



## Dépose dynamique d'un micro-objet saisi par adhésion

Sinan Haliyo, Stéphane Regnier, Jean-Claude Guinot

Laboratoire de robotique de Paris, BP 61, 92265 Fontenay Aux Roses, France

Reçu le 10 février 2003 ; accepte après révision le 27 juin 2003

Présenté par Évariste Sanchez-Palencia

---

### Résumé

Cet article décrit une stratégie dynamique pour relacher 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 dynamiques, avec une sphère en verre de rayon 40  $\mu\text{m}$ , montrent le bien fondé de ce choix. *Pour citer cet article : S. Haliyo et al., C. R. Mecanique 331 (2003).*  
© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects.** 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 demonstrated. *To cite this article: S. Haliyo et al., C. R. Mecanique 331 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Systèmes dynamiques ; Manipulation ; Micro-objets ; Forces d'adhésion ; Effets inertiels

*Keywords:* Dynamical systems; Manipulation; Micro-objects; Adhesion forces; Dynamical effects

---

### Abridged English version

Manipulating at a microscopic scale is quite different than the conventional manipulation. This change is mainly due to the dominance of surface forces. These forces being generally attractive, the manipulated object tends to stick either to the gripper or to the substrate, making capture impossible or irreversible, depending on the relative surface energies of the constitutive materials. Different solutions taking into account this phenomena have been proposed in the literature. For example, the vacuum tool at EPFL uses suction in order to generate capture and release forces higher than the adhesion forces in magnitude, in order to overcome sticking effects. Another interesting approach is

---

Adresses e-mail : [haliyo@robot.jussieu.fr](mailto:haliyo@robot.jussieu.fr) (S. Haliyo), [regnier@robot.jussieu.fr](mailto:regnier@robot.jussieu.fr) (S. Regnier), [guinot@robot.jussieu.fr](mailto:guinot@robot.jussieu.fr) (J.-C. Guinot).

to take advantage of adhesion forces for manipulation purposes. This approach has been successfully implemented, in the case of manipulation of glass beads in an electron microscope.

Our recent work on micro-manipulation is based on a similar approach. An exploration of micro-scale specificities, then a dynamic study of a manipulation task has permitted to foresee an operational mode for pick-up and release of objects, using a one-finger gripper, solely based on sticking and inertial effects.

The capture of an micro-object is solely achieved by contacting the gripper with the object. The success of the operation depends on the superiority of the adhesion on the object/gripper interface compared to object/substrate interface. This mode is called “static capture”. The release operation is achieved either by a similar static mode, on a target substrate whose adhesion energy is greater than the gripper’s, or by dynamic effects. Simulations showed that a vertical instantaneous acceleration of the gripper would produce a inertial force higher than the gripper/object adhesion on the object, thus accomplishing the release. In extreme cases, this acceleration can go as high as  $10^6 \text{ m/s}^2$ . These three modes, static capture, static release and dynamic release, has been successfully demonstrated using [mü] MAD, our prototype manipulator. The architecture of the active gripper designed to accomplish this operations is as follows: a piezoresistive cantilever, originally a tipless AFM device is used as the end effector. The high Hamaker constant and near zero roughness of the AFM probe make possible the static capture by adhesion. The gripper is activated by a piezoelectric ceramic, driven by 50 to 300 V impulses to produce instantaneous accelerations in the  $[100, 10^6] \text{ m/s}^2$  range. Moreover, the AFM device allows an accurate visualization of vibrations of the end effector. The frequencies of these vibrations depends on the gripped object thus it is possible to judge the release operation by mere observation the output signal of the AFM device, without needing any other external sensors.

## 1. Introduction

La micro-manipulation par adhésion est une approche basée sur la mécanique et la physique des interactions pour la préhension de micro-objets. Elle se décompose en plusieurs étapes : approche avec un outil simple de type poutre, saisie par simple contact, approche pour la dépose et dépose en s’affranchissant des efforts d’adhésion. Néanmoins, si saisir un objet par simple contact est maintenant bien maîtrisé avec un choix judicieux du préhenseur, s’affranchir de ces mêmes effets est un problème complexe. Une solution statique consistait à introduire un angle de dépose pour diminuer l’interaction objet préhenseur mais sa viabilité est limitée aux objets sphériques. Pour les objets plans comme ceux utilisés pour les MEMS, la seule solution semble donc être l’utilisation de l’inertie du préhenseur : il s’agit d’utiliser la dynamique du préhenseur pour vaincre les effets d’adhésion et « casser » la liaison entre l’objet et le préhenseur. La difficulté principale provient des accélérations mises en jeu de  $10^4$ – $10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Un système capable de produire ces accélérations et de saisir le micro-objet a ainsi été conçu. Il se compose d’une céramique jouant le rôle d’accélérateur et d’une poutre piézorésistive assurant le rôle du capteur et du préhenseur. La première partie de cet article proposera un bref rappel de la formulation dynamique de la dépose et des valeurs nécessaires pour vaincre l’adhésion. Ensuite, une description simplifiée du dispositif expérimental sera introduite. Enfin des expérimentations dynamiques montreront tout à la fois la fiabilité du système et de l’hypothèse proposée, l’inertie pour vaincre l’adhésion.

## 2. Approche théorique

Le modèle dynamique d’une tâche de saisie/dépose par adhésion peut s’écrire [1] :

$$m_p \ddot{Y}_p = F_p^{\text{ext}} - F_{op}^{\text{adh}}(D_2) - m_p g \quad (1)$$

$$m_o \ddot{D}_1 = F_{op}^{\text{adh}}(D_1) - F_{os}^{\text{adh}}(D_1) \cos(\theta) - m_o g \quad (2)$$

$$m_p \ddot{Y}_p = F_p^{\text{ext}} - F_{op}^{\text{adh}}(D_2) - m_p g, \quad \ddot{D}_2 = \ddot{Y}_p - \ddot{D}_1 \quad (3)$$

La Fig. 1 décrit les différentes distances utilisées pour ce modèle incluant les contraintes de système unique et de distance. L’indice  $p$  est affecté à la poutre,  $o$  à l’objet et  $s$  au substrat.

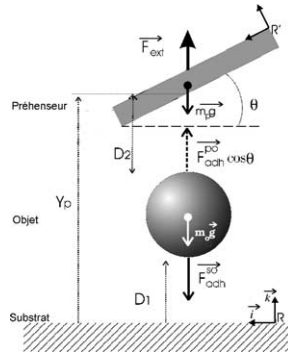


Fig. 1. Étude dynamique de la tâche de manipulation.

Fig. 1. Dynamics of the manipulation.

$F_p^{\text{ext}}$  est la force extérieure appliquée à la pipette,  $F_{op}^{\text{adh}}$  est force d'adhésion entre l'objet et le préhenseur incluant les forces de Van der Waals, électrostatiques et capillaires,  $F_{os}^{\text{adh}}$  est force d'adhésion entre l'objet et le substrat. Si l'on considère la phase de dépose, la force extérieure appliquée au préhenseur (par l'actuateur) doit être supérieure à la force d'adhésion objet préhenseur  $F_p^{\text{ext}} > F_{op}^{\text{adh}}$ . Pour un objet sphérique en silicium de rayon  $50 \mu\text{m}$ , sa masse est évaluée à  $m_b = 10^{-11} \text{ g}$  et cette force d'adhésion à  $10^{-6} \text{ N}$  soit une accélération nécessaire pour casser l'adhésion de :

$$\ddot{Y}_p \geq \frac{F_{op}^{\text{adh}}}{m_b} = 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \quad (4)$$

Une étude plus fine sur un grand nombre de cas montre que l'accélération nécessaire pour vaincre l'adhésion doit se trouver dans une plage très haute soit  $[10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}, 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}]$ . L'objectif de ce travail est donc :

- la synthèse d'un système capable d'atteindre cette accélération et de saisir un objet par adhésion,
- la validation a posteriori des hypothèses sur l'inertie du système pour vaincre l'adhésion.

Les différents systèmes ont déjà été présentés [2]. Il s'agit maintenant de montrer leur réponse dynamique pour valider le choix proposé.

### 3. Description du système de micro-préhension

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. Ainsi, le choix s'est orienté vers l'utilisation d'une pointe AFM comme préhenseur. Les résultats théoriques de simulations des modèles dynamiques ont montré la nécessité de produire une large gamme d'accélération allant de  $100$  à  $10^6 \text{ m/s}^2$  [1]. Les céramiques piézoélectriques présentent un avantage certain pour répondre à ce besoin [2]. La céramique est ainsi collée sur sa face supérieure à un axe rectangulaire, montée directement sur le bloc déplacement par une liaison pivot glissant. Le dispositif AFM est collé à la surface inférieure de la céramique. La Fig. 2 illustre ce système de micro-manipulation.

### 4. Dépose dynamique d'un objet saisi par adhésion

Un apport important du mode de manipulation proposé est l'utilisation de la dynamique du système, notamment pour la phase de dépose. Pour tester le fonctionnement du manipulateur pour une tâche de dépose, une expérience de tâche canonique est choisie. Il s'agit de saisir un objet sphérique à partir d'un substrat et de le déposer sur ce

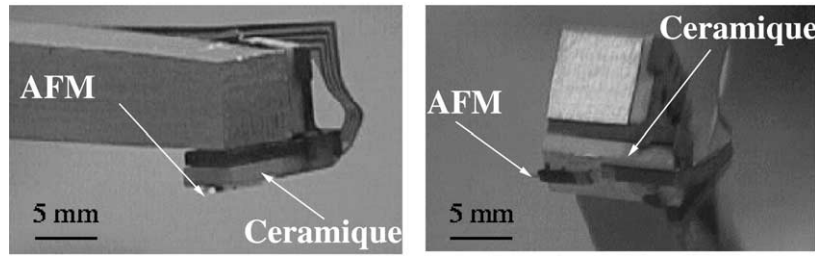


Fig. 2. Le préhenseur actif réalisé.

Fig. 2. The active gripper.

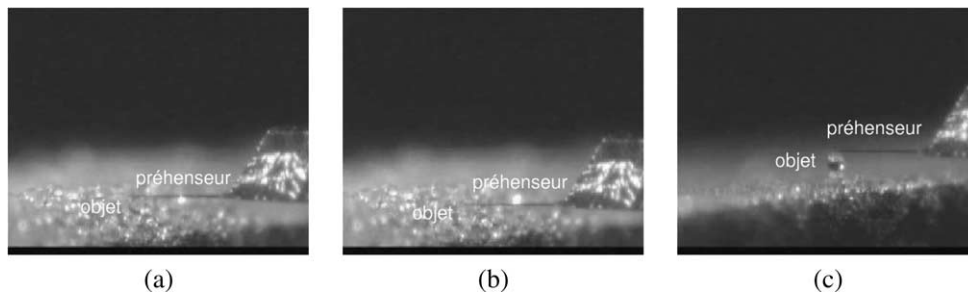


Fig. 3. Saisie statique du micro-sphère.

Fig. 3. Static capture of the micro-sphere.

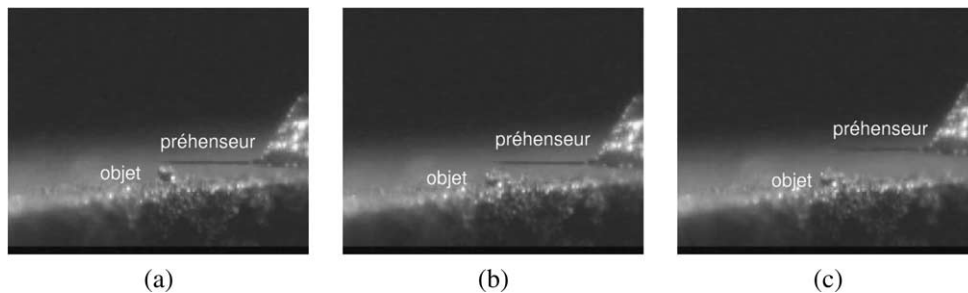


Fig. 4. Dépose dynamique du micro-sphère.

Fig. 4. Dynamic release of the micro-sphere.

dernier. L'objet est une sphère en verre de 40 à 50  $\mu\text{m}$  de diamètre et le substrat en plexiglas. Ce choix est motivé par la bonne réussite et la répétabilité de la phase de saisie, permettant ainsi de consacrer l'étude à la phase de dépose dynamique.

La Fig. 3 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 micro-sphère reste accrochée à la pointe même après des contacts objet/substrat répétés (Fig. 4(a)). Il est donc impossible d'effectuer la dépose statique, comme prévue 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 pré-

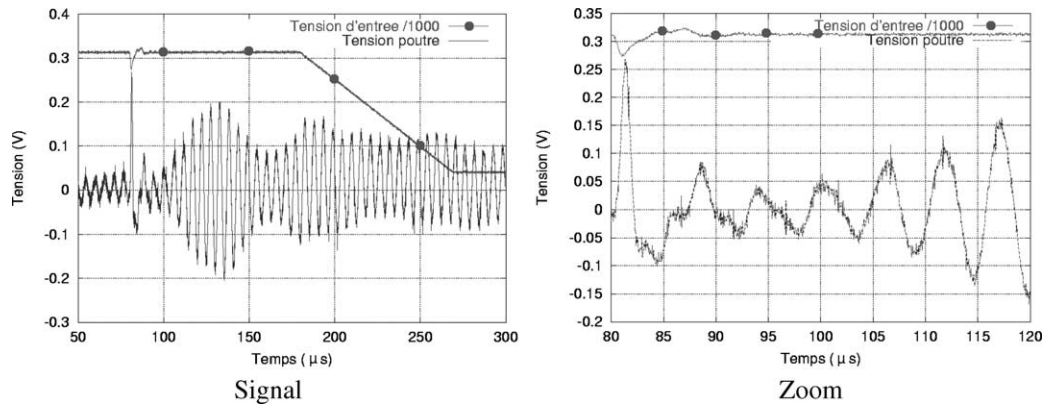


Fig. 5. Comportement dynamique du préhenseur pour la 1ère excitation.

Fig. 5. Dynamic behaviour of the gripper for the 1st excitation.

henseur, avec l'objet collé à son extrémité libre, est positionné légèrement au-dessus du substrat. Cette manoeuvre 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 [3]. Ce comportement a aussi été observé pendant la caractérisation dynamique du préhenseur. Trois expérimentations sont réalisées. Le même type d'excitation est utilisé pour ces trois cas. La réponse de la céramique est plus efficace dans le cas où elle est précompressée. Pour cette raison, le signal de commande est composé d'une rampe lente préliminaire qui impose une compression quasi-statique. Cette partie du signal n'est pas visible sur les courbes. L'excitation qui produit l'accélération est l'impulsion de Dirac qui se déclenche à  $t = 90 \mu\text{s}$ . Puis, la céramique est décompressée lentement jusqu'à sa forme initiale (de  $t = 180$  à  $280 \mu\text{s}$ ). Un autre facteur important pour la bonne interprétation du comportement du préhenseur est la connaissance de la fréquence propre du système. Sur les courbes de tension du pont de Wheatstone, plusieurs fréquences superposées sont apparentes. 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 est de 40 V. L'accélération résultante est estimée à  $5 \sim 10^5 \text{ m/s}^2$  [2]. Cette valeur est en dessous de l'accélération limite estimée par simulation, à  $\sim 7 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ . Le signal de flexion de la pointe ainsi que le signal de commande sont représentés sur la Fig. 5.

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. A haute fréquence, les vibrations du premier mode de torsion de la poutre, d'une fréquence de  $\sim 0.2 \text{ MHz}$  sont observées. Elles sont engendrées 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 à cause de la nature de jauge de pont de Wheatstone du système AFM. 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.

Dans le deuxième cas, l'amplitude du Dirac est amplifiée pour atteindre 80 V (Fig. 6). L'accélération résultante est estimée à  $\sim 1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ . 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 sur la fréquence « poutre + objet » (flexion et torsion). Ces vibrations causent la dépose à  $t = 140 \mu\text{s}$ . Puis, le système oscille sur la fréquence du premier mode de flexion de la poutre seule, affirmant ainsi le succès de l'opération.

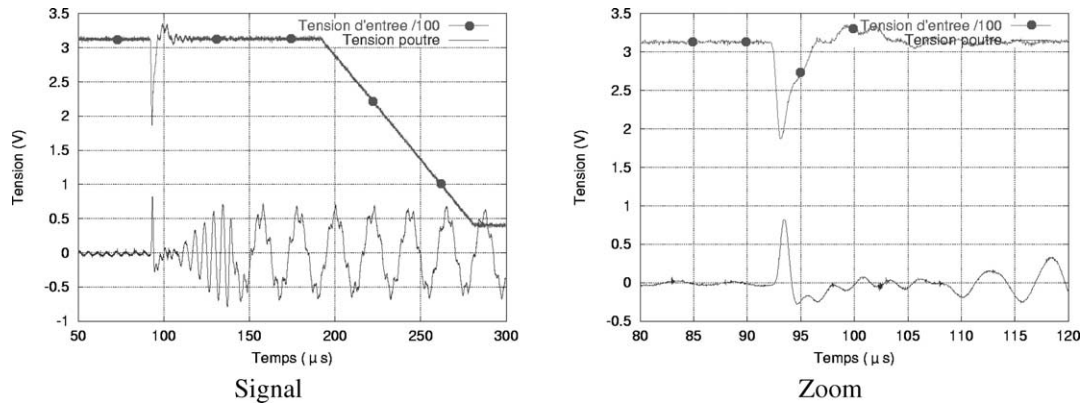


Fig. 6. Comportement dynamique du préhenseur pour la 2ème excitation.

Fig. 6. Dynamics behaviour of the gripper for the 2nd excitation.

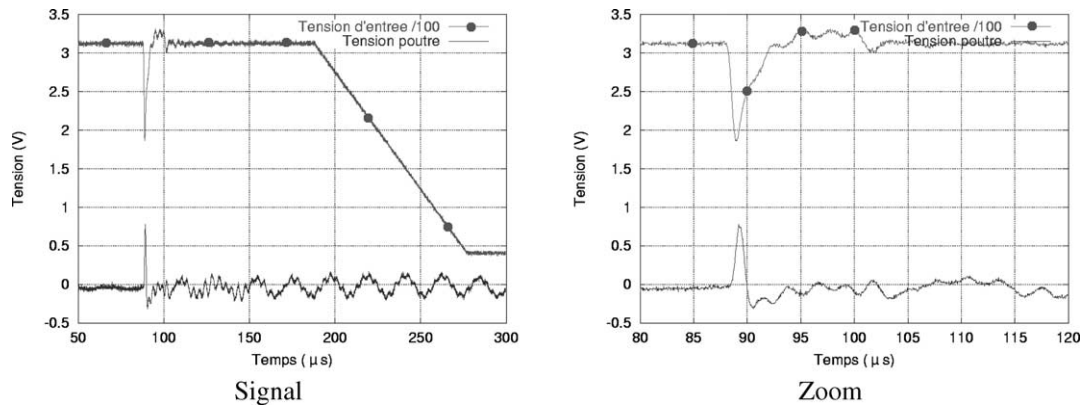


Fig. 7. Comportement dynamique du préhenseur pour la 3ème excitation.

Fig. 7. Dynamics behaviour of the gripper for the 3rd excitation.

Pour le troisième cas, l'amplitude du Dirac est de 120 V (Fig. 7). L'accélération résultante est estimée à  $\sim 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ . Après une brève régime transitoire, le système oscille sur la fréquence poutre seule. Le dépôt est donc effectuée immédiatement après l'impulsion.

## 5. Conclusion

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

## Références

- [1] Y. Rollot, S. Régnier, J.-C. Guinot, Microrobotique : modèle dynamique et loi horaire pour une micromanipulation par adhésion, C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. Iib 326 (1998) 469–474.
- [2] Y. Rollot, S. Régnier, J.-C. Guinot, Simulation of micro-manipulations: Adhesion forces and specific dynamic models, Int. J. Adhesion & Adhesives 19 (1999) 35–48.
- [3] D. Quesnel, D. Rimai, L. Sharpe, Particle Adhesion: Applications and Advances, Taylor and Francis, 2001.