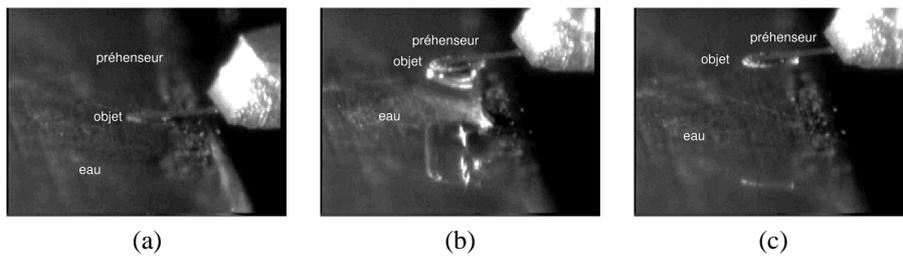
La constante de Hamaker  $A_{p-eau-o} = 11.28 \cdot 10^{-20} J$ ,  $F_{p-eau-o}^{adh} = 57 \mu N$  ;

– **Interface substrat/objet :**

La constante de Hamaker  $A_{s-eau-o} = 5.74 \cdot 10^{-20} J$ ,  $F_{s-eau-o}^{adh} = 43 \mu N$ .

A partir de ces choix, la saisie peut être effectuée. Son déroulement est présenté sur la figure 15. Sur cette figure, l'objet flotte sur la goutte d'eau. Dans un premier temps, pour pouvoir effectuer la saisie, il faut s'assurer de la supériorité de la force d'adhésion préhenseur/objet par rapport à l'interface objet/substrat,  $F_{p-eau-o}^{adh} > F_{s-eau-o}^{adh}$ . Cette condition étant satisfaite, la pointe est mise en contact avec l'objet. La goutte d'eau

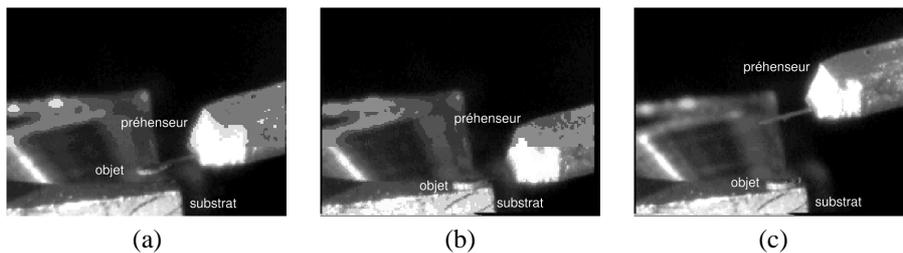
remplit sa fonction de coussinet passif et le contact entre le disque et le préhenseur est amélioré. L'adhésion objet/substrat est alors vaincue par l'adhésion objet/préhenseur. Néanmoins, un nouveau paramètre apparaît : avec une vitesse de montée très lente, l'objet reste accroché à la pointe et la formation d'un ménisque aqueux sous l'objet est observée (b) mais la saisie reste possible, tandis que pour une vitesse plus élevée, l'objet se détache du préhenseur et reste à la surface de la goutte d'eau.



**Figure 15.** Saisie à partir d'une goutte d'eau

Dans cette phase, pour réussir complètement la saisie, il faut pouvoir «casser» ce ménisque. Les facteurs cinétiques et dynamiques, qui entrent en jeu dans la formation et l'évolution du ménisque, sont mal connus. Par contre, l'effet dominant semble être la force visqueuse à l'intérieur du ménisque et de la goutte d'eau. Cette force étant directement proportionnelle à la vitesse, il suffit de continuer à lever le préhenseur en restant en dessous d'une vitesse seuil. Ce phénomène est effectivement observé au cours de la manipulation. La saisie est réussie (c) à condition d'utiliser une vitesse de déplacement minimale, déterminée empiriquement : la vitesse est divisée par 2 à la suite de chaque essai de saisie infructueux. La valeur de la vitesse seuil est de  $50 \mu\text{m/s}$ .

La dépose s'effectue, comme décrit ci-dessous, sur un substrat en *covar*, donc métallique. La force d'adhésion entre l'objet et ce substrat, en prenant en compte la supériorité de l'aire de la zone de contact, est supérieure à l'adhésion préhenseur/objet. La figure 16 montre le déroulement de la phase de dépose.



**Figure 16.** Dépose du disque sur le substrat métallique

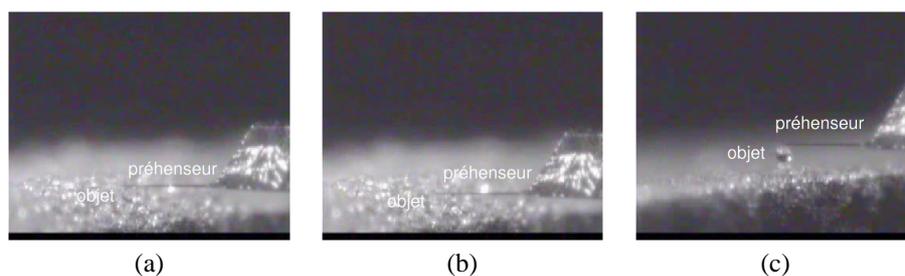
Le préhenseur est placé au dessus de l'emplacement choisi pour la dépose (a). Il est ensuite baissé jusqu'à la mise en contact de l'objet avec le substrat (b). Pour

empêcher l'apparition du problème lié au défaut d'orientation, le disque est appuyé fortement contre le substrat. La souplesse de la pointe, la grandeur relative de la surface de contact substrat/objet et la forte adhésion à cette interface sont suffisantes pour effectuer la dépose (c). La réussite de cette expérience montre la validité du mode de manipulation proposé pour une application industrielle. La difficulté majeure qui était de garantir un contact parfait entre un objet plat et le préhenseur, est surmontée par l'utilisation d'une goutte d'eau comme coussinet passif. Ce choix a aussi permis d'étudier le problème de saisie avec une interface aqueuse. La vitesse de déplacement du préhenseur, contrairement au cas de manipulation en environnement sec, est un facteur déterminant à cause du caractère dominant des forces visqueuses dans l'environnement aqueux.

## 6. Saisie statique et dépose dynamique

Les expériences de manipulation présentées précédemment ont pour objectif d'évaluer la faisabilité des tâches de saisie et de dépose en utilisant uniquement les forces d'adhésion. Or, un apport important du mode de manipulation proposé est l'utilisation de la dynamique du système, notamment pour la phase de dépose. Il démontre aussi comment un dispositif technologiquement simple peut permettre d'atteindre des hautes accélérations sur un temps très court, conduisant à l'amplification de l'effet inertiel pour vaincre l'adhésion. Le comportement dynamique du préhenseur a été étudié, théoriquement par la méthode des éléments finis, puis expérimentalement. Ces études ont conclu à l'aptitude du préhenseur à produire la gamme d'accélérations nécessaires.

Pour tester le fonctionnement du manipulateur pour une tâche de dépose, l'expérience suivante est définie : il s'agit de saisir un objet sphérique à partir d'un substrat et de le re-déposer sur ce dernier. Contrairement à la première expérience de manipulation où la dépose est effectuée par une approche statique (en utilisant l'orientation du préhenseur) c'est la dépose dynamique qui sera utilisée.

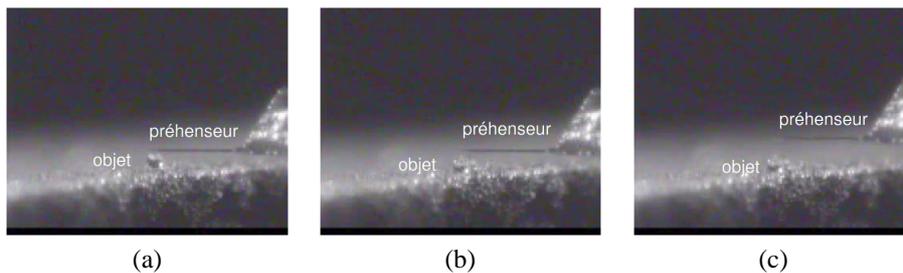


**Figure 17.** Saisie statique de la microsphère

L'objet et le substrat utilisés pour cette expérience sont identiques à ceux de la première expérience : l'objet est une sphère en verre de 40 à 50  $\mu\text{m}$  de diamètre et le substrat est en polystyrène. Ce choix est motivé par la bonne réussite et la répétabilité

de la phase de saisie, permettant ainsi de ne consacrer cette partie de l'étude qu'à la phase de dépose dynamique.

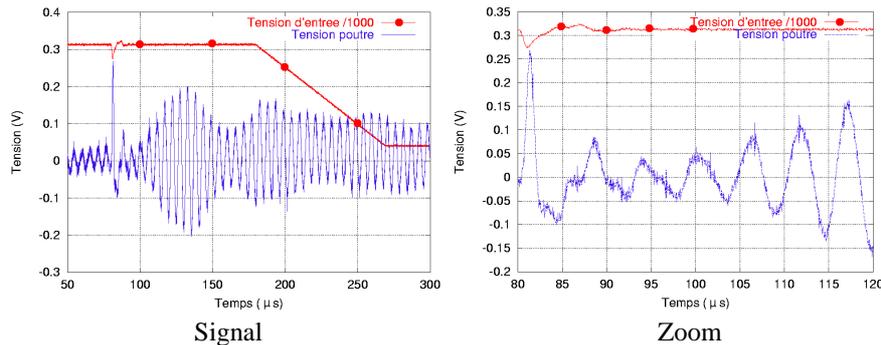
La figure 17 montre le déroulement de l'opération de saisie. La condition statique au niveau de l'adhésion préhenseur/objet étant satisfaite (a), la saisie s'effectue facilement en mettant le préhenseur en contact avec l'objet (b) puis en le retirant verticalement (c). Pour montrer la difficulté de la dépose, le préhenseur est baissé jusqu'au contact entre le substrat et l'objet. La microsphère reste accrochée à la pointe même après des contacts objets/substrat répétés (figure 18-a). Il est donc impossible d'effectuer la dépose statique, comme prévu par l'étude théorique, sans incliner le préhenseur. Pour expérimenter le mode de dépose dynamique, et surtout afin de quantifier la valeur de l'accélération limite permettant la dépose, le préhenseur est excité par des signaux de différentes amplitudes. Préalablement à l'excitation, le préhenseur, avec l'objet collé à son extrémité libre, est positionné légèrement au-dessus du substrat. Cette manœuvre a pour but d'empêcher l'endommagement de la poutre dans le cas d'un choc avec le substrat : l'étude de comportement dynamique de la pointe AFM avait prédit un comportement à phase non minimale, qui se traduit par un abaissement de la pointe juste après l'impulsion. Ce comportement a aussi été observé pendant la caractérisation dynamique du préhenseur.



**Figure 18.** Dépose dynamique de la microsphère

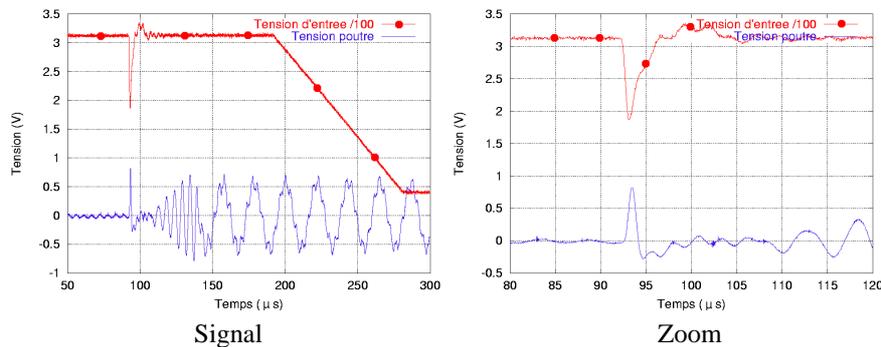
Trois expérimentations sont réalisées. Le même type d'excitation est utilisé dans chacun des cas. La réponse de la céramique est plus efficace dans le cas où elle est précompressée. Pour cela, une rampe lente préliminaire qui impose une compression quasi statique est ajoutée au signal de commande. Cette partie du signal n'est pas visible sur les courbes. L'excitation qui produit l'accélération est une impulsion qui se déclenche à  $t = 90 \mu s$ . Puis, la céramique est décompressée lentement jusqu'à sa forme initiale (de  $t = 180$  à  $280 \mu s$ ). Un autre facteur important pour la bonne interprétation du comportement du préhenseur est la connaissance de la fréquence propre du système formé par le préhenseur avec ou sans l'objet. Sur les courbes de tension du pont de Wheatstone, plusieurs fréquences superposées sont visibles. Le premier mode de résonance de la pointe du préhenseur est de  $40 kHz$ . Le deuxième mode se situe aux environs de  $200 kHz$ . Si l'on considère le système complet formé de la pointe avec l'objet accroché à l'extrémité, le premier mode de résonance se situe aux environs de  $\sim 20 kHz$ . Il est donc possible de détecter immédiatement la réussite de l'opération de dépose par observation de la fréquence du signal de retour

du dispositif AFM. Dans le premier cas, l'amplitude du signal choisie est de 40 V. L'accélération résultante, d'après la relation 2 mise en place au premier paragraphe, est estimée à  $5 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$ . Cette valeur semble inférieure à l'accélération limite. Le signal de flexion de la pointe ainsi que le signal de commande sont représentés sur la figure 19.



**Figure 19.** Comportement dynamique du préhenseur pour la 1ère excitation.

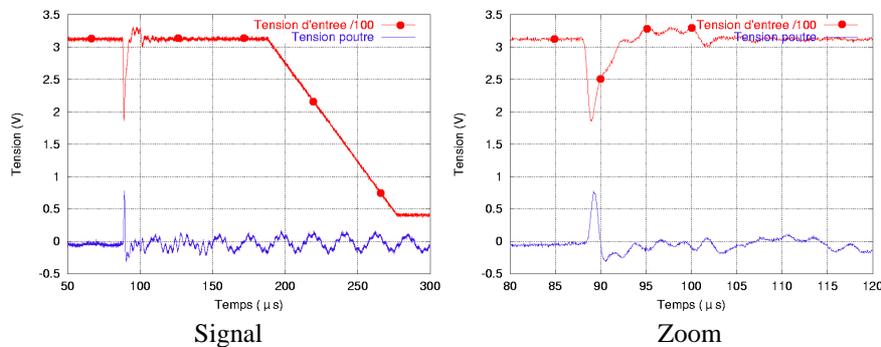
Pour cette valeur, le décollement n'a pas lieu et la dépose n'est donc pas effectuée : la force d'inertie créée par cette accélération n'est pas suffisante pour vaincre la force d'adhésion. L'oscillation résultante de cette impulsion est composée de plusieurs modes. Une analyse de Fourier de ce signal a permis de visualiser les vibrations d'une fréquence de  $\sim 0.2 \text{ MHz}$ . Une simulation par éléments finis démontre que cette fréquence correspond au premier mode de torsion de la poutre. Ce mode serait engendré par l'excentricité du point de contact entre l'objet et la pointe. Néanmoins, l'amplitude de ce mode de torsion est impossible à déduire du système AFM, à cause de la nature de la jauge du pont de Wheatstone. A basse fréquence, la fréquence d'oscillation observée est celle du premier mode de flexion du système poutre+objet. Cette fréquence confirme l'échec de la dépose.



**Figure 20.** Comportement dynamique du préhenseur pour la 2ème excitation.

Dans le deuxième cas, l'amplitude de l'impulsion est amplifiée jusqu'à 80 V (fig. 20). L'accélération résultante est estimée à  $\sim 10^6 \text{ m/s}^2$ . Cette valeur est juste au-dessus de la limite de dépose. Comme prévue, l'opération est réussie et le décollement est effectif. L'observation de la sortie du dispositif AFM montre que le système oscille d'abord à la fréquence "poutre+objet" (flexion et torsion). Ces vibrations provoquent la dépose à  $t = 140 \mu\text{s}$ . Puis, le système oscille sur la fréquence du premier mode de flexion de la poutre seule, confirmant ainsi le succès de l'opération.

Pour le troisième cas, l'amplitude de l'impulsion est de 120 V (fig. 21). L'accélération résultante est estimée à  $\sim 1.5 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$ . Après un bref régime transitoire, le système oscille sur la fréquence poutre seule. Le dépose est donc effectuée immédiatement après l'impulsion.



**Figure 21.** Comportement dynamique du préhenseur pour la 3ème excitation.

Ces expériences ont bien démontré l'efficacité de la dépose dynamique et l'existence d'une «accélération minimum de dépose». La dépose dynamique contribue largement à l'efficacité du mode de manipulation par adhésion, permettant d'utiliser un préhenseur de très forte énergie de surface pour garantir la saisie, sans pour autant empêcher la dépose.

## 7. Conclusion

Cet article décrit les études expérimentales autour du mode de manipulation proposé. Dans un premier temps, les caractéristiques de l'actionneur et du préhenseur actif ont été explorées pour déterminer le comportement dynamique et les propriétés relatives aux phénomènes d'adhésion. Cette première expérimentation a permis de valider l'utilisation du préhenseur actif réalisé pour produire les grandes accélérations nécessaires au mode de manipulation proposé.

Les premières expériences de manipulations valident l'utilisation des forces d'adhésion pour les tâches de saisie et de dépose. Une microsphère en verre de  $50 \mu\text{m}$  de diamètre est saisie et manipulée par utilisation unique du phénomène d'adhésion.

Une application industrielle, consistant à manipuler un disque en étain de 300  $\mu\text{m}$  de diamètre, destiné au montage de microdiodes, est réalisée en mettant à profit une interface aqueuse qui facilite la saisie. Enfin, les capacités dynamiques du préhenseur sont mises en œuvre pour effectuer une tâche de dépose sur un substrat à très faible énergie de surface. La réussite de ces trois expériences justifie pleinement les fonctionnalités du mode de manipulation choisi.

## 8. Bibliographie

- [ARA 97] ARAI F., FUKUDA T., « Adhesion-type Micro Endeffector for Micromanipulation », *proc. of IEEE international conference on robotics and automation*, 1997, p. 1472-1477.
- [FEA 95] FEARING R., « Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling », *proc. of the IEEE/RSJ Intelligent Robots System*, 1995, p. 212-217.
- [HAL 02] HALIYO D., RÉGNIER S., « Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects », *Proceedings of ICRA/IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2002.
- [LUO 01] LUO Y., NELSON B., « Fusing Force and Vision Feedback for Manipulating Deformable Objects », *Journal of Micromechatronics*, vol. 18, n° 3, 2001, p. 103–117.
- [ROL 00a] ROLLOT Y., *Micro-manipulation par adhésion : Modélisations dynamiques et expérimentations*, Thèse soutenue en janvier 2000, Paris, 2000.
- [ROL 00b] ROLLOT Y., RÉGNIER S., « Micromanipulation par adhésion : Modélisation dynamique et expérimentation », *Nano et Micro Technologies*, vol. 1, no 2/2000.
- [SAI 02] SAITO S., MIYAZAKI H., SATO T., « Micro-object Pick and Place Operation under SEM based on Micro-Physics », *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 14, n° 3, 2002, p. 227–237.
- [SAT 96] SATO T., « Micro/Nano Manipulation World », *proc. of IROS 96*, 1996, p. 835-841.