THESE

présentée à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

par

D.Sinan HALIYO

pour obtenir le diplôme de

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité : Mécanique-Robotique

Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation

---

Soutenue le 18 Décembre 2002

JURY

Mr. M. BARQUINS	Directeur de Recherche CNRS/ESPCI - PMMH	Rapporteur
Mr. J.P. LALLEMAND	Professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
Mr. N. CHAILLET	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Examinateur
Mr. S. REGNIER	Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie	Examinateur
Mr. A. RIGOLOT	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examinateur
Mr. J.C. GUINOT	Directeur de Thèse Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examinateur

INVITES

Mr. C. FRETIGNY	Chargé de Recherche CNRS/ESPCI - PCSM	Examinateur
Mr. J.P. FRICONNEAU	Chef de Laboratoire CEA	Examinateur
Mr. Y. ROLLOT	Chargé de Recherche INRA - BPLC	Examinateur

à Claude Pollak

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier M. Jean-Claude Guinot, *mon directeur de thèse et directeur du LRP jusqu'en 2001, pour ses précieux conseils et son encadrement exemplaire. Je tiens également à remercier* M. Philippe Bidaud, *pour sa collaboration et l'intérêt qu'il a porté à mon travail.*

M. Stéphane Régnier *a participé à l'élaboration de cette thèse d'une manière "symbiotique". Il mérite plus que des remerciements, ainsi que* M. Yves Rollot, *mon prédécesseur, et précurseur de la micro-manipulation par adhésion au LRP.*

M. Alain Testa *a apporté son savoir faire pour toutes les réalisations techniques. De plus, plusieurs personnes, stagiaires ou autres, ont participé à ce travail. Leurs contributions m'ont été d'un grand soutien.*

Je tiens finalement à remercier tous mes correcteurs linguistiques, qui m'ont aidé à mettre en forme ma rédaction.

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES **vii**

LISTE DES FIGURES **xi**

INTRODUCTION **1**

I La manipulation d'objets microscopiques et les forces d'adhésion **5**

1 La recherche en micro-manipulation 6

1.1 L'axe micro-manipulation téléopérée du Laboratoire d'Automatique de Besançon 6

1.2 Le projet "Robotic Micromanipulation" de l'Advanced Microsystems Laboratory 8

1.3 Le Joining Science and Technolgy Laboratory 11

1.4 L'axe Micro-Nano Mechatronics du Fukuda Lab 12

2 Les forces d'adhésion et la micro-manipulation : travaux préliminaires 15

2.1 Description physique de l'échelle microscopique 15

2.2 Energie d'interaction de deux corps 16

2.3 Les forces de Van der Waals 21

2.4 La force capillaire et les effets d'humidité sur l'adhésion 27

2.5 Les forces électrostatiques 30

3 Conclusion 31

II Dualité de la saisie/dépose par adhésion **33**

1 Description de la tâche de manipulation 34

2 Étude théorique de la tâche 35

2.1 Bilan des forces appliquées sur l'objet 36

2.2 Définition des phases de la manipulation 37
2.3 Modèle dynamique des phases de saisie et de dépose . . 38
2.4 Influence de l'inclinaison du préhenseur 42
3 Simulations dynamiques de la tâche 43
3.1 Résolution pas à pas 43
3.2 Résultats de simulations 46
4 Modèles et simulations réalistes 53
4.1 Étude de la déformation de la sphère 54
4.2 Simulations dynamiques par éléments finis 56
5 Application du modèle en milieu aqueux 58
6 Conclusion 59

III Conception et réalisation du prototype 61
1 Cahier des charges 61
2 Etude du préhenseur 65
2.1 Solutions proposées pour la phase de saisie 65
2.2 Solutions technologiques proposées pour la phase de dépose 67
3 Analyse numérique du préhenseur 70
3.1 Modèle dynamique de la céramique piézoélectrique . . 70
3.2 Validation du choix de l'actionneur 74
3.3 Modélisation de la pointe A.F.M 77
3.4 Validation du modèle éléments finis 79
3.5 Simulations du comportement dynamique du préhenseur 80
3.6 Commande du préhenseur 84
4 Description du banc expérimental et du prototype 84
4.1 Bloc déplacement 85
4.2 Porte-échantillons 86
4.3 Module de traitement visuel 87
4.4 La partie logicielle 87
5 Conclusion 89

IV Expériences et applications de la micro-manipulation 91
1 Caractérisation expérimentale du système de préhension . . . 91
1.1 Comportement dynamique de l'actionneur 92
1.2 Pointe AFM 94
2 Saisie et dépose statiques en milieu sec 99
3 Saisie et dépose statiques avec prédominance capillaire 101
4 Saisie statique et dépose dynamique 105
5 Saisie en vrac et dépose sélective 110
6 Conclusion 113

V De la manipulation à la caractérisation 115
1 Analyse dimensionnelle 117
1.1 Un exemple simple : le Vacuum Gripper 117
1.2 La micro-manipulation par adhésion 120
2 Modèles de déformation 121
3 Théorie des poutres en flexion 124
4 Le premier mode de flexion du système “poutre + objet” . . . 125
5 Différentes caractérisations micro-physiques 128
5.1 De la masse de l'objet à sa raideur 128
5.2 Mesure de la masse avec plusieurs objets 129
5.3 Étude de l'énergie d'interface objet substrat 130
5.4 De l'accélération de dépose à l'énergie d'interface objet préhenseur 132
5.5 Vers la torsion 132
6 Conclusion 133

CONCLUSION 135

ANNEXES 147

A Piézoélectricité 147
1 Tenseur de déformation 147
2 Tenseur de contraintes 148
3 Champ électrique 150
4 Loi de Hooke 150
5 Tenseur piézoélectrique 151
6 Équation piézoélectrique directe 152

B Simulateur de comportement dynamique des céramiques piézoélectriques 153
1 Algorithme de calcul dynamique 153
2 Le code C du simulateur 154

C Code CASTEM pour le comportement dynamique du préhenseur 157

Liste des figures

1 Système de téléopération de LAB 7
2 Micropince du LAB 8
3 Prototype du micro-préhenseur de l'équipe Yu Zhou et Bradley J. Nelson [Zhou et al., 2000] 9
4 Assemblages des MEMS magnétiques 10
5 Injection introcytoplasmique (AML) 10
6 Plate-forme de micro-manipulation de l'équipe de Hideki MIYAZAKI et Tomomasa SATO [Miyazaki et Sato, 1997] 11
7 Manipulation des micro-billes 12
8 Procédé de fabrication des micro-trous [Arai et Fukuda, 1997] 13
9 Décomposition de la prise d'un objet en utilisant une force de succion [Arai et Fukuda, 1997] 14
10 Micro-manipulation indirecte par la manipulation sans contact d'un micro-outil [Arai et al., 2001] 14
11 Différents profils de densité de forces de Van der Waals corrigées 22
12 Deux plans avec défauts de parallélisme 24
13 Comparaison du poids et de la force de pull-off d'une sphère en fonction de son rayon, sur un substrat en polystyrène . . . 25
14 L'effet de la rugosité sur la force de Van der Waals ($\frac{F_r}{F_{VdW}^{theorique}}$) . 26
15 Etude du ménisque aqueux 28
16 Variation de la force d'adhésion en fonction de l'humidité (courbe expérimentale) [Zhou et Nelson, 1998] 29

1 Décomposition de la tâche de manipulation 35
2 Etude de la tâche de manipulation 36
3 Etude dynamique de la tâche de manipulation : modèle 'détaché' 39
4 Etude dynamique de la tâche de manipulation : modèle 'attaché' 41

5 Diagramme bloc de *Simulink* pour les simulations 44
6 Résultats de simulations : cas de la saisie statique $\ddot{Y}_p < \gamma^0$ avec
7 Résultats de simulations : cas de la limite de saisie $\ddot{Y}_p \in [\gamma^0, \gamma^1[$ avec
48
8 Résultats de simulations : cas de la limite de dépose $\ddot{Y}_p \simeq \gamma^1$ av
9 Résultats de simulations : cas de la dépose dynamique $\ddot{Y}_p > \gamma^1$
10 Résumé des résultats de simulations en fonction de l'accélération 50
11 Influence de la variation du rayon sur l'accélération limite γ^1 . 51
12 Influence de la variation de l'angle θ sur l'accélération limite γ^1 51
13 Limite d'accélération minimum nécessaire pour effectuer la dépose en fonction du rayon de l'objet manipulé et l'inclinaison du préhenseur 52
14 Modèle EF de l'objet (1/8 de la sphère) 54
15 Déformation pré-contact 55
16 (a) Modèle EF de l'objet en contact (b) Déformation au contact 56
17 Plages de saisie et de dépose pour une sphère en verre 57
18 Déformations subies par un objet élastique au cours de la simulation 57
19 Plages de saisie et de dépose pour un objet biologique 58

1 Schéma fonctionnel du manipulateur 62
2 Caractéristiques de la pointe piézorésistive utilisée comme préhenseur (produite par la société Nanosensors Gmbh) 66
3 Poutre piézorésistive durant la phase de métallisation 67
4 Caractérisation de la poutre lors d'un essai de flexion par contact avec un support en PEEK 68
5 Proposition de géométrie du préhenseur 70
6 Schéma simplifié du préhenseur pour l'étude dynamique 71
7 Diagramme de Bode de la céramique piézoélectrique 73
8 Déplacement $\mathbf{u_z(t)}$ de la face inférieure de la céramique pour différentes entrées $\mathbf{e(t)}$ - courbes expérimentales [Uchino, 1995] 75
9 Déplacement $\mathbf{u_z(t)}$ de la face inférieure de la céramique pour différentes entrées $\mathbf{e(t)}$ - courbes théoriques 76
10 Dynamique de la céramique piézoélectrique 77
11 Modélisation du système étudié 78
12 Manipulation pour déterminer les modes propres 80
13 Réponse de la poutre au profil no. 2 (rampe d'1 μs) 81
14 Réponse de la poutre au profil no. 6 (rampe de 200 μs) 82
15 Modélisation EF de la pointe avec l'objet manipulé 83
16 Le préhenseur actif réalisé 85
17 Le schéma cinématique et le bloc de déplacement 86

18 Le porte-échantillons 86
19 L'interface utilisateur graphique 88
20 Le site expérimental et le manipulateur prototype 89

1 Montage de l'actionneur pour l'interférométrie laser 93
2 Mesures de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser 93
3 Calibrage de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser 94
4 Calibrage de la flexion de la pointe AFM 95
5 Caractérisation dynamique du préhenseur (1) 96
6 Caractérisation dynamique du préhenseur (2) 97
7 Comportement à phase non minimale de la poutre 97
8 Caractérisation dynamique du préhenseur (3) 98
9 Manipulation par saisie et dépose statique 101
10 Saisie à partir d'une goutte d'eau 104
11 Dépose du disque sur le substrat métallique 105
12 Saisie statique du micro-sphère 106
13 Dépose dynamique du micro-sphère 107
14 Comportement dynamique du préhenseur pour la 1ère excitation. 108
15 Comportement dynamique du préhenseur pour la 2ème excitation. 109
16 Comportement dynamique du préhenseur pour la 3ème excitation. 109
17 La pointe AFM couverte d'or 110
18 Amas des billes sur le substrat 111
19 Saisie statique des micro-sphères 111
20 Dépose sélective des 2 objets saisis en vrac 112

1 Système de manipulation par succion "Bernouilli-gripper" (EPFL) 118
2 Modélisation du système poutre-objet 126
3 Mesure du pull-off pour un contact avec le cuivre et le peek . . 130
4 Mesure du pull-off pour des contacts différents -0.5 **V** et -1 **V** avec le cuivre 131

Introduction

La miniaturisation et ses aspects dérivés, la micro-électronique, la micro-physique, 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 micro-robotique fait partie des nouveaux thèmes pluridisciplinaires de recherche ouverts depuis une petite décennie.

La micro-manipulation intègre les problèmes classiques de la préhension et ceux intrinsèques à l'échelle microscopique. 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 micro-manipulation.

Un précédent travail [Rollot, 2000] 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 micro-manipulation ont été mis en place aboutissant à une fenêtre technologique définissant certaines exigences du mode de manipulation. 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. Par ailleurs, il apparaît clairement que de nombreux paramètres, tels que la dynamique du système ou les contacts intermittents, doivent être également pris en compte pour cette réalisation.

On peut dégager cinq étapes dans cette étude, chacune décrite ici dans un chapitre. Le premier chapitre est dédié à un panorama des différents travaux de recherche dans le domaine de la micro-manipulation. La diversité des approches et la multitude des domaines d'application sont mises en avant.

L'échelle microscopique est ensuite décrite pour appréhender ses propriétés et spécificités et pour proposer une approche unifiée des divers travaux relatifs à ce domaine.

Le deuxième chapitre est consacré, à partir d'un exemple canonique, à la description d'un logiciel de simulation d'une tâche de micro-manipulation. L'étude théorique approfondie et détaillée de cette tâche, fondée sur les deux phases de manipulation : objet attaché au préhenseur (saisie) et détaché (dépose), conduit à un modèle à deux états transitoires. Ce dernier, sous l'hypothèse de corps rigides, permet de paramétrer toutes les caractéristiques de la manipulation, telles que l'environnement, les matériaux, les formes des objets, etc. De nombreuses simulations mettent en évidences trois types d'opération : la saisie statique par adhésion, la dépose statique par adhésion et inclinaison et la dépose dynamique par effet inertiel. Enfin, une modélisation plus fine, par éléments finis, sous l'hypothèse de corps déformables est introduite pour prouver la pertinence du modèle corps rigide retenu.

Le troisième chapitre s'attache à la conception et à la réalisation du prototype. Un cahier des charges avec toutes les interactions entre les différents composants est rédigé. Celui-ci permet une étude de l'élément essentiel du système, le préhenseur actif, composé d'un actionneur et d'un outil terminal, qui sont étudiés en détail. Des simulations précises sont ensuite proposées pour extraire les caractéristiques dimensionnelles du préhenseur actif précédemment retenu. Enfin, une description du système dans sa globalité, du bloc déplacement au porte-échantillon, est effectuée.

Le quatrième chapitre est entièrement dédié à de nombreuses expérimentations autour du système retenu. Dans un premier temps, une caractérisation dynamique de l'actionneur puis du préhenseur est proposée. Ensuite, diverses expériences de micro-manipulation sont entièrement décrites. Les comportements du système observés à travers ces expériences permettent de valider les simulations, et notamment la dépose dynamique, avec les accélérations instantanées très importantes qu'elle nécessite, s'effectue avec succès.

Enfin, le cinquième chapitre, à vocation exploratoire, ouvre sur l'étude d'une méthode pour fiabiliser et optimiser la micro-manipulation par adhésion en vue d'une intégration industrielle. Pour cela, il faut extraire des invariants propres de la manipulation par adhésion à travers une analyse dimensionnelle. L'étude approfondie du système met en évidence la possibilité de mesurer les caractéristiques mécaniques de l'objet. Quelques pistes pour ce mode d'utilisation du système comme appareil de mesure microscopique

sont présentées.

Finalement, une conclusion rappellera les points essentiels du processus et établira quelques perspectives pour l'avenir du projet.

Chapitre I

La manipulation d'objets microscopiques et les forces d'adhésion

La micro-robotique et la miniaturisation sont des domaines qui intéressent particulièrement la communauté des roboticiens et des automaticiens avec l'émergence de nouvelles applications : d'une part, les nouveaux procédés de fabrications de systèmes micro-électro-mécaniques (**MEMS**) permettent la production de composants miniatures et, d'autre part, la recherche en biologie s'intéresse particulièrement aux corps isolés de dimension micrométrique.

Dans cette perspective, la micro-manipulation apparaît comme une nécessité primordiale, mais manque d'outils pour répondre aux besoins de ces dernières innovations. En effet, il n'existe pas, à ce jour, de moyen d'industrialiser et de commercialiser des produits basés sur les MEMS, faute d'existence de chaînes d'assemblages automatisées. Tous les travaux de manipulations actuels se proposent de remédier à ce problème, soit à travers des applications spécialisées soit par des approches plus généralistes.

L'échelle physique de la micro-manipulation se trouve proche de la limite inférieure de la mécanique classique. On considère, en général, que les lois de la physique newtonienne sont toujours valables et que les effets quantiques sont négligeables. L'échelle considérée se situe donc à la lisière des deux espaces classiques dont les limites ne sont pas clairement définies [Feynman, 1959], [Fearing, 1995], [Rollot *et al.*, 1998a]. Une des différences majeures avec l'échelle macroscopique est en effet due aux origines des forces considérées. La décroissance de $\mathbf{L}^3$ étant plus rapide que $\mathbf{L}^2$, dans l'intervalle $[0, 1]$, les forces volumiques sont négligeables par rapport aux forces surfaciques pour les objets de dimension microscopique.

Les forces surfaciques, et particulièrement d'adhésion, dont les effets sont négligeables à l'échelle macroscopique, modifient de façon drastique la mécanique du contact et les interactions entre les différents milieux. Il est donc impossible de transposer les systèmes de manipulations classiques vers l'échelle microscopique sans modification majeure. Les travaux exposés dans la suite de ce chapitre confirment ce constat.

Dans la conception de micro-manipulateur, une première approche est d'essayer d'éliminer les forces d'adhésion [Fukuda *et al.*, 1998] ou d'utiliser des forces de module supérieur à ces forces surfaciques afin de pouvoir utiliser le savoir faire macroscopique [Calin *et al.*, 1997], [Zesch *et al.*, 1997].

Une seconde tendance, plus actuelle et dans laquelle les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent, cherche à profiter de ce type de force pour réaliser la manipulation [Miyazaki et Sato, 1997],[Rollot, 2000]. La difficulté principale de la manipulation provient alors essentiellement de l'environnement, et du contrôle de celui-ci. Un large panorama de ces travaux et de leurs particularités est présenté dans les pages suivantes.

Le choix de la force d'adhésion comme paramètre principal de la manipulation impose un rappel précis des forces surfaciques. Il s'agit d'exploiter la physique des surfaces dans une opération de micro-manipulation. Une analyse des potentiels d'interactions, des forces de Van der Waals, des forces capillaires et électrostatiques, est donc proposée afin de comprendre les phénomènes qui entrent en jeu.

1 La recherche en micro-manipulation

1.1 L'axe micro-manipulation téléopérée du Laboratoire d'Automatique de Besançon

Le Laboratoire d'Automatique de Besançon (**LAB**) consacre l'un de ses trois axes de recherche à la micro-manipulation. L'un des objectifs concerne l'étude et le développement d'un lien entre le macromonde et le micromonde, de façon à permettre à un opérateur de piloter un microrobot depuis le macromonde. Il s'agit, dans un premier temps, d'étudier la faisabilité d'un tel système en pilotant une tâche simple dans le micromonde à partir d'une information visuelle (microscope) et d'un retour d'efforts (haptique). Le microscope est utilisé pour la commande référencée vision et le système haptique pour commander les degrés de liberté du microsystème.

Lien entre macromonde et micromonde

Lorsqu'il s'agit de faire réaliser par un opérateur une tâche de manipulation dans le micromonde, celui-ci n'a pas directement accès aux informations sensorielles lui permettant d'effectuer convenablement cette tâche. Il faut créer un lien entre le micromonde et le macromonde, par le biais d'un effecteur, d'un système de vision microscopique et d'un système haptique à retour d'efforts de manière à donner à l'opérateur humain la possibilité de ressentir les forces micrométriques et de téléopérer des tâches de manipulation. Les travaux en cours utilisent un levier de microscope à force atomique (AFM) comme effecteur et un joystick à retour d'efforts comme système haptique [Rougeot et Chaillet, 2002].

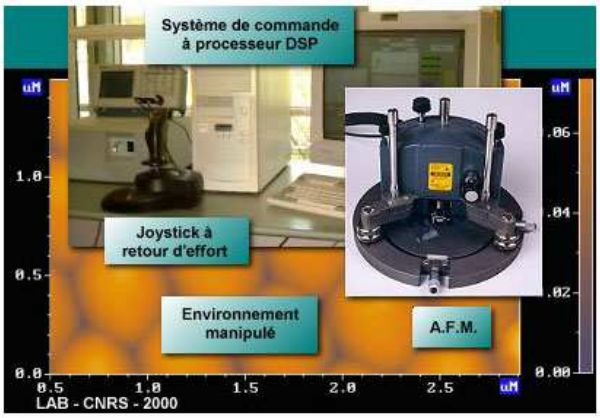


FIG. 1: Système de téléopération de LAB

Étude et réalisation d'outils dédiés de micro-manipulation

L'objectif final du LAB est de concevoir des outils de manipulation en vue de leur insertion finale dans un système démonstrateur complet. Le co eur du système de manipulation est une micro-pince piézoélectrique à deux doigts de serrage (fig. 2) dont chaque doigt est un unimorphe piézoélectrique de 5 à 10 mm de longueur. Une commande en boucle fermée offre une précision de positionnement inférieure à 10 nm à l'extrémité d'un doigt, pour une bande passante de 500 Hz à 1 kHz. Les travaux en cours concernent deux points, d'une part, l'intégration de capteurs de déformations sur les doigts de la micropince pour la mesure directe de leur déflexion et, d'autre part, le pilotage de l'ensemble par un joystick à retour d'efforts, afin d'améliorer la dextérité de l'opérateur [Ferreira *et al.*, 2001].

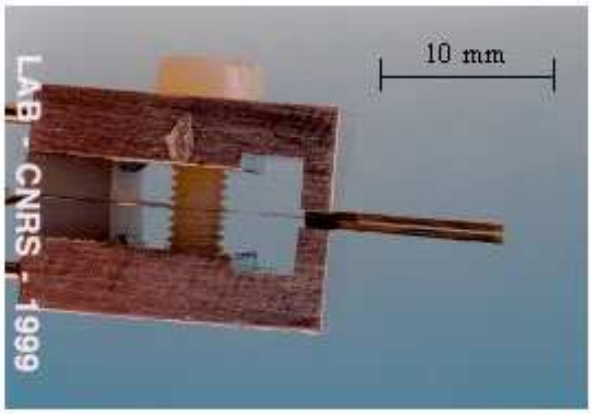


FIG. 2: Micropince du LAB

L'approche adoptée par le LAB est donc la miniaturisation d'un système de préhension macroscopique, en associant une interface haptique, afin de permettre à l'utilisateur le passage du macro au micromonde. Cette approche atteint ses limites lors de l'intervention de facteurs liés à la micro-physique et plus particulièrement aux forces d'adhésion. Elle a donc nécessité la mise au point d'une nouvelle étude d'exploration des forces à l'échelle microscopique prenant en compte les phénomènes d'adhésion pour la micro-manipulation.

1.2 Le projet "Robotic Micromanipulation" de l'Advanced Microsystems Laboratory

L'Advanced Microsystems Laboratory (**AML**) de l'Université du Minnesota, sous la direction du Professeur Bradley Nelson, s'intéresse à la micromanipulation, en explorant d'une part le problème de positionnement précis et, d'autre part, les particularités physiques des contacts à l'échelle microscopique. Les recherches actuelles incluent une commande référencée vision et efforts appliquée aux micro-technologies et à la conception de micro-préhenseurs.

Un micro-préhenseur a été réalisé pour effectuer des tâches de saisie et de dépose (fig. 4)[Zhou *et al.*, 2000]. Il possède deux doigts : le premier est une structure en cantilever d'un AFM dont la pointe a été supprimée et le second est mis en mouvement grâce à un actionneur piézoélectrique qui permet donc la prise entre les deux doigts. Le système détecte la déflexion d'un doigt permettant ainsi de calculer la force de contact en utilisant la constante de raideur du premier doigt. Ce préhenseur s'est avéré peu fiable à cause des facteurs liés à l'adhésion. Bien qu'il soit possible de saisir en contrôlant les

efforts de serrage, la dépose s'effectue difficilement. Néanmoins, cette étude a permis à l'AML d'acquérir une bonne connaissance de l'environnement microscopique.

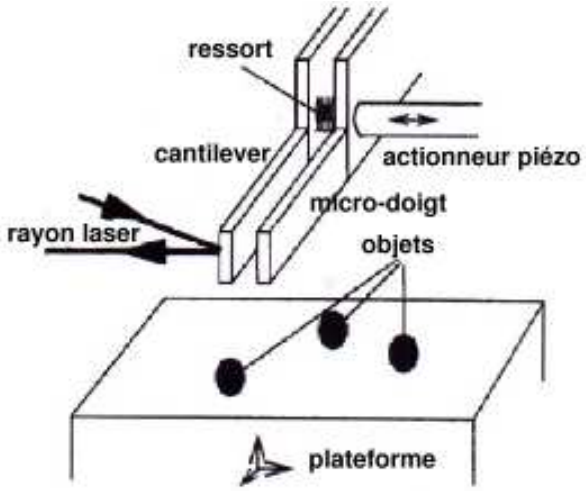


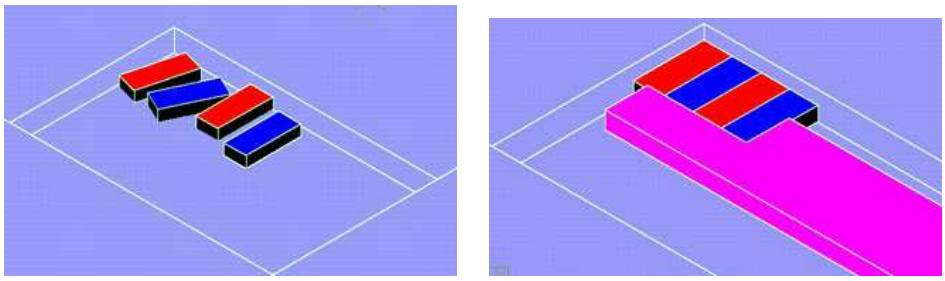
FIG. 3: Prototype du micro-préhenseur de l'équipe Yu Zhou et Bradley J. Nelson [Zhou et al., 2000]

Actuellement, deux projets en cours regroupent le savoir-faire du AML en matière de manipulation. Le premier concerne l'assemblage de micro-composants magnétiques et le deuxième l'injection cellulaire.

Manipulations des MEMS magnétiques

L'objectif de ce projet est de proposer un système, totalement automatisé, d'assemblage des MEMS magnétiques. Le préhenseur utilisé est semblable au premier prototype précédemment décrit. La dépose s'effectue grâce à des forces électrostatiques présentes sur le substrat. Néanmoins, ce phénomène qui rend possible la saisie empêche le bon positionnement des composants (fig. 4-a). Un deuxième outil est alors utilisé pour corriger les erreurs de positionnement en poussant les objets (fig. 4-b) [Vikramaditya *et al.*, 2001].

Cette méthode nécessite une bonne connaissance et un contrôle de l'environnement. Un outil, complexe et adapté uniquement à un type d'objet unique, est utilisé pour réussir la dépose et surmonter les difficultés dues aux forces surfaciques.



(a) (b)

FIG. 4: Assemblages des MEMS magnétiques

Injection cellulaire

Le savoir-faire de l'AML en matière de fabrication de MEMS et la commande référencée vision et efforts à l'échelle microscopique fournissent de bonnes bases pour développer des systèmes dédiés aux applications biologiques. La première de ces applications est une tâche d'injection intracytoplasmique. Cette opération étant classiquement effectuée manuellement, le but de ce projet est donc de l'automatiser et de fournir une méthode de mesure des forces sur les membranes cellulaires [Luo et Nelson, 2001].

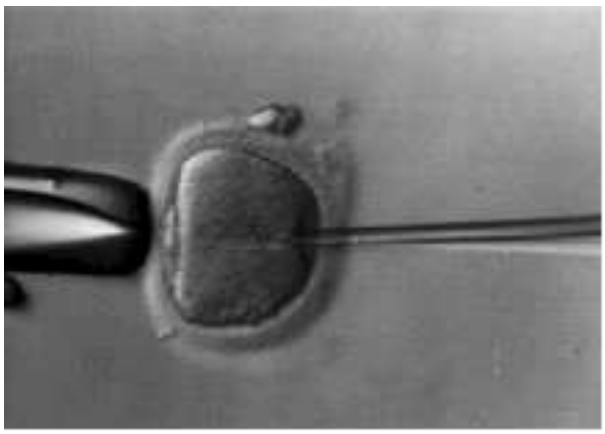


FIG. 5: Injection introcytoplasmique (AML)

L'utilisation du système à poutre piézorésistive est proposée pour les mesures et la phase précédente de manipulation est en cours d'étude. Les méthodes sans contact, par laser ou champs électriques, s'avèrent inadaptées à cause de l'endommagement de la cellule et de l'amplitude des forces recherchées (de l'ordre du micro-newton). Les travaux actuels explorent donc les techniques de contact, basées sur les effets mécaniques et la succion.

Des travaux relatifs à l'échelle microscopique font également partie des projets de l'AML. Un effort considérable est consacré à la quantification des forces surfaciques [Zhou et Nelson, 1999] et au problème de commande robuste pour la micro-manipulation. L'approche adoptée est celle de la commande référencée vision [Zhou *et al.*, 2000] qui est mis à contribution dans tous les projets liés à l'échelle microscopique.

1.3 Le Joining Science and Technolgy Laboratory

Les travaux de micromanipulation de l'Université de Tokyo sont effectués par l'équipe de Hideki MIYAZAKI et Tomomasa SATO. Leur recherche est focalisée sur les techniques de manipulation sous microscope électronique (SEM) [Miyazaki et Sato, 1997]. Le manipulateur consiste en une main gauche qui tient le substrat et en une main droite équipée avec le Nanorobot II (fig. 6). Les deux parties ont trois degrés de liberté en translation, une précision de 10 **nm** et leur amplitude de mouvement est de 15 **mm**. Les deux mains sont positionnées sur une base qui possède elle-même deux degrés de liberté en translation d'une précision de 10 μm et d'une amplitude de 40 **mm**. Cette base sert à positionner le point d'opération au centre du champ de vision du SEM. Chaque mouvement est créé par des actionneurs piézoélectriques.

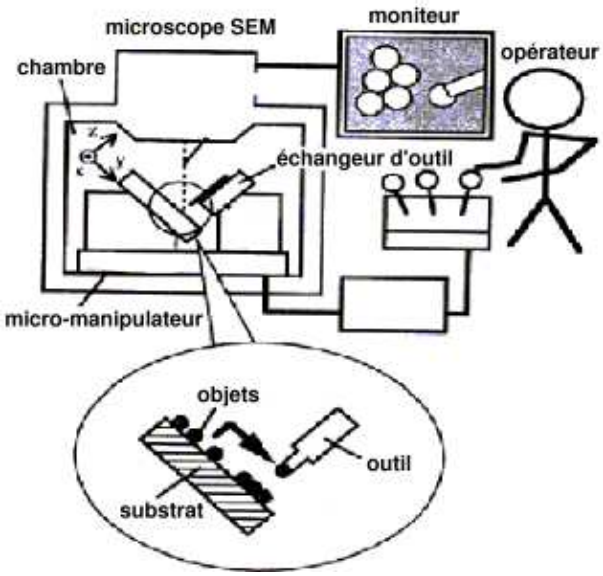


FIG. 6: Plate-forme de micro-manipulation de l'équipe de Hideki MIYAZAKI et Tomomasa SATO [Miyazaki et Sato, 1997]

La main droite possède un échangeur d'outils et plusieurs d'entre eux peuvent être attachés en même temps sur cet échangeur. Les objets sont des sphères en polyvinyltoluène de 2 μm de diamètre (sans couche conductrice). Le substrat est recouvert d'un film conducteur d'or de 65 **nm** d'épaisseur, et ensuite d'un film de polystyrène pour diminuer les forces d'adhésion entre l'objet et le substrat.

L'environnement est fortement chargé en forces électrostatiques à cause de la nature du SEM. Les opérations de saisie et dépose sont donc effectuées en s'appuyant sur ce phénomène. Une autre approche, dans le cas où la prépondérance des forces électrostatiques ne serait plus garantie, propose une méthode de dépose intéressante, en faisant "rouler" les objets entre le préhenseur et le substrat. Une étude dynamique de la manipulation est ainsi développée [Saito *et al.*, 2002]. Cette étude permet de déterminer les stratégies de saisie et de dépose, en prenant en compte les effets cinématiques et dynamiques [Takahashi *et al.*, 2001].

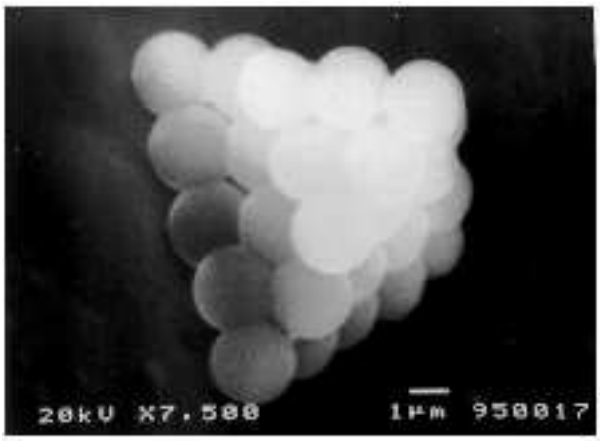


FIG. 7: Manipulation des micro-billes

Plusieurs manipulations spectaculaires ont été réussies avec ce système, notamment l'assemblage en pyramide des micro-sphères (fig. 7). Toutefois, le succès de l'opération est fondé sur l'environnement bien connu et maîtrisé du microscope électronique et limite fortement son utilisation.

1.4 L'axe Micro-Nano Mechatronics du Fukuda Lab

L'équipe de Fumihito ARAI et Toshio FUKUDA [Arai et Fukuda, 1997] part du principe que les forces de Van der Waals sont difficiles à maîtriser et que l'utilisation des forces électrostatiques n'est pas appropriée pour la manipulation de certains composants. Ils ont donc expérimenté une manipulation

à partir d'une force d'absorption/éjection, avec une réduction préalable des forces de surface. L'utilisation d'une pompe pour produire une force d'aspiration n'est pas possible car celle-ci se boucherait rapidement avec les petites particules. L'aspiration est donc créé par le changement de pression généré par une variation de température. Pour utiliser la variation de pression, la surface de contact du préhenseur est rugueuse (fig. 8). En chauffant le préhenseur, la pression devient plus forte dans les trous de la surface de contact. Cette différence de pression provoque l'effet de succion recherché, le temps de réponse étant assez court grâce aux faibles dimensions du système.

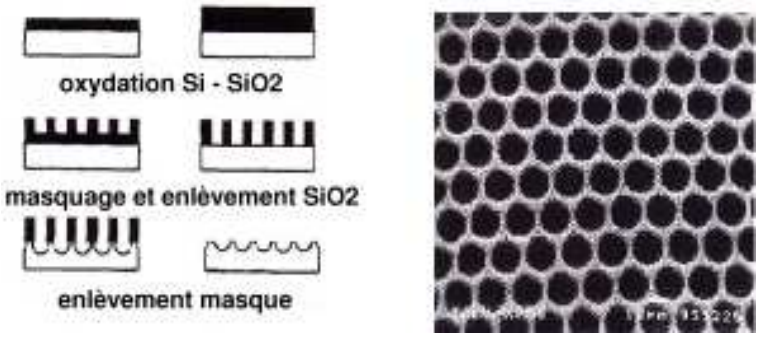


FIG. 8: Procédé de fabrication des micro-trous [Arai et Fukuda, 1997]

Pendant la manipulation, le préhenseur est approché de l'objet. Avant le contact, le préhenseur est chauffé pour que sa température soit supérieure à la température ambiante. La variation de température est de 80° **C**. Après le contact, la température est réduite de façon à diminuer la pression dans les trous. Cette force de succion étant supérieure aux forces surfaciques, l'objet peut être déplacé. Pour lâcher l'objet, la température du préhenseur est à nouveau augmentée et l'objet est "éjecté" par la pression à l'intérieur des trous. (fig. 9).

Cette méthode est basée sur une bonne compréhension des phénomènes d'adhésion à l'échelle microscopique. Le principe de manipulation est donc de produire une force de saisie (ou de dépose) supérieure au module des forces surfaciques par effet de succion.

Un nouvel axe d'étude est apparu, afin de répondre à des besoins comme la bio-manipulation. En effet, les dimensions des objets traités (des microbes ou des cellules) et l'environnement de manipulation (solution aqueuse) empêchent l'utilisation des techniques de manipulation à contact. Néanmoins, les techniques sans contact (laser et champs électrique) risquent d'endommager les objets biologiques. La solution adoptée combine donc deux techniques : les micro-outils (de dimension du même ordre de grandeur que l'objet

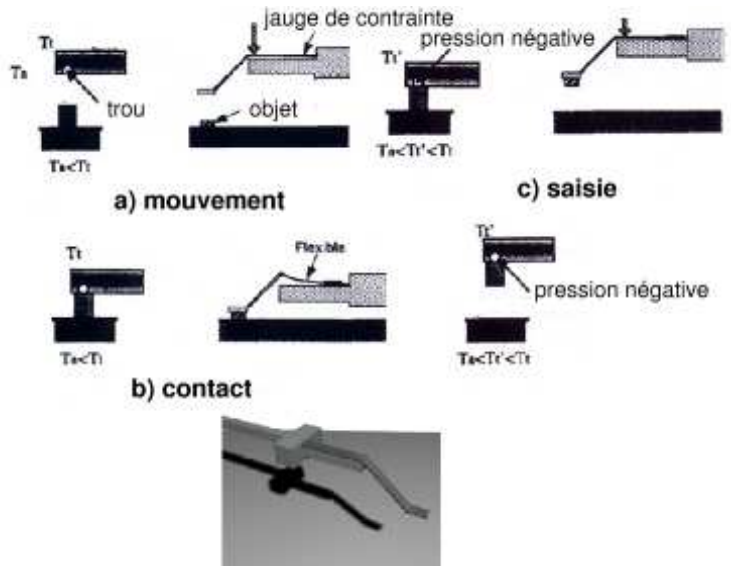


FIG. 9: Décomposition de la prise d'un objet en utilisant une force de succion [Arai et Fukuda, 1997]

manipulé) qui sont introduits dans l'environnement de manipulation (pour pousser et déplacer la cellule), et un laser qui manipule ces outils [Arai *et al.*, 2001]. La figure 10 décrit ce mode de manipulation.

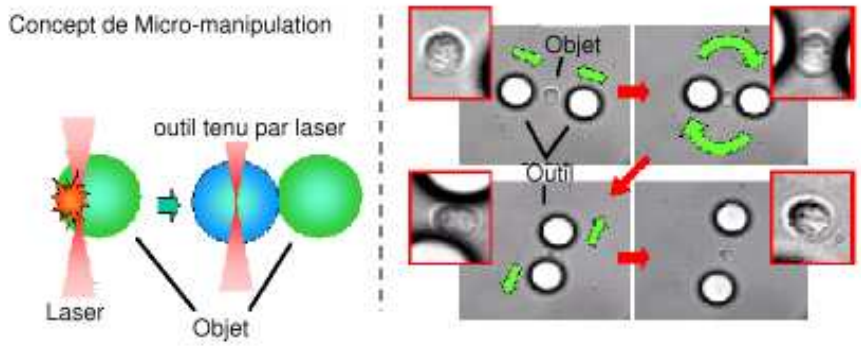


FIG. 10: Micro-manipulation indirecte par la manipulation sans contact d'un micro-outil [Arai et al., 2001]

2 Les forces d'adhésion et la micro-manipulation : travaux préliminaires

Les observations préliminaires et les travaux précédents démontrent qu'une étude "microscopique" doit être entreprise pour la conception d'un système de manipulation. Le postulat de base de ce travail est fondé sur l'utilisation de l'adhésion pour des tâches de saisie et de dépose de micro-objets. Le dessein de ce travail est de tirer profit des phénomènes physiques spécifiques à l'échelle microscopique pour la réalisation d'une opération de manipulation donnée.

L'objectif de cette seconde partie est donc d'effectuer une analyse de la "micro-échelle" et plus particulièrement du phénomène d'adhésion. Cette étude s'appuie sur la compréhension et la maîtrise des efforts de surface intervenant entre les objets de taille microscopique. Il s'agit donc de préciser les particularités physiques (énergie de surface, pull-off, etc.) qui sont les clefs de l'utilisation de l'adhésion pour la micro-manipulation.

2.1 Description physique de l'échelle microscopique

A l'échelle microscopique, trois grandes classes de forces d'adhésion apparaissent, leurs modules sont importants et jouent un rôle primordial dans les interactions surfaciques. Ces forces sont :

- **les forces de Van der Waals :** elles sont toujours présentes lorsque deux ou plusieurs surfaces interagissent.
- **les forces capillaires :** elles sont liées aux conditions environnementales, dépendent fortement de l'humidité et peuvent modifier le module des forces de Van der Waals.
- **les forces électrostatiques :** il s'agit des forces de coulomb classiques. Elles dépendent des charges acquises par les surfaces et de la répartition des charges. La faible taille des objets considérés implique des difficultés considérables pour connaître leurs modules et pour les maîtriser.

Il faut noter que d'une manière générale, tous les phénomènes de liaisons chimiques contribuent à l'adhésion. Bien que l'énergie de ces liaisons ne soit pas négligeable, leurs effets ne sont pas pris en compte. En effet, selon l'hypothèse de travail du Professeur Krupp ([Krupp, 1967]), en dehors d'environnements contrôlés, comme le vide, les liaisons chimiques de surfaces sont saturées par des substances contaminantes (oxydation, etc.). Les forces dues à ces liaisons sont donc négligées et les forces considérées dans cette

étude sont celles mentionnées précédemment et utilisées dans les travaux de référence tels que [Kohno et Hyodo, 1974], [Rumpf, 1977], [Bowling, 1986], [Ranade, 1987] , [Hecht, 1990], [Fearing, 1995].

2.2 Energie d'interaction de deux corps

Avant d'expliciter et de détailler les expressions des forces d'adhésion, un rappel approfondi des énergies d'interaction est proposé afin de se familiariser avec le vocabulaire et les notations classiques et de mettre en avant les différentes approches proposées et leurs particularités.

Travail d'adhésion et de cohésion

Ce travail représente l'énergie nécessaire pour séparer des surfaces unitaires de deux milieux du contact jusqu'à l'infini, dans le vide. Pour deux milieux différents, cette énergie est appelée *travail d'adhésion* alors que pour deux milieux identiques, elle est appelée *travail de cohésion.*

$$\mathbf{W}_{12} \quad \text{travail d'adhésion} \tag{1}$$

$$\mathbf{W}_{11} \quad \text{travail de cohésion} \tag{2}$$

Si le milieu **1** est un solide et le milieu **2** un liquide alors $\mathbf{W}_{12}$ est noté $\mathbf{W}_{\mathbf{SL}}$.

Énergie de surface et tension de surface

L'énergie de surface γ représente l'énergie nécessaire pour augmenter la surface libre du milieu d'une surface unité. Puisqu'il s'agit de séparer deux surfaces en contact, elle est égale à la moitié du travail de cohésion :

$$\gamma_1 = \frac{1}{2}\mathbf{W}_{11}$$

Pour des solides, elle est notée $\gamma_{\mathbf{s}}$ et est considérée comme une énergie par unité de surface, habituellement $\mathbf{mJm^{-2}}$. Pour des liquides, elle est notée $\gamma_{\mathbf{l}}$ et est donnée comme une tension par unité de longueur, habituellement $\mathbf{mNm^{-1}}$.

Cette énergie de surface dépend souvent du point d'ébullition. Ainsi, les substances tels les métaux qui ont une température d'ébullition élevée ($\mathbf{T_E} > \mathbf{2000^oC}$) ont des énergies de surface importantes ($\gamma > \mathbf{1000\ mJm^{-2}}$).

Énergie interfaciale

Quand deux milieux sont en contact, l'énergie à leur interface par surface unitaire est notée énergie interfaciale ou tension interfaciale γ_{12}. Elle se calcule selon :

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2}\mathbf{W}_{11} + \frac{1}{2}\mathbf{W}_{22} - \mathbf{W}_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \mathbf{W}_{12}$$

Cette équation est appelée équation de Dupré.

La relation de combinaison la plus usuelle est obtenue à partir d'une approche thermodynamique. La formule suivante, sous forme combinée est alors [Israelachvili, 1991] :

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_1\,\gamma_2}$$

Travail d'adhésion dans un troisième milieu

On peut déduire des formules précédentes l'énergie nécessaire pour séparer deux milieux 1 et 2 immergés dans un milieu 3 :

$$\mathbf{W}_{132} = \mathbf{W}_{12} + \mathbf{W}_{33} - \mathbf{W}_{13} - \mathbf{W}_{23} = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12}$$

Théorie de Hamaker

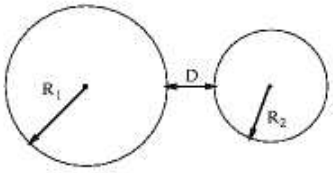
Le potentiel d'interaction entre deux milieux est calculé en intégrant l'interaction entre une molécule de chacun des milieux, sur le volume total des deux milieux. Son expression dépend donc de la géométrie des surfaces et des caractéristiques intrinsèques des matériaux, qui apparaissent à travers la constante de Hamaker, habituellement notée $\mathbf{A}$. Le tableau 1 illustre les différents potentiels d'interaction entre deux surfaces en fonction de la géométrie et de $\mathbf{A}$.

Une expression simplifiée de la constante de Hamaker, en supposant que l'interaction est additive et non-retardée, est donnée par [Hamaker, 1937] :

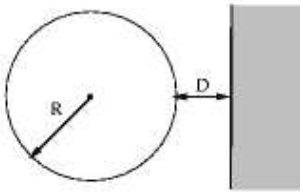
$$\mathbf{A} = \pi^2\mathbf{C}\rho_1\rho_2 \tag{3}$$

avec $\mathbf{C}$ la constante d'interaction universelle et $\rho_\mathbf{i}$ la masse volumique.

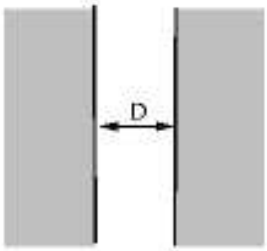
La constante de Hamaker semble être la clef du phénomène de l'adhésion. Sa valeur est proportionnelle à l'amplitude des forces d'adhésion (sauf dans le cas d'une interaction dite "retardée", qui n'est pas traitée ici).



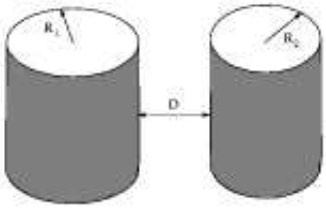
sphère/sphère $\mathbf{W_s} = -\frac{\mathbf{A}}{6\mathbf{D}}\frac{\mathbf{R_1R_2}}{(\mathbf{R_1+R_2})}$



sphère/plan $\mathbf{W_{sp}} = -\frac{\mathbf{AR}}{6\mathbf{D}}$



plan/plan $\mathbf{W_p} = -\frac{\mathbf{A}}{12\pi\mathbf{D}^2}$



cylindre/cylindre $\mathbf{W_c} = -\frac{\mathbf{AL}}{12\sqrt{2}\mathbf{D}^{3/2}}\left(\frac{\mathbf{R_1R_2}}{\mathbf{R_1+R_2}}\right)^{1/2}$

TAB. 1: Potentiels d'interaction pour différentes géométries

Lifshitz [Lifshitz, 1956] a développé une théorie plus réaliste qui prend en compte l'influence des molécules voisines à celle considérée dans le calcul de la constante de Hamaker. Avec cette théorie, les effets "retardés" dus aux forces de dispersion sont moins sensibles, mais l'estimation de la constante de Hamaker est plus complexe. En effet, pour la calculer, il est alors nécessaire de connaître les variations de la permittivité diélectrique ϵ des différents corps formant le système en fonction de la fréquence électronique d'absorption. Il faut ensuite intégrer l'équation suivante [Israelachvili, 1991] [Krupp, 1967] :

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_{132} &\approx \frac{3}{4}\mathbf{kT}\left(\frac{\epsilon_1-\epsilon_3}{\epsilon_1+\epsilon_3}\right)\left(\frac{\epsilon_2-\epsilon_3}{\epsilon_2+\epsilon_3}\right)\\ &+ \frac{3\mathbf{h}}{4\pi}\int_{\nu_1}^{\infty}\left(\frac{\epsilon_1(i\nu)-\epsilon_3(i\nu)}{\epsilon_1(i\nu)+\epsilon_3(i\nu)}\right)\left(\frac{\epsilon_2(i\nu)-\epsilon_3(i\nu)}{\epsilon_2(i\nu)+\epsilon_3(i\nu)}\right)d\nu\end{aligned}$$

avec k la constante de Boltzmann ($1.381\cdot10^{-23}\ \mathbf{J}/^{\mathbf{o}}\mathbf{K}$) ; T température ($^{\mathbf{o}}\mathbf{K}$) ; $\nu_{\mathbf{e}}$ principale fréquence électronique d'absorption (typiquement de l'ordre de $3\cdot10^{15}\ \mathbf{s}^{-1}$) ; $\epsilon_{\mathbf{i}}$ la permittivité diélectrique et $\mathbf{n_i}$ l'indice de réfraction.

Cette équation est assez complexe et nécessite une intégrale sur toutes les valeurs de permittivité en fonction de la fréquence d'absorption. Or, ces valeurs sont connues pour la plupart des matériaux de façon expérimentale

pour des intervalles de ν limités rendant l'équation difficile à résoudre. [Israelachvili, 1991] propose une simplification qui permet de transformer le deuxième terme en une fraction, fonction des indices de réfraction. Ainsi, la constante de Hamaker peut s'exprimer, pour des milieux 1 et 2 interagissant au travers d'un milieu 3 (1-3-2), sous la forme :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{132} &\approx \frac{3}{4}\mathbf{kT}\left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_3}\right)\left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}\right) \\ &+ \frac{3h\nu_{\mathbf{e}}}{8\sqrt{2}} \frac{(\mathbf{n}_1^2 - \mathbf{n}_3^2)(\mathbf{n}_2^2 - \mathbf{n}_3^2)}{\sqrt{(\mathbf{n}_1^2 + \mathbf{n}_3^2)}\sqrt{(\mathbf{n}_2^2 + \mathbf{n}_3^2)}[\sqrt{(\mathbf{n}_1^2 + \mathbf{n}_3^2)} + \sqrt{(\mathbf{n}_2^2 + \mathbf{n}_3^2)}]} \end{aligned}$$

Cette expression complexe se simplifie lors de certaines interactions (par exemple pour des interactions de types 1-3-1, 1-2 ou 1-1).

Énergie d'interaction

L'énergie d'interaction de Van der Waals entre deux plans parallèles, en fonction de la distance $\mathbf{D}$ de séparation, s'écrit (tab. 1) :

$$\mathbf{W_p(D)} = -\frac{\mathbf{A}}{12\pi\mathbf{D}^2} \tag{4}$$

Pour déterminer l'énergie nécessaire pour écarter des milieux, initialement au contact à la distance $\mathbf{D} = \mathbf{D}_0$, d'une distance "infinie", il faut faire un bilan énergétique : à $\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 \Rightarrow \mathbf{W_p(D_0)} = -\frac{\mathbf{A}}{12\pi\mathbf{D}_0^2}$ et à $\mathbf{D} = \infty \Rightarrow \mathbf{W_p(D)} = 0$. La variation d'énergie du système est donc :

$$\Delta\mathbf{W} = \mathbf{W_p(D)} - \mathbf{W_p(D_0)} = \frac{\mathbf{A}}{12\pi\mathbf{D}_0^2}$$

Or, si l'énergie de surface vaut la moitié de l'énergie nécessaire pour écarter deux milieux du contact à l'infini, on peut en déduire :

$$\Delta\mathbf{W} = -\mathbf{W_p(D_0)} = 2\gamma \Rightarrow \gamma = \frac{\mathbf{A}}{24\pi\mathbf{D}_0^2} \tag{5}$$

Cette équation fournit un moyen de relier l'énergie de surface à la constante de Hamaker et vice-versa. Il reste alors à déterminer la valeur de $\mathbf{D}_0$. A première vue, il paraît judicieux de prendre la distance moyenne entre les atomes, $0.4\ \mathbf{nm}$. Néanmoins, les expériences ont démontré que ce choix sous-estime largement γ. La raison principale de cette erreur est que l'expression de $\mathbf{W_p(D)}$ est obtenue par une approche de milieu continu, tandis qu'à la

distance de contact, de même ordre de grandeur que les dimensions moléculaires, une approche quantique est plus appropriée.

Il suffit alors d'effectuer une "correction" de $\mathbf{D_0}$ en le divisant par un coefficient de correction, déterminé empiriquement, égal à 2.5, amenant à remplacer $\mathbf{D_0}$ par $0.165\ \mathbf{nm}$. Le choix de cette valeur permet la bonne corrélation entre les valeurs théoriques et expérimentales de γ et $\mathbf{A}$ [Israelachvili, 1991].

$$\gamma = \frac{\mathbf{A}}{24\pi(0.165)^2} \tag{6}$$

$$\mathbf{A} = 2.1 \cdot 10^{-21}\gamma \tag{7}$$

On peut on déduire une expression de $\mathbf{W_p(D)}$ "corrigée", notée $\mathbf{W_p^c}$, correspondant au potentiel d'interaction au contact :

$$\mathbf{W_p^c(D_0)} = -\frac{\mathbf{A}}{12\pi(\mathbf{D_0}/2.5)^2} \tag{8}$$

Il est à noter que cette approximation fournit des résultats corrects pour la plupart des matériaux, mais qu'elle sous-estime largement la valeur de γ dans le cas de matériaux fortement polaires ou de métaux pour lesquels il est préférable de se baser sur des valeurs expérimentales. Dans le cas où le calcul des forces de Van der Waals serait basé sur les constantes de Hamaker et non sur les expressions expérimentales de l'énergie de surface, il faut intégrer cette correction dans l'expression de $\mathbf{W_p(D)}$. Une discontinuité importante apparaît alors dans l'estimation de ce potentiel. Dans la suite de ce chapitre, elle sera détaillée afin de simplifier le calcul des forces de Van der Waals et mettre en place une procédure automatique dans le cas de l'utilisation des constantes de Hamaker.

Énergies de surface des métaux

Il est à noter que pour les métaux, la permittivité diélectrique à $\nu = 0$ est infinie. Le deuxième terme dans l'équation 4 n'est donc plus exact. En effet, pour les métaux, la constante de Hamaker est typiquement $\mathbf{A} \simeq 30$ à $50 \cdot 10^{-20}\ \mathbf{J}$. Une différence importante apparaît donc pour cette classe de matériaux, puisqu'il existe un coefficient de 2 à 20 entre les valeurs théoriques et expérimentales.

Une expression phénoménologique est donnée dans [Israelachvili, 1991], pour le potentiel d'interaction des surfaces métalliques similaires, selon la

forme :

$$\mathbf{W}^{\mathbf{metaux}}(\mathbf{D}) = -2\gamma \left[1 - \frac{(\mathbf{D} - \mathbf{D}_0}{\lambda_{\mathbf{M}}}\right] \mathbf{e}^{-\frac{\mathbf{D}-\mathbf{D}_0}{\lambda_{\mathbf{M}}}}$$

avec $\lambda_{\mathbf{M}}$ la longueur caractéristique, similaire à la longueur de Fermi.

Le calcul de l'énergie de surface, et donc de la force de Van der Waals qui en découle, par des moyennes théoriques, risque de sous-estimer largement les valeurs recherchées. Il est alors préférable de se baser sur les données expérimentales lorsqu'on désire calculer les forces d'adhésion entre deux milieux métalliques.

2.3 Les forces de Van der Waals

Plans infinis parallèles

Une expression de la force d'adhésion de Van der Waals entre deux plans parallèles peut être obtenue à partir de la dérivée de $\mathbf{W_p(D)}$, le potentiel d'interaction entre deux plans (fig. 1). Puisqu'il s'agit d'une énergie d'adhésion par unité de surface, le résultat obtenu est une densité de force surfacique :

$$\mathbf{P(D)} = -\frac{\partial \mathbf{W_p(D)}}{\partial \mathbf{D}}$$

$$\Rightarrow \mathbf{P(D)} = -\frac{\mathbf{A}}{6\pi \mathbf{D}^3} = \frac{\mathbf{W_p(D)}}{2\mathbf{D}} \tag{9}$$

Il a été démontré au paragraphe précédent qu'au contact, il faut "corriger" la valeur de $\mathbf{W_p(D)}$. Il est évident que cette manipulation modifiera la valeur de $\mathbf{P(D)}$ en fonction de la correction retenue. Il existe plusieurs choix :

1. Ignorer la correction de $\mathbf{W_p(D)}$, donc sous-estimer la force d'adhésion au contact d'un facteur $\sim 1/6,25$, noté $\mathbf{P(D)}$;
2. Appliquer la correction en remplaçant $\mathbf{W_p(D)}$ par $\mathbf{W_p^c(D)}$ (éq. 8) partout dans l'espace, donc surestimer la force d'adhésion sans contact d'un facteur $\sim 6,25$, noté $\mathbf{P_c(D)}$;
3. Utiliser un profil discontinu à la distance de contact , tel que :
   Si $\mathbf{D} = \mathbf{D}_0$, $\mathbf{P_d(D)} = \mathbf{P(D)} \times 6.25$
   Sinon $\mathbf{P_d(D)} = \mathbf{P(D)}$
4. Définir une fonction continue de $\mathbf{P_c(D)}$ vers $\mathbf{P(D)}$ tel que :
   $\mathbf{P_k(D_0)} = \mathbf{P_c(D_0)}$ et $\mathbf{P_k(D \to \infty)} = \mathbf{P(D)}$

Cette dernière approche peut être appliquée en déterminant une fonction $\mathbf{P_k(D)}$ tel que :

$$\begin{aligned} \mathbf{P_k(D_0)} &= \mathbf{P_c(D_0)} \\ \mathbf{P_k(D)} &\simeq \mathbf{P(D)} \text{ pour } \mathbf{D} \to \infty \end{aligned}$$

De plus, pour des raisons de continuité, $\mathbf{P_k(D)}$ doit être dérivable. En effet $\mathbf{P_c(D)} = \mathbf{K} \times \mathbf{W(D)}$ avec $\mathbf{K} = 6.25$. Pour $\mathbf{P_k(D)}$, il suffit de remplacer $\mathbf{K}$ par une fonction $\mathbf{K(D)}$ tel que :

$$\mathbf{K(D_0)} = 6.25$$

$$\mathbf{K(D)} \simeq 1 \text{ quand } \mathbf{d} \to \infty$$

Une forme simple pour $\mathbf{K(D)}$ est donc :

$$\mathbf{K(D)} = 1 + \frac{2.1}{\mathbf{D} \times 10^9}$$

Les différents profils de $\mathbf{P}$ sont comparés sur la figure 11.

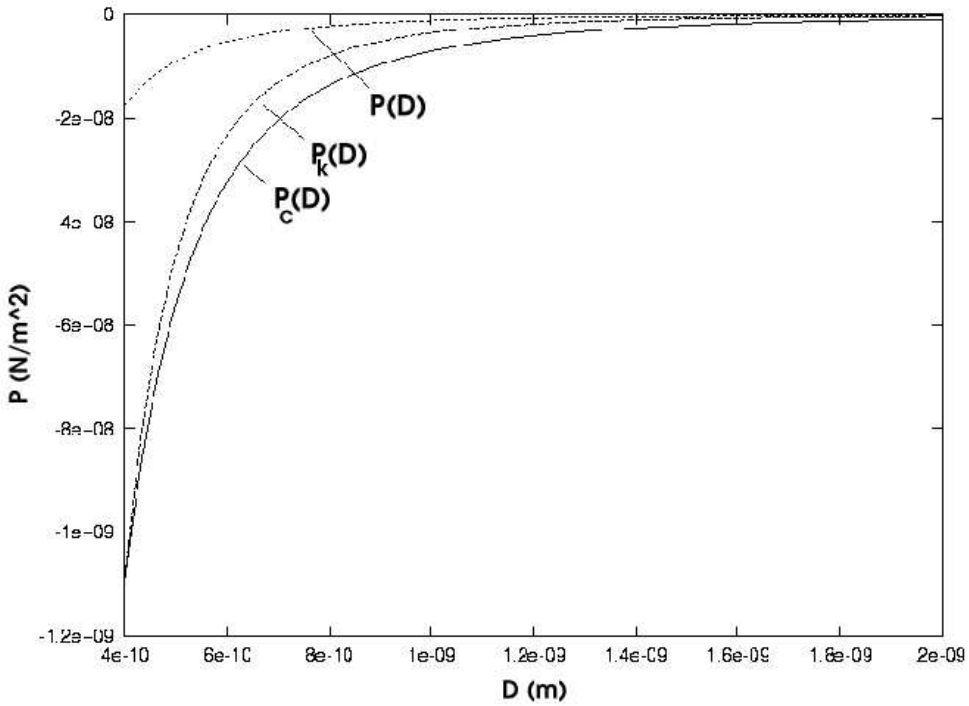


FIG. 11: Différents profils de densité de forces de Van der Waals corrigées

Parmi les 3 courbes représentées, $\mathbf{P(D)}$ présente une discontinuité pour $\mathbf{D_0 = 0,4\ nm}$. Cette discontinuité empêche la résolution d'un système dynamique dans le cas où la distance $\mathbf{D}$ fait partie des inconnues. Entre les deux profils corrigés, $\mathbf{P_k(D)}$ converge très rapidement vers $\mathbf{P(D)}$ alors que $\mathbf{P_c(D)}$ reste toujours inférieure à ce dernier d'un facteur 6,25.
Dans la suite de l'étude, le profil $\mathbf{P_k(D)}$ est utilisé. Il est à noter que cette correction est particulièrement nécessaire pour le cas des contacts plan/plan où l'aire de la zone de contact est importante comparée à la superficie des milieux. Pour un contact sphérique, et dans le cas de l'approximation de Derjaguin [Derjaguin *et al.*, 1975], l'expression d'origine de $\mathbf{W(D)}$ reste valable sans correction (voir ci-dessous).

Sphères

L'énergie d'interaction entre deux sphères est selon le tableau 1 :

$$\mathbf{W_s(D)} = -\frac{\mathbf{A\,R_1\,R_2}}{\mathbf{6D(R_1 + R_2)}}$$

La force d'adhésion entre 2 sphères $\mathbf{F_s(D)}$ peut être écrite en fonction du potentiel d'interaction entre deux plans ($\mathbf{W_p(D)} = -\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{12\pi D^2}}$) par l'approximation de Derjaguin [Derjaguin *et al.*, 1975] :

$$\mathbf{F_s(D)} = -\frac{\partial \mathbf{W_s(D)}}{\partial \mathbf{D}} = -\frac{\mathbf{A\,R_1\,R_2}}{\mathbf{6D^2(R_1 + R_2)}} \tag{10}$$

or :

$$\mathbf{F_s(D)} = -\frac{2\pi\,\mathbf{R_1\,R_2\,A}}{\mathbf{(R_1 + R_2)}12\pi\mathbf{D^2}} = \frac{\mathbf{R_1 R_2}}{\mathbf{(R_1 + R_2)}}2\pi\mathbf{W_p(D)} \tag{11}$$

Le cas de contact sphère/plan peut alors être obtenu en posant $\mathbf{R_1} = \infty$

$$\mathbf{F_s(D)} = 2\pi\mathbf{R W_p(D)} \tag{12}$$

Deux plans avec un défaut de parallélisme

Dans le cas de la manipulation d'objets plans avec un outil plan (*voir manipulation d'un disque d'étain, chapitre IV*), il semble inévitable d'avoir un défaut d'orientation entre les deux surfaces. Il est donc nécessaire de le prendre en compte dans le calcul des forces de Van der Waals.

On considère maintenant le cas de deux plans avec un léger défaut de parallélisme (fig.12) et plus particulièrement le cas d'un plan de dimensions $\mathbf{L} \times \mathbf{E}$ incliné d'un angle θ à distance $\mathbf{d}$ d'un plan infini.

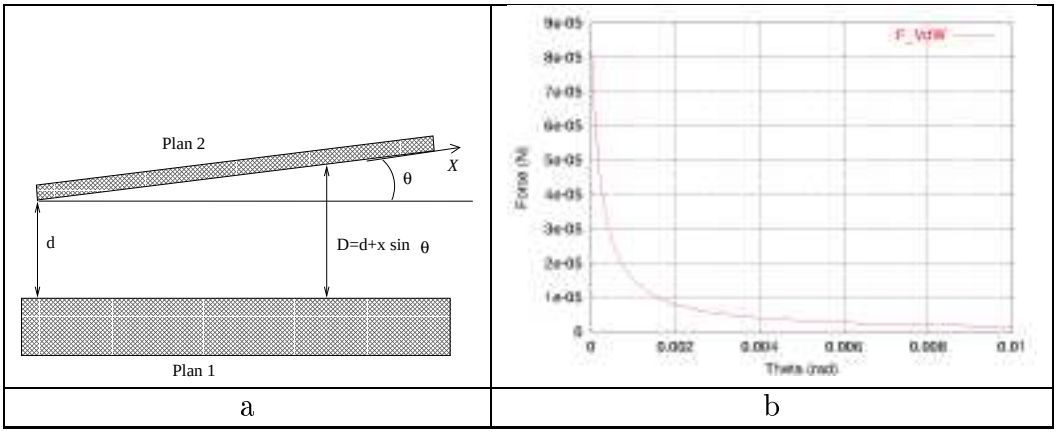


FIG. 12: Deux plans avec défauts de parallélisme

Il suffit d'intégrer la densité de force surfacique $\mathbf{P(D)}$ sur toute la surface tel que :

$$\mathbf{F(D)} = \int_{\mathbf{S}} \mathbf{P(D)dS} \tag{13}$$

Il faut noter que dans ce cas, $\mathbf{D}$ est une fonction de $\mathbf{x}$:

$$\mathbf{D(x)} = \mathbf{d} + \mathbf{x}\sin(\theta)$$

Donc l'intégrale 13 devient :

$$\mathbf{F(D)} = \int_0^{\mathbf{L}} \int_0^{\mathbf{E}} \mathbf{P(D(x))dydx}$$

Par souci de simplification en prenant l'expression continue sans correction de $\mathbf{P(D)}$, la force d'adhésion entre ces deux plans s'écrit :

$$\mathbf{F(D)} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{A} \times \mathbf{L}(2\mathbf{d} + \mathbf{L}\sin(\theta))}{12\pi(\mathbf{d} + \mathbf{L}\sin(\theta))^2\mathbf{d}^2} \tag{14}$$

Si $\theta = 0$, le cas des plans parfaitement parallèles est bien obtenu. Cette expression montre que, même pour un léger défaut de parallélisme, la force d'adhésion est réduite de façon significative. La figure 12-b montre cette décroissance, en fonction de θ, pour $\mathbf{L} = 10^{-3}\mathbf{m}$ et $\mathbf{d} = 0.4\mathbf{nm}$. Or, dans la pratique, il est très difficile de placer deux surfaces, surtout dans le domaine microscopique, avec un parallélisme parfait. Ce facteur est pris en considération pour le choix des surfaces fonctionnelles du préhenseur et des objets à manipuler.

Force de pull-off

La force de pull-off est un cas particulier de la force de Van der Waals. Dans le cas où on considère seulement une interaction de Van der Waals, elle correspond à la force nécessaire qu'il faut fournir pour séparer deux objets en contact. Elle équivaut à $\mathbf{F(D_0)}$.

Pour deux sphères rigides selon l'approximation de Derjaguin la force de pull-off s'écrit relativement au travail d'adhésion plan/plan sous la forme :

$$\mathbf{F} = 2\pi \left(\frac{\mathbf{R_1 R_2}}{\mathbf{R_1 + R_2}} \right) \mathbf{W_{12}(D_0)} \tag{15}$$

Toutes les autres interactions peuvent être construites à partir de ce modèle.
En prenant l'exemple de la sphère de rayon $\mathbf{R}$ de matériau $\mathbf{2}$ sur une surface solide de matériau $\mathbf{1}$ dans l'air :

$$\mathbf{F} = 2\pi \mathbf{R W_{12}} = 2\pi \mathbf{R}(\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12})$$

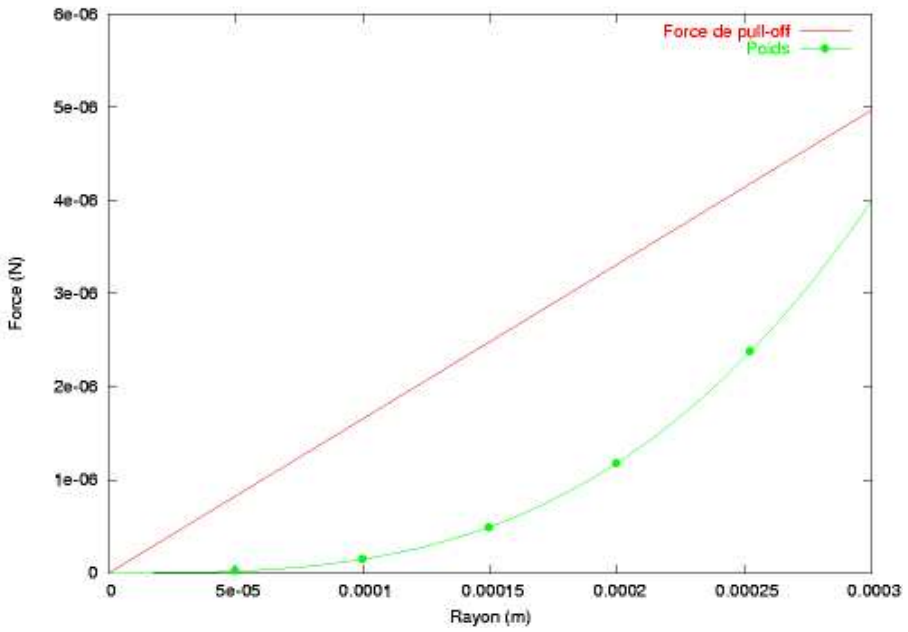


FIG. 13: Comparaison du poids et de la force de pull-off d'une sphère en fonction de son rayon, sur un substrat en polystyrène

La force de pull-off correspond à la force minimum qu'il faut appliquer à un objet pour pouvoir le séparer du substrat sur lequel il repose. La figure

13 compare le poids et la force de pull-off pour une micro-sphère en silicium. Or, la force de pull-off est supérieure au poids pour un diamètre inférieur à $\sim 300\mu m$. Dans le cadre d'une manipulation, si on considère la phase de dépose où il faut séparer l'objet et le préhenseur, il apparaît que la gravité seule n'est pas suffisante pour effectuer l'opération.

Rugosité

Les forces de Van der Waals dépendant directement de la surface de contact, la rugosité a donc un impact très important. Il est cependant très difficile de déterminer la surface de contact réel entre des solides à cause de la connaissance imparfaite de l'état de surface. Néanmoins, il existe une formule [Arai *et al.*, 1996] qui permet d'évaluer la force d'adhésion réelle en fonction de la force d'adhésion théorique et de la rugosité $\mathbf{r_g}$:

$$\mathbf{F_r(D)} = \left(\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{D} + \frac{\mathbf{r_g}}{2}}\right)^2 \mathbf{F_{VdW}^{theorique}(D)} \tag{16}$$

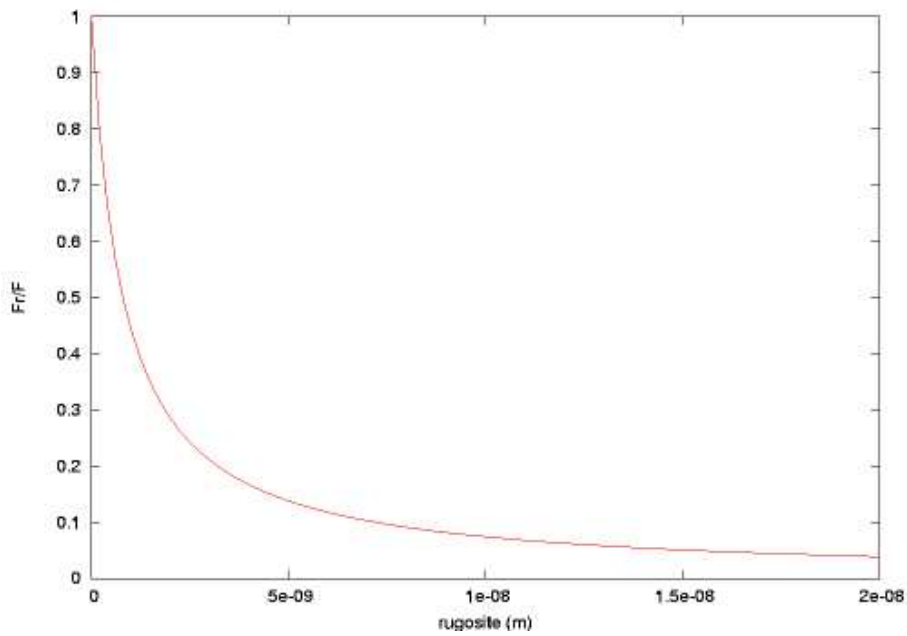


FIG. 14: L'effet de la rugosité sur la force de Van der Waals ($\frac{\mathbf{F_r}}{\mathbf{F_{VdW}^{theorique}}}$)

On observe que même pour une très faible rugosité ($\sim$ **10 nm**) la force d'adhésion chute de **90%**. Ce phénomène peut être facilement utilisé pour modifier l'adhésion soit en agissant sur l'état de surface des matériaux utilisés, soit en inventant des matériaux à surface "adaptables".

2.4 La force capillaire et les effets d'humidité sur l'adhésion

La présence d'eau (ou d'un autre liquide) dans l'environnement a des effets considérables sur les forces d'adhésion. L'eau peut ainsi remplir divers pores et fissures de surface, augmentant les zones de contact. D'une part, les coefficients de Hamaker sont modifiés et, d'autre part, l'interaction de deux milieux à travers un troisième milieu est différente de celle à travers le vide (ou l'air). Pour la grande majorité des matériaux, l'interaction à travers l'eau réduit fortement $\mathbf{A_{ij}}$, diminuant ainsi considérablement les modules des forces de Van der Waals. Ce phénomène est représenté dans le tableau 2 [Israelachvili, 1991].

Matériau	$\mathbf{A_{vide}}$ (10^{-20} **J**)	$\mathbf{A_{eau}}$ (10^{-20} **J**)
Polystyrène	≈ 7	$1,3$
Mica	10	2
Alumine	14	$5,3$
métaux (Au, Ag, Cu)	≈ 50	≈ 40

TAB. 2: Variation de la constante de Hamaker d'une interface en fonction du milieu à travers lequel se fait l'interaction : le vide ($\mathbf{A_{vide}}$) ou l'eau ($\mathbf{A_{eau}}$)

La présence de l'eau, conductrice, a tendance à égaliser les charges des deux surfaces en contact. Donc, dans les interactions mettant en présence des matériaux non-conducteurs, les forces électrostatiques se trouvent fortement diminuées.

La présence de l'eau à l'interface peut aussi conduire à la formation d'un ménisque aqueux, qui contribuera à l'adhésion grâce à la pression laplacienne. Ce phénomène a des conséquences importantes sur l'adhésion car il fait apparaître une force visqueuse dans l'interaction, introduisant de nouveaux paramètres dans la modélisation, comme la vitesse de déplacement et de déformation.

Force Capillaire

Les gouttes d'eau déposées sur un substrat plan forment un angle de contact avec celui-ci qui dépend entièrement de la nature hydrophobe/hydrophile du substrat (fig. 15). Cet angle, appelé θ, est relativement petit pour les matériaux hydrophiles et tend vers $\pi/2$ pour des matériaux hydrophobes (dans le cas d'une très haute hydrophobie, il peut même dépasser cette valeur).

La force capillaire est due à la présence d'un troisième milieu, en l'occurrence liquide, entre les deux premiers mis en contact. Pour déterminer la

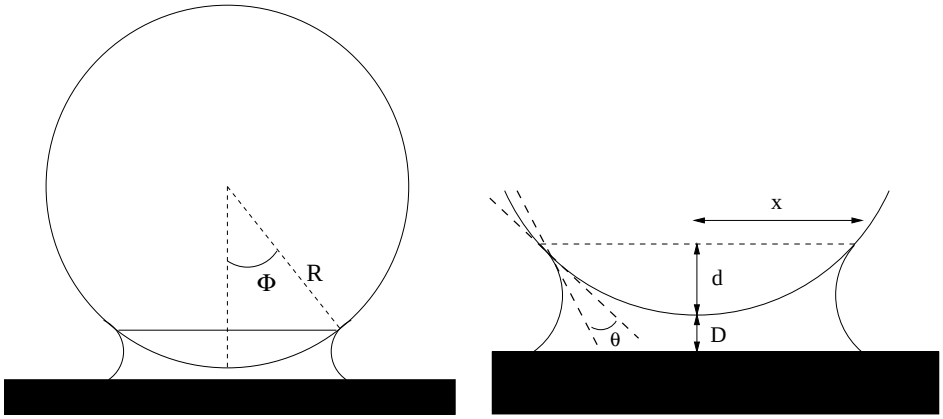


FIG. 15: Etude du ménisque aqueux

force capillaire, il faut déterminer d'abord la forme du ménisque qui se forme à l'interface (fig. 15). A l'équilibre, le rayon de courbure est lié à l'humidité relative $\frac{p}{p_{sat}}$ par l'équation de Kelvin :

$$r_{menisc} = \frac{\gamma V}{RT \log(p/p_{sat})} \tag{17}$$

où γ est l'énergie de surface du liquide et V est le volume molaire ($\frac{\gamma V}{RT} = 0.54$ pour l'eau). La hauteur d'immersion d peut être déduite à partir de ϕ, l'angle de remplissage :

$$d = 2r_{menisc} \cos(\phi + \theta)$$

En supposant le volume du ménisque constant, la force capillaire est donnée par :

$$F = \frac{4\pi R \gamma_{eau} \cos\theta}{1 + D/d} \tag{18}$$

Au contact, où $D \simeq D_0$, cette expression peut être réduite à :

$$F = F_{max} = 4\pi R \gamma_{eau} \cos\theta$$

En complétant cette équation avec la force d'adhésion solide-solide dans le ménisque, on obtient :

$$F = F_{max} = 4\pi R(\gamma_{eau} \cos\theta + \gamma_{eau/solide}) \tag{19}$$

Cette expression peut être utilisée pour obtenir approximativement la force capillaire entre deux milieux en ambiance humide, à partir de la connaissance de θ et de $\gamma_{eau/solide}$.

En absence d'humidité ($r \to 0$), cette équation se réduit à (15) :

$$F = 4\pi R \gamma_{solide}$$

Évolution des forces d'adhésion en fonction de l'humidité ambiante

Il parait possible de déterminer exactement la variation de la force d'adhésion en fonction de l'humidité, en utilisant l'équation 17 pour déterminer le rayon du ménisque aqueux, et donc la force laplacienne. Cependant, la variation exacte des constantes de Hamaker reste indéterminée [Zhou *et al.*, 2001] puisque deux approximations, dans le vide ou l'air sec et à travers l'eau, ont été définies. Or, d'une part, le cas de l'atmosphère humide n'est pas très bien connu et, d'autre part, à l'échelle microscopique, l'effet de la présence d'eau sur les charges électrostatiques reste à ce jour mal déterminé.

Dans [Zhou et Nelson, 1998], des essais d'adhésion entre un plan et une sphère, en fonction d'une humidité variable, sont effectués (fig. 2.4). La présence d'eau, en faible quantité, fait chuter considérablement le module des forces d'adhésion. Cette diminution est sans doute due à la décroissance des constantes de Hamaker et à l'homogénéisation de la répartition des charges électrostatiques. Mais, une augmentation de l'humidité fait accroître proportionnellement l'adhésion qui dépasse la valeur initiale à très haute humidité. Dans tous les cas, l'humidité est un facteur central pour les interactions surfaciques microscopiques [Adamson, 1990].

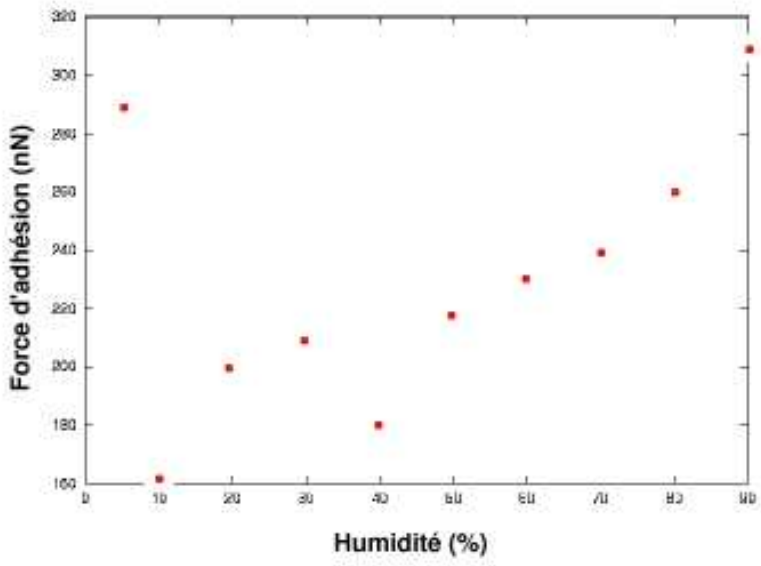


FIG. 16: Variation de la force d'adhésion en fonction de l'humidité (courbe expérimentale) [Zhou et Nelson, 1998]

2.5 Les forces électrostatiques

Les forces électrostatiques sont des forces classiques de Coulomb. Même si les systèmes en présence ne sont pas chargés, la triboélectrification entraîne la création de charges surfaciques [Lowell et Rose-Innes, 1980]. Ce phénomène est repris dans [Rollot, 2000]. Différents cas d'interactions peuvent ainsi apparaître.

Interaction particule chargée/surface chargée et particule chargée/particule chargée

Dans le cas d'une particule chargée $\mathbf{q}$ interagissant avec une surface chargée, la force d'interaction s'exprime par la loi de Coulomb : la surface crée un champ $\mathbf{E} = \sigma/(2\epsilon\epsilon_0)$ (avec σ la densité de charge surfacique, ϵ la densité diélectrique du milieu et ϵ_0 permissivité de l'air). La force s'exprime donc par :

$$\mathbf{F} = \mathbf{qE} \quad \text{indépendamment de la distance de séparation} \tag{20}$$

Pour des interactions entre particules chargées, la force d'interaction s'exprime par :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}_1\mathbf{q}_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \quad \text{avec r la distance de séparation entre les particules} \tag{21}$$

Interaction particule chargée / surface non chargée

Lorsqu'une charge ponctuelle, $\mathbf{q}$, approche une surface non chargée, la force d'interaction s'exprime par :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}^2}{16\pi\epsilon\epsilon_0\mathbf{h}^2} \tag{22}$$

$\mathbf{h}$ est la distance séparant la charge et la surface, et ϵ est la constante diélectrique du milieu dans lequel l'interaction se produit.

Il est à noter que pour une surface conductrice, lors du contact, un transfert de charges, entre la particule et la surface, se produit tendant à réduire la force d'adhésion [Bowling, 1986].

Pour des matériaux isolants possédant des constantes diélectriques ϵ_1 et ϵ_2, la force image s'exprime par :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}^2}{16\pi\epsilon_1\epsilon_0\mathbf{h}^2}\frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)} \quad \text{avec } \epsilon_2 > \epsilon_1 \tag{23}$$

Interaction surface / surface

Lorsque l'on considère deux surfaces planes en vis-à-vis, possédant des densités surfaciques de charge σ et $-\sigma$, chacune crée un champ :

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \tag{24}$$

Le champ électrique dans le matériau (ϵ) situé entre les deux surfaces est :

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} \tag{25}$$

La force électrostatique par unité de surface est donc :

$$\mathbf{P} = \sigma.E = \frac{\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} \tag{26}$$

Cette dernière expression montre que la force électrostatique (ou pression électrostatique d'adhésion) entre surfaces planes ne dépend pas de la distance de séparation. Elle n'intervient que dans le cas où la répartition de charges ne serait pas uniforme.

Il est très difficile de connaître avec précision les charges (et les champs électriques résultants) à l'échelle microscopique. Dans le cas où l'on considère des objets isolants de taille microscopique (diamètre inférieur à $500\ \mu m$) ; la répartition de ces charges n'est pas a priori connue et n'est pas théoriquement prédictible. Néanmoins, il est possible de minimiser l'influence des forces électrostatiques par des traitements surfaciques pour éliminer les charges. Elles ne seront donc prises en compte que si l'hypothèse de répartition uniforme des charges ne peut plus être vérifiée.

3 Conclusion

Ce chapitre est consacré à une présentation générale de la micro-manipulation. Dans un premier temps, divers travaux de recherche relatifs à la conception des systèmes à l'échelle microscopique sont décrits. Ce tour d'horizon a démontré la nécessité de la compréhension des phénomènes physiques dominants à cette échelle. Le projet actuel du LRP étant fondé sur l'utilisation de l'adhésion pour la micro-manipulation, la deuxième partie du chapitre a donc été consacrée à une description détaillée des forces d'adhésion, notamment les énergies d'interaction surfaciques et de Van der Waals, mais

aussi l'influence de l'humidité et des charges électrostatiques. Ces études permettent d'établir des modèles analytiques de phénomènes physiques qui seront exploités dans le chapitre suivant, consacré à la construction des modèles statiques et dynamiques d'une tâche de saisie et de dépose d'objet microscopique.

Chapitre II

Dualité de la saisie/dépose par adhésion

Le chapitre précédent démontre la prépondérance des forces d'adhésion sur le poids pour les objets dont les dimensions sont inférieures à $\simeq$ 300 μm. Ce phénomène a été choisi comme support du système de micro-manipulation [Rollot, 2000].

Il est possible de saisir un objet par un simple contact avec un préhenseur, à condition de faire un choix judicieux du matériau du préhenseur. En effet, en statique, en projection sur un axe vertical, la force d'adhésion entre l'objet et le préhenseur doit être supérieure à la somme du poids et de la force d'adhésion entre l'objet et le substrat. Dans le cas où l'objet est relâché sur le substrat d'origine, cette condition devient totalement handicapante pour la dépose. Ce problème peut-être évité en concevant un préhenseur articulé complexe, avec par exemple un mécanisme secondaire poussant l'objet pour l'arracher du préhenseur au moment de la dépose tel que l'a développé [Tanikawa *et al.*, 1996]. Par contre, cette solution implique la réalisation d'un micro-mécanisme complexe en conception et en production. Une approche intégrant les effets dynamiques, ignorés dans les travaux similaires précédents, apporte une issue au problème de la dépose. Pour identifier les effets dynamiques, il faut développer un modèle dynamique complet via l'étude d'une tâche de manipulation canonique prenant en compte tous les phénomènes physiques liés à la réduction de l'échelle.

Dans la suite de ce chapitre, la tâche canonique adoptée pour la modélisation est décrite puis étudiée en statique et en dynamique. Le modèle dynamique déduit de ces études fait ensuite l'objet d'une simulation numérique. Cette simulation permet de déterminer les conditions statiques et dynamiques assurant la réussite des opérations de saisie et de dépose par

adhésion.

1 Description de la tâche de manipulation

Pour utiliser les forces d'adhésion pour la micro-manipulation, il faut déterminer de façon précise, les conditions nécessaires pour saisir l'objet, le maintenir pendant la phase de mouvement du préhenseur, puis finalement assurer sa dépose en s'affranchissant de l'effet d'adhésion.

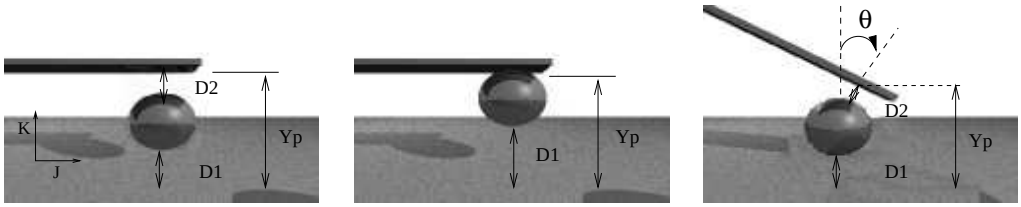
Un logiciel de simulation sous forme simplifiée dédié à la micro-manipulation par adhésion est alors mis en place. Pour comprendre en détail les particularités et la faisabilité de la manipulation, une tâche particulière de saisie et de dépose d'objet microscopique a été choisie. Cette tâche est dite "canonique" car elle représente les différents aspects de l'opération et permet la mise en équation de toutes les étapes de la manipulation. Un modèle dynamique est extrait de l'étude de cette tâche, permettant de simuler la manipulation. Ces simulations détermineront les facteurs liés à l'environnement et aux matériaux constitutifs, ainsi que les variables géométriques, cinématiques et dynamiques qui interviennent dans les phases de saisie et de dépose de l'objet.

L'idée principale de ce projet est de tirer profit des forces d'adhésion pour effectuer la manipulation. La saisie est effectuée par un simple contact entre l'objet et le préhenseur. La seule condition sur la géométrie du préhenseur est sa surface fonctionnelle en contact avec l'objet à manipuler. Il faut maximiser l'adhésion entre l'objet et le préhenseur, ce qui revient à augmenter l'aire de la zone de contact. La surface fonctionnelle est donc considérée comme un plan parfait.

L'objet manipulé est supposé avoir une forme sphérique parfaite, celle-ci se rapprochant des contacts classiques de micro-manipulation [Ando *et al.*, 1991] [Zesch et Fearing, 1998]. De plus, ce choix facilite la mise en équation des forces d'adhésion qui dépendent de la géométrie et de la surface du contact, déterminées principalement par le rayon de l'objet considéré.

La tâche canonique peut alors être définie, elle se compose d'une saisie puis d'une dépose d'un objet. La saisie s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, le préhenseur est mis en contact avec l'objet, initialement au repos sur un substrat plan, puis, il est soulevé avec l'objet adhérant sur celui-ci. Il faut donc préserver la liaison "adhésive" préhenseur/objet et casser la liaison substrat/objet. L'opération de dépose se déroule de façon similaire, il faut préserver la liaison substrat/objet et casser la liaison préhenseur/objet. La figure 1 décrit le déroulement de la tâche canonique de manipulation.

Il est clair qu'il est impossible d'effectuer ces deux actions avec le même mode opératoire. Un autre protocole de dépose doit donc être défini. Pour



(a) (b) (c)

FIG. 1: Décomposition de la tâche de manipulation

cela, un angle θ, inclinaison du préhenseur selon un axe perpendiculaire au plan de saisie/dépose, est introduit entre le préhenseur et le plan horizontal [Rollot *et al.*, 2001]. Cet angle permet la réduction du module de la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet en projection sur l'axe vertical d'un facteur de $\cos\theta$. Cette inclinaison, maintenue en retirant le préhenseur verticalement, facilite la tâche de dépose. Il est à noter que cette inclinaison produit un couple dont l'effet serait de faire rouler l'objet sur le préhenseur et/ou le substrat. Cet effet est négligé dans une première approche.

Pour justifier ce mode de manipulation, un modèle paramétré est déterminé. Ce modèle permet d'évaluer dans un premier temps la faisabilité et par la suite les différents facteurs qui influencent le déroulement et la commande de cette tâche de manipulation. Il permet la définition d'un cahier des charges, afin de construire un prototype expérimental.

2 Étude théorique de la tâche

Pour obtenir un modèle paramétré de la tâche de micro-manipulation, il faut d'abord déterminer les différentes variables et grandeurs physiques du problème.

Dans le chapitre précédent, les forces d'adhésion ont été décrites en détail. Dans le cas des forces capillaires et électrostatiques, la détermination des valeurs précises pour les modules de forces est difficile [Hays, 1991a] [Horn et Smith, 1992]. Les forces capillaires dépendent des caractéristiques hydrophiles ou hydrophobes des matériaux ainsi que de l'humidité ambiante [Mastrangelo, 1993]. Par ailleurs l'influence de l'humidité sur la force de Van der Waals n'est connue que très approximativement [Mastrangelo, 1993]. De même, sa dépendance temporelle et sa relation avec la force de pull-off ne sont pas totalement maîtrisées. Pour les forces électrostatiques, la connaissance de la répartition des charges sur un micro-objet est difficile à connaître [Lowell et Rose-Innes, 1980]. De plus, cette répartition des charges n'est jamais stable et change de configuration en fonction des autres objets chargés

dans l'environnement [Harper, 1967].

Pour remédier à ces problèmes, une fonction $\mathbf{F_{adh}}$ est déterminée à partir des expressions des forces exposées dans le chapitre précédent. Elle dépend de la distance entre les deux corps considérés et associe les différents effets d'adhésion. Elle intègre aussi différents facteurs comme la rugosité ou l'humidité par le biais de coefficients modérateurs, respectivement $\mathbf{C_r}$ et $\mathbf{C_h}$.

$$\mathbf{F_{adh}(D) = C_r\, C_h(F_{V\,dW}(D) + F_{capillaire}(D)) + F_{electrostatique}(D)}$$

2.1 Bilan des forces appliquées sur l'objet

Dans un premier temps, un simple bilan des forces appliquées à l'objet est effectué. Cette étude va permettre de mieux comprendre les différents états du système (l'objet est attaché au préhenseur ou au substrat) et à partir de l'analyse de ces états, différentes phases de la micro-manipulation pourront être définies autour de la tâche canonique. La figure 2 décrit le système avec les différentes notations.

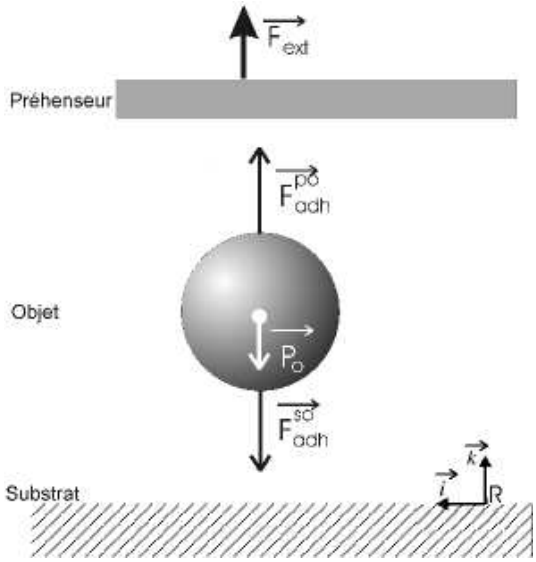


FIG. 2: Etude de la tâche de manipulation

Les forces qui apparaissent dans le bilan sont les suivantes :

- $\vec{\mathbf{F}}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}}$ et $\vec{\mathbf{F}}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}}$, forces d'adhésion respectivement entre le préhenseur et l'objet manipulé et entre le substrat et l'objet manipulé ;
- $\vec{\mathbf{P}}_{\mathbf{o}}$, poids de l'objet ;

– $\vec{F}_{ext}$, force extérieure appliquée au préhenseur.

Il est important de noter la complexité d'établir un équilibre statique du système : l'état associé à ce bilan ne permet pas d'effectuer un équilibre statique. L'hypothèse corps rigide, qui néglige les efforts dus au contact et aux déformations, ne semble en effet pas applicable pour ce problème.

A partir de cette étude, l'état associé à l'instant initial de la manipulation peut néanmoins être défini :

Si $F_{adh}^{po} > F_{adh}^{so} + P_o$ → attaché au préhenseur
Si $F_{adh}^{po} < F_{adh}^{so} + P_o$ → attaché au substrat

2.2 Définition des phases de la manipulation

Une force extérieure est appliquée au préhenseur pour déplacer ce dernier. Il est donc nécessaire de déterminer dans quelle phase le système se placera, saisie ou dépose, en fonction de cette force. Pour répondre à cette question, il suffit alors de distinguer différents cas en fonction des forces d'adhésion et de l'évolution de la force extérieure.

1. $F_{adh}^{po} > F_{adh}^{so} + P_o$: l'objet est collé au préhenseur
   – $F_{adh}^{po} > F_{adh}^{so} + P_o > F_{ext}$
   La force extérieure n'est pas suffisante pour modifier le système.
   – $F_{adh}^{po} > F_{ext} > F_{adh}^{so} + P_o$
   Dans ce cas, la force extérieure est suffisante pour arracher l'objet du substrat mais l'adhésion entre l'objet et la pointe est maintenue. Cette phase est appelée **saisie**.
   – $F_{ext} > F_{adh}^{po} > F_{adh}^{so} + P_o$
   La force extérieure est supérieure aux forces d'adhésion. Il est alors difficile de déterminer quelle interface cédera la première. Néanmoins, si on suppose que l'application de la force extérieure entraîne préalablement un des cas précédents, seule une étude dynamique prenant en compte les inerties et les accélérations est susceptible de fournir une solution.
2. $F_{adh}^{so} + P_o > F_{adh}^{po}$: l'objet est collé au substrat
   – $F_{adh}^{so} + P_o > F_{adh}^{po} > F_{ext}$
   La force extérieure n'est pas suffisante pour modifier le système.
   – $F_{adh}^{so} + P_o > F_{ext} > F_{adh}^{po}$
   Dans ce cas l'adhésion au niveau de l'interface objet - pointe est brisée avant celle de l'interface objet - substrat. Cette phase est appelée **dépose**.

– $\mathbf{F_{ext} > F^{so}_{adh} + P_o > F^{po}_{adh}}$
Il est encore difficile de déterminer le comportement du système dans ce cas sans prendre en compte les paramètres dynamiques.

Ce raisonnement permet de déterminer les conditions statiques de la saisie par adhésion : la force d'adhésion objet-préhenseur doit être impérativement supérieure à la somme de la force d'adhésion objet-substrat et du poids de l'objet. Par contre, cette condition interdit de re-déposer sur le même substrat en restant dans le cadre d'une approche qui néglige les effets dynamiques.
De plus, lors d'une opération de manipulation industrielle, le choix du substrat cible ainsi que son énergie de surface sont fixés par les nécessités de l'application. Une solution simple apparaît si une inclinaison θ (voir fig. 1-c) est introduite. De cette façon, la force d'adhésion entre la pointe et l'objet,en projection sur l'axe vertical, est réduite d'un facteur de $\cos\theta$. La dépose peut alors être maîtrisée indépendamment des valeurs relatives des surfaces d'énergie.

$$\vec{\mathbf{F}}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} = \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \cos(\theta)\vec{\mathbf{k}} + \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \sin(\theta)\vec{\mathbf{i}}$$

Ce mode de manipulation, fondé sur les cas de saisie et de dépose statique, nécessite une condition forte pour sa fiabilité. En effet, la force extérieure doit appartenir à l'intervalle borné par les deux forces d'adhésion. L'ordre de grandeur de ces forces est de $\sim 10\ \mu N$ [Adamson, 1990] [Bowling, 1986]. De plus, ces valeurs varient rapidement en fonction des facteurs environnants, il est donc très difficile de produire et de commander une force extérieure conforme à cette condition [Hays, 1991b]. Il est donc souhaitable d'étendre cette étude à une étude dynamique du système.

2.3 Modèle dynamique des phases de saisie et de dépose

Un simple bilan des forces ne permet pas de déterminer le comportement global du système. D'une part, les forces d'adhésion varient fortement en fonction de la distance, d'autre part, malgré les faibles masses des objets manipulés, les effets dynamiques et inertiels ne sont pas négligeables dans l'analyse du système [Banerjea *et al.*, 1991].

Néanmoins, la mise en équation dynamique pose quelques problèmes. La nature de la liaison due aux forces d'adhésion aux interfaces entres les divers médias, reste très mal définie. Cette indétermination rend complexe l'écriture de l'équilibre dynamique. L'approche simplifiée constituée par l'équilibre de l'objet et du préhenseur n'est plus suffisante pour décrire complètement le système. Il faut donc distinguer deux sous-modèles. Dans l'un, lorsque la pointe et l'objet manipulés sont séparés, ils forment deux systèmes différents

(modèle **"détaché"**). Dans l'autre, lorsque l'objet est "collé" à la pointe, ils forment un seul et unique système (modèle **"attaché"**). L'objectif de la modélisation est alors de déterminer les conditions de passage d'un modèle à l'autre, c'est-à-dire les conditions dynamiques de saisie et de dépose.
Pour simplifier l'écriture des équations dynamiques, tous les vecteurs et grandeurs sont projetés sur l'axe $\vec{\mathbf{k}}$, verticale orientée vers le haut dans le repère **R** attaché au substrat et supposé galiléen. Toutes les forces et déplacements étant colinéaires à cet axe, les modules des projections restent inchangés, sauf dans le cas où le préhenseur est incliné d'un angle θ. Dans ce cas, la composante due à la projection sur l'axe $\vec{\mathbf{i}}$ de la force d'adhésion est négligée dans l'écriture de l'équilibre dynamique du système. Cette hypothèse sera discutée par la suite.

Modèle "détaché"

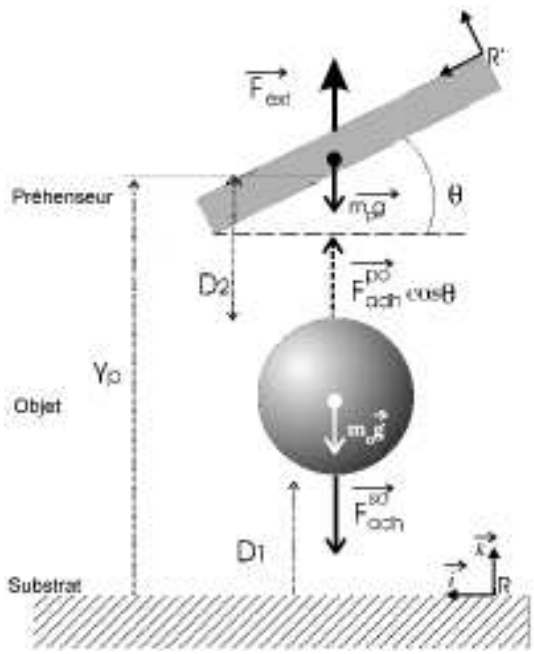


FIG. 3: Etude dynamique de la tâche de manipulation : modèle 'détaché'

Ce modèle est composé par application du principe fondamental de la dynamique aux deux systèmes matériels distincts, l'objet et la pointe. $\mathbf{m_p}$ désigne la masse du préhenseur, $\mathbf{m_o}$ celle de l'objet, $\mathbf{F^{po}_{adh}}$ et $\mathbf{F^{so}_{adh}}$ respectivement les forces d'adhésion entre l'objet et le préhenseur, et l'objet et le substrat, $\mathbf{R_o}$ le rayon de l'objet et $\mathbf{F_{ext}}$ la force extérieure appliquée au préhenseur. Les notations des distances sont conformes à la figure 3.

Sous l'hypothèse des corps rigides indéformables, des conditions géométriques, dites de réaction, sont définies. Elles garantissent une intersection nulle entre les corps en limitant la distance de contact à une valeur minimale. Cette distance est prise égale à la distance de séparation atomique, $0.4\ \mathbf{nm}$ [Israelachvili, 1991].

Dans un premier temps, seule l'équation de la résultante est considérée. La première équation du modèle correspond à l'équilibre dynamique du préhenseur et la deuxième à celle de l'objet, la troisième donne la relation entre les distances caractéristiques du problème, et la condition dynamique sur les accélérations, déduite de la relation précédente. Les forces d'adhésion sont décrites en fonction des distances caractéristiques du problème, à partir de leurs expressions données dans le chapitre précédent.

$$\begin{aligned} \mathbf{m_p}\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} &= \mathbf{F}^{\mathbf{ext}} - \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}}(\mathbf{D}_2)\cos\theta - \mathbf{m_p g} && (1)\\ \mathbf{m_o}\ddot{\mathbf{D}}_1 &= \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}}(\mathbf{D}_2)\cos\theta - \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}}(\mathbf{D}_1) - \mathbf{m_o g} && (2)\\ \mathbf{Y_p} &= \mathbf{D}_1 + 2\mathbf{R_o} + \mathbf{D}_2 \quad \Rightarrow \quad \ddot{\mathbf{D}}_2 = \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} - \ddot{\mathbf{D}}_1 && (3) \end{aligned}$$

Les conditions géométriques de réaction ajoutées au système sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_1 &\geq 0.4\ \mathbf{nm}\\ \mathbf{D}_2 &\geq 0.4\ \mathbf{nm} \end{aligned}$$

Modèle "attaché"

Dans ce cas, l'objet et le préhenseur forment un système unique noté "**po**", de masse $\mathbf{m_{po}} = \mathbf{m_p} + \mathbf{m_o}$ (fig. 4). Comme précédemment, l'équation de la résultante donne :

$$\begin{aligned} \mathbf{m_{po}}\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} &= \mathbf{F_{ext}} - \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}} - (\mathbf{m_p} + \mathbf{m_o})\,\mathbf{g} && (4)\\ \mathbf{Y_p} &= \mathbf{D}_1 + 2\mathbf{R_o} + 0.4\ \mathbf{nm} \qquad \ddot{\mathbf{D}}_1 = \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} && (5) \end{aligned}$$

La condition géométrique de réaction existe seulement pour $\mathbf{D}_1$ tel que :

$$\mathbf{D}_1 \geq 0.4\ \mathbf{nm}$$

Conditions de transition de modèle

Pour déterminer le comportement exact du système et obtenir l'évolution des distances caractéristiques, il est primordial de connaître le ou les

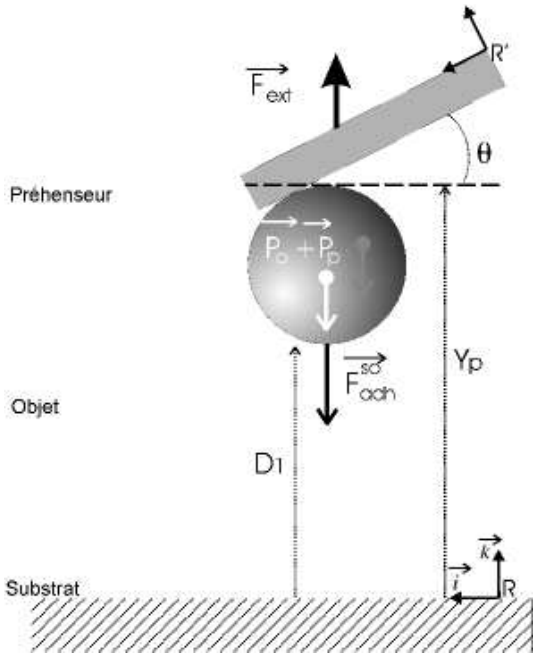


FIG. 4: Etude dynamique de la tâche de manipulation : modèle 'attaché'

moment(s) de transition, qui traduisent le détachement de l'objet du préhenseur, soit le passage du modèle attaché au modèle détaché. D'une façon algébrique, le modèle attaché est un cas particulier du modèle détaché, où $\mathbf{D_2}$ = Constante = 0.4 **nm**, et donc $\ddot{\mathbf{D}}_2 = 0$. Dans ce cas, le modèle attaché est validé sous réserve d'une vérification d'une non séparation entre l'objet et le préhenseur.

Pour cette vérification, il suffit d'observer l'évolution de l'accélération de l'objet par rapport au préhenseur. Si cette accélération est orientée vers le préhenseur, donc positive, le contact est maintenu. Dans le cas contraire, l'objet se sépare du préhenseur et une transition vers le modèle "détacheé" est effectuée. Il faut donc écrire le bilan des forces s'appliquant sur l'objet dans le cas "attaché" (donc $\mathbf{D_2}$ = 0.4 **nm**) . Il est à noter que ce bilan des forces se fait par rapport à un repère attaché au système préhenseur - objet, donc **non galiléen**. L'accélération de l'objet dans ce repère $\vec{\gamma}_{\mathbf{obj}et/R}$ est donnée par la somme de l'accélération relative dans le repère $\vec{\gamma}_{\mathbf{obj}et/R'}$ et de l'accélération du repère $\mathbf{R}'$ par rapport à $\mathbf{R}$, $\vec{\gamma}_{\mathbf{R}'/R}$.

$$\vec{\gamma}_{\mathbf{obj}et/R} = \vec{\gamma}_{\mathbf{obj}et/R'} + \vec{\gamma}_{\mathbf{R}'/R} \rightarrow \gamma_{\mathbf{obj}et/R'} = \ddot{\mathbf{D}}_1 - \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$$

L'application du principe fondamental de la dynamique à l'objet, dans le repère $\mathbf{R}'$, introduit un terme supplémentaire, $-\mathbf{m_o}\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$, qui s'ajoute à la

somme des forces extérieures. Ce terme est aussi appelé **la force d'inertie d'entraînement**. Les autres forces s'appliquant sur l'objet sont les forces d'adhésion du substrat et du préhenseur et son poids.

$$\mathbf{m_o}\gamma_{\mathbf{obj}\,et/R'} = \mathbf{F^{po}_{adh}}(\mathbf{D}_2 = 0.4\ \mathbf{nm})\cos\theta - \mathbf{F^{so}_{adh}}(\mathbf{D}_1) - \mathbf{m_o}\,\mathbf{g} - \mathbf{m_o}\,\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$$

$$\mathbf{m_o}\gamma_{\mathbf{obj}\,et/R'} = \mathbf{F^{po}_{adh}}(\mathbf{D}_2)\cos\theta - \left(\mathbf{F^{so}_{adh}}(\mathbf{D}_1) + \mathbf{m_o}(\mathbf{g} + \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p})\right) \tag{6}$$

La condition de transition peut donc s'exprimer en combinant la condition sur la distance objet - préhenseur $\mathbf{D}_2$ et la détermination du signe de $\gamma_{\mathbf{obj}\,et/R'}$ (eq. 6) :

$$\begin{array}{lll} \text{si} & \mathbf{D}_2 = 0.4\ \mathbf{nm} & \\ \text{et si} & \mathbf{F^{po}_{adh}}(\mathbf{D}_2)\cos\theta > \mathbf{F^{so}_{adh}}(\mathbf{D}_1) + \mathbf{m_o}(\mathbf{g} + \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}) & \\ & \hookrightarrow \quad \textbf{modèle attaché} & \\ \text{sinon} & \longrightarrow \quad \textbf{modèle détaché} & \end{array} \tag{7}$$

Parmi toutes les grandeurs qui apparaissent dans cette condition, seuls l'angle θ, dû à l'inclinaison du préhenseur, et la force d'inertie, donc implicitement l'accélération $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ du préhenseur, sont des facteurs qui peuvent être imposés au système. Pour un couple objet/substrat défini, **la transition de modèle, plus précisément la dépose, peut donc être totalement conditionnée en ne modifiant que ces deux termes**.

2.4 Influence de l'inclinaison du préhenseur

Il est à noter que tous les modèles et équations présentés sont des projections sur l'axe $\vec{\mathbf{k}}$. Cette approximation est justifiée si tous les vecteurs sont colinéaires à cet axe. Or, l'introduction de l'inclinaison θ dévie aussi la force d'adhésion objet-préhenseur du même angle puisque cette force est supposée perpendiculaire à la surface du préhenseur. Une composante de cette force, de module $\mathbf{F^{po}_{adh}}(\mathbf{D}_2)\sin\theta$ suivant l'axe $\vec{\mathbf{i}}$ apparaît. L'écriture des équations dynamiques en projection sur l'axe $\vec{\mathbf{k}}$ ne fait pas apparaître cette composante. Il faut donc déterminer s'il convient de la négliger totalement ou si elle a une influence sur le comportement du système.

L'influence de cette composante pourrait être un roulement ou un glissement de l'objet vers l'extrémité du préhenseur. Il est très difficile de déterminer lequel de ces phénomènes peut apparaître sans connaître précisément la force de frottement entre l'objet et le préhenseur. Dans tous les cas, si

l'objet est supposé très proche de l'extrémité du préhenseur, le roulement ou le glissement contribuera à la séparation avec le préhenseur.

Un des objectifs de cette modélisation étant de déterminer les conditions provoquant la dépose, il vaut mieux se placer dans le cas le plus désavantageux et considérer que la contribution de la composante horizontale est négligeable. Cette simplification permet de déterminer une condition de limite supérieure garantissant la dépose, bien que la séparation soit possible, dans certains cas, avec une condition plus faible, provoquée par la composante négligée.

3 Simulations dynamiques de la tâche

Le modèle dynamique corps rigide à deux états attaché - détaché, avec la condition de transition complémentaire décrit le comportement global du système. L'objectif de l'étude théorique, en plus d'évaluer la faisabilité de la tâche de manipulation, est de déterminer les méthodes et les stratégies qui permettront de maîtriser et de commander précisément les phases de saisie et de dépose.

L'étude menée jusqu'à ce stade laisse entrevoir la possibilité d'utiliser l'inclinaison du préhenseur et les forces inertielles, à travers la force extérieure appliquée au préhenseur, pour paramétrer le passage entre les deux modèles "attaché" et "détaché" (voire pour maîtriser avec précision les opérations de saisie et de dépose d'une tâche de micro-manipulation). Il est donc nécessaire de résoudre le modèle dynamique décrivant le système pour définir les paramètres influençant son comportement.

Par ailleurs, il est peu probable d'obtenir une solution analytique à cause de la description à deux états du système et de l'interdépendance des variables régissant le système. Il est certes, possible de calculer la condition de transition et de vérifier l'état actuel du système en connaissant les paramètres instantanés (les distances caractéristiques et les forces d'adhésion), mais ces valeurs sont fortement liées entre elles et ne sont, a priori, pas connues. La méthode la plus adaptée semble être une simulation numérique du déroulement de la tâche de manipulation en vérifiant à chaque pas la condition de transition et en choisissant l'état approprié du modèle.

3.1 Résolution pas à pas

Pour pouvoir utiliser un logiciel de simulation tel que *Matlab/Simulink*, le modèle dynamique doit être modifié pour s'adapter à une résolution numérique. Comme entrée du système, il a été choisi d'utiliser la force extérieure

appliquée au préhenseur et l'inclinaison du préhenseur. Ce choix s'explique par le fait que ces paramètres sont les seuls qui peuvent être maîtrisés d'un point de vue expérimental. Le profil de la force sera un signal triangulaire de largeur d'une microseconde et d'amplitude fixée par l'utilisateur. En pratique, ce signal est assimilable à un Dirac, appliqué au préhenseur à l'instant initial de la simulation. L'inclinaison θ est fixée à une valeur choisie par l'utilisateur pour toute la durée de la simulation. A la sortie du simulateur, les résultats sont les évolutions des distances caractéristiques du système : $\mathbf{Y_p}$, la distance substrat - préhenseur et $\mathbf{D_1}$, la distance substrat - objet. Ces distances sont obtenues par intégration successive des accélérations correspondantes.

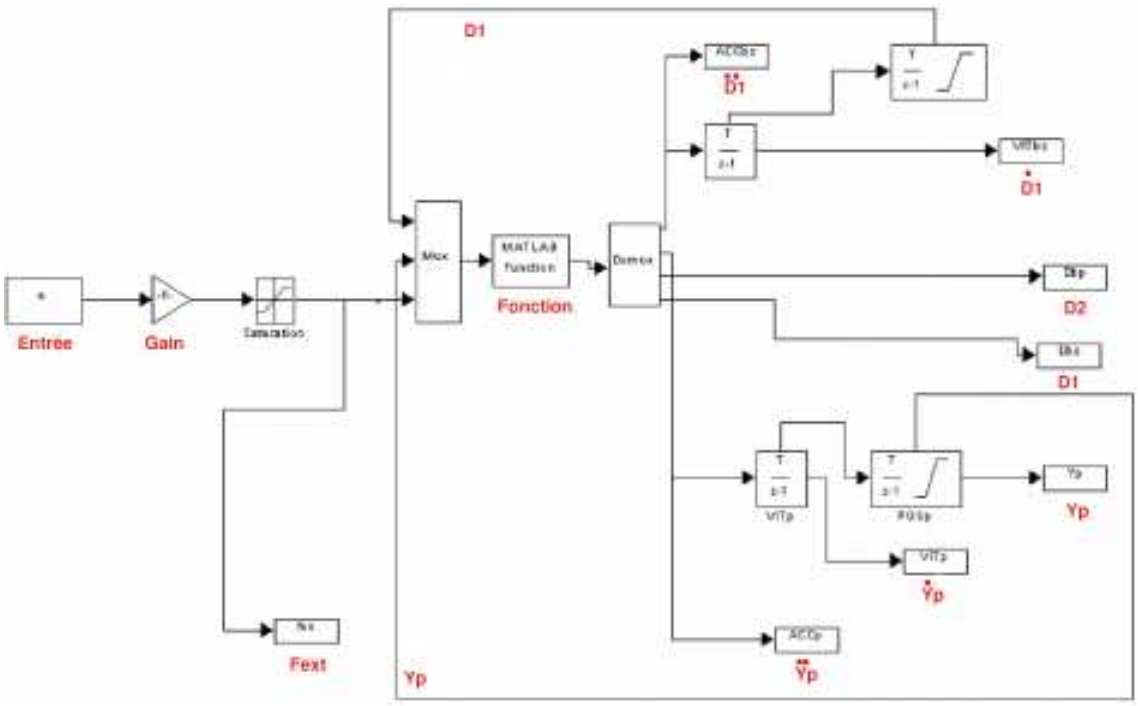


FIG. 5: Diagramme bloc de *Simulink* pour les simulations

La figure 5 représente le schéma bloc de la simulation. Le bloc "Entrée" contient le profil de la force appliquée. Le bloc "Gain" est l'amplitude de cette force, fixée par l'utilisateur pour une simulation complète donnée. Le bloc "Fonction" contient le modèle dynamique adapté à la résolution pas à pas, décrit de façon détaillée ci-dessous. Il fournit à sa sortie les accélérations du préhenseur et de l'objet dans le repère du substrat. Les blocs d'intégrations calculent numériquement les vitesses et les distances caractéristiques à partir de ces données, retournant les valeurs obtenues au bloc "Fonction",

pour calculer les prochains pas de simulation. La résolution du système se fait donc principalement dans le bloc “Fonction”. L’algorithme de résolution du modèle dans ce bloc peut être décrit de la façon suivante :

1. Les différentes entrées du modèle dynamique sont : (1)la force extérieure, (2) la distance substrat - objet $\mathbf{D_2}$, (3) la distance substrat - préhenseur $\mathbf{Y_p}$ (obtenues par les conditions initiales ou les pas précédents)
2. La distance objet - préhenseur est calculée par la relation $\mathbf{D_2} = \mathbf{Y_p} - (\mathbf{D_1} + 2\mathbf{R_b})$. La condition de réaction est alors imposée selon :

$$\text{si} \quad \mathbf{D_i} < 0.4\,\mathbf{nm} \rightarrow \mathbf{D_i} = 0.4\,\mathbf{nm} \quad \mathbf{i} = 1, 2$$

3. Les forces d’adhésion substrat - objet et préhenseur - objet sont calculées
4. Si $\mathbf{D_2} = 0.4\,\mathbf{nm}$, le système est dans l’état attaché :
   (a) L’accélération du système préhenseur - objet est calculée à partir de l’équation 4 :

$$\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} = (\mathbf{F_{ext}} - \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}} - (\mathbf{m_p} + \mathbf{m_o})\,\mathbf{g})/m_{\mathbf{po}}$$

   (b) Avec cette valeur, la transition de modèle est vérifiée à partir de l’équation 7 :

$$\text{si} \quad \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \cos\theta < \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}} + \mathbf{m_o}(\mathbf{g} + \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}) \rightarrow \text{transition}$$

   (c) Si la condition de transition est vérifiée, l’accélération de l’objet est donnée par l’équation 2 du modèle détaché :

$$\ddot{\mathbf{D}}_1 = (\mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \cos\theta - \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}} - \mathbf{m_o}\,\mathbf{g})\,/m_\mathbf{o}$$

   (d) Si la transition n’est pas vérifiée, l’accélération de l’objet par rapport au substrat est égale à l’accélération du préhenseur par rapport au substrat :

$$\ddot{\mathbf{D}}_1 = \ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$$

5. Si l’objet et le préhenseur ne sont pas en contact ($\mathbf{D_2} > 0.4\,\mathbf{nm}$), leurs accélérations respectives sont calculées à partir des équations 1 et 2 du modèle détaché.

$$\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} = (\mathbf{F}^{\mathbf{ext}} - \mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \cos\theta - \mathbf{m_p}\mathbf{g})/m_\mathbf{p}$$

$$\ddot{\mathbf{D}}_1 = (\mathbf{F}^{\mathbf{po}}_{\mathbf{adh}} \cos\theta - \mathbf{F}^{\mathbf{so}}_{\mathbf{adh}} - \mathbf{m_o}\mathbf{g})/m_\mathbf{o}$$

6. Les valeurs instantanées de $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ et $\ddot{\mathbf{D}}_\mathbf{1}$ sont les résultats pour le pas donné et le processus est réitéré après intégration de ces valeurs.

Le choix du pas de calcul des simulations est délicat. Pour obtenir des résultats réalistes, il doit être le plus petit possible, mais des pas trop petits augmentent considérablement la durée des simulations. De plus, les variations des valeurs successives sont noyées si elles sont plus faibles que la précision informatique des variables numériques. Plusieurs essais ont démontré que les résultats convergent pour une durée de pas inférieure à une nanoseconde et leur variation devient négligeable pour une valeur inférieure à 0.5 nanoseconde. Le choix s'est donc fixé pour cette valeur comme pas de calcul, soit :

$$\Delta \mathbf{t} = 0.5 \cdot 10^{-9}\ \mathbf{s}$$

3.2 Résultats de simulations

Le modèle dynamique a été simulé pour plusieurs valeurs de $\mathbf{F_{ext}}$. En fonction de cette force appliquée au préhenseur, les évolutions des distances caractéristiques du problème sont étudiées : la distance substrat - préhenseur $\mathbf{Y_p}$ et la distance objet - substrat $\mathbf{D_1}$. L'interprétation des résultats des simulations en fonction de la force extérieure comme entrée du système a un inconvénient : on a vu précédemment que les paramètres conditionnant la transition de modèle sont l'accélération du préhenseur $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ et l'angle θ. Or, $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ dépend de la force extérieure $\mathbf{F}^{\mathbf{ext}}$ et de la masse du préhenseur $\mathbf{m_p}$. A ce stade de l'étude, il est impossible d'attribuer une valeur exacte à cette dernière. Pour pouvoir généraliser les résultats des simulations et les exploiter correctement, **il faut s'affranchir de cette dépendance de la masse du préhenseur**. Il est donc plus approprié d'adopter un paramètrage des simulations en fonction de l'accélération du préhenseur et non de la force extérieure appliquée, bien que pour les simulations, cette dernière soit considérée comme la véritable entrée du système. Ce choix permet de déterminer des invariants conditionnant le comportement du système, indépendamment du choix du préhenseur et facilite donc la phase de conception.

La première conclusion extraite des simulations est l'impossibilité d'effectuer la saisie si la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet n'est pas supérieure à la somme de la force d'adhésion substrat - objet et du poids de l'objet. Donc, la première condition triviale de manipulation par utilisation des forces d'adhésion est l'utilisation d'un préhenseur dont l'énergie d'adhésion est plus grande que celle du substrat.

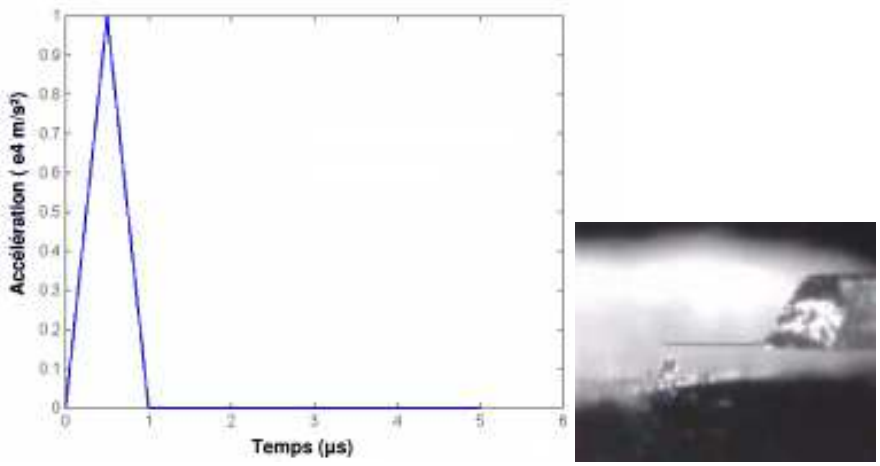
$$\mathbf{A_{po}} > \mathbf{A_{so}}$$

Par la suite, il a été attribué au préhenseur les caractéristiques matérielles du silicium, à l'objet celles du verre et au substrat celle du polystyrène. Les valeurs des constantes de Hamaker correspondantes sont calculées avant les simulations en utilisant l'approche de Lifshitz [Lifshitz, 1956] et les relations de combinaisons, telles qu'elles sont présentées au premier chapitre. A titre d'information, le tableau suivant récapitule ces résultats.

	A_{Verre}	$A_{VerrePS}$	$A_{VerreSi}$	A_{Si}	A_{SiPS}
Sec ($\times 10^{-20}$ **J**)	6.2	7.17	10.1	25.8	13.2
Humide ($\times 10^{-20}$ **J**)	4.72	9.85	4.72	13.8	0.27

TAB. 1: Les constantes de Hamaker pour différentes interactions simulées

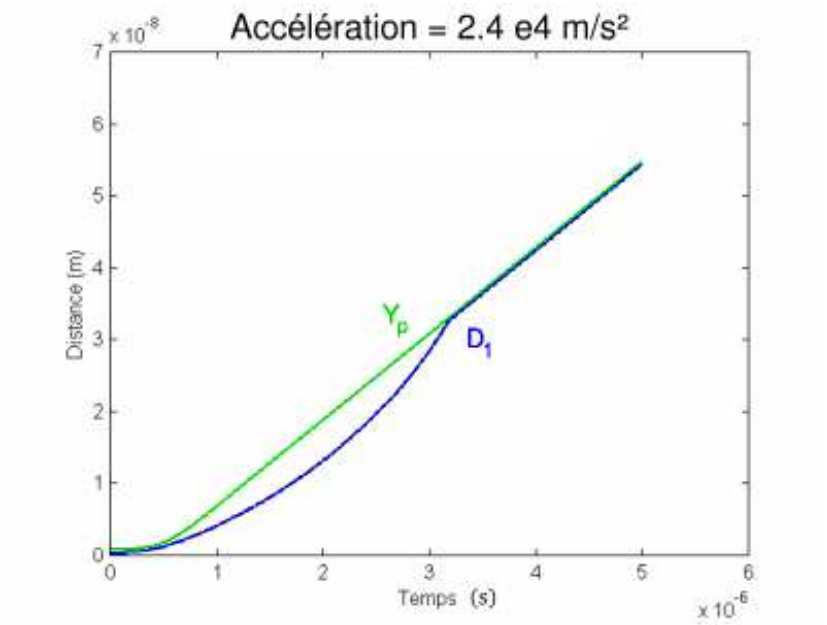
Les simulations sont effectuées avec des valeurs de $\ddot{Y}_p$ croissantes pour un objet sphérique de rayon 50 μm et une inclinaison nulle du préhenseur ($\theta = 0$). Quatre cas différents sont observés :



(a) Evolution de $\ddot{Y}_p$ (b) Evolutions de D_1 et Y_p

FIG. 6: Résultats de simulations : cas de la saisie statique $\ddot{Y}_p < \gamma^0$ avec $\gamma^0 = 2.4 \cdot 10^4\ m/s^2$

- Pour une accélération de préhenseur $\ddot{Y}_p$ inférieure à un seuil ($\ddot{Y}_p < \gamma^0$), l'objet reste collé au préhenseur pendant toute la durée de la simulation. Cette valeur seuil est très faible au regard de la dynamique du système. Ce cas est donc appelé **saisie statique** et il est représenté sur la figure 6. Sa caractéristique principale, qui décrit la saisie, est la similitude des courbes d'évolution des distances D_1 et Y_p.



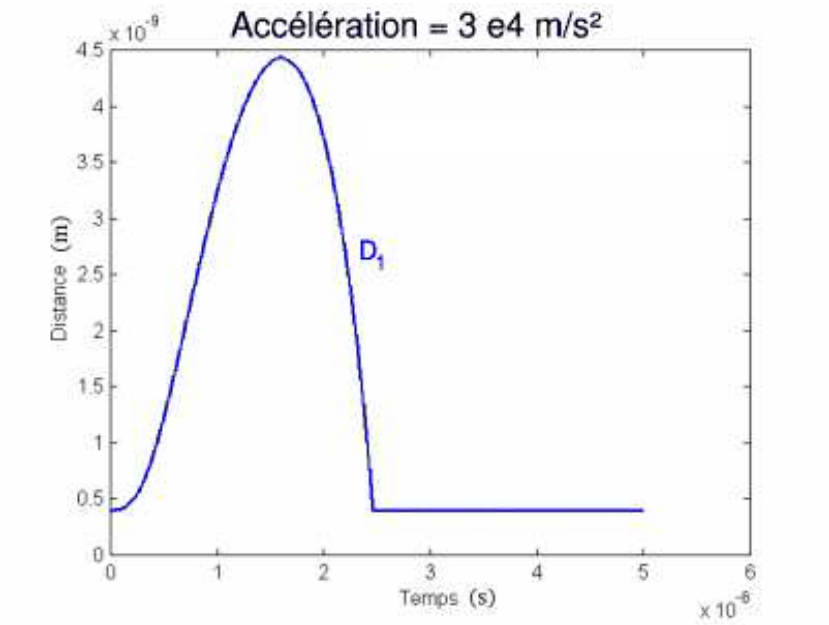
Evolutions de $\mathbf{D_1}$ et $\mathbf{Y_p}$

FIG. 7: Résultats de simulations : cas de la limite de saisie $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} \in [\gamma^0, \gamma^1[$ avec $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} \simeq \gamma^0 = 2.4 \cdot 10^4\ m/s^2$

- Quand $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ est supérieure à cette valeur seuil mais reste inférieure à une valeur très proche de celle-ci ($\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} \in [\gamma^0, \gamma^1[$, avec $\gamma^0 \simeq \gamma^1$), l'objet recolle au préhenseur après un court décollement. Ce cas est appelé **limite de saisie** et est représenté sur la figure 7.

- de façon similaire, quand l'accélération $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}$ dépasse de façon infime l'intervalle cité ci-dessus, un autre comportement est observé. L'objet se décolle du substrat mais ne parvient pas à s'accrocher au préhenseur et retombe ensuite sur ce même substrat. Ce cas est représenté sur la figure 8 et est appelé **limite de dépose**. La valeur seuil γ^1 marque le point de transition entre la saisie et la dépose. Elle est donc appelée **accélération limite**.

- Enfin, pour des valeurs d'accélération nettement supérieure à cette limite, la distance $\mathbf{D_1}$ reste fixée à sa valeur initiale tandis que $\mathbf{Y_p}$ augmente. Ce comportement traduit la séparation entre le préhenseur et l'objet. Ce cas est appelé **dépose dynamique** en regard de la valeur très importante de l'accélération et est représenté sur la figure 9.



Evolution de $\mathbf{D_1}$

FIG. 8: Résultats de simulations : cas de la limite de dépose $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} \simeq \gamma^1$ avec $\gamma^1 = 3 \cdot 10^4\ m/s^2$

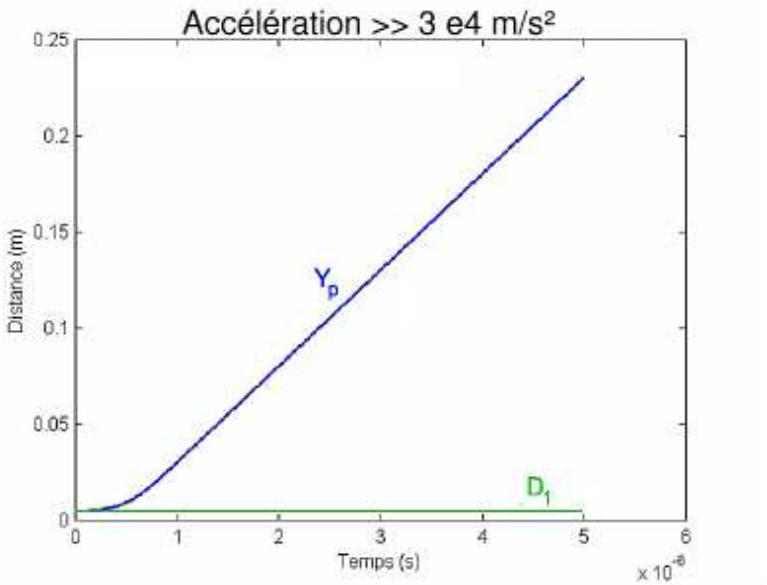


FIG. 9: Résultats de simulations : cas de la dépose dynamique $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} > \gamma^1$ avec $\gamma^1 = 3 \cdot 10^4\ m/s^2$

La figure 10 résume les différentes phases possibles en fonction de l'accélération instantanée appliquée à **t = 0** au préhenseur, pour un objet de rayon **50** μm avec une inclinaison du préhenseur nulle.

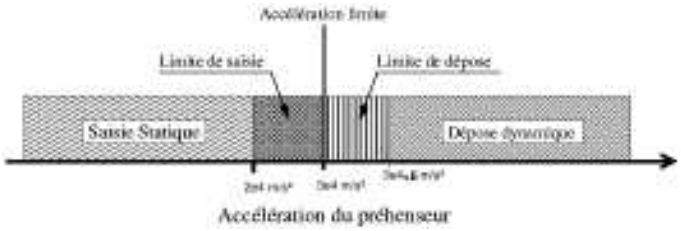


FIG. 10: Résumé des résultats de simulations en fonction de l'accélération

Influence des variations de $\mathbf{R_b}$ et Θ

Le simulateur a été configuré pour détecter l'accélération limite γ^1 pour un rayon et une inclinaison donnés. La technique utilisée est la dichotomie : la simulation est itérativement effectuée en augmentant ou diminuant la force appliquée afin d'encadrer la transition dans un intervalle dont la largeur est le centième de sa valeur centrale. Afin de déterminer l'influence de la taille de l'objet sur l'accélération limite γ^1, on utilise cette technique en faisant varier, dans un premier temps, le rayon de l'objet avec une inclinaison nulle du préhenseur (fig. 11).

Comme la physique du système semblait le laisser supposer, l'accélération nécessaire pour réaliser la dépose est d'autant plus importante que l'objet est petit. Cette variation est due à la force d'inertie qui apparaît dans la condition de transition. Cette force dépend à la fois de l'accélération du préhenseur par rapport au substrat et de la masse de l'objet manipulé, donc intrinsèquement de son rayon au cube.

Les mêmes simulations sont alors effectuées en fixant le rayon à **50** μm et en faisant varier l'inclinaison θ du préhenseur. La figure 12 représente la variation de l'accélération limite en fonction de l'angle θ. La valeur de cette accélération limite décroît proportionnellement au cosinus de l'angle θ. Quand cette valeur atteint **37** degrés, la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet devient inférieure à la somme de l'adhésion du substrat et du poids de l'objet. La condition de saisie statique n'est plus vérifiée : il est donc impossible d'effectuer la saisie. En d'autres termes, l'objet est toujours déposé.

L'objectif de cette étude théorique est la détermination des conditions expérimentales nécessaires à la réussite des phases de saisie et de dépose. Il

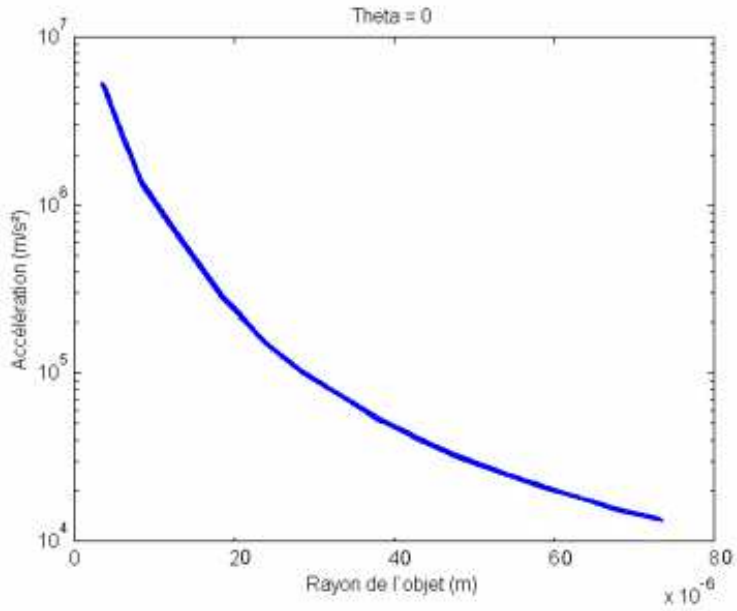


FIG. 11: Influence de la variation du rayon sur l'accélération limite γ^1

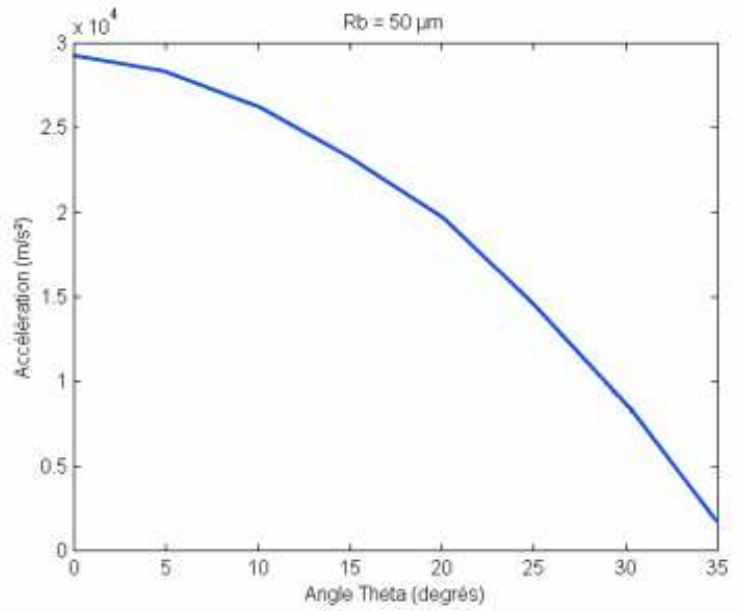


FIG. 12: Influence de la variation de l'angle θ sur l'accélération limite γ^1

a été démontré que la saisie est réalisable si et seulement si les conditions statiques sont vérifiées. La réussite de l'opération de dépose dépend des dif-

férents paramètres qui déterminent l'accélération minimale nécessaire à la dépose. Ces paramètres sont, en plus des caractéristiques intrinsèques des matériaux, la masse de l'objet manipulé et l'angle θ de l'inclinaison du préhenseur. Des simulations itératives sont effectuées pour déterminer la valeur de cette accélération limite en fonction de ces paramètres pour des triplets de matériaux [substrat,objet,préhenseur] donnés.

La figure 13 illustre les résultats de ces simulations. L'objet manipulé est considéré comme sphérique et la variation de son rayon est utilisée pour paramétrer sa masse. Pour effectuer la dépose, le point représentatif de l'accélération fournie au système doit être au-dessus de la surface exprimant la valeur limite pour un angle et un rayon donnés.

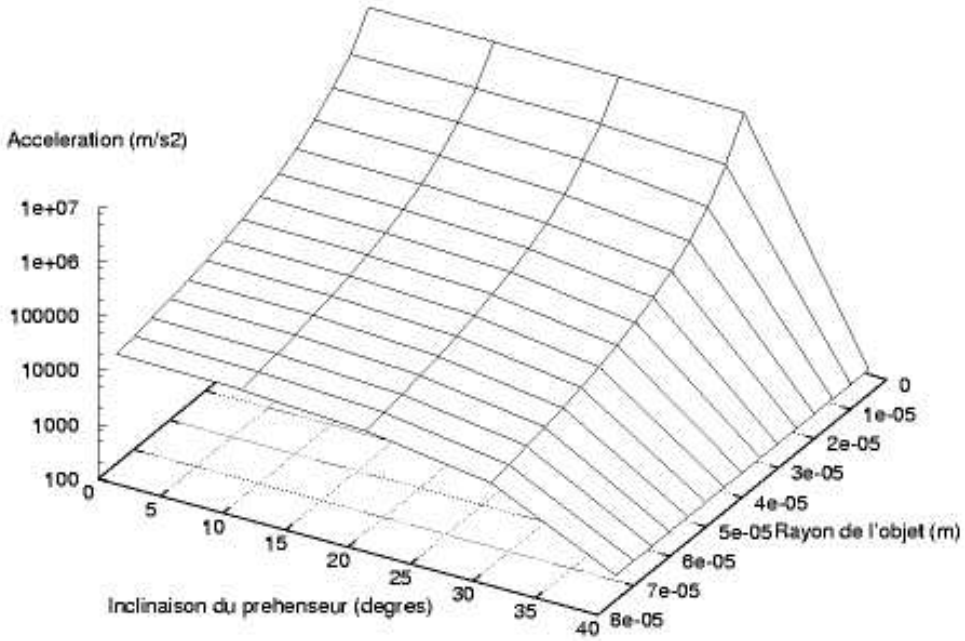


FIG. 13: Limite d'accélération minimum nécessaire pour effectuer la dépose en fonction du rayon de l'objet manipulé et l'inclinaison du préhenseur

Ces simulations démontrent qu'il est possible de réaliser une tâche de micro-manipulation en utilisant le phénomène d'adhésion. Le préhenseur utilisé est une poutre et elle est simplement mise en contact avec l'objet à manipuler. Le choix de l'opération, saisie ou dépose, se fait par le biais de l'inclinaison du préhenseur et/ou de son accélération.

Pour l'opération de saisie, il suffit que la force d'adhésion à l'interface objet/préhenseur soit supérieure à la somme du poids de l'objet et de la force d'adhésion à l'interface objet/substrat.

Pour l'opération de dépose, une forte accélération imposée au préhenseur et supérieure à une valeur seuil γ^1 appelée 'accélération limite', , crée sur l'objet, une force d'inertie supérieure à la force d'adhésion du préhenseur et provoque la séparation. Cette 'accélération limite' est d'autant plus élevée que l'objet est petit et dans les cas extrêmes, atteint des valeurs aussi élevées que 10^7 m/s^2. Ce phénomène est dû à la dépendance de la force d'inertie à la masse de l'objet. L'augmentation de l'inclinaison du préhenseur diminue cette accélération limite, proportionnellement au cosinus de l'angle d'inclinaison θ. Ce phénomène s'explique par la décroissance de la force d'adhésion objet/préhenseur en projection sur l'axe verticale d'un facteur $\cos\theta$, donc de la réduction du rapport (adhésion préhenseur)/(adhésion substrat) du même facteur. Néanmoins, pour pouvoir négliger le couple généré par cette inclinaison, il faut limiter cette inclinaison, par exemple à 45°. Dans ce cas, le facteur de réduction sera de 0.7.

4 Modèles et simulations réalistes

Le modèle dynamique et les simulations présentées dans les paragraphes précédents sont basés sur l'hypothèse suivante : tous les corps appartenant au système sont considérés rigides et indéformables. Or une relation directe entre les déformations et les forces d'adhésion, notamment pour les forces de Van der Waals (à travers le changement de la superficie de la zone de contact) est clairement établie [Hecht, 1990] [Johnson, 1985]. Les méthodes utilisées précédemment ne permettent pas la prise en compte de ces déformations. Effectivement, une résolution analytique du système devient très difficile si l'influence des déformations est ajoutée de façon réaliste au système.

La meilleure approche de ce problème est l'utilisation de la méthode des éléments finis. Cette technique permet d'utiliser des modèles en trois dimensions des composants du système. Avec un choix judicieux dans le nombre et la distribution des noeuds, il est ainsi possible d'obtenir une solution très réaliste au problème. Le logiciel choisi est **ANSYS**. En plus des fonctions classiques d'un logiciel de calcul EF, il présente la possibilité d'effectuer des simulations dynamiques pas à pas et de définir des forces 'virtuelles' entre les différents noeuds. Cette dernière particularité permet de modéliser les forces d'adhésion entre les différents médias.

Les forces de Van der Waals dépendent fortement de la distance et de l'aire de la zone de contact. La déformation due au contact ou tout sim-

plement à l'influence des forces d'adhésion, modifie donc le comportement et le module de ces dernières. Ce phénomène est décrit dans les théories JKR ou DMT, présentées dans la cinquième chapitre. La modélisation en éléments finis prend intrinsèquement compte de l'influence des déformations au contact sur les modules des forces surfaciques. Il n'est donc pas nécessaire d'implémenter ces théories dans le code du logiciel.

4.1 Étude de la déformation de la sphère

Deux cas de déformation sous l'influence des forces de Van der Waals sont étudiés. Le préhenseur supposé rigide est mis en contact avec l'objet. Le premier cas correspond à la situation qui précède infinitésimalement le contact et le deuxième le contact proprement dit. Afin d'alléger le temps de calcul, seulement 1/8ième de la sphère est utilisée (fig. 14).

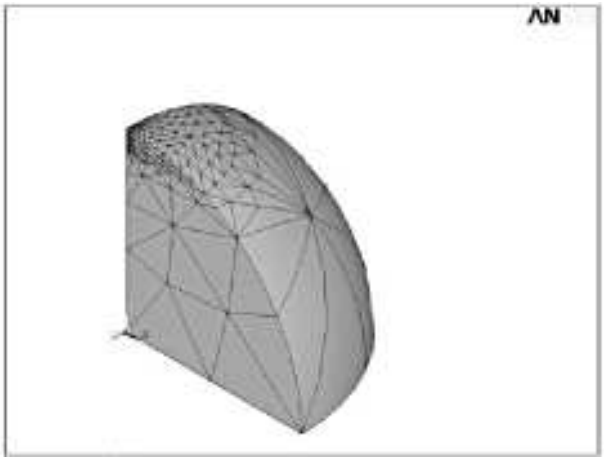


FIG. 14: Modèle EF de l'objet (1/8 de la sphère)

La force de Van der Waals est définie entre chaque noeud d'un solide et tous ceux de l'autre solide. Elle s'exprime de façon suivante :

$$\mathbf{F_{V\,dW}} = \frac{\mathbf{As}}{6\pi \mathbf{D}^3}$$

avec :

- $\mathbf{F_{V\,dW}}$ la force de Van der Waals appliquée en chacun des noeuds des deux solides.
- $\mathbf{A}$ la constante de Hamaker entre le verre et le silicium ($\sim 1,909 \cdot 10^{-19}\ \mathbf{J}$)
- $\mathbf{s}$ l'unité de surface élémentaire.
- $\mathbf{D}$ la distance entre les noeuds d'application de la force.

Dans le premier cas, le préhenseur est placé à **0.4 nm** au dessus de la sphère. Pour réduire le temps de calcul et garantir la fiabilité de la solution, le maillage de celle-ci est affiné dans un rayon de **500 nm** autour du point de contact. La figure 15 montre l'amplitude de la déformation de la sphère autour du point de contact. Ces résultats montrent que l'objet est 'étiré' vers le préhenseur. L'amplitude maximale, atteinte évidemment au sommet de la sphère, est de l'ordre de **30 nm**.

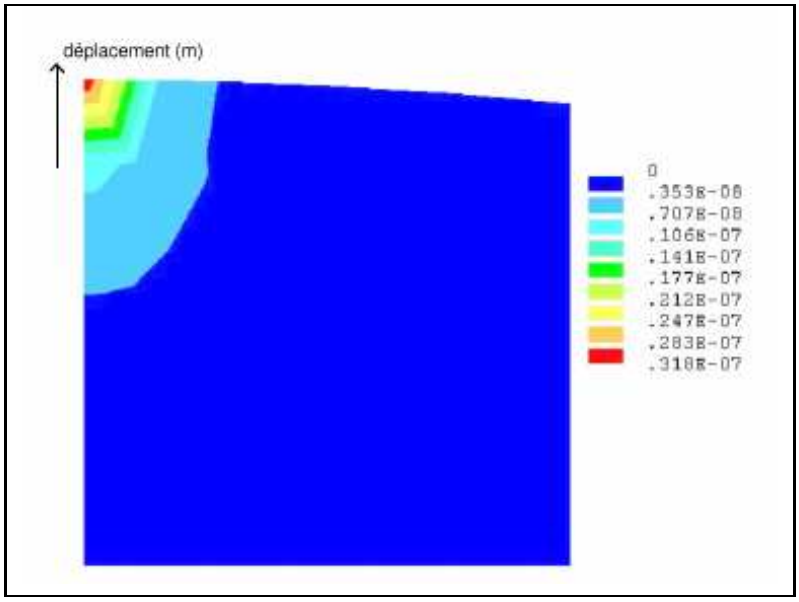


FIG. 15: Déformation pré-contact

Dans le deuxième cas, la sphère est modélisée en contact avec le préhenseur.
La figure 16-a montre le maillage éléments finis du système et la figure 16-b les résultats de la simulation. Dans ce cas, la déformation constatée est inversée par rapport au cas précédent. L'objet, au lieu d'être étiré vers le préhenseur, est aplati autour du point de contact. L'amplitude de la déformation est de l'ordre de **10 nm**.

Ces deux études montrent que même pour un objet relativement rigide, la déformation varie considérablement autour de l'instant de contact en changeant de sens et atteint des valeurs suffisamment grandes pour modifier les forces d'adhésion. Dans le cas de manipulation d'objet plus "mou" comme une cellule, ces déformations sont beaucoup plus importantes et influencent le déroulement des phases de saisie et de dépose. Une analyse dynamique

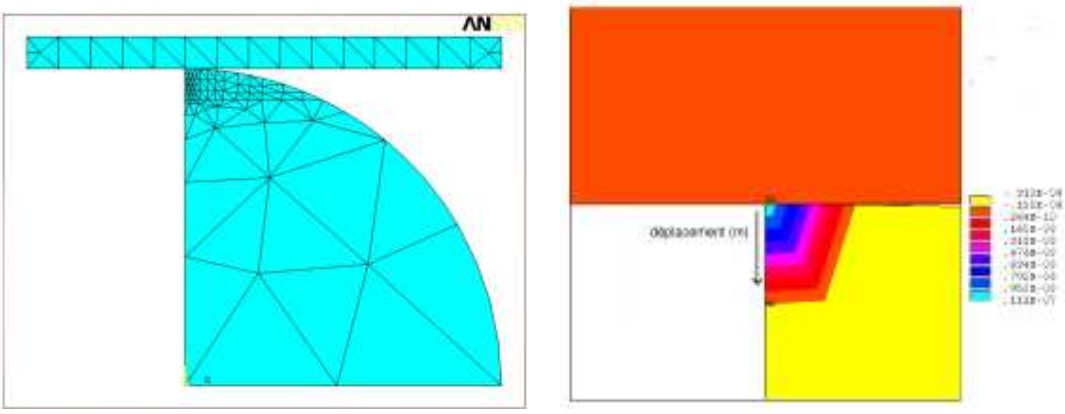


FIG. 16: (a) Modèle EF de l'objet en contact (b) Déformation au contact

par méthode des éléments finis va donc permettre la quantification de ces influences.

4.2 Simulations dynamiques par éléments finis

Afin de simplifier la simulation et de limiter le temps de calcul, le problème est ramené à deux dimensions, en utilisant la propriété d'axisymétrie. Un disque de rayon **10** μm est utilisé pour représenter l'objet manipulé. Le substrat est ensuite représenté par un quadrilatère. Le préhenseur n'est pas modélisé en tant que solide. Il est remplacé par un champs de force, modélisant les forces de Van der Waals s'appliquant sur l'objet à une distance d'interaction **D**. Les forces de Van der Waals sont prises en compte entre le substrat et l'objet par une modélisation noeud à noeud. Pour simuler le mouvement du préhenseur, la distance d'interaction **D** est progressivement augmentée. Le comportement de l'objet dépend de la vitesse du déplacement du préhenseur.

Les résultats sont présentés sur la figure 17. Les plages de saisie et de dépose sont données en fonction du déplacement imposé dans un intervalle de temps donné. En terme d'accélération, la limite supérieure de la saisie (donc l'accélération minimum pour la dépose) correspond à $\mathbf{10}^5$ m/s^2. Cette limite est légèrement inférieure aux résultats obtenus avec la simulation corps rigide pour le même exemple, soit $\sim$ $\mathbf{10}^6$ m/s^2. Il semble donc plus facile d'effectuer la dépose que cela n'avait été prévu dans l'hypothèse de corps rigides. Néanmoins, les résultats sont conformes quant au comportement général du système et les transitions entre les différents états 'attaché' et 'détaché' apparaissent de façon identique. On peut donc conclure à la validité des résultats

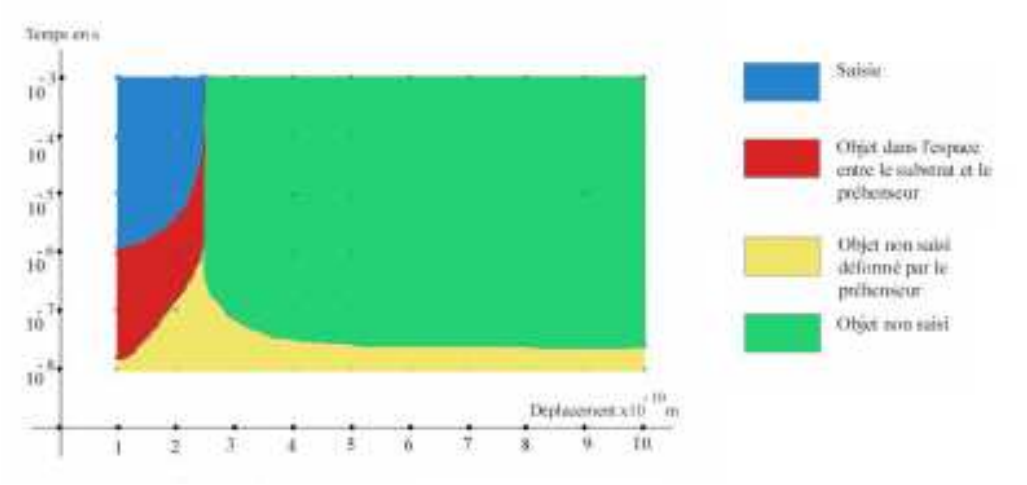
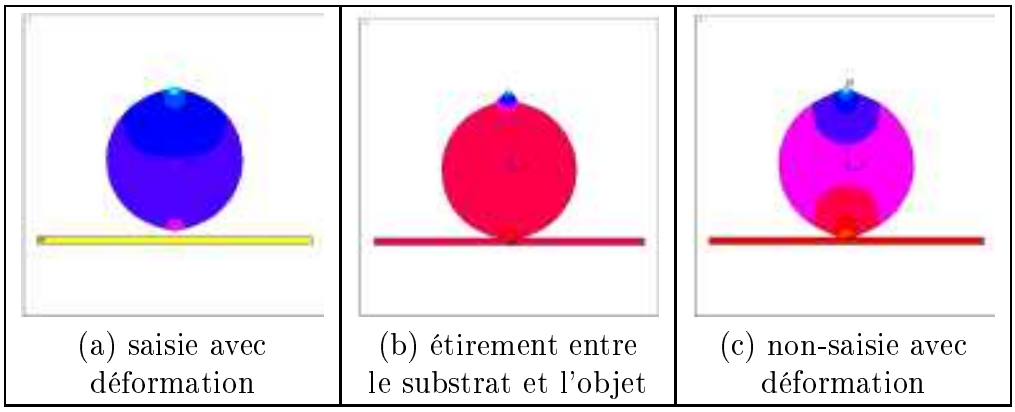


FIG. 17: Plages de saisie et de dépose pour une sphère en verre

obtenus avec l'approche corps rigide, même si les valeurs limites sont modifiées.

La même étude est réalisée pour un objet biologique, plus élastique, en remplaçant le module d'Young de l'objet par le module élastique d'une cellule endothéliale [Waché *et al.*, 2000]. Le changement de ce module modifie le comportement du système. Il apparaît une situation ignorée dans le modèle en corps rigide, où l'objet reste collé simultanément au préhenseur et au substrat et est étiré entre les deux. Ce cas de figure risque probablement d'endommager les objets biologiques. La figure 18 montre les déformations subies par l'objet au cours de la manipulation.



(a) saisie avec déformation | (b) étirement entre le substrat et l'objet | (c) non-saisie avec déformation

FIG. 18: Déformations subies par un objet élastique au cours de la simulation

Les résultats des simulations avec cet objet sont représentés à la figure 19. Il semble plus judicieux d'utiliser la vitesse pour interpréter ces résultats : en effet, le comportement visco-élastique de l'objet dépend de la vitesse et l'accélération instantanée n'est plus suffisante pour décrire et prévoir le comportement du système.

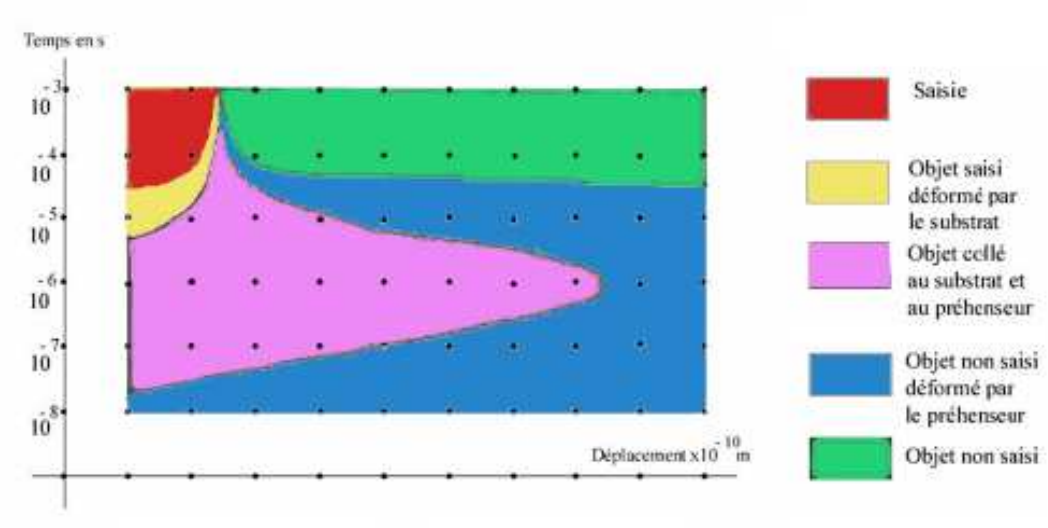


FIG. 19: Plages de saisie et de dépose pour un objet biologique

La limite inférieure de dépose est considérablement réduite à cause de l'élasticité de l'objet. En effet, il s'avère que contrairement au cas des objets rigides où la saisie s'effectue facilement, dans le cas de l'objet hautement élastique l'influence de la vitesse devient prédominante et la génération de trajectoire du préhenseur demande alors plus d'attention. Néanmoins, le mode de manipulation proposé s'avère applicable pour ce type d'objet, bien que le contrôle des opérations de saisie et de dépose soit plus contraignant.

5 Application du modèle en milieu aqueux

La recherche biologique a atteint un stade où l'étude des corps biologiques isolés est fortement requise. Cette demande nécessite un outil de manipulation adapté à ces objets biologiques, dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que l'échelle étudiée dans ce mémoire. Néanmoins, les objets biologiques se présentent en solution aqueuse, indispensable à leur survie. Il s'agit donc de déterminer la validité du mode de manipulation proposé dans

un tel environnement.

Le modèle dynamique mis en place inclut les facteurs relatifs à l'environnement sec ou légèrement humide présents dans tous les cas envisagés. Il peut être simplement modifié pour être transposé à des environnements différents. Il suffit alors d'ajouter aux modèles précédents, les effets et les forces appropriés. Dans le cas de l'environnement aqueux, la modification majeure est due à la viscosité du milieu [Butt, 1991]. Elle peut être prise en compte en incluant une force visqueuse proportionnelle à la vitesse et à la traînée de l'objet et du préhenseur[Lee, 1991]. Le modèle dynamique en milieu aqueux, pour le cas détaché, peut donc être formulé ainsi :

$$\mathbf{m_p \ddot{Y}_p} = \mathbf{F^{ext}} - \mathbf{F^{po}_{adh}(D_2)} \cos\theta - \mathbf{T_p \dot{Y}_p} - \mathbf{m_p g} \quad (8)$$

$$\mathbf{m_o \ddot{D}_1} = \mathbf{F^{po}_{adh}(D_2)} \cos\theta - \mathbf{F^{os}_{adh}(D_1)} - \mathbf{T_o \dot{D}_1} - \mathbf{m_o g} \quad (9)$$

$$\mathbf{Y_p} = \mathbf{D_1} + 2\mathbf{R_o} + \mathbf{D_2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{\ddot{D}_2} = \mathbf{\ddot{Y}_p} - \mathbf{\ddot{D}_1} \quad (10)$$

$\mathbf{T_p}$ et $\mathbf{T_o}$ représentent respectivement la traînée du préhenseur et de l'objet manipulé. Rappelons que le modèle attaché est un cas particulier du cas détaché, obtenu pour $\mathbf{D_1} = \mathbf{Y_p}$. L'influence de cette force apparaît plus particulièrement dans la condition de détachement. Le bilan des forces s'appliquant sur l'objet, s'écrit comme précédemment :

$$\mathbf{m_o \ddot{D}_2} = \mathbf{F^{po}_{adh}(D_2} = 0.4\,\mathbf{nm)} \cos\theta - \mathbf{F^{so}_{adh}(D_1)} - \mathbf{m_o\, g} - \mathbf{m_o\, \ddot{Y}_p} - \mathbf{T_o \dot{Y}_p} \quad (11)$$

Dans le cas de l'environnement sec, le paramètre principal contrôlable pour maîtriser la transition saisie/dépose est la force inertielle à travers l'accélération du préhenseur. Dans le cas présent, la force visqueuse contribue aussi à la dépose. Cette force dépendant de la vitesse, il apparaît donc une notion de 'vitesse limite', à l'instar de l'accélération limite, pour différencier les domaines de saisie et de dépose.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle analytique basé sur un exemple canonique de tâche de manipulation est proposé. Ce modèle, incluant les phases de saisie et de dépose d'un objet sphérique en utilisant un préhenseur plan simple, est simulé en utilisant une approche pas à pas numérique. Elle permet de déterminer les conditions nécessaires pour assurer le succès de ces opérations. Différentes propriétés sont alors observées. D'une part, la saisie est possible si

les conditions statiques relatives aux énergies d'interactions entre les couples de matériaux [objet/préhenseur] et [objet/substrat] sont vérifiées. D'autre part, la dépose est effectuée en contrôlant la force d'inertie s'appliquant sur l'objet à travers l'accélération fournie au préhenseur. De plus, les simulations démontrent que l'accélération limite permettant la dépose est souvent très élevée et peut atteindre 10^6 m/s^2 dans certains cas.

Une modélisation par éléments finis est aussi proposée pour étudier les limites des simulations en corps rigide. Elle montre une similitude satisfaisante avec l'approche corps rigide, validant ainsi cette dernière.

Ensuite, ce modèle a été adapté pour illustrer la manipulation dans un milieu aqueux. Cette modification est réalisée par l'adjonction au modèle classique, de la force visqueuse propre à ce milieu . Cette dernière avait été négligée dans le cas de l'environnement sec. Un changement significatif apparaît dans le comportement du système : une notion de vitesse limite séparant les domaines de saisie et de dépose. Ce phénomène permet de supposer que la manipulation par adhésion en milieu aqueux est elle aussi réalisable. Elle semble même plus aisée puisqu'elle nécessite de générer une vitesse relativement faible au lieu de mettre en place des accélérations de très forte amplitude.

Les résultats de ces simulation conduisent à la détermination des exigences technologiques pour la réalisation d'un manipulateur prototype. Dans le chapitre suivant, la définition du cahier des charges et la conception du site expérimental sont présentées.

Chapitre III

Conception et réalisation du prototype

Durant les chapitres précédents, une analyse des travaux de micro-manipulation puis des modélisations dynamiques sous l'hypothèse de corps rigides et éléments finis ont été proposées. Le logiciel de simulation développé autour d'une tâche choisie n'est validé que si les résultats peuvent être vérifiés expérimentalement. Il s'agit donc, dans ce chapitre, d'étudier la conception d'un prototype entièrement dédié à la micro-manipulation par adhésion. L'objectif de celui-ci n'est pas simplement de montrer la faisabilité de la manipulation par adhésion (cette hypothèse a déjà été démontrée par [Rollot *et al.*, 2001]), mais surtout de développer un système fiable et répétable pour explorer toutes les potentialités de cette approche.

Afin de rendre le système évolutif, il faut réfléchir attentivement à ses différents composants. C'est pourquoi la première partie de ce chapitre est dédiée à la rédaction d'un cahier des charges. Puis, une seconde partie présente le préhenseur actif, le composant essentiel du manipulateur. La partie suivante étudie les composants du préhenseur, l'actionneur et l'outil terminal, en fonction des caractéristiques nécessaires à la manipulation. Enfin, la dernière partie s'intéresse au prototype réalisé et le décrit en détails avec tous les éléments technologiques.

1 Cahier des charges

Un manipulateur destiné aux objets microscopiques est un outil complexe composé de différents éléments accomplissant chacun une tâche précise dans le cadre d'une opération donnée. Outre les composants mécaniques, les niveaux de commande et de contrôle ainsi que l'interface utilisateur doivent

être étudiés.

La figure 1 représente le schéma fonctionnel du système, sur lequel la conception du manipulateur est basée. Chaque composant est représenté en fonction de ses interactions avec les autres. Un segment de droite représente une liaison mécanique, tandis que les flèches représentent une interaction uni ou bilatérale. Cette dernière peut exprimer soit une liaison physique (comme dans le cas du préhenseur avec l'objet), soit un échange de données (comme le cas du bloc déplacement et du module de commande).
Les descriptions des composants technologiques du système sont données ci-dessous :

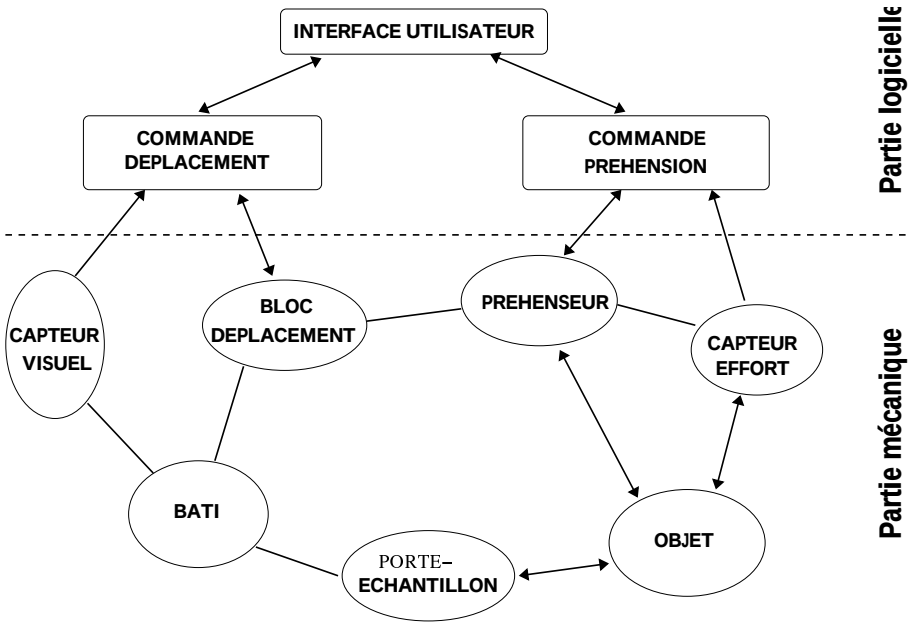


FIG. 1: Schéma fonctionnel du manipulateur

- **Partie mécanique**
  - **Le préhenseur** est le coeur du système de micro-manipulation. Dans le chapitre précédent, un mode de manipulation a été présenté et sa faisabilité évaluée. Il s'agit de proposer une solution technologique conforme aux conclusions de l'étude théorique.

  - **Le capteur d'efforts**, intégré au préhenseur, permet de contrôler l'effort appliqué à l'objet manipulé. Les efforts mis en jeu lors des contacts avec des micro-objets sont de l'ordre du μN

  - **Le bloc de déplacement** fournit les translations et les rotations nécessaires au préhenseur pour l'accomplissement de la tâche de manipulation. Sa résolution et sa précision doivent être adaptées à l'échelle. Une résolution sub-micrométrique est donc nécessaire.

  - **Le porte échantillon** définit la zone d'interaction initiale entre l'objet et le manipulateur. Il peut s'avérer utile de le doter de quelques degrés de libertés supplémentaires, facilitant ainsi l'accès du préhenseur à la zone de travail.

  - **La visualisation** des opérations à l'échelle microscopique nécessite un grossissement approprié. Il faut donc prévoir un instrument tel qu'un microscope et/ou des caméras à forte amplification.

- **Partie logicielle**
  - **La commande** comporte plusieurs niveaux. Le premier niveau, le plus simple, fournit un mode de contrôle manuel à l'utilisateur qui déterminera la trajectoire à accomplir. A partir de cette base, différentes fonctionnalités peuvent être adjointes donnant accès aux autres niveaux. Le second niveau correspond au mode semi-automatique (où l'utilisateur fournit la position finale) et, le troisième niveau, permet d'accéder au mode automatique (où le manipulateur est capable d'effectuer une tâche prédéfinie de façon répétitive avec une intervention minimum de l'utilisateur) pour lequel il convient d'intégrer les commandes référencées vision et efforts.

  - **L'interface utilisateur** est un logiciel de type panneau de contrôle, qui centralise et fournit un accès aux fonctionnalités bas niveau du manipulateur.

L'étude théorique préalable présentée au chapitre précédent a déterminé les contraintes du mode de manipulation par adhésion. La connaissance de ces contraintes, et de celles imposées par le mode de manipulation, permet de proposer des solutions technologiques. Le tableau 1 récapitule toutes les contraintes de conception en fonction des composants sur lesquels elles s'appliquent.

Il ne semble pas utile de réduire à l'échelle tout le manipulateur, la seule miniaturisation du préhenseur est suffisante. Le bloc déplacement, avec une commande judicieuse en boucle fermée et par traitement d'information visuelle, fournit la précision sub-micrométrique au système. La détection du

Contrainte	**Composant**
Contraintes technologiques	
Miniaturisation	Préhenseur
Précision sub-micrométrique	Bloc déplacement, capteur visuel, commande déplacement
Détection du contact et de l'effort appliqué à l'objet	Capteur effort, commande préhenseur
Contraintes provenant de l'étude théorique	
Saisie : Adhésion préhenseur > Adhésion substrat	Préhenseur, porte-échantillon
Dépose statique : Outil terminal inclinable	Préhenseur
Dépose dynamique : Fortes accélérations	Préhenseur

TAB. 1: Cahier des charges : Contraintes et composants correspondants

contact, ou de façon plus élaborée le contrôle de l'effort appliqué à l'objet manipulé, repose sur les informations transmises par le capteur d'efforts du préhenseur. Enfin, il faut ajouter les contraintes du mode de manipulation par adhésion. Pour la phase de saisie par simple contact, les matériaux constitutifs, déterminant la force d'adhésion, sont une première exigence. La seconde contrainte, quand à elle, est liée à l'opération de dépose. D'une part, le système proposé doit être capable de produire les fortes accélérations pour la dépose dynamique. D'autre part, un degré de liberté supplémentaire est nécessaire pour incliner le préhenseur pour la dépose statique.

Le produit visé est un prototype, il est donc utile dans cette première phase de développement de faciliter l'intervention de l'utilisateur au bas niveau de commande et de lui permettre une surveillance indépendante et directe du système en plaçant le manipulateur, du moins la partie préhension, sous un microscope optique. Ce choix contraint fortement l'opération en limitant la zone de manipulation au champ visuel du microscope, mais permet à l'utilisateur de procéder aux différentes mises au point technologiques et logicielles, facilitant ainsi la phase de développement.

Le cahier des charges montre clairement qu'il faut introduire des innovations importantes dans plusieurs domaines, notamment en ce qui concerne la capacité à produire de fortes accélérations tout en respectant la contrainte de miniaturisation. En revanche, pour le bloc déplacement, les exigences peuvent

être traitées dans la phase de prototypage avec des solutions existantes, tels que des systèmes de déplacement intégrés 3 axes avec des résolutions submicrométriques, commercialement disponibles. Le travail de conception se concentre donc sur le préhenseur, une solution adaptée aux différents aspects de la manipulation est présentée et discutée dans la suite de ce document.

2 Etude du 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 les deux différents modes de dépose. Son étude est donc proposée sous cet angle, en fonction des phases du mode de manipulation.

Un autre aspect important du préhenseur est la détection du contact et de l'effort. En fonction des limitations du travail sous microscope et de la contrainte de miniaturisation, l'unique moyen de mesure disponible dans ce cas est la mesure directe. Il est donc impossible de séparer l'outil terminal du capteur d'effort si une mesure continue en temps réel est désirée. Il faut donc impérativement proposer une solution pour le préhenseur intégrant un capteur d'efforts.

2.1 Solutions proposées pour la phase de saisie

Les contraintes s'appliquant lors de la phase de saisie sont la miniaturisation, la valeur plus élevée de l'adhésion à l'interface objet/préhenseur comparée à l'interface objet/substrat et le capteur d'efforts intégré.

L'étude des forces d'adhésion, présentée dans le premier chapitre, permet de limiter la contrainte relative à la force d'adhésion sur la partie du préhenseur mise en contact avec l'objet manipulé. Il suffit donc de déterminer un matériau constitutif pour l'outil terminal. Sachant qu'un des facteurs importants qui influence l'amplitude des forces d'adhésion est la rugosité, il est nécessaire d'avoir un état de surface le plus parfait possible.

La fabrication d'un micro-système demande des moyens importants et un savoir-faire considérable. Avant d'opter pour une solution onéreuse en coût et en temps de sous-traitance, on a fait une recherche parmi les composants existant dans des domaines similaires, pour vérifier s'ils peuvent être détournés de leur fonction première et adaptés au système proposé. Ainsi, les microscopes à force atomique, appelé "AFM" de l'anglais "Atomic Force Microscopy" présentent des caractéristiques intéressantes [Rollot *et al.*, 1998b]

Les systèmes d'AFM

Les investigations ont conduit à l'étude de micro-poutres piézorésistives utilisées dans les systèmes AFM (Atomic Force Microscopy) [Tortonese *et al.*, 1991] [Minne *et al.*, 1995][Manalis *et al.*, 1995]. Ces systèmes présentent plusieurs avantages :

- ils sont de taille réduite ;
- ils permettent, du fait de leur nature piézorésistive, de mesurer des efforts avec une résolution de l'ordre du nano-newton ;
- la poutre étant en silicium monocristallin et fabriquée par procédé de "bulk micro-machining", ces systèmes présentent un état de surface exceptionnel et une bonne énergie d'adhésion ;
- ils possèdent un faible encombrement et une facilité de mise en oeuvre.

Ces systèmes intègrent un pont de Wheatstone dont les éléments résistifs, gravés au niveau de l'encastrement, permettent de quantifier de très faibles flexions de la poutre. Le système atteint des résolutions élevées et est donc très attractif pour ce problème de manipulation.
Ainsi, le choix s'est orienté vers l'utilisation de ce système comme préhenseur. L'élément retenu est présenté sur la figure 2, il est composé d'une poutre de silicium mono-cristallin d'orientation **< 100 >**, et de dimensions **600**x**140**x**10** μm^3. L'ensemble poutre-pont de Wheaststone, d'une masse totale de $\mathbf{m_p} = 0,1\,\mathbf{g}$, est fixé à un support en alumine (**5**x**8** $\mathbf{mm}^2$) sur lequel sont gravées les bornes de connexion du pont.

Pointe	
Longueur	600 μm
Largeur	140 μm
Épaisseur	10 μm
Fréquence de résonance	$\approx$ **40 kHz**
Pont de Wheatstone	
Résistance du pont ($\mathbf{R}_\pi$)	1.3 kΩ
Dissipation de puissance max.	**1 mW**

FIG. 2: 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 micro-topologie 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 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 nm** de Titane (couche d'accrochage) puis un dépôt de **50 nm** d'or. La figure 3 illustre la poutre en fin de phase de métallisation.

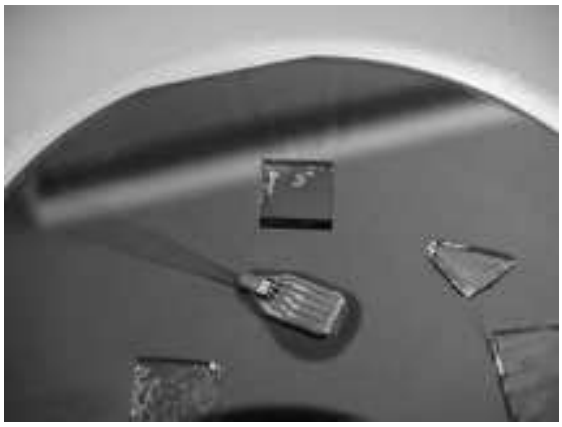


FIG. 3: Poutre piézorésistive durant la phase de métallisation

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

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

Afin de quantifier les déflexions et les tensions de sortie, la figure 4 donne un exemple de courbe obtenue lors d'un essai de flexion sur un support en PEEK.

Cet élément présente donc toutes les caractéristiques exigées du préhenseur pour effectuer l'opération de saisie, conformément à l'approche théorique proposée au chapitre précédent. Les solutions technologiques relatives à la phase de dépose sont donc effectuées à partir de ce composant.

2.2 Solutions technologiques proposées pour la phase de dépose

Deux modes de dépose ont été proposés dans le chapitre précédent : (1) le mode statique, effectué en inclinant le préhenseur et (2) le mode dynamique,

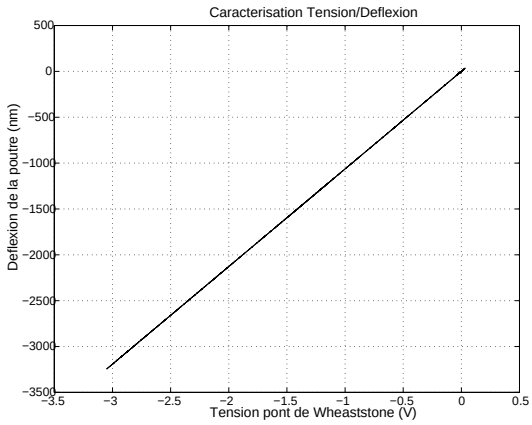


FIG. 4: Caractérisation de la poutre lors d'un essai de flexion par contact avec un support en PEEK

en utilisant une forte accélération du préhenseur. Ces deux cas sont étudiés séparément.

Dépose statique

Pour ce type de dépose, il suffit d'incliner le préhenseur par rapport au substrat. Cette inclinaison, d'un angle θ, réduit les forces d'adhésion entre le préhenseur et l'objet manipulé d'un facteur $cos\theta$ en projection sur l'axe vertical. Il suffit donc d'ajouter un degré de liberté au préhenseur, permettant ainsi un mouvement de liaison pivot. Celle-ci est placée à l'amont du préhenseur pour faciliter la mise en oeuvre. L'axe de rotation a été choisi horizontal et perpendiculaire à la poutre de l'AFM afin de bien visualiser l'angle d'inclinaison.

Dépose dynamique

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 m/s^2. 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.

Les matériaux piézoélectriques produisent une quantité de charges proportionnelle à la contrainte appliquée (**effet inverse**) ou une déformation proportionnelle à la tension électrique appliquée (**effet direct**). Ils sont donc utilisables comme capteur (effet inverse) ou actionneur (effet direct). Ces phénomènes sont observables dans les monocristaux tels que le quartz (SiO_2), dans les polymères tels que le polyvinylidine fluoride (**PVDF**) ou dans les céramiques telles que les $Pb(ZR, Ti)O_3$, plus communément appelés **PZT**. Les mouvements générés sont assez faibles ($\delta l/l < 10^{-4}$). Une revue des utilisations de ces céramiques est présentée par [Uchi, 1995]. Les poutres piézoélectriques sont commandables par seule application d'une tension et ne dépendent pas "fortement" des facteurs environnants tels la température, l'humidité, la luminosité, etc. à l'inverse des gels polymères et des matériaux optiques. De plus, elles sont utilisées industriellement depuis plus de vingt ans et sont ainsi relativement mieux maîtrisées.

Par la suite, cette solution est adoptée sous réserve de la vérification de leurs capacités par des modélisations et des simulations numériques.

Proposition de géométrie du manipulateur

La géométrie de l'organe terminal du manipulateur est fixée avec l'utilisation d'une céramique piézoélectrique comme actionneur et d'une poutre piézorésistive comme préhenseur. Elle est présentée sur la figure 5. Par ses dimensions réduites, elle est adaptée à une manipulation sous microscope. Par la suite, l'étude est basée sur cette proposition.

Le rendement mécanique par rapport à l'excitation électrique d'une céramique piézoélectrique dépend de sa surface, il est donc préférable de la maximiser de façon à couvrir tout le circuit AFM. La céramique est ainsi collée au bâti à sa face supérieure, permettant de travailler en mode épaisseur, donc sur l'axe vertical. La liaison pivot permet d'incliner tout le préhenseur, actionneur compris, afin d'effectuer la dépose statique. Les caractéristiques exactes de la céramique (matériau, épaisseur, etc.) seront déterminées à l'aide des simulations numériques.

Cette configuration minimise le volume totale du préhenseur. Les deux types de dépose sont facilement réalisables séparément sans nécessiter une intervention technique pour, par exemple, un changement d'outil. Il est éga-

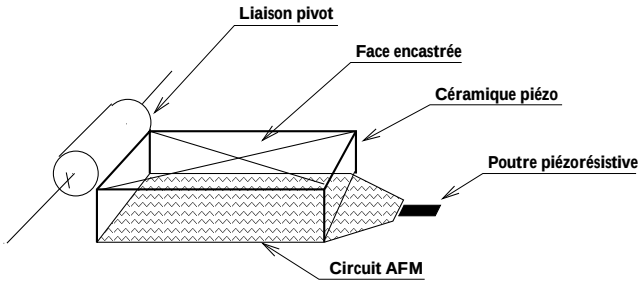


FIG. 5: Proposition de géométrie du préhenseur

lement possible de combiner les deux types de dépose en utilisant l'actionneur avec une inclinaison donnée, puisque celui-ci est toujours perpendiculaire à la poutre du système AFM.

3 Analyse numérique du préhenseur

En adoptant la géométrie proposée pour le préhenseur, une étude du comportement dynamique s'impose, d'une part, pour justifier le choix de l'actionneur piézoélectrique et, d'autre part, pour déterminer le système de commande.

Une étude théorique des céramiques piézoélectriques est proposée à l'annexe A [Dieulesaint et Royer, 1974]. Par la suite, à partir de la loi de comportement piézoélectrique, une analyse de l'actionneur est effectuée. L'objectif de cette étude étant de déterminer les capacités dynamiques du préhenseur, le comportement de la poutre du système AFM est exploré. Les deux analyses déterminent le comportement dynamique global du préhenseur.

3.1 Modèle dynamique de la céramique piézoélectrique

Dans le cas du système décrit précédemment à la figure 5, le problème peut être supposé unidimensionnel. Sous cette hypothèse, la déformation de la céramique suivant l'axe $\vec{\mathbf{z}}$ est donc indépendante des coordonnées $\mathbf{x}$ et $\mathbf{y}$ du point considéré. Une représentation schématique du problème est présentée sur la figure 6.

$\mathbf{u_z(t)}$ désigne le déplacement de la face inférieure de la céramique ainsi que le déplacement du circuit AFM, directement collé à cette face. $\vec{\mathbf{F}}$ est la force produite par la déformation de la céramique agissant sur cette face. $\mathbf{T}$ et $\mathbf{S}$, respectivement les tenseurs des contraintes et des déformations de la céramique (explicités en annexe A), sont des fonctions du temps ($\mathbf{t}$). Les

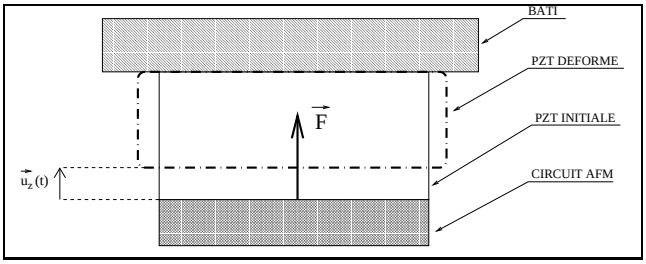


FIG. 6: Schéma simplifié du préhenseur pour l'étude dynamique

poids de la céramique et de l'AFM sont négligés.

Dans le cas où $\vec{\mathbf{F}}$ est la seule force agissant sur cette face, toutes les composantes du tenseur des contraintes $\mathbf{T(t)}$ sont nulles, sauf le terme $\mathbf{T_3}$, quelque soit $\mathbf{t}$. La condition limite à la face inférieure de la céramique est donc donnée par :

$$\mathbf{A\,T_3(t)\vec{z} = -\vec{F}(t)}$$

avec $\mathbf{A}$ la surface de la face inférieure.

De plus, en appliquant le principe fondamental de la dynamique à l'AFM, on obtient :

$$\mathbf{\vec{F}(t) = \ddot{u}_z(t)\,M\vec{z}}$$

avec $\mathbf{M}$ la masse du circuit AFM.

Ces deux équations permettent de déduire l'expression de $\mathbf{T_3(t)}$:

$$\mathbf{T_3(t) = -\frac{\ddot{u}_z(t)\cdot M}{A}} \tag{1}$$

Sous l'hypothèse que $\mathbf{S_3}$ est uniforme selon l'épaisseur, le tenseur des déformations $\mathbf{S}$, peut être relié à l'épaisseur $\mathbf{e}$ de la céramique par [Uchino, 1997] :

$$\mathbf{e\cdot S_3(t) = u_z(t)} \tag{2}$$

De même, la différence de potentiel $\mathbf{v(t)}$ appliquée aux bornes de la céramique est liée au champ électrique $\mathbf{E}$ par la relation :

$$\mathbf{(e + u_z(t))\cdot E_3(t) = v(t)}$$

Or, le déplacement $u_z(t)$ est très petit devant l'épaisseur e de la céramique ($e + u_z(t) \simeq e$). La relation suivante peut donc être obtenue :

$$e \cdot E_3(t) \simeq v(t) \tag{3}$$

La loi de comportement piézoélectrique [Dieulesaint et Royer, 1974] donne la relation entre S (le tenseur des déformations), T (le tenseur des contraintes) et E (le tenseur de champ électrique), tous les termes de $T(t)$ étant nuls, sauf $T_3(t)$:

$$S_3(t) = s_{33}T_3(t) + d_{33}E_3(t)$$

s_{33} et d_{33} sont respectivement la compliance élastique et le coefficient de charge piézoélectrique. Ces deux termes sont des caractéristiques intrinsèques de la céramique piézoélectrique étudiée. En multipliant cette équation par l'épaisseur "e" de la céramique, on peut en déduire :

$$e \cdot S_3(t) = s_{33}\,(e \cdot T_3(t)) + d33\,(e \cdot E_3(t)) \tag{4}$$

En remplaçant dans l'équation 4, les expressions de $e \cdot S_3$, T_3 et $e \cdot E_3$ provenant respectivement des équations 2, 1 et 3, il vient :

$$u_z(t) = -\frac{\ddot{u_z}(t) \cdot M}{A} e \cdot s_{33} + d_{33}v(t) \tag{5}$$

Cette équation est le modèle dynamique du comportement de l'actionneur. En utilisant la transformée de Laplace, la fonction de transfert de la céramique piézoélectrique peut être déduite :

$$U(p) = H(p)V(p)$$

avec

$$H(p) = \frac{d_{33}}{1 + \frac{M \cdot e \cdot s_{33}}{A} p^2} \tag{6}$$

Cette fonction de transfert, d'ordre deux, donne l'information du comportement du système. Le terme d'amortissement est nul. Cette propriété est caractérisée sur le diagramme de Bode (fig. 7) par le pic de résonance.

Choix de l'actionneur

L'étude du modèle dynamique permet de déterminer les caractéristiques de l'actionneur en fonction des performances exigées. Ainsi, pour maximiser l'accélération, le rapport $\frac{d_{33}}{s_{33}}$ doit être le plus grand possible. De plus, les céramiques piézoélectriques sont limitées en valeurs maximales de champ

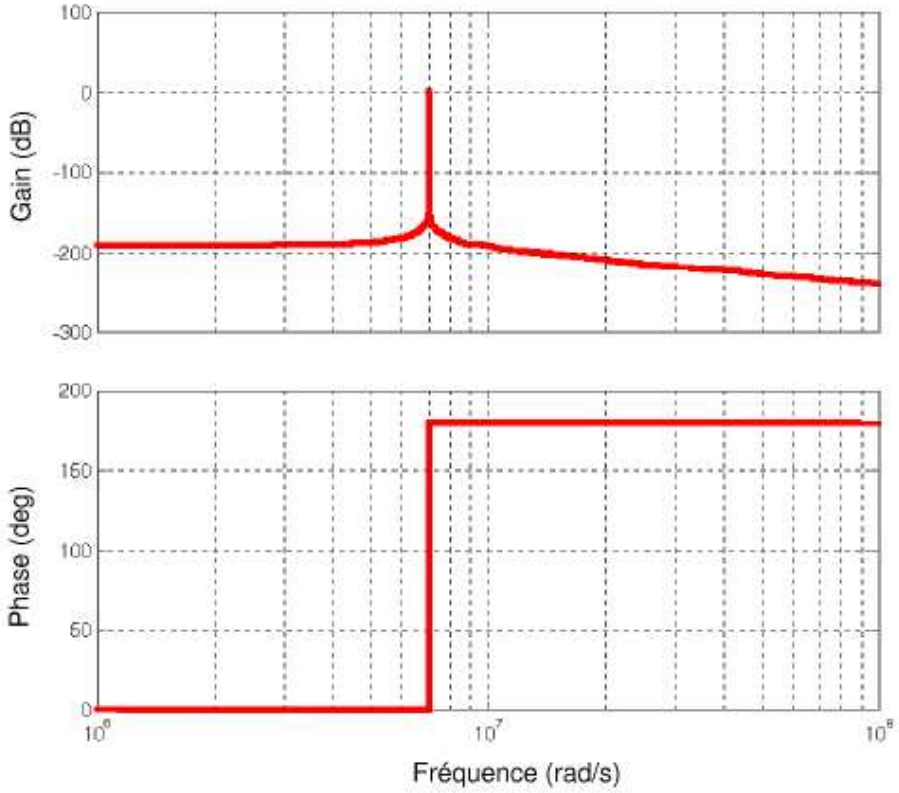


FIG. 7: Diagramme de Bode de la céramique piézoélectrique

électrique. Ainsi, la céramique choisie doit être capable de supporter la tension appliquée pour produire l'accélération initiale.

Les investigations effectuées auprès de plusieurs fabricants de matériel piézoélectrique ont permis de choisir une céramique PZT de type PI-89. Les caractéristiques de ce type de PZT sont $\mathbf{s_{33}} = 13,24 \cdot 10^{-12}\ \mathbf{m^2/N}$ et $\mathbf{d_{33}} = 240 \cdot 10^{-12}\ \mathbf{m^2/N}$. Une tension de l'ordre de $\mathbf{300\ V}$ est donc nécessaire pour produire la déformation désirée. La tolérance électrique de la céramique étant de $\mathbf{400\ V}/mm$, une épaisseur d'au moins $\mathbf{1\ mm}$ est nécessaire. De plus sa surface est directement proportionnelle à la performance dynamique de l'actionneur. Son épaisseur est donc fixée à cette valeur et sa surface est de même

dimension que le circuit AFM collé sur sa face inférieure, soit $8\,\mathbf{mm}$x$5\,\mathbf{mm}$.

3.2 Validation du choix de l'actionneur

A partir des précédentes équations et du modèle dynamique, un logiciel simulant le comportement de la céramique a été réalisé. Les détails de l'algorithme numérique pas à pas, à l'origine de ce simulateur, sont décrits dans l'annexe B.

Ce logiciel permet de calculer, en plus de la vitesse et de l'accélération instantanée de la céramique, la déformation induite en fonction d'une courbe de tension (déterminée par l'utilisateur) appliquée à ses bornes.
Afin de valider le modèle dynamique de la céramique piézoélectrique et le logiciel de simulation, une comparaison avec les résultats expérimentaux est ainsi proposée.

La fonction de transfert déterminée est du deuxième ordre et son terme d'amortissement est nul :

$$\mathbf{H(p)} = \frac{\mathbf{K}}{1 + \frac{\mathbf{p}^2}{\omega^2}} \quad \text{avec } \omega^2 = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{M} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_{33}}$$

Donc la fréquence de résonance et la période propre sont obtenues par :

$$\mathbf{f_r} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \mathbf{T_r} = \frac{1}{\mathbf{f_r}}$$

Dans ce cas, la fréquence de résonance est alors :

$$\mathbf{f_r} = \sqrt{\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{M} \cdot \mathbf{e} \cdot \mathbf{s}_{33}}} \cdot \frac{1}{2\pi}$$

La céramique choisie pour l'application est une PZT de type PI-89. Sa fréquence propre est de l'ordre de $1\,\mathbf{MHz}$ et sa période propre est donc de $1\,\mu s$.

K. Uchino décrit dans [Uchino, 1997] les mesures effectuées sur une céramique piézoélectrique dont la fréquence propre est de l'ordre de $100\,\mathbf{kHz}$. Son choix d'une céramique de si faible fréquence propre s'explique par la difficulté d'effectuer des mesures directes sur un système très rapide. Néanmoins, on peut logiquement s'attendre au même type de comportement pour une céramique de type PI-89. Pour comparer les résultats présentés par Uchino avec ceux obtenus par le logiciel de simulation, les même types de signaux d'entrées sont simulés. Ceux-ci sont :

1. un signal rectangulaire de largeur supérieure à la période de résonance,
2. un signal rectangulaire de largeur inférieure à la période de résonance,
3. un signal rectangulaire de période égale à la période de résonance,
4. un signal en rampe de temps de montée supérieure à la période de résonance,
5. un signal en rampe de temps de montée inférieure à la période de résonance,
6. un signal en rampe avec un temps de montée égal à la période de résonance.

Les résultats de ces simulations sont représentés sur la figure 9.

La figure 8 représente les résultats obtenus par Uchino pour les même signaux. Une rapide comparaison de ces deux figures et la conformité des courbes théoriques et expérimentales permet de valider le modèle dynamique simulé mis en place. Il est à noter que la céramique utilisée par Uchino a une période propre de **10 ms** tandis que la céramique simulée a une période de **1** μs

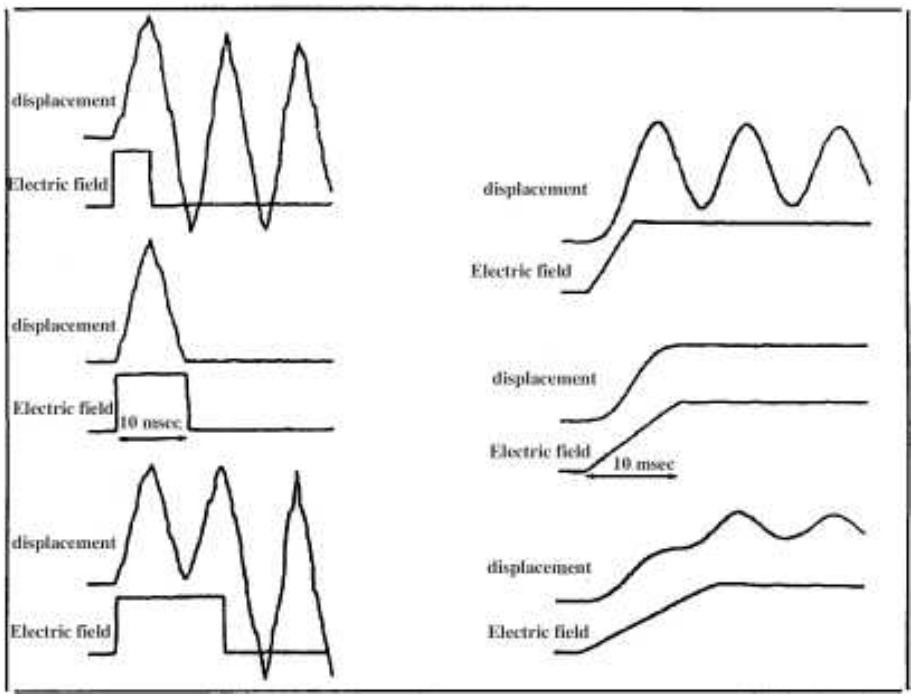


FIG. 8: Déplacement $\mathbf{u_z(t)}$ de la face inférieure de la céramique pour différentes entrées **e(t)** - courbes expérimentales [Uchino, 1995]

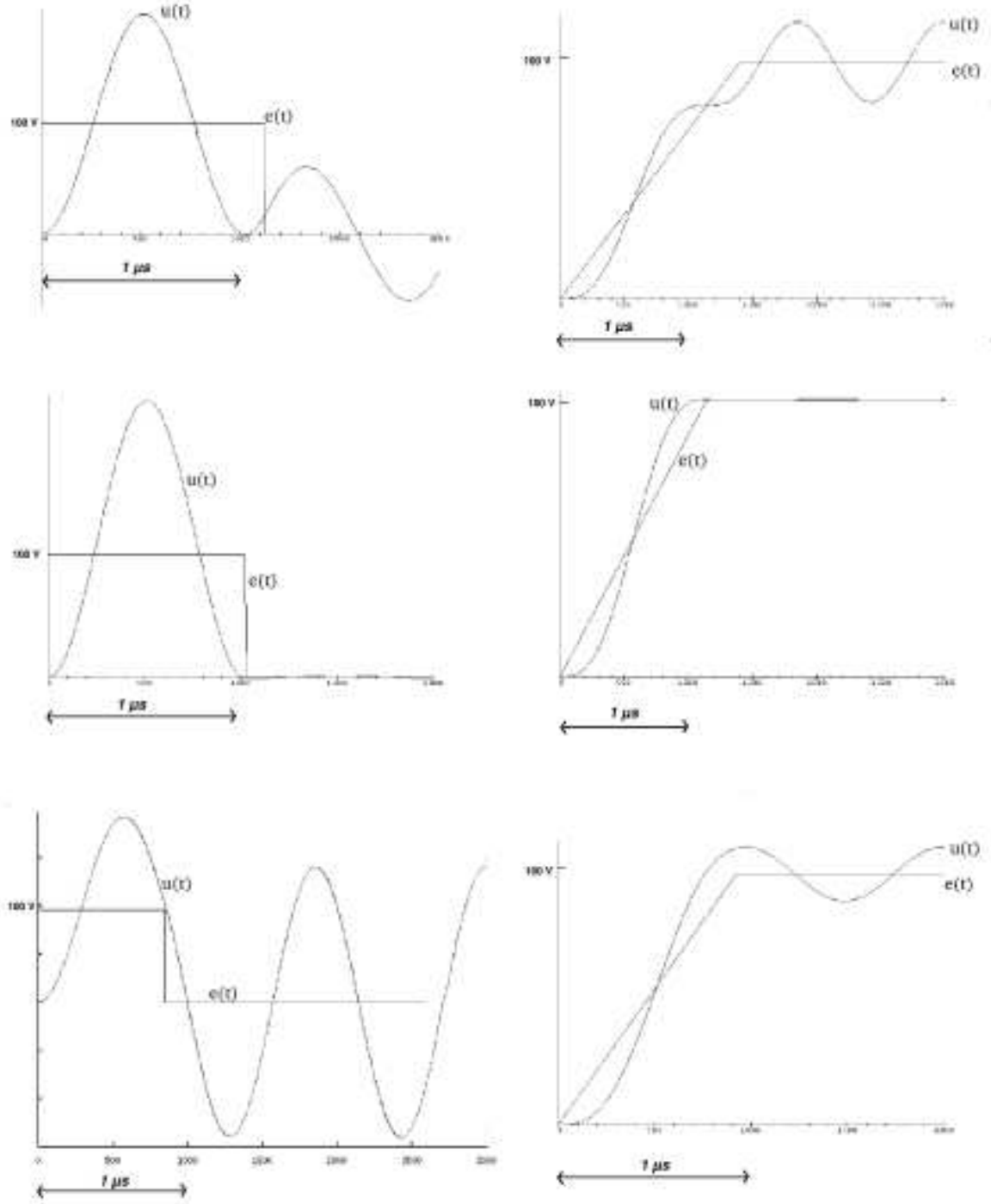
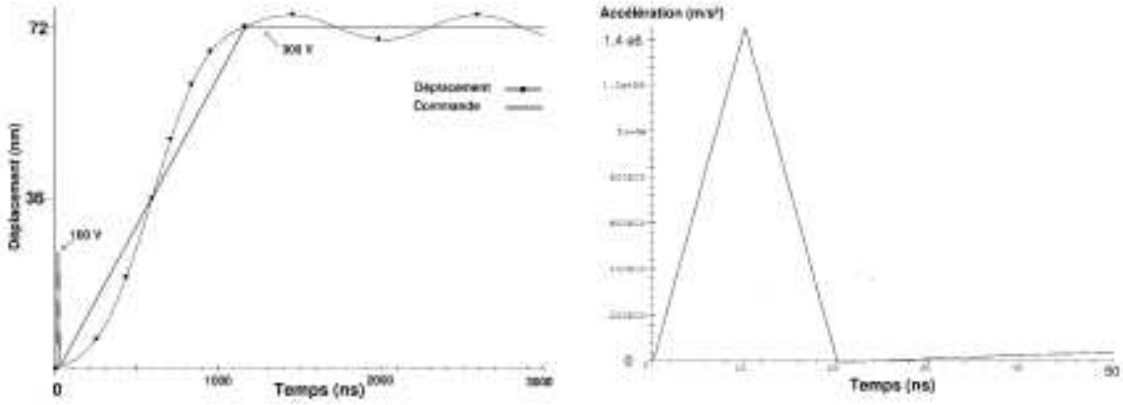


FIG. 9: Déplacement $\mathbf{u_z(t)}$ de la face inférieure de la céramique pour différentes entrées **e(t)** - courbes théoriques

Il faut maintenant déterminer, en utilisant le logiciel de simulation, si la céramique choisie est capable de fournir les accélérations exigées.

On désire un déplacement de l'actionneur, d'une centaine de nanomètres, couplé avec une forte accélération, on choisit donc un profil en rampe pour le signal de commande. L'objectif principal étant d'obtenir une grande accélération initiale, on utilise une impulsion de Dirac de grande amplitude ajoutée au signal de commande au moment approprié.

Avec cette perspective, un profil de tension de type Dirac, d'amplitude 100 **V** et de durée 10 **ns**, dans le but d'amplifier la réponse transitoire et, par conséquent, d'augmenter la valeur de l'accélération au démarrage, couplé à une rampe de temps de montée égale à une période de résonance de la céramique, d'amplitude 300 **V** pour obtenir la déformation nécessaire de 100 nanomètres(figure 10.a) est utilisée. La figure 10.b montre l'accélération obtenue en utilisant ce profil.



(a) Tension d'entrée et déplacement induit (b) Accélération

FIG. 10: Dynamique de la céramique piézoélectrique

Avec ce profil de tension, une accélération initiale de l'ordre de $1,4 \cdot 10^6$ $\mathbf{ms}^{-2}$ est obtenue (fig. 10). La céramique choisie, commandée par ce signal, est donc capable de fournir la performance dynamique exigée. Pour obtenir des accélérations plus faibles, il suffit de réduire proportionnellement l'amplitude du signal de commande.

3.3 Modélisation de la pointe A.F.M

L'accélération de dépose doit être appliquée à l'interface préhenseur/objet. L'objet est supposé saisi par l'extrémité libre de la poutre. Il semble intéressant de connaître sa valeur et son évolution à ce point. Pour pouvoir répondre

à ce besoin, une modélisation de la pointe est proposée. La poutre est supposée avoir une géométrie parfaite, de dimensions définies à la figure 2.

Dans une première approche, en réduisant le problème à une dimension, la théorie des poutres est appliquée. Néanmoins, cette approche ne permet pas la détermination du régime transitoire et nécessite donc un approfondissement de l'étude. Une analyse par éléments finis est donc proposée.

Modélisation géométrique du problème

Sous l'hypothèse que la longueur de la poutre est grande devant les autres dimensions, une modélisation unidimensionnelle est adoptée (fig. 11). Elle est supposée encastrée à une extrémité et libre à l'autre.

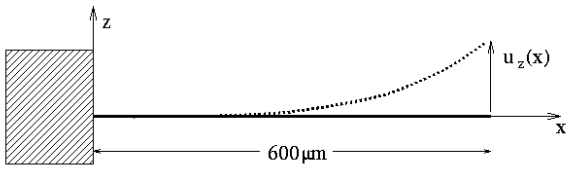


FIG. 11: Modélisation du système étudié

L'application des théorèmes généraux de la dynamique conduit à :

$$\rho S \frac{\partial^2 \mathbf{u_z}(x, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}^2} = -\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{F_{ext}} \tag{7}$$

avec ρ la masse volumique, $\mathbf{S}$ la section de la poutre, $\mathbf{T}$ l'effort tranchant et $\mathbf{F_{ext}}$ la force extérieure par unité de longueur.

L'équation aux dérivées partielles du mouvement est donc déduite :

$$\mathbf{E\,I} \frac{\partial^4 \mathbf{u_z}(x, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{x}^4} + \rho S \frac{\partial^2 \mathbf{u_z}(x, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}^2} - \mathbf{F_{ext}} = 0 \tag{8}$$

Détermination des conditions aux limites et formulation du problème

L'objectif est de déterminer le mouvement de l'extrémité de la poutre lorsque sa base est soumise au mouvement de l'actionneur piézoélectrique. Dans une première approche, la poutre n'est supposée soumise à aucune force extérieure. La seule donnée du problème est donc le déplacement de la base de la poutre, son extrémité encastrée. Ce déplacement ainsi que celui de la face libre de la céramique piézoélectrique $\mathbf{u_z}(o, \mathbf{t}), \dot{\mathbf{u}}_\mathbf{z}(0, \mathbf{t})$ et $\ddot{\mathbf{u}}_\mathbf{z}(0, \mathbf{t})$ sont donc

connus quel que soit $\mathbf{t}$. De plus, à cause de la nature de l'encastrement, la rotation de la première section est supposée nulle, soit :

$$\left(\frac{\partial \mathbf{u_z}(x,\mathbf{t})}{\partial \mathbf{x}}\right)_{\mathbf{x}=0} = 0 \qquad \forall \mathbf{t}$$

La résolution de l'équation 8, de quatrième ordre, est analytiquement impossible avec les données disponibles. Dans le chapitre cinq, son étude sera proposée pour déterminer la fréquence propre du système.

Une autre solution pourrait être d'effectuer une analyse modale. Dans tous les cas, ces équations conduisent à une solution stationnaire, qui ne permet pas le calcul de la valeur de l'accélération initiale liée au régime transitoire. Une résolution par la méthode des éléments finis semble la plus susceptible d'aboutir.

Modélisation par la méthode des éléments finis

On dispose du logiciel d'éléments finis **Castem 2000** développé par le C.E.A. Ce logiciel permet la modélisation 3D d'un ou plusieurs solides, la définition des liaisons cinématiques, des conditions limites ainsi que des chargements appliqués tels les déplacements ou les efforts. En plus, il dispose d'un module dynamique, qui effectue un calcul pas à pas sur plusieurs itérations permettant d'obtenir la réponse dynamique du système en fonction du temps.

L'utilisation de la méthode des éléments finis n'est pas sans risque : le choix du maillage, des éléments et de la discrétisation sont d'une importance primordiale et peuvent facilement conduire à l'erreur. En effet, un maillage apparaissant correct peut très bien fournir un résultat faux dont la vérification expérimentale sera difficile : la piézorésistivité permet en effet de retourner un signal électrique induit par la flexion de la poutre et proportionnel à la courbure de cette dernière, mais ce signal dépend principalement de la rotation des sections proches de l'extrémité encastrée de la poutre. Dans le cas de la présence de plusieurs modes superposés, il ne peut être directement lié à la flèche à l'extrémité. Il convient donc de comparer les fréquences des premiers modes observés expérimentalement avec celles issues des simulations. L'objectif de ces simulations est ainsi la validation expérimentale du modèle éléments finis.

3.4 Validation du modèle éléments finis

Un montage expérimental permettant de déterminer les modes propres de la poutre (figure 12) a été réalisé. La poutre est montée sur un émetteur ultrasonore, dont la fréquence de résonance est de l'ordre de 40kHz (proche

de la valeur du premier mode donné par le constructeur). En appliquant des excitations harmoniques sur plusieurs fréquences, et en disposant du retour d'état lié à la flexion de la poutre, les modes propres de cette dernière sont relevés. Les valeurs obtenues sont les suivants :

- mode 1 : 33.33 **kHz**
- mode 2 : 196.8 **kHz**

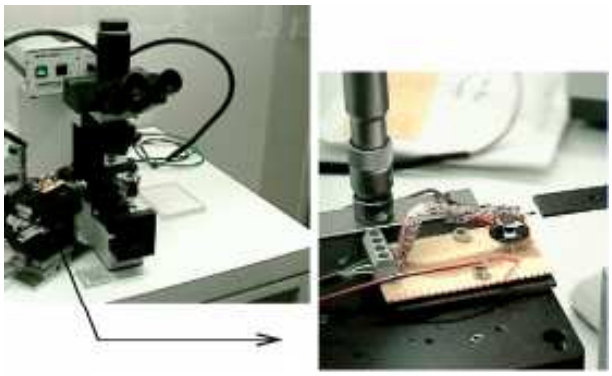


FIG. 12: Manipulation pour déterminer les modes propres

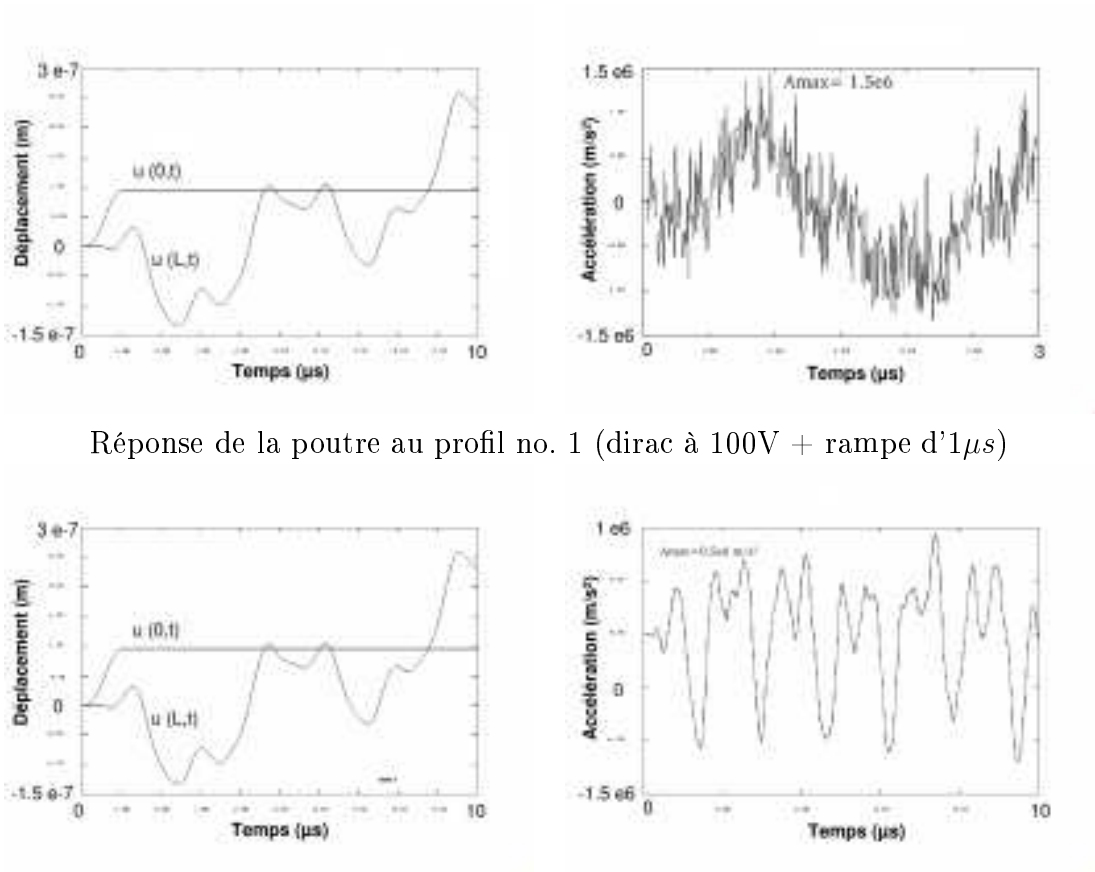
Castem présente la possibilité de déterminer les modes propres d'un structure modélisée par éléments finis. Pour cette étude, la poutre a été modélisée en utilisant les éléments cubiques à 20 noeuds, avec une densité d'éléments de 16x6x1. Les deux premiers modes propres obtenus en utilisant cette configuration sont respectivement 33.82 **kHz** et 211.43 **kHz**

Ces résultats semblent suffisamment proches des résultats expérimentaux. De plus, le temps de calcul est assez réduit pour cette densité d'éléments. Ce maillage est donc choisi pour la suite de l'étude.

3.5 Simulations du comportement dynamique du préhenseur

Le comportement dynamique complet du préhenseur peut être déterminé en combinant les modèles dynamiques de l'actionneur piézoélectrique et de la poutre AFM. Dans ce but, la poutre est modélisée avec une liaison linéaire à la base, où le déplacement de la face inférieure de la céramique PZT, obtenu par le logiciel de simulation de l'actionneur, est imposé. En sortie, deux graphes sont extraits : le premier indiquant simultanément les déplacements de la base et de l'extrémité, l'autre montrant l'accélération de l'extrémité (où le contact avec l'objet à manipuler se situe). Les figures suivantes illustrent ces

graphes pour différents profils de tension. Le code du programme Castem est présenté dans l'annexe C.



Réponse de la poutre au profil no. 1 (dirac à 100V + rampe d'1μs)

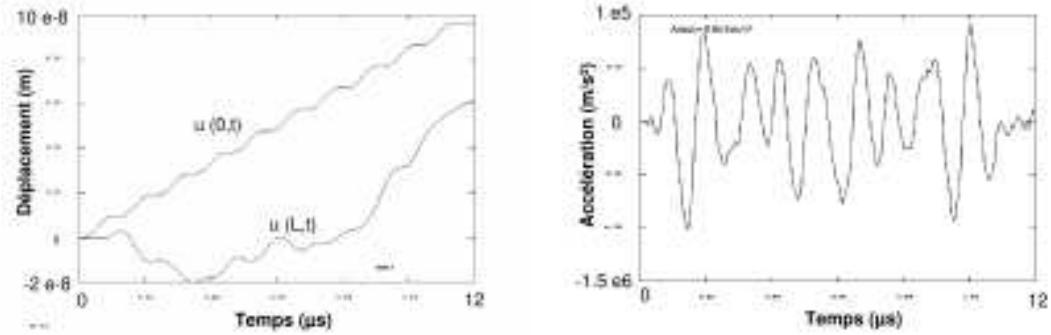
u(0,t) déplacement induit
u(L,t) déplacement extrémité

Accélération instantanée

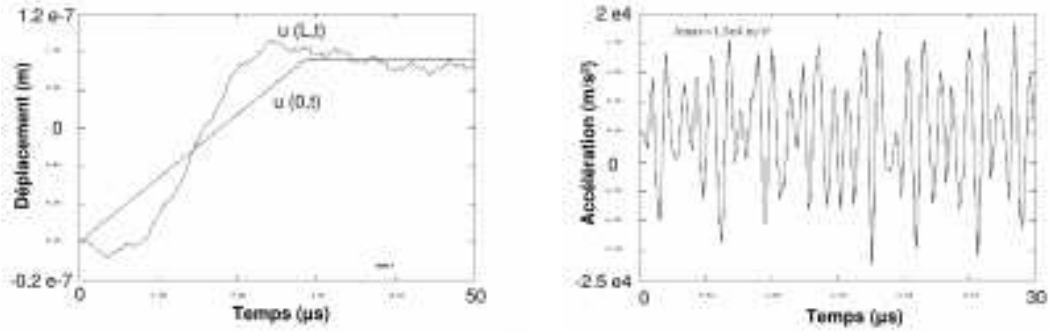
FIG. 13: Réponse de la poutre au profil no. 2 (rampe d'1 μs)

Pour le profil no. 1, le signal qui a permis de valider l'actionneur, est utilisé (fig. 10). L'accélération atteinte est de $1.5 \cdot 10^6\ m/s^2$ (fig. 13). Ce signal est l'addition d'un Dirac de **100 V** à une rampe de **1** μs. La présence de ce Dirac augmente considérablement l'accélération initiale, comparée à la rampe seule (profil no. 2, fig.13). Dans ce cas, l'accélération est de l'ordre de $0.5 \cdot 10^6\ m/s^2$.

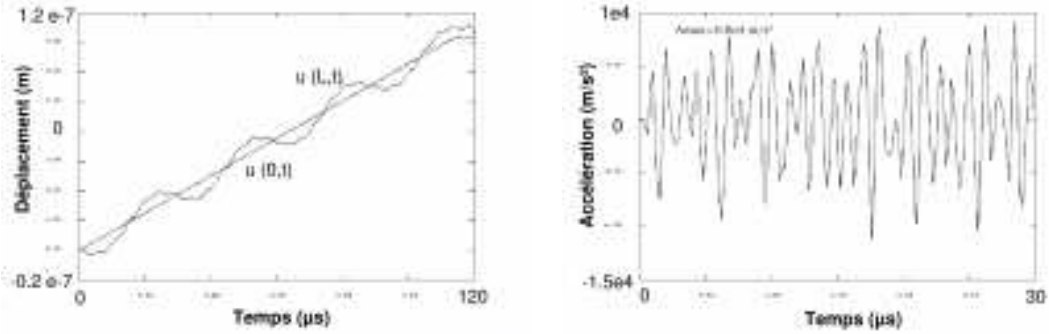
Pour déterminer la gamme d'accélérations réalisable avec ce système, plusieurs profils de signaux de commande sont utilisés. Ces profils sont des rampes d'amplitude **300 V** et de largeur variable. Ainsi, des rampes de temps



Réponse de la poutre au profil no. 3 (rampe de 10 μs)



Réponse de la poutre au profil no. 4 (rampe de 50 μs)



Réponse de la poutre au profil no. 5 (rampe de 100 μs)

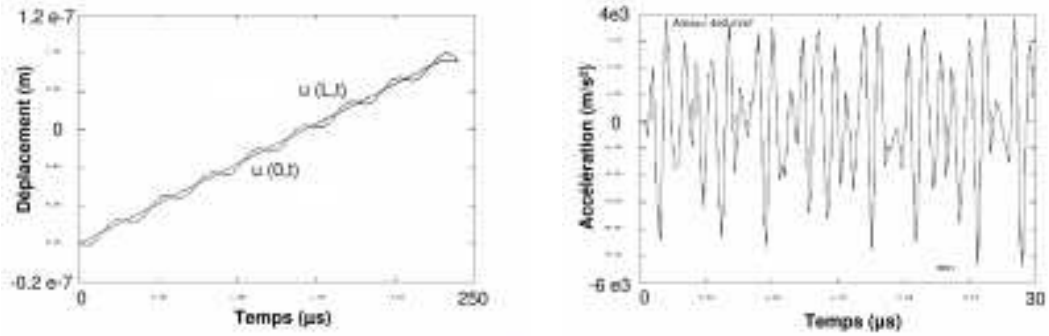


FIG. 14: Réponse de la poutre au profil no. 6 (rampe de 200 μs)

de montée de $10, 50, 100$ et 200 μs sont testées. Ces simulations sont présentées sur la figure 14.

La similitude des évolutions de l'accélération est remarquable. En effet, mis à part le profil 1, toutes les autres accélérations ont à peu près la même allure, avec des amplitudes différentes, inversement proportionnelle à la durée de la rampe.

Pour les profils 1, 2 et 3, l'extrémité de la poutre s'élève après être descendue de quelques nanomètres. Ce phénomène est dû au caractère à phase non minimale du système. Il est fort probable que ce phénomène entraîne l'endommagement de la poutre à cause du choc possible avec le substrat. Cette situation doit être évitée, soit en soulevant la pointe préalablement à la génération de l'accélération, soit en utilisant des profils de plus faible amplitude.

Ces simulations montrent qu'avec l'utilisation d'une commande en boucle ouverte utilisant les profils prédéfinis, le système est capable de produire une large gamme d'accélération, allant de $2 \cdot 10^3$ m/s^2 jusqu'à $1.5 \cdot 10^6$ m/s^2. Cet intervalle constitue une gamme suffisante pour procéder aux expérimentations.

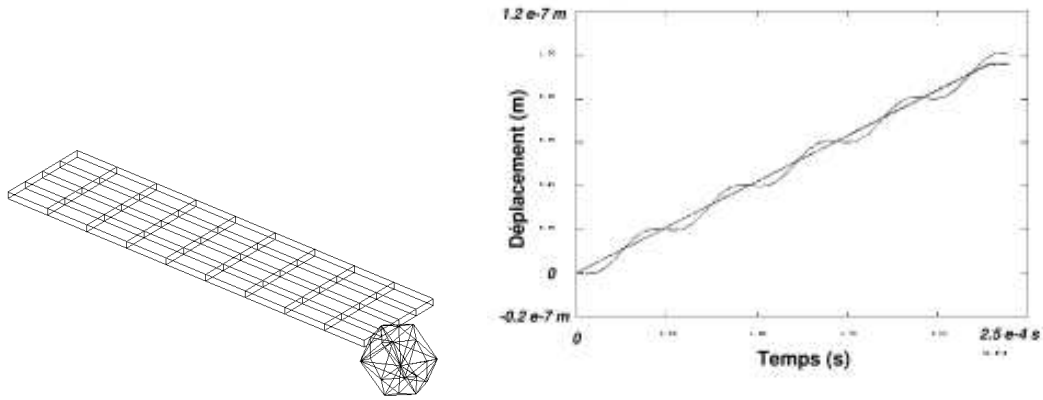


FIG. 15: Modélisation EF de la pointe avec l'objet manipulé

Les résultats présentés sont obtenus en considérant la poutre seule. Or dans la pratique, l'objet manipulé est collé à l'extrémité libre. Une dernière simulation, en ajoutant une sphère de 100 μm de diamètre au bout de la pointe est proposée. Faute de pouvoir modéliser les forces d'adhésion dans le logiciel, une liaison complète est déclarée entre deux solides. Pour cette

simulation, le profil 6, avec une largeur de rampe de 200 μm, est utilisé une nouvelle fois (fig. 15).

Cette simulation permet d'assurer que l'ajout de l'objet à l'extrémité de la pointe n'influence le comportement de cette dernière que de façon minime. Les résultats obtenus précédemment sont donc validés.

3.6 Commande du préhenseur

L'étude précédente a démontré la nécessité d'un dispositif capable de produire des tensions variant de 100 à **400 V** dans un intervalle de temps de quelques microsecondes. Cette contrainte de temps est proche des systèmes de commandes de piézoélectrique dans un domaine comme l'analyse des matériaux par ultrasons. Mais, ces systèmes ont une puissance de sortie nettement inférieure aux exigences de l'application. De plus, il est impossible d'obtenir des tensions aussi élevées directement à la sortie d'un PC. La solution adoptée est donc la suivante : une carte de commande ultrasons "*Saphir*" est connectée à un amplificateur de tension, de gain G=30, en boucle fermée. La carte saphir permet à l'utilisateur de 'dessiner' le signal désiré par pas de **0.25** μs. Ensuite, ce signal, dont l'amplitude est comprise entre 0 et 10 **V**, est envoyé à l'amplificateur, directement relié à la céramique.

Il est à noter que cet amplificateur est un système électronique de deuxième ordre, sa sortie n'est pas exactement conforme à la consigne de la carte de saphir, les variations inférieures à **1** μs sont filtrées. La qualité du signal de sortie est d'autant plus dégradée que la variation de tension de la consigne est importante. Ces variations ne sont a priori pas prévisibles par la théorie et nécessitent un apprentissage par expérimentation.

La figure 16 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.

4 Description du banc expérimental et du prototype

Après la caractérisation technologique du préhenseur, il est possible de compléter la partie mécanique avec des solutions existantes. Cette approche est adoptée pour le bloc déplacement, le porte-échantillon et les capteurs

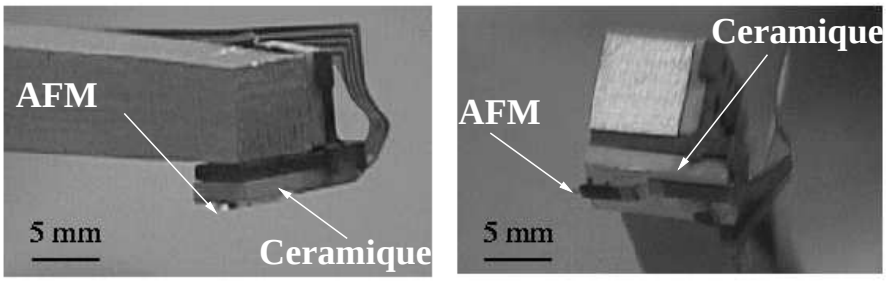


FIG. 16: Le préhenseur actif réalisé

visuels. La partie logicielle est développée autour de ces éléments, et est construite sur les pilotes logiciels fournis par leurs constructeurs respectifs.

4.1 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 **50nm** pour une course de **2.5 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 nm**, sur l'axe vertical.

Pour toutes ces raisons, un translateur piézocapacitif est ajouté en série sur l'axe $\vec{z}$. Cet actionneur, qui fonctionne sur le principe des vibrations asymétriques appliquées à un composant piézoélectrique, possède une course de **120** μm 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 $120000/2^{16} = 1.83$ **nm**. La figure 17 représente le schéma cinématique du bloc déplacement.

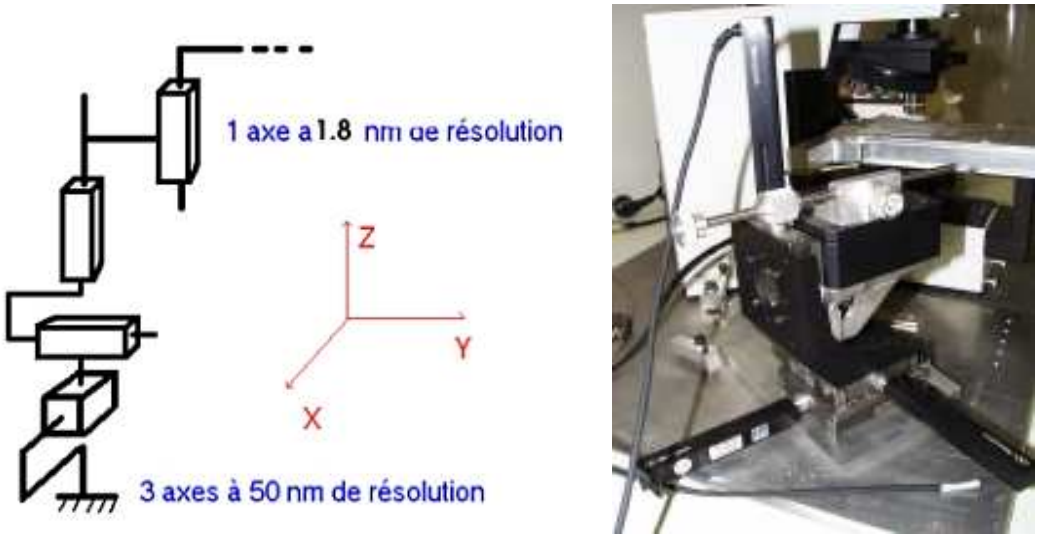


FIG. 17: Le schéma cinématique et le bloc de déplacement

4.2 Porte-échantillons

Le porte-échantillons est la partie destinée à recevoir le substrat sur lequel l'objet est initialement placé. La course du manipulateur étant limitée à **2.5 cm** par le bloc déplacement, il semble utile de disposer de degrés de mobilité supplémentaires permettant de déplacer le substrat ou de changer de substrat entre les phases de saisie et de dépose d'une manipulation.

FIG. 18: Le porte-échantillons

Le porte échantillon finalement réalisé est un plateau métallique monté sur deux liaisons glissières manuelles de grande course couplées à des molettes micro-métriques pour un positionnement affiné.

4.3 Module de traitement visuel

Pour le bon fonctionnement d'une opération de manipulation, il est impératif de maîtriser la configuration instantanée du système. Les actionneurs utilisés fournissent leurs états actuels en temps réel. Ceux-ci permettent ainsi de connaître les coordonnées du manipulateur dans un repère global connu. Néanmoins, la position de l'objet et du substrat cible ne sont pas connues a priori. Pour effectuer correctement la commande du système, il faut donc une autre source d'information.

La solution la plus simple est l'utilisation de caméras. Cette solution est très pratique pour un premier niveau d'automatisation : l'utilisateur contrôle la plupart des opérations, incluant les trajectoires. Pour les niveaux d'automatisation plus élevés, il faut disposer d'un traitement logiciel important afin de doter le système de reconnaissance de forme et de génération automatisée de trajectoires.

Pour disposer d'une information complète en trois dimensions du système en temps réel, deux caméras sont utilisées. La première est intégrée directement au microscope, fournissant une vue de dessus de la zone de manipulation. La deuxième caméra placée latéralement complète l'information en permettant une visualisation et une estimation des différentes distances verticales.

Les deux caméras utilisées possèdent des grossissements importants et une profondeur de champ très réduite, limitée à quelques micromètres. La caméra intégrée au microscope utilise le système optique de ce dernier. Pour pouvoir intégrer une commande référencée vision, le contrôle de cette chaîne optique est nécessaire. Un moteur pas à pas, commandé par la même interface que les moteurs linéaires du bloc déplacement, est donc monté sur la molette de mise au point du microscope. La grande réduction mécanique de cette liaison permet d'obtenir une précision sub-micrométrique. Cette particularité autorise des mesures de distances verticales de façon très précise, en effectuant des mises au point successives sur le préhenseur, l'objet manipulé et le substrat.

4.4 La partie logicielle

La partie logicielle doit traiter et coordonner les différentes informations provenant de tous les composants du système. Elle fournit aussi une interface à l'utilisateur, permettant l'accès à toutes les fonctionnalités du manipulateur. La figure 19 représente l'interface utilisateur graphique réalisée.

Le logiciel de commande fonctionne de la façon suivante : un sous processus périodique lit d'abord les informations provenant de la partie mécanique,

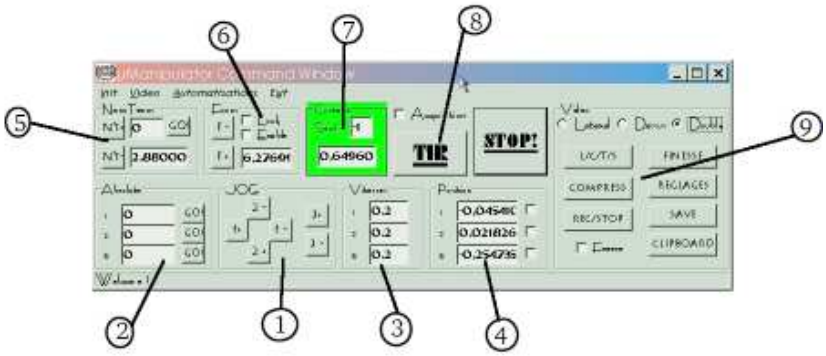


FIG. 19: L'interface utilisateur graphique

puis les actions de l'utilisateur. Les image des caméras, envoyées directement à l'écran dans une fenêtre vidéo, représentent un grand volume d'informations. Par conséquent, elles ne sont traitées que si l'utilisateur demande une action particulière, par exemple, une mise au point automatique ou un déplacement de la poutre déterminé par une action de la souris sur la fenêtre vidéo. Les positions des 3 moteurs linéaires, du translateur nanométrique, de la hauteur de l'objectif du microscope et la sortie de la poutre AFM sont affichées avec une période de l'ordre de la milliseconde. Ces composants, à l'exception du préhenseur, sont commandés suivant les indications de l'utilisateur par des boucles PID fermées. Différentes fonctionnalités liées à l'acquisition visuelle sont aussi accessibles, comme la possibilité d'enregistrer l'image instantanée affichée dans la fenêtre vidéo ou le lancement et l'arrêt de l'enregistrement d'un film.

Les fonctions proposées par le logiciel sont les suivantes :

- commande en vitesse (1) et/ou en trajectoire (2) des moteurs linéaires et les affichages temps réels associées (3,4)
- commande de trajectoires en 3 dimensions avec l'utilisation de la fenêtre vidéo (l'utilisateur clique sur le point à atteindre),
- commande en trajectoire du translateur nanométrique (5),
- commande en trajectoire de la mise au point de la caméra verticale et possibilité de suivi automatique du préhenseur (6),
- affichage de la tension de flexion et protection de la pointe AFM en bloquant unidirectionellement les moteurs dans le cas d'un dépassement d'une valeur seuil déterminée par l'utilisateur (7),
- mise au point automatique de la caméra verticale et mesure automatique de la distance verticale entre le substrat et la pointe par des mises

au point successives,
- automatisation de la phase de saisie, à partir de l'indication de la localisation de l'objet à manipuler par l'utilisateur en cliquant sur la fenêtre vidéo,
- commande binaire de l'actionneur piézoélectrique du préhenseur pour la dépose (8),
- les contrôles vidéo (9).

Ce logiciel, par sa nature modulaire, présente une base solide pour l'utilisation du manipulateur. Il permet la création de fonctionnalités supplémentaires de façon simplifiée grâce à l'accès au bas niveau de programmation.

5 Conclusion

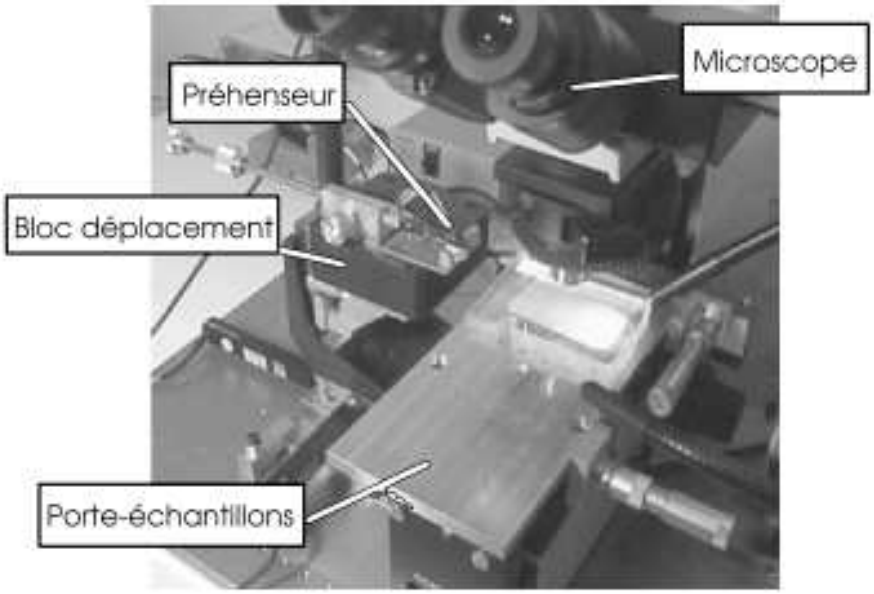


FIG. 20: Le site expérimental et le manipulateur prototype

Dans ce chapitre, les consignes pour la réalisation du prototype de micromanipulation ont été proposées à partir de l'étude théorique de la tâche de manipulation. Suivant ce cahier des charges, il a été décidé de se focaliser sur la construction du préhenseur actif, qui est, par sa nature, au coeur du mode de manipulation proposé. Il présente plusieurs innovations, concernant la mesure des forces, la détection du contact et sa grande capacité dynamique. Après la conception et la construction de ce dispositif pour répondre

aux exigences techniques et théoriques de l'utilisation des forces d'adhésion, la partie mécanique complémentaire est réalisée en adaptant des composants commercialement existant. Le module de commande logiciel ainsi réalisé permet à l'utilisateur un accès facile à toutes les fonctionnalités du manipulateur et aux traitements d'images pour une commande référencée vision [Zhou *et al.*, 2001]. De plus, son architecture modulaire et ouverte facilite et prépare les développements futurs.

La figure 20 montre le site mis en place pour procéder aux expérimentations. Il est placé dans une salle blanche à humidité contrôlée. Dans le chapitre suivant, les différentes expériences visant à déterminer les capacités du manipulateur et du mode de manipulation sont étudiées.

Chapitre IV

Expériences et applications de la micro-manipulation

Dans les chapitres précédents, l'étude théorique de la micro-manipulation, la conception et la réalisation d'un prototype ont été présentées. Le prototype est construit autour d'un micro-préhenseur actif, capable d'effectuer les tâches de saisie par adhésion (*statique*) et de déposes par inclinaison (*statique*) ou par effet inertiel (*dynamique*).

Ce chapitre est consacré à la description de l'étude expérimentale relative à ce projet. Dans un premier temps, 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.

1 Caractérisation expérimentale du système de préhension

Le préhenseur est la partie la plus sensible du manipulateur. Lors de l'étude de conception menée au chapitre III, sa géométrie a été déterminée. Il se compose d'une céramique piézoélectrique de dimensions 8x5 $\mathbf{cm}^2$, 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 micro-poutre piézorésistive, utilisée comme organe terminal, est collé sous la céramique (fig. III.16). 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.

1.1 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 [Pouet *et al.*, 1998]. 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 1 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.

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 $20\,\mathbf{kHz}$ 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 $300\,\mathbf{V}$,
- une tension de $300\,\mathbf{V}$ pendant $100\,\mu s$,

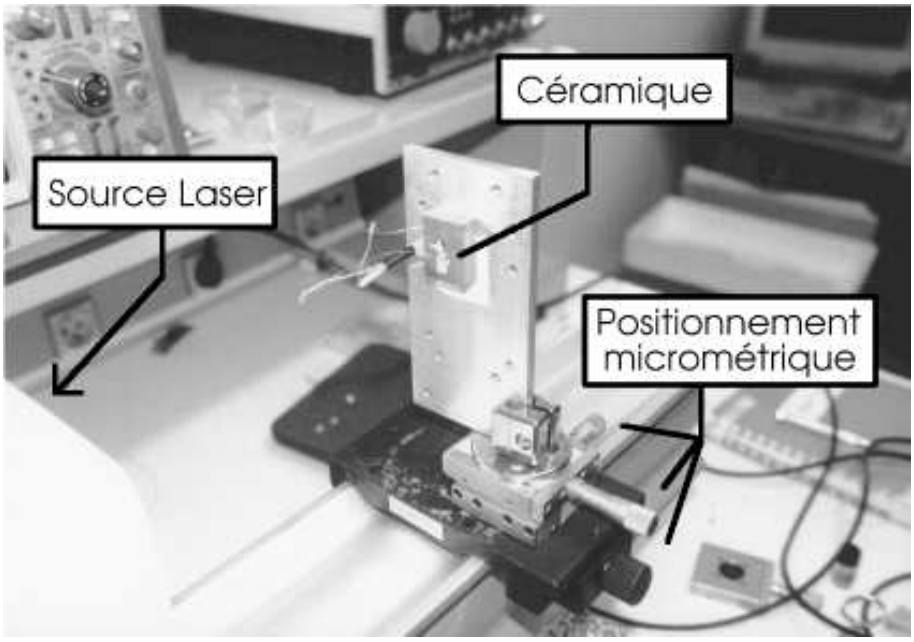
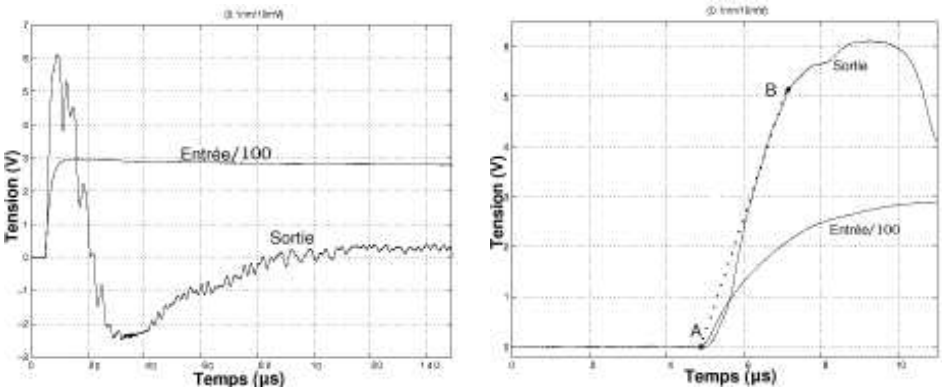


FIG. 1: Montage de l'actionneur pour l'interférométrie laser

– une descente de **300** à **0V** en **50** μs.

La figure 2(a) montre le signal de commande et le signal de mesure. Pour une meilleure visualisation, la figure 2(b) 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** nm/V



(a) Signal (b) Zoom

FIG. 2: Mesures 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. Sous 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. 2, entre les points "A" et "B") est estimée à $50 \cdot 10^{-9}/(2 \cdot 10^{-6})^2 = 2.5 \cdot 10^4\, m/s^2$.

Afin de calibrer la gamme d'accélérations disponibles, plusieurs essais sont effectués avec des signaux de même profil mais d'amplitudes différentes.

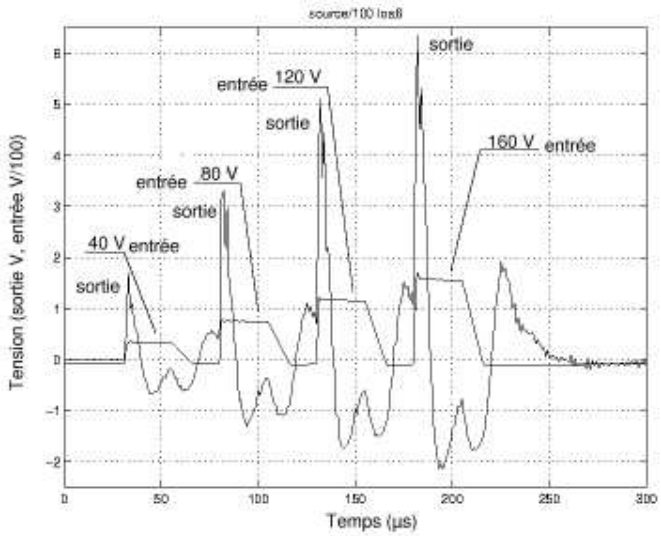


FIG. 3: Calibrage de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser

Ces expériences démontrent la capacité de l'actionneur piézoélectrique à produire une gamme d'accélérations allant jusqu'à $\sim 5 \cdot 10^4\ m/s^2$. 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 a priori pas identique au déplacement de l'actionneur.

1.2 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 nm**, la poutre est appuyée contre le substrat. Lorsque la tension du pont atteint $\sim$ **4 V**, le préhenseur est éloigné jusqu'à la rupture du contact. La courbe obtenue est présentée sur la figure 4.

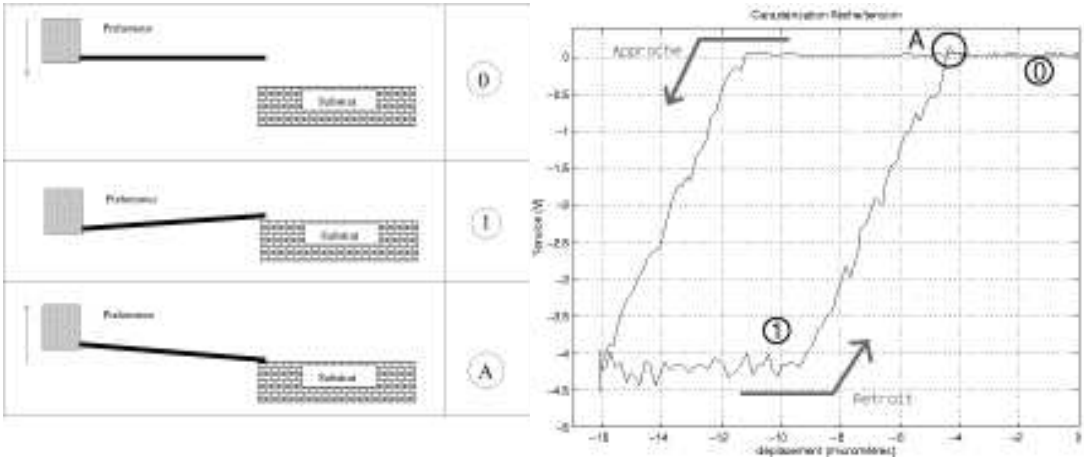


FIG. 4: Calibrage de la flexion de la pointe AFM

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** μm 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 :$\alpha = \frac{-4}{5} = -0.8\,\mathbf{V}/\mu m$.

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 (fig. 4-"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.

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 manoeuvre améliore les capacités dynamiques. Il faut donc être capable de compresser la céramique sans créer de perturbation sur la poutre. La figure 5 montre le signal de commande de céramique et la tension de pont de Wheatstone de la poutre pendant l'expérience.

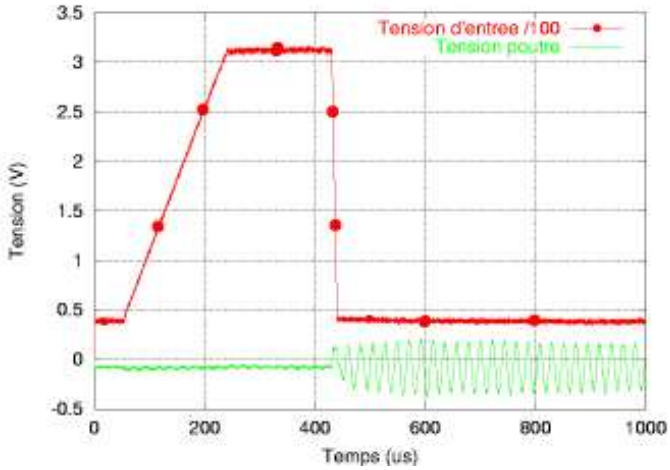


FIG. 5: Caractérisation dynamique du préhenseur (1)

Cette expérience montre qu'un signal avec une pente 'lente' (de 280 **V** en 200 μs), cause de très faibles oscillations à la poutre. En revanche, la descente, effectuée en 10 μs, induit des oscillations de l'ordre de 0.5 **V**, équi-

valent à un déplacement relatif de **0.4** μm. 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 6 montre les courbes obtenues.

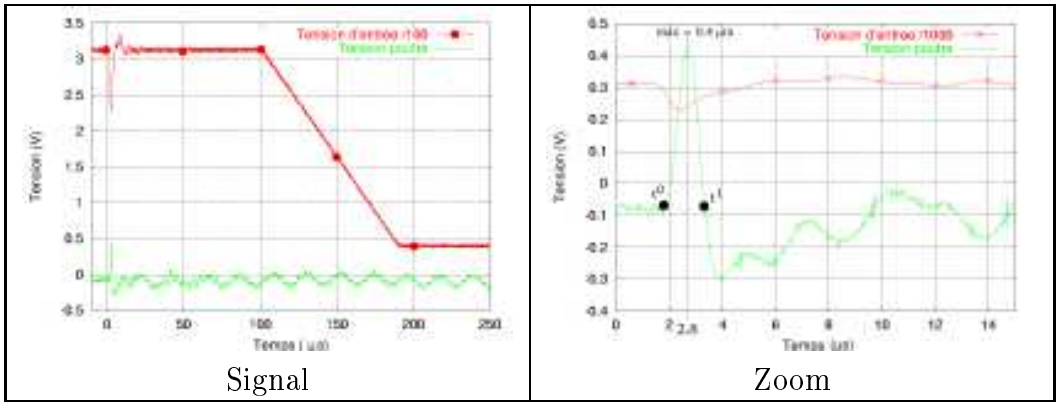


FIG. 6: Caractérisation dynamique du préhenseur (2)

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 7.

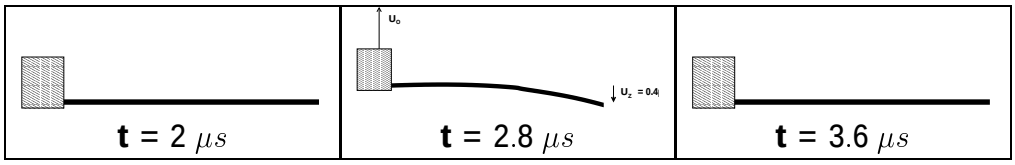


FIG. 7: Comportement à phase non minimale de la poutre

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 $\mathbf{t} = 2.8\ \mu s$.
L'amplitude du pic est de $0.5\mathbf{V}$, donc la flèche est sensiblement de $-0.4\ \mu m$. La valeur minimale de cette flèche est atteinte à $\mathbf{t} = 2,8\mu s$. La variation entre les instants $\mathbf{t} = 2\ \mu s$ et $\mathbf{t} = 2.8\ \mu s$ étant quasiment linéaire, on peut considérer que la vitesse de déplacement est constante. Elle est égale à $\frac{-4.10^{-7}}{8.10^{-7}} = -0.5\ m/s$. Cette vitesse est identique pour la phase de décroissance de tension (soit l'accroissement de la flèche), entre les instants $\mathbf{t} = 2.8$ et $\mathbf{t} = 3.6\ \mu s$.

La vitesse passe donc de $-0.5\ m/s$ à $0.5\ m/s$. 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 :

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

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 $200\ \mathbf{V}$. La figure 8 représente les courbes obtenues.

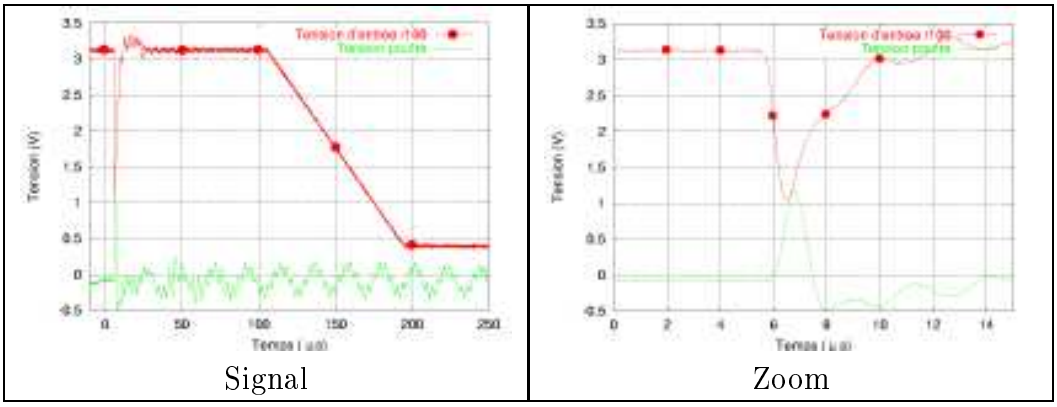


FIG. 8: Caractérisation dynamique du préhenseur (3)

Pour ce signal, l'amplitude du premier pic est de $1.25\ \mathbf{V}$. Il faut remarquer que dans cet exemple, la tension d'entrée est de $200\ \mathbf{V}$, 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 $0.5\ \mathbf{V}$ pour une tension d'entrée de $80\ \mathbf{V}$. 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 :

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

avec $\mathbf{u_z}$ (μm) la flèche à l'extrémité de la poutre, $\mathbf{A}$ l'amplitude de l'impulsion ($\mathbf{V}$), et $\mathbf{K_d}$ 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 $2.5 \cdot 10^6\ m/s^2$ pour une impulsion de $200\ \mathbf{V}$. La relation obtenue est donc de la forme :

$$\ddot{\mathbf{u}}_\mathbf{z} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{K_a} \quad \text{avec } \mathbf{K_a} = 12500\ m/V\mathbf{s}^2 \tag{2}$$

avec $\ddot{\mathbf{u}}_\mathbf{z}$ l'accélération initiale à l'extrémité de la poutre (m/s^2), $\mathbf{A}$ l'amplitude du Dirac ($\mathbf{V}$) , et $\mathbf{K_a}$ 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 quelque soit le réglage du préamplificateur.

2 Saisie et dépose statiques en milieu sec

Une première expérience est proposée pour justifier l'utilisation des forces d'adhésion pour la micro-manipulation. 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 au chapitre 2 :

- **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 Lipfshitz, 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 $\mathbf{F_{adh}^{so}} = 4.70\ \mu N$ et $\mathbf{F_{adh}^{po}} = 6.80\ \mu N$

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 $\mathbf{D} = \mathbf{D_0} = 0.4$ **nm**, le rapport des forces d'adhésion *Substrat/Préhenseur* dépend uniquement des constantes de Hamaker des deux matériaux et est égal à : $\mathbf{R_A} = \frac{\mathbf{A_s}}{\mathbf{A_p}} = 0.7$. En prenant en compte l'inclinaison θ, pour réussir la dépose l'inégalité suivante doit être vérifiée :

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

L'inclinaison θ nécessaire à la dépose doit donc satisfaire la condition $\cos\theta < \mathbf{R_A}$. Par conséquent, une inclinaison estimée à $45°$ doit permettre la dépose statique.

La figure 9 représente le déroulement de l'opération, obtenue sur le site expérimental :

- 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° (d)

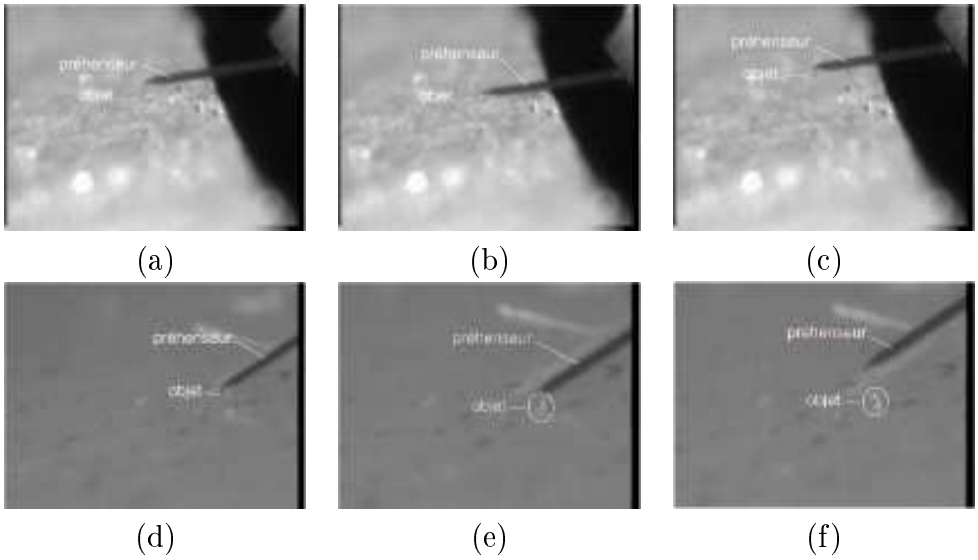


FIG. 9: Manipulation par saisie et dépose statique

- 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.

3 Saisie et dépose statiques avec prédominance capillaire

Dans le domaine, par exemple, de la micro-électronique, où les applications nécessitant la micro-manipulation sont nombreuses, les composants à manipuler sont rarement de forme sphérique ou cylindrique. Ce sont souvent des pièces de forme parallélépipèdique 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 micro-diodes 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. D'après la présentation des forces d'adhésion effectuée au chapitre 1, 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 :
    $\mathbf{S^p_{cont}} = 300 \times 140 = 42000\ \mu m^2$.
  - le coefficient de Hamaker de l'interaction étain/silicium, obtenu expérimentalement et par les relations de combinaison, est de $\sim 53 \cdot 10^{-20}\ \mathbf{J}$.
    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 :
    $\mathbf{S^s_{cont}} = 150^2 \times \pi = 70650\ \mu m^2$.
  - 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 $\sim 30 \cdot 10^{-20}\ \mathbf{J}$.
    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 principale-

ment 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, exposé au chapitre 1, 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 être la seule solution envisageable.

Cette dernière est mécaniquement assez difficile à mettre en oeuvre : 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 $\mathbf{A_{p-eau-o}} = 11.28 \cdot 10^{-20}$ **J**, $\mathbf{F^{adh}_{p-eau-o}} = 57\ \mu N$;
- **Interface substrat/objet :**
  La constante de Hamaker $\mathbf{A_{s-eau-o}} = 5.74 \cdot 10^{-20}$ **J**, $\mathbf{F^{adh}_{s-eau-o}} = 43\ \mu N$.

A partir de ces choix, la saisie peut être effectuée. Son déroulement est présenté sur la figure 10.

(a) (b) (c)

FIG. 10: Saisie à partir d'une goutte d'eau

Sur la figure 10-a, 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, $\mathbf{F^{adh}_{p-eau-o}} > \mathbf{F^{adh}_{s-eau-o}}$. 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/susbtrat 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 un vitesse plus élevée, l'objet se détache du préhenseur et reste à la surface de la 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 minime, 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 $50\ \mu m/s$.

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 11 montre le déroulement de la phase de dépose.

(a) (b) (c)

FIG. 11: 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.

4 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.

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 μm 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.

(a) (b) (c)

FIG. 12: Saisie statique du micro-sphère

La figure 12 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 objets/substrat répétés (figure 13-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'exci-

(a) (b) (c)

FIG. 13: Dépose dynamique du micro-sphère

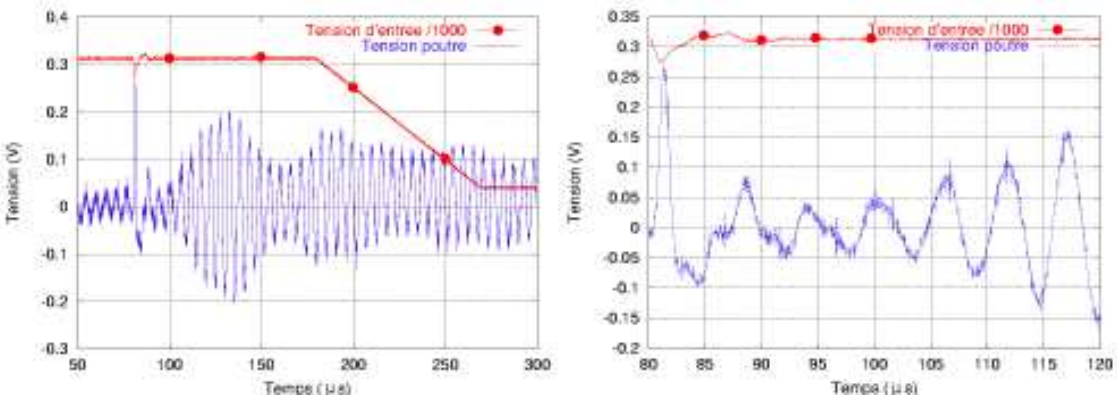
tation, le préhenseur, avec l'objet collé à son extrémité libre, est positionné légèrement au-dessus du substrat. Cette manoeuvre a pour but d'empêcher l'endommagement de la poutre dans le cas d'un choc avec le substrat : l'étude de comportement dynamique de la pointe AFM avait prédit une comportement 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

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 $\mathbf{t} = 90\ \mu s$. Puis, la céramique est décompressée lentement jusqu'à sa forme initiale (de $\mathbf{t} = 180$ 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 $40\ \mathbf{kHz}$. Le deuxième mode se situe aux environs de $200\ \mathbf{kHz}$. 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 $\sim 20\ \mathbf{kHz}$. 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 $40\ \mathbf{V}$. L'accélération résultante, d'après la relation 2 mise en place au premier paragraphe,

est estimée à $5 \cdot 10^5\ m/s^2$. 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 14.



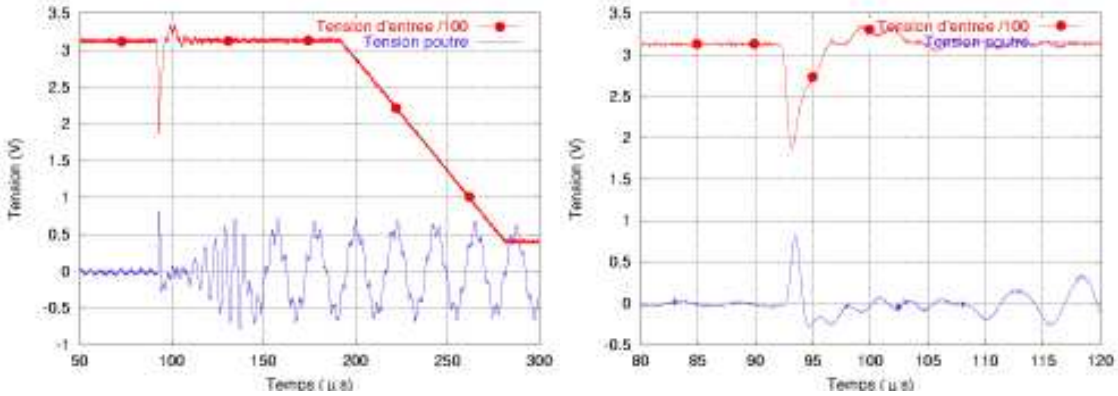
Signal Zoom

FIG. 14: 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 Fourrier de ce signal a permis de visualiser les vibrations d'une fréquence de $\sim$ **0.2 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

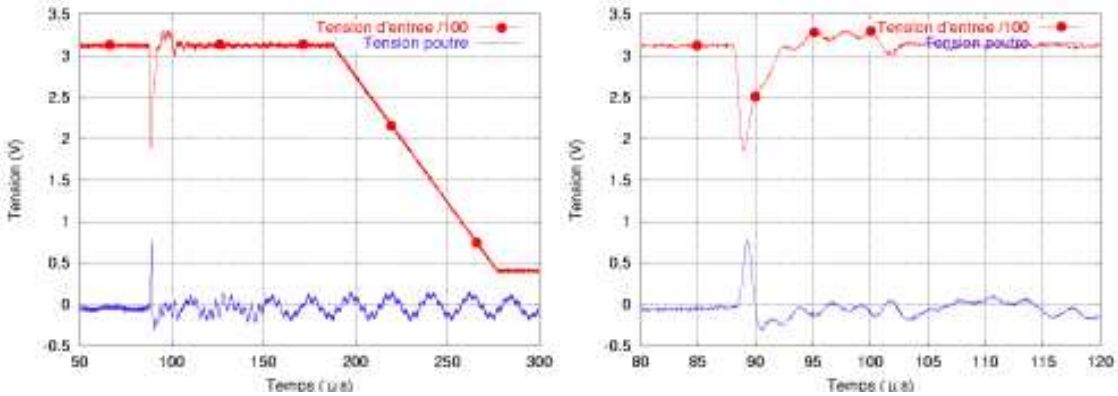
Dans le deuxième cas, l'amplitude de l'impulsion est amplifiée jusqu'à **80 V** (fig. 15). L'accélération résultante est estimée à $\sim 10^6\ m/s^2$. Cette valeur est juste au-dessus de la limite de dépose. Comme prévue, l'opération est réussie et le décollement est effectif. L'observation de la sortie du dispositif AFM montre que le système oscille d'abord à la fréquence "poutre+objet" (flexion et torsion). Ces vibrations provoquent la dépose à $\mathbf{t} = 140\ \mu s$. Puis, le système oscille sur la fréquence du premier mode de flexion de la poutre seule, confirmant ainsi le succès de l'opération.



Signal Zoom

FIG. 15: Comportement dynamique du préhenseur pour la 2ème excitation.

Pour le troisième cas, l'amplitude de l'impulsion est de **120 V** (fig. 16). L'accélération résultante est estimée à $\sim \mathbf{1.5 \cdot 10^6}\ m/s^2$. Après un bref régime transitoire, le système oscille sur la fréquence poutre seule. Le dépose est donc effectuée immédiatement après l'impulsion.



Signal Zoom

FIG. 16: 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.

5 Saisie en vrac et dépose sélective

Une particularité très intéressante du manipulateur a été découverte au cours de certaines expérimentations. Ces dernières utilisaient un deuxième préhenseur possédant une pointe AFM couverte d'une mince couche d'or par traitement surfacique. Ce traitement semble provoquer une diminution importante de l'énergie d'adhésion du préhenseur. Cette particularité est peut être due à l'oxydation de la couche métallique, à ses imperfections d'homogénéité et à son état de surface. Cette pointe est présentée sur la figure 17.

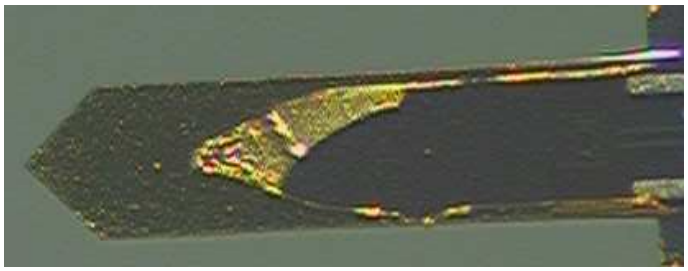


FIG. 17: La pointe AFM couverte d'or

Il a d'abord été observé que la saisie par adhésion n'était plus réalisable que pour des particules de poids relativement plus faibles que ceux des particules utilisées dans les expériences précédentes. Plusieurs essais successifs avec des micro-sphères en verre de différentes dimensions ont montré que des objets dont le diamètre est inférieur à $\sim 20\ \mu m$ pouvaient être saisis par adhésion.

Pour des objets qui sont proches de cette limite, la supériorité de l'adhésion préhenseur/objet comparée au poids et à l'adhésion substrat/objet n'est pas systématiquement vérifiée. Cette observation se vérifie aussi lors des essais de dépose dynamique : une petite accélération, produite par un signal de quelques volts, soit une accélération de l'ordre de $10\ m/s^2$, suffit à arracher l'objet à la pointe.

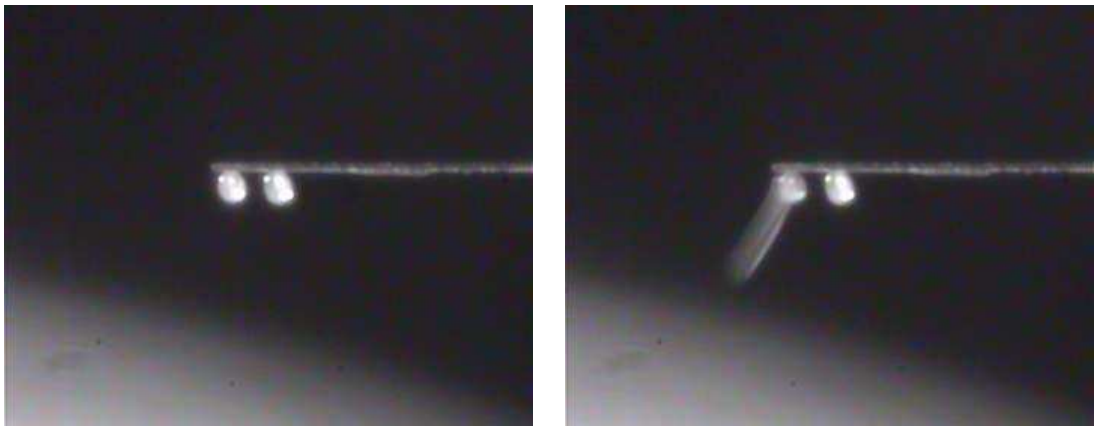
Pour explorer les avantages de cette situation, une expérience, visant à travailler avec des sphères de diamètre de 10 a 20 μm, est proposée. Ces objets existent commercialement sous forme d'une poudre, dont les particules ont été calibrées par filtrage pour respecter la gamme de dimensions désirées. Cette poudre est versée directement sur le substrat. Comme le montre la figure 18, la distribution des billes obtenue est très concentrée et plus ou moins homogène.

FIG. 18: Amas des billes sur le substrat

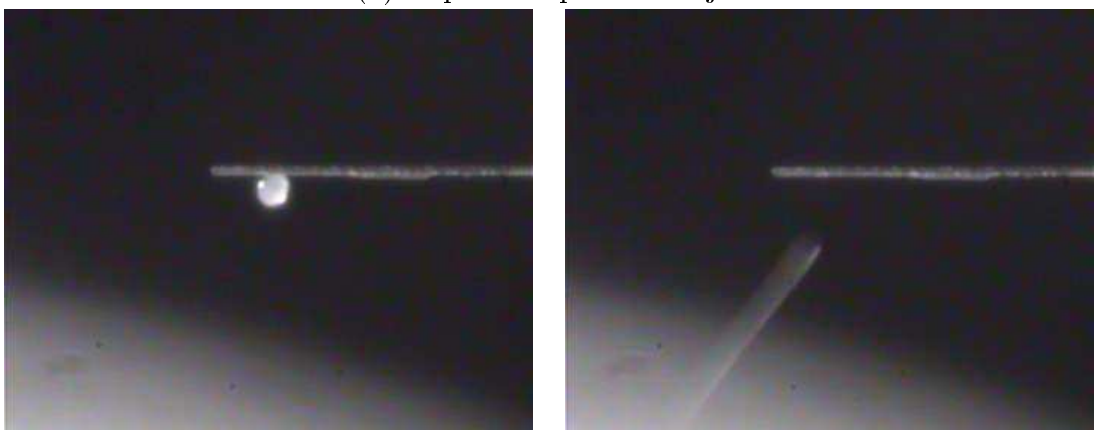
A cause de la densité et de la proximité des objets, ainsi que de l'importance de la surface de la pointe par rapport aux dimensions de ceux-ci, il est impossible d'isoler un seul objet pour le saisir. La figure 19 montre une opération saisie sous ces conditions. Dans ce cas, deux objets sont saisis simultanément.

FIG. 19: Saisie statique des micro-sphères

Puis, le préhenseur est mené dans une position haute, légèrement au dessus du substrat. La céramique piézoélectrique est excitée par un signal sinusoïdal d'une amplitude d'une dizaine de volts dont la fréquence est augmentée progressivement. Au fur et à mesure que cette fréquence d'excitation est augmentée, les billes sont arrachées **une par une**, à chaque fois pour des valeurs spécifiques. Quand la fréquence propre de la poutre seule est atteinte, soit pour une fréquence de **40 kHz**, tous les objet sont relâchés. Cette expérience est illustrée au figure 20.



(a) Dépose du premier objet



(b) Dépose du deuxième objet

FIG. 20: Dépose sélective des 2 objets saisis en vrac

Ce phénomène est sans doute dû au comportement dynamique du système poutre+objet(s). En effet, l'ajout d'une masse à l'extrémité libre d'une poutre encastrée baisse la fréquence de son premier mode de flexion. Donc le système pointe + 2 sphères a une fréquence propre plus basse que le système pointe

+ 1 sphère[1].

Quand, par augmentation de la fréquence d'excitation de la céramique, la résonance du système est approchée, l'amplitude des oscillations de la poutre devient de plus en plus importante. Lorsque l'amplitude atteint une valeur pour laquelle l'accélération instantanée résultante est suffisante pour que la force d'inertie produite vainque l'adhésion à l'interface bille/pointe, l'arrachement d'une bille est observé. Il est à noter que la bille déposée est invariablement la plus proche de l'extrémité car la force d'inertie créée est d'autant plus forte qu'elle se situe proche de l'extrémité libre de la poutre. Le décollement de cette bille réduit ainsi la masse du système, entraînant une augmentation de la fréquence propre. La dynamique du système semble être suffisamment rapide pour réduire les oscillations sans qu'une deuxième bille soit arrachée immédiatement après la première. Pour pouvoir déposer l'objet suivant, il faut donc augmenter la fréquence d'excitation jusqu'à la nouvelle valeur de la résonance.

En utilisant la méthode décrite ci-dessus, la dépose des objets **un par un**, initialement saisis en vrac, est possible. Cette méthode est extrêmement utile car elle permet de trier les micro-objets. En effet, dans certains domaines comme la micro-biologie, les particules manipulées ne sont pas isolées. Plusieurs applications, tels que le procédé de fabrication des anticorps monoclônaless, nécessitent le tri de cellules et l'isolement de l'une d'entre elles [Federspiel *et al.*, 1991]. Avec de légères modifications du préhenseur, le mode de manipulation proposé est en mesure d'effectuer cette tâche qui serait au-delà des capacités des autres méthodes de micro-manipulation. Cette propriété est un réel atout du projet présenté.

Cette fonctionnalité peut être développée en utilisant un préhenseur, spécialement adapté à une tâche précise, dont l'énergie de surface est réduite pour n'être que légèrement supérieure à celle du substrat et du poids de l'objet. Notamment, l'équipe du Prof. Andreas Stemmer à l'ETH de Zurich propose des méthodes de traitement de surface à base de fluorocarbon, visant à en modifier les propriétés d'adhésion [Stemmer *et al.*, 1996]. Ces travaux peuvent contribuer à la mise au point de ce type d'application.

6 Conclusion

Le chapitre 4 décrit les études expérimentales autour du mode de manipulation proposé. Dans un premier temps, les caractéristiques de l'actionneur et

[1] L'étude détaillée d'un système poutre+objet est proposé dans le chapitre suivant.

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 micro-sphère en verre de 50 μm 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 μm de diamètre, destiné au montage de micro-diodes, est réalisée en mettant à profit une interface aqueuse qui facilite la saisie. Enfin, les capacités dynamiques du préhenseur sont mises en oeuvre 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.

Une expérience avec un préhenseur possédant une énergie d'adhésion plus faible et des objets de plus petite taille (des sphères en verre de 10 à 20 μm) a permis la mise au point d'un procédé permettant de trier des micro-objets. Ce mode opératoire permet, en ayant préalablement déterminé leurs nature et dimensions, la saisie de plusieurs objets en vrac pour pouvoir les déposer ensuite un par un à des emplacements précis. Cette possibilité ouvre sans doute des nouvelles perspectives pour les domaines applicatifs du manipulateur réalisé.

Chapitre V

De la manipulation à la caractérisation

Deux grandes classes de problèmes apparaissent encore dans l'utilisation des forces d'adhésion comme support de manipulation. La première a été en partie traitée dans ce document. Il s'agit de positionner un objet, après saisie par adhésion, avec une précision sub-micronique. De nombreuses méthodes existent [Akiyama *et al.*, 2001] [Dellmann *et al.*, 2000] [Takahashi *et al.*, 2001] et cette recherche est intégrée dans le cadre d'un projet ROBEA du CNRS intitulé "Techniques et méthodes pour la télé micro-manipulation".
La deuxième consiste en l'industrialisation de la micro-manipulation. Dans les chapitres précédents, le nouveau mode de micro-manipulation a été proposé et étudié en détails. Les expérimentations présentées au chapitre 4 ont démontré la faisabilité de ce mode de manipulation. Néanmoins, la démarche scientifique et technologique qui a permis la mise au point du système est fastidieuse. En effet, la maîtrise de l'opération nécessite une connaissance préliminaire de l'environnement, des objets à manipuler, du substrat, du préhenseur et des différentes interactions entre ces derniers. Cette connaissance est acquise au prix d'une modélisation dynamique, de simulations numériques et d'une analyse des déformations par la méthode des éléments finis.

Ces étapes sont complètement justifiées dans le cadre d'une étude exploratoire dont le but est la conception et la réalisation d'un nouvel outil, en l'occurrence le micro-manipulateur par adhésion baptisé **[*mü*]MAD**. Par contre, l'intégration de cet outil dans un atelier de micro-mécanique doit pouvoir se passer de cette approche théorique coûteuse en temps et s'accompagner d'un "manuel d'utilisation" permettant à l'utilisateur d'adapter le fonctionnement de **[*mü*]MAD** à la tâche désirée, et plus spécifiquement aux objets à manipuler. De plus, la réalisation d'une tâche industrielle doit être fiable et répétable. Pour ces raisons, il est essentiel de mettre au point une mé-

thode de détermination des paramètres optimaux de manipulation, tels que l'accélération de dépose, l'inclinaison, la vitesse maximale admissible etc.

Classiquement, les réglages d'une machine-outil sont effectuées à l'aide d'abaques. En prenant comme exemple une fraiseuse, le réglage de la vitesse de coupe est obtenu dans un tableau dont l'abscisse et l'ordonnée sont l'épaisseur ou la dureté du matériau et le type du foret utilisé. Il est intéressant de vérifier qu'on peut adopter la même approche pour la micro-manipulation par adhésion. En effet, l'existence d'un abaque similaire fiabiliserait la fonctionnement et l'intégration de **[*mü*]MAD** et faciliterait sa prise en main par l'utilisateur final.

La création d'un abaque nécessite la détermination des grandeurs invariantes qualifiant la micro-manipulation par adhésion. La garantie de la fiabilité du système proposé est étroitement liée à la connaissance de certains paramètres comme la force surfacique objet/préhenseur ou les caractéristiques mécaniques du micro-objet. Il semble primordial d'avoir accès à ces données qui ne font pas parties des informations classiques de la littérature. Il faut donc proposer une méthode de mesure pour leur détermination dans le cadre d'une tâche de manipulation donnée.

Le manipulateur réalisé dispose de moyens d'acquisition intéressants. En effet, son préhenseur actif, et plus spécifiquement le dispositif AFM intégré, s'est montré capable de fournir les informations telles que les forces de contact (de l'ordre de μN) et les fréquences de vibration. Il semble donc possible de tirer profit de cette particularité.

Cette adaptation de **[*mü*]MAD** à la caractérisation et l'importance de la mesure de certaines particularités physiques des objets manipulés entraînent plusieurs questions : quelles sont les mesures nécessaires pour qualifier la micro-manipulation ? Et l'utilisation de **[*mü*]MAD** est-elle possible pour effectuer des mesures pertinentes ? Ces dernières permettraient alors de qualifier et de calibrer le contact objet-poutre soit, par extension, la micro-manipulation par adhésion.

Pour répondre à ces besoins, il faut réussir dans un premier temps à isoler une mesure pertinente capable de qualifier la micro-manipulation **en déterminant, si ils existent, les invariants du mode de manipulation par adhésion**. Une analyse dimensionnelle de la manipulation est alors introduite dans ce chapitre pour mettre en avant certaines constantes propres au système proposé. Il s'agit d'extraire certains paramètres centraux du processus choisi depuis les modèles décrits au chapitre 2. Une fois ces constantes extraites, il faut être capable de les mesurer ou de les identifier. Une synthèse des modèles classiques de déformation est alors proposée : elle relie les efforts surfaciques, les efforts extérieurs, les caractéristiques des objets et les

déformations. Il faut ensuite proposer une modélisation reliant une mesure, par exemple la fréquence propre du système, à une caractéristique physique de l'objet, par exemple sa raideur, son module de Young ou son coefficient de Poisson [Turner et Wiehn, 2001]. Ces dernières caractéristiques sont directement reliées aux surfaces fonctionnelles de contact avec la théorie JKR [Johnson *et al.*, 1971] ou à l'effort de pull-off [Derjaguin *et al.*, 1975] à partie des théories cinétiques du décollement [Robbe-Valloire et Barquins, 1998] [Barquins et Shanahan Martin, 1997]. Une possibilité pour relier ces deux composantes apparaît lors d'une étude théorique simplifiée du mode vibratoire système + objet. Une relation caractéristique pourra ainsi être dégagée de cette étude.

Ce chapitre propose donc une analyse dimensionnelle d'une opération de micro-manipulation. Ensuite, une analyse des modèles de déformations et un rappel sur les poutres en flexion sont introduits. Il s'agit de comparer le mode propre obtenu à partir de cette étude et celui obtenu par expérimentations dans le chapitre précédent. Une fois cette modélisation justifiée, une étude par la méthode de Rayleigh-Ritz est proposée. Elle mettra en avant une relation entre la fréquence propre du système et la raideur de l'objet. Cette relation est ensuite étudiée sous différents aspects pour conclure à l'utilité de **[*mü*]MAD** dans le cadre de mesures micro-mécaniques et par extension, à la rédaction d'un manuel d'utilisation à l'intention d'un utilisateur final.

1 Analyse dimensionnelle

Le problème de la réduction d'échelle est souvent associé à celui de l'analyse dimensionnelle. Cette technique consiste à observer les unités variables d'un problème pour en déduire un sous-ensemble de variables pertinentes, ou des invariants.

L'idée principale de cette partie est de proposer une analyse dimensionnelle sur un système classique de manipulation. Une extrapolation vers la micro-manipulation par adhésion est ensuite effectuée.

1.1 Un exemple simple : le Vacuum Gripper

L'analyse dimensionnelle consiste à exploiter les propriétés d'invariance des relations entre les grandeurs physiques dans un changement de système d'unités fondamentales. Pour comprendre son mécanisme, un exemple simple est choisi, le Vacuum Gripper de l'EPFL [EPFL, 1997] [Bellouard *et al.*, 1997],

produit maintenant industrialisé. Il va permettre de définir un paramétrage intéressant.

Ce préhenseur s'affranchit des forces d'adhésion en utilisant un effet de succion plus aisément contrôlable. Ce manipulateur est illustré sur la figure 1.

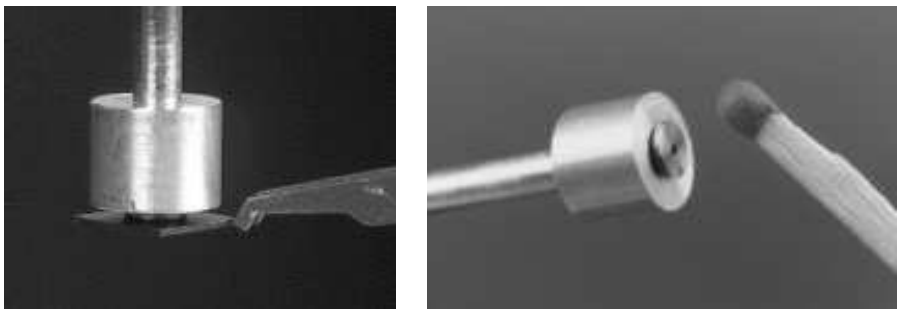


FIG. 1: Système de manipulation par succion "Bernouilli-gripper" (EPFL)

Le coefficient λ représente la force par unité de surface exercée à l'interface entre l'objet et le préhenseur. De plus, ce préhenseur est soumis à une accélération verticale notée γ.

Un système d'unité fondamentale est choisi avec $\mathbf{L}$ pour la longueur, $\mathbf{M}$ pour la masse, $\mathbf{T}$ pour le temps et Θ pour la température. Les paramètres qui influencent la force de saisie et leurs dimensions respectives sont alors :

- γ accélération de l'objet de dimension $[\mathbf{LT}^{-2}]$,
- ρ masse volumique de l'objet $[\mathbf{ML}^{-3}]$,
- l longueur caractéristique de l'objet $[\mathbf{L}]$,
- λ force d'adhésion surfacique $[\mathbf{ML}^{-1}\mathbf{T}^{-2}]$,
- P sur pression générée par le préhenseur $[\mathbf{ML}^{-1}\mathbf{T}^{-2}]$,
- d diamètre caractéristique du préhenseur $[\mathbf{L}]$,
- F force de saisie $[\mathbf{MLT}^{-2}]$.

La forme générique de l'équation recherchée (le calcul de la force de saisie) est de la forme :

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}(\gamma, \rho, \mathbf{l}, \lambda, \mathbf{P}, \mathbf{d}) \tag{1}$$

La matrice des dimensions notée $\mathbf{Dim}$ est construite selon la méthode suivante : chaque colonne correspond à un facteur de la fonction $\mathbf{f}$ dans l'ordre dans lequel ils apparaissent dans l'équation 1. Les lignes de la matrice $\mathbf{Dim}$ correspondent chacune à une grandeur physique du système d'unités fondamentales. La première est la masse $\mathbf{M}$, la deuxième est la longueur $\mathbf{L}$ et la troisième est le temps $\mathbf{T}$. La température est négligée.

$$\mathbf{Dim} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ -2 & 0 & 0 & -2 & -2 & 0 & -2 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{T} \end{pmatrix} \tag{2}$$

Cette matrice est de rang 3. Sept paramètres pertinents ont été déterminés : il faut donc choisir trois variables indépendantes pour déterminer quatre paramètres adimensionnels notés Π. Ce choix s'est orienté vers ρ, γ et $\mathbf{d}$: la matrice résultante de ces variables (colonne 1, 2 et 6) est alors de degré 3.

$$\Pi_1 = \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{d}} \tag{3}$$

$$\Pi_2 = \frac{\lambda}{\rho\gamma\mathbf{d}} \tag{4}$$

$$\Pi_3 = \frac{\mathbf{P}}{\rho\gamma\mathbf{d}} \tag{5}$$

$$\Pi_4 = \frac{\mathbf{F}}{\rho\gamma\mathbf{d}^3} \tag{6}$$

L'équation 1 est alors modifiée selon la forme :

$$\frac{\mathbf{F}}{\rho\gamma\mathbf{d}^3} \simeq \overline{\mathbf{f}}\left(\frac{\mathbf{l}}{\mathbf{d}}, \frac{\lambda}{\rho\gamma\mathbf{d}}, \frac{\mathbf{P}}{\rho\gamma\mathbf{d}}\right) \tag{7}$$

Pour des objets conventionnels (dont la taille est de l'ordre de 1 mm), le rapport $\frac{\lambda}{\rho\gamma\mathbf{d}}$ des forces surfaciques sur les forces volumiques, peut être négligé. On retrouve alors l'équation déterminée pour le mode de fonctionnement de ce micro-manipulateur [Benmayor *et al.*, 1998] :

$$\frac{\mathbf{F}}{\rho\gamma\mathbf{d}^3} = \overline{\mathbf{f}}\left(\frac{\mathbf{l}}{\mathbf{d}}, \frac{\mathbf{P}}{\rho\gamma\mathbf{d}}\right) \tag{8}$$

L'analyse dimensionnelle a permis de redéterminer la forme de l'équation qui décrit le fonctionnement du manipulateur. De plus, elle a mis en avant un terme clef. En effet, en multipliant le numérateur et le dénominateur du terme négligé par $\mathbf{d}^2$, on obtient alors :

$$\frac{\lambda d^2}{\rho\gamma\mathbf{d}^3} \tag{9}$$

Ce nombre représente alors le ratio des forces induites par des phénomènes surfaciques sur les forces d'inertie. On peut simplement observer une

analogie avec le nombre de Reynolds qui représente le ratio des forces d'inertie sur les forces de viscosité. Il existe bien sûr une différence significative : la viscosité d'un fluide peut être mesurée par des moyens classiques et bien maîtrisés. Pour le coefficient des forces surfaciques, ce n'est pas le cas. Seules les interfaces classiques sont connues ou plus vraisemblablement représentées. Néanmoins l'influence de ce nombre représente la limite du système utilisé [Benmayor, 2000].

1.2 La micro-manipulation par adhésion

Selon le processus de la tâche décrit dans le deuxième chapitre, les variables suivantes peuvent être extraites :

- $\lambda_{\mathbf{op}}$: force surfacique à l'interface boule substrat de dimension $[\mathbf{M\,L^{-1}T^{-2}}]$,
- $\mathbf{F_{os}}$ force de pull-off, nécessaire pour casser l'adhésion objet substrat $[\mathbf{M\,LT^{-2}}]$,
- $\rho_{\mathbf{o}}$ masse volumique de l'objet $[\mathbf{M\,L^{-3}}]$,
- $\mathbf{R_o}$ rayon de l'objet $[\mathbf{L}]$,
- $\mathbf{m_p}$ masse du préhenseur $[\mathbf{M}]$,
- $\ddot{\mathbf{Y}}_{\mathbf{P}}$ accélération du préhenseur $[\mathbf{LT^{-2}}]$,
- $\ddot{\mathbf{D}}_1$ accélération de l'objet $[\mathbf{LT^{-2}}]$,

Dans un premier temps, il faut déterminer la variable principale de notre problème. C'est l'accélération de l'objet qui est choisie car elle est directement reliée au résultat de la manipulation (saisie ou dépose). De même, à partir de son estimation, la vitesse, la trajectoire et la force appliquée peuvent être déterminées. Un analogie peut ainsi être effectuée avec l'exemple précédent et le choix de la force de saisie comme variable principale.

La forme générale de l'équation recherchée est alors :

$$\ddot{\mathbf{D}}_1 = \mathbf{f}(\lambda_{\mathbf{op}}, \mathbf{F_{os}}, \rho_{\mathbf{o}}, \mathbf{R_o}, \mathbf{m_p}, \ddot{\mathbf{Y}}_{\mathbf{p}}) \tag{10}$$

A partir de cette équation, la comparaison de $\ddot{\mathbf{D}}_1$ avec $\ddot{\mathbf{Y}}_{\mathbf{P}}$ indique le succès de la saisie ou de la dépose de l'objet. La matrice dimensionnelle $\mathbf{Dim}$ associée au problème et au vecteur $[\lambda_{\mathbf{op}}, \mathbf{F_{os}}, \rho_{\mathbf{o}}, \mathbf{R_o}, \mathbf{m_p}, \ddot{\mathbf{Y}}_{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{D}}_1]$ est alors construite :

$$\mathbf{Dim} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -3 & 1 & 0 & -2 & -2 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{L} \\ \mathbf{T} \end{pmatrix} \tag{11}$$

Elle est de rang 3 et selon la même méthode que précédemment, trois paramètres sont choisis : $\ddot{\mathbf{D}}_1$, $\mathbf{R}_0$ et ρ_0. La forme générale de l'équation re-

cherchée est alors :

$$\frac{\ddot{\mathbf{D}}_1}{\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p}} = \overline{\mathbf{f}}\left(\frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0}{\lambda_\mathbf{op}}, \frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0^3}{\mathbf{F}_\mathbf{os}}, \frac{\rho_\mathbf{o}\mathbf{R}_0^3}{\mathbf{m}_\mathbf{p}}\right) \tag{12}$$

Si la masse du préhenseur est supposée grande devant celle de l'objet, donc ($\frac{\rho_\mathbf{o}\mathbf{R}_0^3}{\mathbf{m}_\mathbf{p}} \rightarrow 0$), deux cas se présentent :

1. pour la saisie, $\ddot{\mathbf{Y}}_\mathbf{p} = \ddot{\mathbf{D}}_1$, l'équation générique recherchée est alors de la forme :

$$\overline{\mathbf{f}}\left(\frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0}{\lambda_\mathbf{op}}, \frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0^3}{\mathbf{F}_\mathbf{os}}\right) = 1 \tag{13}$$

2. pour la dépose ou la relâche de l'objet, $\ddot{\mathbf{D}}_1 \rightarrow 0$, l'équation générique recherchée est alors de la forme :

$$\overline{\mathbf{f}}\left(\frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0}{\lambda_\mathbf{op}}, \frac{\rho_\mathbf{o}\ddot{\mathbf{D}}_1\mathbf{R}_0^3}{\mathbf{F}_\mathbf{os}}\right) = 0 \tag{14}$$

Différents paramètres clefs, certes triviaux, apparaissent pour le succès de la saisie et la dépose de l'objet :
- l'adhésion surfacique objet préhenseur via le paramètre $\lambda_\mathbf{op}$,
- la force de pull-off $\mathbf{F}_\mathbf{os}$,
- les paramètres intrinsèques de l'objet, sa masse et son rayon.

La maîtrise de la micro-manipulation par adhésion, sans s'intéresser aux modèles associés, passe donc par l'étude de ces différents paramètres. A partir du site expérimental réalisé, il faut avoir accès à ces paramètres ou à des termes dérivés. Le problème est donc l'inverse du problème explicité et étudié dans les précédents chapitres. Il s'agit maintenant d'utiliser certaines propriétés de saisie ou de dépose pour calibrer **[*mü*]MAD** et l'étendre à un dispositif de mesure pour extraire les caractéristiques propres des objets.

Avant de proposer des solutions pour extraire des mesures, il faut nécessairement comprendre les relations existantes entre les caractéristiques mécaniques de l'objet et les forces intersurfaciques. Un rappel condensé sur les modèles de déformations à l'échelle microscopiques est donc proposé.

2 Modèles de déformation

Plusieurs modèles décrivant les déformations existent. En 1895, Hertz a considéré deux sphères parfaitement élastiques mises en contact, en supposant une interaction sans attraction ni adhésion et une répulsion entre les

deux surfaces [Johnson, 1985], [Pollock, 1981], [Horn *et al.*, 1987]. Pour des sphères de rayons $\mathbf{R_1}$ et $\mathbf{R_2}$, de modules d'Young $\mathbf{E_1}$ et $\mathbf{E_2}$ et de coefficients de Poisson ν_1 et ν_2, sa théorie propose de calculer le rayon de l'aire de contact $\mathbf{a}$ par :

$$\mathbf{a}^3 = \frac{\mathbf{RF_{ext}}}{\mathbf{E}}$$

La déformation donne alors naissance à une "hauteur d'écrasement" δ (les centres des sphères sont séparés de $\mathbf{R_1} + \mathbf{R_2} - \delta$) calculée par l'expression suivante :

$$\delta = \frac{\mathbf{a}^2}{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{F_{ext}}}{\mathbf{Ea}}$$

où $\mathbf{F_{ext}}$ est la charge extérieure et

$$\frac{1}{\mathbf{R}} = \frac{1}{\mathbf{R_1}} + \frac{1}{\mathbf{R_2}} \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{\mathbf{E}} = \frac{1-\nu_1^2}{\mathbf{E_1}} + \frac{1-\nu_2^2}{\mathbf{E_2}}$$

Ce modèle n'est toutefois pas adapté à la description des déformations à l'échelle microscopique puisqu'il n'intègre aucun effet d'adhésion. Il a néanmoins servi de base pour l'élaboration des modèles suivants.

En 1971, Johnson, Kendall et Roberts (JKR) [Johnson *et al.*, 1971], ont constaté que pour des sphères de faible poids, l'aire de contact est nettement sous estimée par le modèle de Hertz et que de fortes forces d'adhésion maintiennent les surfaces entre elles lorsque ces dernières sont propres et sèches. Ces auteurs ont ensuite proposé une théorie dérivée de celle de Hertz, en partant de deux sphères qui cette fois adhèrent lorsqu'elles entrent en contact. La théorie JKR décrit l'aire de contact par :

$$\mathbf{a}^3 = \frac{3\mathbf{R}}{4\mathbf{E}}\left\{\mathbf{F_{ext}} + 3\pi\mathbf{RW_{12}} + \sqrt{6\pi\mathbf{RW_{12}F_{ext}} + (3\pi\mathbf{W_{12}R})^2}\right\} \tag{15}$$

et la hauteur d'écrasement δ par :

$$\delta = \frac{\mathbf{a}^2}{\mathbf{R}} - \sqrt{\frac{8\pi\mathbf{W_{12}a}}{3\mathbf{E}}} \tag{16}$$

Ces deux formules font clairement apparaître les effets d'adhésion au travers de $\mathbf{W_{12}}$ le travail d'adhésion entre les corps 1 et 2. Lorsque ce dernier est nul, l'aire de contact obtenue est identique à celle décrite par le modèle de Hertz.

Lors de l'absence de charge extérieure, le rayon $\mathbf{a_0}$ de l'aire de contact est :

$$\mathbf{a}_0^3 = \frac{6\pi\mathbf{W_{12}R}^2}{\mathbf{E}}$$

Cette surface de contact engendre des efforts d'adhésion qu'il est nécessaire de vaincre pour séparer deux objets en contact. Toujours d'après cette théorie, il est nécessaire, dans ce cas, d'appliquer une charge négative $\mathbf{P}$ appelée "pull-off" ou force de décollement exprimée par :

$$\mathbf{P} = -\frac{3}{2}\pi \mathbf{R}\mathbf{W}_{12} \tag{17}$$

Ce modèle présente, d'un point de vue théorique, une anomalie. Il prévoit, en effet, une tension infinie au bord de la zone de contact.

En 1975, Derjaguin, Muller et Toporov (DMT) [Derjaguin *et al.*, 1975] ont proposé une théorie combinant les deux précédentes, pour éviter cette tension infinie, en considérant une déformation Hertzienne de la zone de contact et une adhésion due aux forces de surface agissant en dehors de cette dernière.

Les équations du modèle DMT sont ainsi obtenues en additionnant à la force extérieure du modèle de Hertz la force de pull-off. Ainsi le rayon de l'aire de contact et la déformation sont calculés par :

$$\mathbf{a}^3 = \frac{3\mathbf{R}}{4\mathbf{E}}(\mathbf{F}_{\mathbf{ext}} + \mathbf{P}) \tag{18}$$

$$\delta^3 = \frac{9(\mathbf{F}_{\mathbf{ext}} + \mathbf{P})}{16\mathbf{E}^2\mathbf{R}} \tag{19}$$

Cette théorie prévoit qu'il est nécessaire de fournir une force $\mathbf{P}$ pour séparer les solides, exprimée par :

$$\mathbf{P} = -2\pi \mathbf{R}\mathbf{W}_{12} \tag{20}$$

Le problème de la quantification des déformations et de la détermination de l'aire de contact a fait l'objet de plusieurs études essayant de valider l'une ou l'autre des théories précédentes. Maugis et Barquins ont défini un paramètre λ qui indique si le système est mieux décrit par le modèle JKR ou DMT [Maugis et Barquins, 1978] [Maugis, 1992] :

$$\lambda = \frac{2\mathbf{W}_{12}/D_0}{\sqrt[3]{16\pi \mathbf{W}_{12}\mathbf{E}^2/9\mathbf{R}}} \tag{21}$$

Ce paramètre indique que si λ est supérieur à 1 alors le système est mieux décrit par le modèle JKR sinon par le modèle DMT. Plus spécialement, le modèle JKR est plus approprié pour un faible module élastique, une grande adhésion et un fort rayon de contact alors que le modèle DMT est plus adapté pour un fort module élastique,une faible adhésion et un faible rayon de contact.

A partir de ces modèles, on peut alors facilement en déduire la constante de l'objet [Dinelli et Biswas, 2000] :

$$\mathbf{k} = \frac{\partial \mathbf{F_{ext}}}{\partial \delta} \tag{22}$$

Selon le modèle choisi, on obtient alors :

$$\mathbf{k_{DMT}} = 6(\mathbf{F_{ext}} + \mathbf{P})^{\frac{1}{3}}\mathbf{RE}^2 \tag{23}$$

$$\mathbf{k_{JKR}} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{M}} \frac{3^{\frac{2}{3}}\mathbf{A}^{\frac{1}{3}}}{(2+\mathbf{B})\mathbf{A} + \left(2 + \frac{\mathbf{F_{ext}}}{\mathbf{P}} + \mathbf{A}\right)\mathbf{B}} \tag{24}$$

avec $\mathbf{A} = 2\left(1 + \frac{\mathbf{F_{ext}}}{\mathbf{P}}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\mathbf{F_{ext}}}{\mathbf{P}} + 2$, $\mathbf{B} = 1 + \frac{1}{\left(1+\frac{\mathbf{F_{ext}}}{\mathbf{P}}\right)^{\frac{1}{2}}}$ et $\mathbf{M} = \frac{3}{4}\left(\frac{\mathbf{P}^2}{16\mathbf{E}^2\mathbf{R}}\right)^{\frac{1}{3}}$.

A partir de ces formulations, on peut donc relier différentes caractéristiques. La mesure de la raideur du système peut ainsi permettre de calculer, via les formulations précédentes, soit la force de pull-off soit des caractéristiques propres comme le module de Young de l'objet.

Dans les différentes expérimentations entreprises, la vibration du système poutre + objet prend toujours une grande importance, que ce soit pour le mode de flexion ou pour celui de torsion. Le dessein de la caractérisation est de corréler les fréquences propres du système avec les caractéristiques recherchées [Yamanaka *et al.*, 2000].

3 Théorie des poutres en flexion

Le propos de ce paragraphe est de faire un rappel succinct sur les poutres en flexion. Dans un premier temps, il s'agit de montrer que la théorie classique permet de déterminer une fréquence de résonance de la poutre proche de celle observée expérimentalement. Par la suite, il s'agit de relier les caractéristiques physiques de l'objet étudié au comportement vibratoire, afin d'extraire ces caractéristiques à partir d'essais dynamiques.

On rappelle que l'équation d'une poutre en mouvement de flexion (vibrations naturelles non amorties) s'écrit :

$$\frac{\partial^4 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}^4} + \frac{\rho S}{\mathbf{E}\,\mathbf{I}} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}^2} = 0 \tag{25}$$

avec ρ la masse volumique de la poutre, $\mathbf{I}$ le moment quadratique de la section, $\mathbf{E}$ son module de Young et $\mathbf{S}$ sa section. Si on suppose que la solution est une superposition d'ondes stationnaires, on peut utiliser la méthode de

résolution par séparation des variables.

On pose alors :

$$\mathbf{v}(x, \mathbf{t}) = \mathbf{f}(\mathbf{x})\mathbf{g}(\mathbf{t}) \tag{26}$$

La résolution analytique de l'équation 25 conduit à la solution :

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}\cos(\mathbf{K}\mathbf{x}) + \mathbf{B}\sin(\mathbf{K}\mathbf{x}) + \mathbf{C}\mathrm{ch}(\mathbf{K}\mathbf{x}) + \mathbf{D}\mathrm{sh}(\mathbf{K}\mathbf{x}) \tag{27}$$

avec $\mathbf{K}^2 = \frac{\omega}{\mathbf{c}}$, $\frac{1}{\mathbf{c}^2} = \frac{\rho S}{\mathbf{EI}}$ et ω la fréquence propre du système. Les constantes $\mathbf{A}$,$\mathbf{B}$,$\mathbf{C}$ et $\mathbf{D}$ sont déterminées par les conditions aux limites.

Le système à résoudre, avec les conditions limites, devient :

$$1 + \mathrm{ch}(\mathbf{KL})\cos(\mathbf{KL}) = 0 \tag{28}$$

Une résolution numérique de cette équation est proposée dans [Gérardin et Rixen, 1996] soit :

$$\mathbf{KL} = 1.875 \tag{29}$$

On peut alors en déduire la première pulsation propre de la poutre :

$$\omega = \sqrt{\frac{\mathbf{EI}}{\rho S}\mathbf{K}^4} = 2.47\ 10^5\ \mathbf{r}ad.s^{-1} \tag{30}$$

avec $\mathbf{L} = 600\,\mu m$, $\mathbf{E} = 47\,\mathbf{GPa}$, $\mathbf{I} = 1.166\ 10^{-20}\,\mathbf{m}^4$, $\rho = 2330\ \mathbf{kg}/m^3$ et $\mathbf{S} = 14\ 10^{-10}\,\mathbf{m}^2$.

La première fréquence propre se déduit facilement :

$$\mathbf{f} = \frac{\omega}{2\pi} = 39,3\ \mathbf{kHz} \tag{31}$$

Cette fréquence est proche de celle observée physiquement ($\mathbf{f} \simeq 40\ \mathbf{kHz}$) par les différentes expérimentations.

4 Le premier mode de flexion du système “poutre + objet”

Dans le cadre d'une mesure avec un objet inconnu, la détermination de la relation entre les caractéristiques mécaniques de l'objet saisi par le préhenseur et le mode de résonance de ce dernier permettra d'extraire ses caractéristiques en observant les vibrations du système. Dans cette perspective,

le premier problème à résoudre consiste à modéliser le système mécanique "poutre+objet".

L'objet est supposé élastique déformable et possède une masse. La déformation élastique peut donc être modélisée par un ressort muni d'une raideur à déterminer. Cette raideur représente la caractéristique physique recherchée. La masse de l'objet est aussi une inconnue du problème. La poutre et l'objet saisi par adhésion peuvent être modélisés par le système représenté à la figure 2. Il est donc composé d'un système continu et d'un système supposé discret.

FIG. 2: Modélisation du système poutre-objet

Le problème est trop complexe pour une résolution par des méthodes exactes [Timoshenko et Goodier, 1970]. Celle-ci s'est orientée vers des méthodes approchées, et particulièrement la méthode de Rayleigh-Ritz, la plus adaptée au problème [Axisa, 2001]. Il s'agit en effet de déterminer la première fréquence propre du système.

Dans un premier temps, il faut modéliser la poutre, système continu, par des fonctions approchées. En construisant une approximation polynomiale de la déformée de la poutre par une série de fonctions cinématiquement admissibles ($\mathbf{v(0,t)} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{(0,t)} = \mathbf{0}$) extraites de la série des monômes $[\mathbf{1}, \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{L}}, \frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{L}^2}, ..., \frac{\mathbf{x}^n}{\mathbf{L}^n}]$, le déplacement vertical $\mathbf{v}(x, \mathbf{t})$ s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{v}(x, \mathbf{t}) = \mathbf{f}_1(\mathbf{t})\frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{L}^2} + \mathbf{f}_2(\mathbf{t})\frac{\mathbf{x}^3}{\mathbf{L}^3} \tag{32}$$

avec $\mathbf{f}_1$, $\mathbf{f}_2$ les degrés de liberté de la poutre.

Le choix de la combinaison des fonctions paraboliques et cubiques est motivé par le fait que la solution engendrée par ces deux fonctions pour la poutre seule encastrée est très proche de la solution exacte pour le premier mode de flexion (la vraie déformée étant la combinaison de toute les fonctions de la série non limitée des monômes ci-dessus) [Del Pedro et Pahud, 1992].

L'énergie cinétique, pour les systèmes continus en flexion, s'écrit :

$$\mathbf{Ec_{poutre}} = \frac{1}{2}\rho S \int_0^{\mathbf{L}} (\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{t}})^2 \mathbf{dx} \tag{33}$$

De même, l'énergie potentielle de la poutre est donnée par la formule :

$$\mathbf{Ep_{poutre}} = \frac{1}{2}\mathbf{EI}\int_0^{\mathbf{L}}(\frac{\partial^2\mathbf{v}}{\partial\mathbf{x}^2})^2\mathbf{dx} \tag{34}$$

La deuxième composante du système est l'objet. Celui-ci introduit un degré de liberté supplémentaire, le déplacement vertical, représenté sur la figure 2.

On peut donc en déduire les expressions des énergies cinétiques et potentielles de cet objet :

$$\mathbf{Ec_{objet}} = \frac{1}{2}\mathbf{m_{objet}}\dot{\mathbf{f}}_3(\mathbf{t})^2 \tag{35}$$

$$\mathbf{Ep_{objet}} = \mathbf{k_{objet}}(\mathbf{f}_3(\mathbf{t}) - \mathbf{v}(L,\mathbf{t}))^2 = \mathbf{k_{objet}}(\mathbf{f}_3(\mathbf{t}) - \mathbf{f}_1(\mathbf{t}) - \mathbf{f}_2(\mathbf{t}))^2 \tag{36}$$

L'énergie cinétique totale est la somme des énergies de chaque sous-système. A partir d'une écriture sous forme de coordonnées généralisées $[\dot{\mathbf{f}}_1(\mathbf{t}), \dot{\mathbf{f}}_2(\mathbf{t}), \dot{\mathbf{f}}_3(\mathbf{t})]$, la matrice d'inertie du système peut être déduite simplement :

$$\bar{\bar{\mathbf{M}}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{5}\rho S\mathbf{L} & \frac{1}{6}\rho S\mathbf{L} & 0 \\ \frac{1}{6}\rho S\mathbf{L} & \frac{1}{7}\rho S\mathbf{L} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{m_{objet}} \end{pmatrix} \tag{37}$$

De la même façon, l'énergie potentielle peut être calculée. La matrice de raideur du système poutre+objet associée aux coordonnées généralisées $[\mathbf{f}_1(\mathbf{t}), \mathbf{f}_2(\mathbf{t}), \mathbf{f}_3(\mathbf{t})]$ est ainsi déduite :

$$\bar{\bar{\mathbf{K}}} = \begin{pmatrix} \frac{4\mathbf{EI}}{\mathbf{L}^3} + \mathbf{k_{objet}} & \frac{6\mathbf{EI}}{\mathbf{L}^3} + \mathbf{k_{objet}} & -\mathbf{k_{objet}} \\ \frac{6\mathbf{EI}}{\mathbf{L}^3} + \mathbf{k_{objet}} & \frac{12\mathbf{EI}}{\mathbf{L}^3} + \mathbf{k_{objet}} & -\mathbf{k_{objet}} \\ -\mathbf{k_{objet}} & -\mathbf{k_{objet}} & \mathbf{k_{objet}} \end{pmatrix} \tag{38}$$

Pour déterminer la fréquence propre associée à ce système, il faut alors résoudre l'équation suivante :

$$\mathbf{det}(\bar{\bar{\mathbf{K}}} - \bar{\bar{\mathbf{M}}}\omega^2) = 0 \tag{39}$$

La résolution analytique de ce système permet d'aboutir à l'équation suivante avec $\mathbf{k_{objet}} = \mathbf{k}$ et $\mathbf{m_{objet}} = \mathbf{m}$:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{1260\mathbf{L}^6} \quad (\quad & -15120\mathbf{E}^2\mathbf{I}^2\mathbf{k} + 15120\mathbf{E}^2\mathbf{I}^2 m\omega^2 + 5040\mathbf{EIkL}^3 m\omega^2 \\ & +1224\mathbf{EI}\rho S\mathbf{L}^4\omega^2\mathbf{k} - 1224\mathbf{EI}\rho S\mathbf{L}^4\omega^4\mathbf{m} \\ & -12\mathbf{kL}^7\rho S\omega^4\mathbf{m} - \rho^2\mathbf{S}^2\mathbf{L}^8\omega^4\mathbf{k} + \rho^2\mathbf{S}^2\mathbf{L}^8\omega^6\mathbf{m}) = 0 \end{aligned} \tag{40}$$

Si l'on admet que la fréquence propre du système est déterminée expérimentalement ainsi que toutes les caractéristiques de la poutre, alors l'équation précédente peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{a_1 k} + \mathbf{b_1 k m} + \mathbf{c_1 m} = 0 \tag{41}$$

avec $\mathbf{a_1} = -15120\mathbf{E}^2\mathbf{I}^2 + 1224\mathbf{E}\,\mathbf{I}\rho S\mathbf{L}^4\omega^2 - \rho^2\mathbf{S}^2\mathbf{L}^8\omega^4$, $\mathbf{b_1} = 5040\mathbf{E}\,\mathbf{I}\,\mathbf{L}^3\omega^2$ et $\mathbf{c_1} = 15120\mathbf{E}^2\mathbf{I}^2\omega^2 - 1224\mathbf{E}\,\mathbf{I}\rho S\mathbf{L}^4\omega^4 - 12\mathbf{k}\mathbf{L}^7\rho S\omega^4 + \rho^2\mathbf{S}^2\mathbf{L}^8\omega^6$.

Les différentes constantes $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{b_1}$ et $\mathbf{c_1}$ sont donc liées aux caractéristiques propres connues de la poutre ainsi qu'à sa fréquence de résonance. Le problème consiste donc à résoudre une équation non linéaire à deux inconnues $\mathbf{m}$ et $\mathbf{k}$.

5 Différentes caractérisations micro-physiques

5.1 De la masse de l'objet à sa raideur

L'une des clefs du système de mesure proposé est donc d'obtenir des informations sur les caractéristiques des micro-objets manipulés comme par exemple la masse. Si l'on considère une sphère en silicium de 50 μm de rayon, sa masse est d'environ $\mathbf{m} = 1.21 \cdot 10^{-9}\ \mathbf{kg}$ soit un poids aux alentours de $10^{-8}\ \mathbf{N}$.
La précision de la pointe AFM est de l'ordre du nanonewton. L'objet possède donc un poids dix fois supérieur à la précision recherchée : la mesure de la masse semble donc possible avec la pointe pour cette classe dimensionnelle d'objets et impossible pour des objets de taille plus petite.

En effet, si l'objet adhère à la pointe (il est saisi par adhésion), le système formé par l'objet et la pointe est un système unique. La seule mesure effectuée par le pont de Wheatstone est alors le poids de l'objet. Cette mesure est effectuée pour une sphère en silicium :

$$\text{masse} = 0.88\ 10^{-8}\ \textbf{kilogrammes} \tag{42}$$

Cette mesure est comparable avec la masse estimée. De plus, à partir de cette mesure et de la connaissance de la fréquence propre du système, la raideur de l'objet peut être calculée grâce à l'équation 41. Les différents paramètres sont estimés à :

$$\mathbf{a_1} = 1.90\ S.I. \tag{43}$$
$$\mathbf{b_1} = -0.16\ 10^{10}\ S.I. \tag{44}$$
$$\mathbf{c_1} = -0.30\ 10^{9}\ S.I. \tag{45}$$

La raideur calculée vaut alors :

$$\mathbf{k} = 0.49\ \mathbf{N}/m \tag{46}$$

Connaissant la raideur et d'après la théorie JKR, on peut déduire certaines caractéristiques propres (module de Young) ou la surface de contact [Yamanaka *et al.*, 1999] [Dinelli et Biswas, 2000].

5.2 Mesure de la masse avec plusieurs objets

Une des hypothèses principales pour déterminer la raideur d'un objet est la connaissance ou la mesure de la masse pour résoudre ensuite l'équation 41. Si l'on considère maintenant des sphères en silicium de rayon $5\ \mu m$, la masse estimée est alors $\mathbf{m} = 10^{-12}\ \mathbf{kg}$ soit un poids de $10^{-11}\ \mathbf{N}$. Cette caractéristique ne peut être mesurée par la pointe AFM. Néanmoins, ce problème peut être résolu par un système de deux équations.

La première est déterminée selon la méthode établie dans les pages précédentes. On considère un objet saisi et on mesure la fréquence propre du système. Une équation à deux inconnues $\mathbf{k}$ et $\mathbf{m}$, est alors déterminée :

$$\mathbf{a_1 k} + \mathbf{b_1 km} + \mathbf{c_1 m} = 0 \tag{47}$$

La deuxième est déterminée en supposant que le manipulateur saisisse par adhésion **deux objets** en série (le deuxième objet adhère au premier). Suivant la même démarche (avec cette fois un système de coordonnées généralisées à quatre variables) et en admettant que les objets ont les mêmes caractéristiques, une deuxième équation à deux inconnues est alors déterminée :

$$\mathbf{a_2 k} + \mathbf{b_2 km} + \mathbf{c_2 m} = 0 \tag{48}$$

Si l'on reprend l'exemple du chapitre précédent, les fréquences propres obtenues avec la bille de rayon estimé à $5\ \mu m$ étaient de $32\ \mathbf{kHz}$ et avec deux billes de $28\ \mathbf{kHz}$. Le calcul des différents coefficients donne alors :

- $\mathbf{a_1} = 1.83\ S.I.$, $\mathbf{b_1} = -0.16\ 10^{12}\ S.I.$ et $\mathbf{c_1} = 0.29\ 10^{11}\ S.I.$
- $\mathbf{a_2} = 1.87\ S.I.$, $\mathbf{b_2} = -0.42\ 10^{12}\ S.I.$ et $\mathbf{c_2} = 0.24\ 10^{11}\ S.I.$

La solution unique non triviale est alors :

$$\text{masse} = 1.18\ 10^{-12}\ \mathbf{kg} \tag{49}$$

$$\text{raideur} = 2.0710^{-2}\ \mathbf{N\,m^{-1}} \tag{50}$$

La masse estimée est d'environ $10^{-12}\ \mathbf{kg}$ ce qui semble justifier l'approche proposée.

5.3 Étude de l'énergie d'interface objet substrat

L'idée principale de l'utilisation du système de micro-manipulation par adhésion pour appréhender certaines constantes physiques peut apparaître comme un problème inverse de la manipulation. En effet, l'étude dimensionnelle a montré que la saisie et la dépose d'un objet n'était affectée que par trois classes de paramètres, la force de contact objet/substrat ou force de pull-off, l'adhésion objet/préhenseur et certaines caractéristiques mécaniques de l'objet via la modélisation JKR ou DMT.

Si les conditions statiques nécessaires pour la manipulation par adhésion sont vérifiées, alors l'objet est toujours saisi. Cependant, pour pouvoir choisir le préhenseur adapté et ainsi garantir la manipulation, la force de pull-off doit être estimée. Un processus expérimental peut alors être mis en application. Il s'agit de saisir l'objet de façon quasi-statique. Ainsi l'effort mesuré par le pont de Wheatstone est directement relié à la mesure de l'effort de pull-off. Dès que l'interface objet substrat cède, la différence instantanée correspond à l'effort de pull-off.

Pour obtenir une mesure de la force de pull-off, la manipulation doit être quasi-statique [Agache V. et L., 2002]. En effet, l'influence des effets cinétiques est très mal connue sur la force de pull-off [Vallet et Barquins, 2002]. Cette nécessité quasi-statique est surmontée avec l'utilisation du nano-translateur, capable d'effectuer des déplacements de l'ordre de $10\,nm/s$.

Deux exemples sont proposés pour mieux comprendre cette procédure. Les mesures sont effectuées pour deux substrats différents, le PEEK et le cuivre (figure 3).

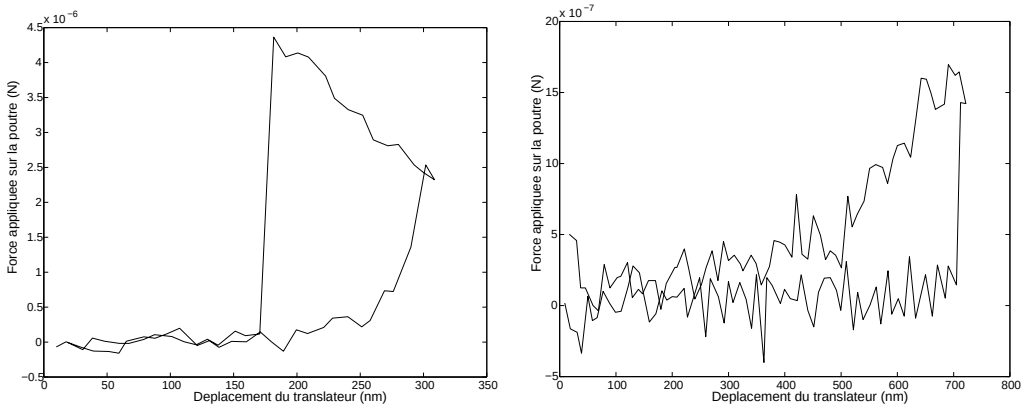


FIG. 3: Mesure du pull-off pour un contact avec le cuivre et le peek

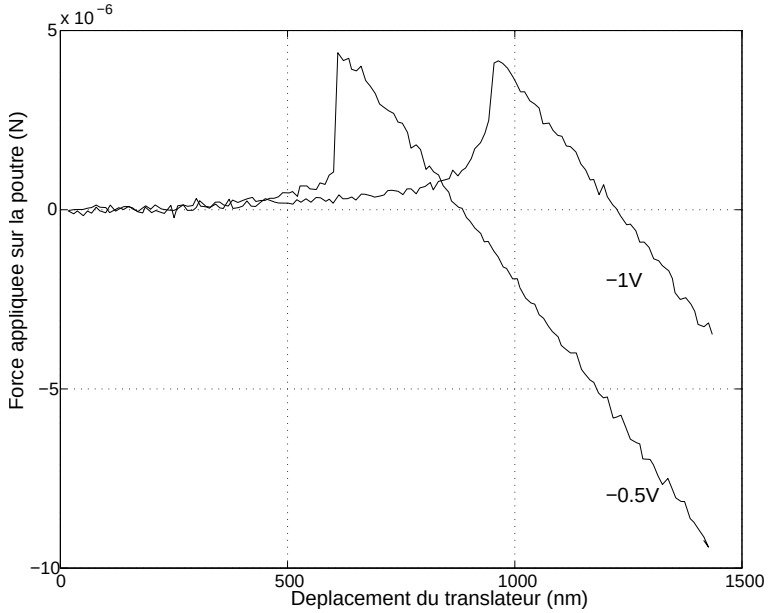


FIG. 4: Mesure du pull-off pour des contacts différents -0.5 **V** et -1 **V** avec le cuivre

Dans les deux cas, la force de pull-off peut alors être estimée à partir du "saut" d'adhésion soit :

- pour le contact objet-cuivre, $\mathbf{F_{pull-off}} \sim 4.45\ 10^{-6}\ \mathbf{N}$
- pour le contact objet-cuivre, $\mathbf{F_{pull-off}} \sim 1.43\ 10^{-6}\ \mathbf{N}$

Une deuxième difficulté doit être surmontée pour valider la mesure : la force appliquée par l'objet sur le préhenseur. En effet, la force de pull-off est directement reliée à la hauteur d'écrasement et il convient de vérifier que la mesure reste stable pour différentes pressions du préhenseur (soit des mesures de tension du pont de Wheatstone négatives). Sur le substrat en cuivre, deux tests sont effectués pour des tensions mesurées de $-0.5\,\mathbf{V}$ et $-1\,\mathbf{V}$ engendrant différents efforts de pression.

Les mesures sont similaires aux mesures précédentes et valident ce procédé de quantification de l'effort. Bien sur, les conditions environnementales représentent des difficultés majeures. La construction d'une nouvelle salle blanche est en cours dans notre laboratoire afin de pouvoir travailler en environnement contrôlé.

5.4 De l'accélération de dépose à l'énergie d'interface objet préhenseur

Une autre application provient directement de la dépose dynamique. En effet, le calcul de l'accélération nécessaire pour casser l'adhésion est directement relié à l'effort inertiel nécessaire pour vaincre la force intersurfacique objet/préhenseur.

Pour l'exemple établi au chapitre précédent pour la dépose dynamique, cette première accélération est égale à :

$$\gamma = 10^6 \, \mathbf{ms}^{-2} \tag{51}$$

Cette accélération est directement reliée à la force extérieure nécessaire pour casser l'adhésion. Nous pouvons donc en déduire :

$$\mathbf{F}_{ext/objet} = \mathbf{F_{adh}} = \mathbf{m_o} \, \gamma \tag{52}$$

L'objet considéré était de rayon $5 \, \mu m$ et de masse approximative $1.18 \; 10^{-13} \, \mathbf{kg}$, donc l'adhésion objet préhenseur peut être estimée à :

$$\mathbf{F_{adh}} = 1.18 \; 10^{-12} \times 10^6 = 1.18 \; 10^{-6} \, \mathbf{N} \tag{53}$$

Dans tous les cas, sans s'intéresser au processus de dépose de l'objet, cette méthode semble capable de calculer l'adhésion entre l'objet et le préhenseur.

5.5 Vers la torsion

Selon la même analogie, il semble possible d'exploiter le mode propre de torsion pour déterminer la rigidité à la torsion ou plus simplement la distance du centre de gravité de l'objet à l'axe de symétrie de la poutre.

En effet, la torsion est induite par une distance notée $\mathbf{d_t}$ de l'objet à l'axe de symétrie de la poutre :

$$\mathbf{M_{torsion}} = \mathbf{m_o} \, \mathbf{g} \, \mathbf{d_t} \tag{54}$$

On peut alors exploiter simplement une méthode numérique pour déterminer cette distance à partir de la fréquence propre. Comme cette démarche est rigoureusement identique à celle appliquée pour la flexion, elle n'est pas développée ici.

6 Conclusion

Le propos de ce dernier chapitre était de chercher à calibrer et à quantifier la micro-manipulation. En effet, si la méthode utilisée semble maintenant donner des résultats satisfaisants pour la manipulation, un problème important peut apparaître : comment rendre le système fiable et robuste vis à vis d'un objet donné ?

Pour répondre à cette question, il s'avère nécessaire de déterminer les caractéristiques physiques de l'objet manipulé ainsi que l'adhésion surfacique objet/préhenseur et la force de pull-off. Il s'agit alors de vérifier l'adaptabilité de **[*mü*]MAD** aux tâches de caractérisation pour permettre l'extraction de ces données.

Dans un premier temps, des rappels ont été proposés sur l'analyse dimensionnelle pour l'extraction des paramètres à mesurer, sur les modèles de déformation et sur les poutres en flexion. Ces études ont permis de déterminer des relations entre les caractéristiques physiques recherchées et les informations fournies par **[*mü*]MAD**. Enfin, différentes mesures ont été effectuées pour mettre en valeur ce processus dans le cadre de la fiabilisation du système proposé.

Il est à noter que ce chapitre a une approche exploratoire : il ne s'agit pas d'un travail abouti mais plutôt d'une ouverture de perspectives, autour du manipulateur réalisé, vers le domaine de la caractérisation et de la micrométrologie.

Conclusion

Dans ce mémoire, une étude de la micro-manipulation dynamique par adhésion et ses propriétés a été proposée.

Le premier chapitre présente un état de l'art de la micro-manipulation. Toutes les approches sont explorées pour mettre en avant les spécificités du système proposé et ses nécessités. Ensuite, une analyse des effets microscopiques intersurfaciques est effectuée. Son objectif peut être décliné à plusieurs niveaux. Il s'agit d'appréhender le choix de l'adhésion comme l'élément central de la manipulation, mais aussi de proposer une approche unifiée, un vocabulaire précis et des formulations analytiques associés aux différentes forces présentes.

Le deuxième chapitre décrit une modélisation dynamique d'une tâche canonique, d'abord sous l'hypothèse de corps rigides puis de corps déformables (par éléments finis). Une modélisation possédant deux états ("attaché" ou "détaché"), ainsi qu'une condition de transition entre ces deux états, sont proposées. La modélisation intègre les particularités propres à l'échelle microscopique et les spécificités de la micro-manipulation par adhésion. Des simulations numériques effectuées avec ces modèles font apparaître trois modes de fonctionnement différents : saisie statique, dépose statique et dépose dynamique. Ce dernier, qui constitue la particularité de ce travail dans le domaine de la micro-manipulation, nécessite une dynamique du système élevée, avec des accélérations allant jusqu'à 10^6 m/s^2. Enfin, une étude par éléments finis complète la modélisation permettant ainsi de disposer d'un logiciel de simulation entièrement dédié à la micro-manipulation par adhésion.

Le troisième chapitre décrit la conception du système expérimental, baptisé **[*mü*]MAD**, répondant aux exigences dynamiques de la manipulation

par adhésion. Une attention particulière est portée au préhenseur actif. Des modélisations précises sont proposées pour extraire les caractéristiques dimensionnelles et matérielles de son système d'actionnement (une céramique piézoélectrique) et de son système de préhension (une micro-poutre piézorésistive). Enfin, le banc expérimental dans son ensemble est décrit en fonction des exigences du mode de manipulation.

Le quatrième chapitre est totalement consacré aux expérimentations. Dans la première partie, les caractérisations de la dynamique de l'actionneur (par interférométrie laser) et du préhenseur (en utilisant le signal de la poutre piézorésistive) sont effectuées, validant ainsi les choix réalisés. Dans la deuxième partie, une série d'expérimentations, entièrement basées sur l'adhésion et caractérisant toutes les phases de manipulation, permet de justifier l'approche proposée. La dépose dynamique par effet inertiel et la dépose sélective apparaissent alors comme les points forts du système de manipulation.

Le cinquième chapitre a une vocation exploratoire. Il ouvre la réflexion sur la mise en relation des paramètres du système (force de pull-off, surface de contact, etc.), d'une part, à travers une analyse dimensionnelle du problème pour en extraire les invariants et, d'autre part, par un rappel de la modélisation des déformations. A partir de ces résultats, on constate la possibilité de caractériser les micro-objets (la masse et la raideur) via l'étude des vibrations du système. Ainsi, le mode opératoire pour la caractérisation est décliné selon différentes approches.

De nombreuses perspectives apparaissent à l'issue de ce travail. Celui-ci a en effet permis le passage de la validation de l'adhésion, comme support de micro-manipulation, à un système robuste intégrant chacun des modes de fonctionnement.

Les perspectives sont rassemblées dans un projet ROBEA du CNRS intitulé "Techniques et méthodes pour la télé micro-manipulation". Celui-ci se décompose en 4 thèmes :

- **identification des paramètres micro-physiques :** il s'agit de continuer et d'approfondir l'exploration entreprise dans le cinquième chapitre, vers la caractérisation de la micro-manipulation et des objets.
- **conception de micro-préhenseur actif :** la synthèse d'un préhenseur à surface fonctionnelle adaptative est en cours d'élaboration. Il s'agit de s'appuyer sur la maîtrise et l'utilisation de l'adhésion : le préhenseur sera ainsi capable de maximiser l'adhésion pour la saisie et de la minimiser pour la dépose, en agissant sur la surface de contact avec

l'objet.
- **commande référence vision et efforts :** l'automatisation de la manipulation et la commande par le couplage vision - efforts sont des objectifs à court terme du projet.
- **retour micro-haptique :** le dessein final est la télé manipulation des micro-objets. Il est donc primordial de transmettre à l'opérateur les forces et les effets physiques présents dans l'environnement de manipulation.

Toutes ces parties composent autant de perspectives nouvelles à ce travail.

Références

[Adamson, 1990] A.W. Adamson. *Physical chemistry of surfaces, fifth edition, pp 4-52.* Wiley Interscience publication, 1990.

[Agache V. et L., 2002] Collard D. Agache V., Legrand B. et Buchaillot L. *Adhesive forces investigation on a silicon tip by contact-mode atomic force microscope. Applied Physics Letters*, 81(14) :2623–2625, 2002.

[Akiyama *et al.*, 2001] T. Akiyama, U. Staufer, et N.F. de Rooij. *Atomic force microscopy using an integrated comb-shape electrostatic actuator for high-speed feedback motion. Applied Physics Letters*, 76(21) :3139–3141, 2001.

[Ando *et al.*, 1991] Y. Ando, H. Ogawa, et Y. Ishikawa. *Estimation of attractive force between approached surfaces.* In *proc. of the 2nd International Symposium on Micromachine and Human Science*, pages 133–138, 1991.

[Arai *et al.*, 1996] F. Arai, T. Fukuda, H. Iwata, et K. Itoigawa. *Integrated Micro Endeffector for Dexterous Micromanipulation.* In *proc. of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pages 149–156, 1996.

[Arai *et al.*, 2001] F. Arai, A. Kawaji, P. Luangjarmekorn, T. Fukuda, et K. Itoigawa. *Three-Dimensional Bio-Micromanipulation under the Microscope.* In *Proc. of the International Conf. on Robotics and Automation Vol. 1 (ICRA 2001)*, pages 604–609. IEEE, 2001.

[Arai et Fukuda, 1997] F. Arai et T. Fukuda. *Adhesion-type Micro Endeffector for Micromanipulation.* In *proc. of IEEE international conference on robotics and automation*, pages 1472–1477, 1997.

[Axisa, 2001] François Axisa. *Modélisation des systèmes mécaniques Vol. 2 : systèmes continus.* Hermes, 2001.

[Banerjea *et al.*, 1991] A. Banerjea, J. Ferrante, et J.R. Smith. *Adhesion at Metal Interfaces, in Fundamentals of Adhesion, pp 325-348.* Edited by Lieng-Huang Lee, Plenum Press, 1991.

[Barquins et Shanahan Martin, 1997] M. Barquins et E.R. Shanahan Martin. *Effect of surface cavities on static and dynamic adhesion to an elastomer. International Journal of adhesion and adhesives*, 17(4) :313–317, 1997.

[Bellouard *et al.*, 1997] Y Bellouard, R Clavel, et J-E. Bidaux. *A new design of Shape Memory Alloy micro-gripper used in micro-optics assembly.* In *Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.

[Benmayor *et al.*, 1998] L Benmayor, S Koelemeijer, et J. Jacot. *Modeling of micro-forces in micro-object handling.* In *Microrobotics and Micromanipulation SPIE Vol. 3519*, 1998.

[Benmayor, 2000] L Benmayor. *Dimensional Analysis and Similitude in Microsystem Design and Assembly.* PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.

[Bowling, 1986] R.A. Bowling. *A Theoretical Review of Particle Adhesion.* In *Symposium on particules on surface 1 : Detection, Adhesion and Removal, San Francisco*, pages 129–142, 1986.

[Butt, 1991] H-J Butt. *Measuring electrostatic, van der waals, and hydratation forces in electrolyte solutions with an AFM. Biophys. J.*, 60 :1438–1444, 1991.

[Calin *et al.*, 1997] M. Calin, N. Chaillet, J. Agnus, et A. Bourjault. *Design of cooperative Microrobots with impedance Optimization.* In *Proc. of the International Conference on Intelligent Robotics Systems*, pages 1312–1317, 1997.

[Del Pedro et Pahud, 1992] M. Del Pedro et P. Pahud. *Mécanique vibratoire : systèmes discrets linéaires.* Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1992.

[Dellmann *et al.*, 2000] L. Dellmann, A. Akiyama, D. Briand, S. Gautsch, O.T. Guenat, B. Guldimann, et N.F. de Rooij. *Microsystems for diverse applications using recently developed microfabrication techniques.* In *Proc. MOEMS and Miniaturized Systems*, pages 16–27, 2000.

[Derjaguin *et al.*, 1975] B. V. Derjaguin, V.M. Muller, et YU. P. Toporov. *Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles. Journal of Colloid and interface science*, 53, No. 2 :314–326, 1975.

[Dieulesaint et Royer, 1974] E. Dieulesaint et D. Royer. *Ondes élastiques dans les solides, application au traitement du signal.* Masson et Cie, 1974.

[Dinelli et Biswas, 2000] F. Dinelli et S. Biswas. *Measurements of stiff-material compliance on the nanoscale using ultrasonic force microscopy. PHYSICAL REVIEW B*, (61) :13995–14006, 2000.

[EPFL, 1997] EPFL. *Rapport d'activité http ://research.epfl.ch/research/*, 1997.

[Fearing, 1995] R.S. Fearing. *Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling.* In *proc. of the IEEE/RSJ Intelligent Robots System*, pages 212–217, 1995.

[Federspiel *et al.*, 1991] G. Federspiel, McCullough K.C., et Kihm U. *Production of monoclonal antibodies specific for African swine fever virus following in vitro primary immunization of mouse splenocytes in the presence of stimulated T lymphocyte supernatants. Journal of Immunology Methods*, (145) :71–81, 1991.

[Ferreira *et al.*, 2001] A. Ferreira, C. Cassier, Y. Haddab, P. Rougeot, et N. Chaillet. *Development of a teleoperated micromanipulation system with visual and haptic feedback.* In *Proc. of Photonics Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, pages 112–123. Microrobotics and Microassembly SPIE, Octobre 2001.

[Feynman, 1959] R.P. Feynman. *There's Plenty of Room at the Bottom. Talk at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Caltech), December 29th*, 1959.

[Fukuda *et al.*, 1998] T. Fukuda, H. Sato, F. Arai, H. Iwata, et K. Itoigawa. *Parallel Beam Micro Sensor/Actuator Unit Using PZT Thin Films and Its Application Examples.* In *Proc. of the International Conference on Robotics and Automation*, pages 1498–1503, 1998.

[Gérardin et Rixen, 1996] M Gérardin et D Rixen. *Théorie des Vibrations : Application à la dynamique des Struvtures.* Masson, recherche en mécanique édition, 1996.

[Grindlay, 1970] J. Grindlay. *An introduction to the phenomenological theory of ferroelectricity.* Pergamon Press, 1970.

[Hamaker, 1937] H.C. Hamaker. *The London Van der Waals attraction between spherical particles. Physica*, 10 :1058–1072, 1937.

[Harper, 1967] W.R Harper. *Contact and frictional electrification.* Oxford at the Clarenton Press, 1967.

[Hays, 1991a] D.A Hays. *Electrostatic adhesion of non-uniformly charged dielectric sphere. Int. Phys. Conf. ser. No. 118 : section 4*, pages 223–228, 1991.

[Hays, 1991b] D.A Hays. *Role of Electrostatics in Adhesion, in Fundamentals of Adhesion, pp 249-278.* Edited by Lieng-Huang Lee, Plenum Press, 1991.

[Hecht, 1990] L. Hecht. *An Introductory Review of Particle Adhesion to Solid Surfaces. Journal of the IES*, March/April :33–37, 1990.

[Horn *et al.*, 1987] R.G. Horn, J.N. Israelachvili, et F. Pribac. *Measurement of the Deformation and Adhesion of Solids in Contact. Journal of Colloid and Interface Science*, 115, No. 2 :480–492, 1987.

[Horn et Smith, 1992] R.G. Horn et D.T. Smith. *Contact Electrification and Adhesion Between Dissimilar Materials. Science*, 256 :362–364, 1992.

[Israelachvili, 1991] J. Israelachvili. *Intermolecular and Surface Forces.* Academic Press, 1991.

[Johnson *et al.*, 1971] K. L. Johnson, K. Kendall, et A. D. Roberts. *Surface energy and the contact of elastic solids. Proc. R. Soc. Lond.*, A 324 :301–313, 1971.

[Johnson, 1985] K. Johnson. *Contact Mechanics.* C.U.P. Edition, 1985.

[Kohno et Hyodo, 1974] A. Kohno et S. Hyodo. *The effect of surface energy on the microadhesion between hard solids. Journal of Physic D : Appl. Phys.*, 7 :1243–1246, 1974.

[Krupp, 1967] H. Krupp. *Particle adhesion : theory and experiments. Journal of Advances in Colloid*, 1 :111–239, 1967.

[Lee, 1991] L.H. Lee. *The Chemistry and Physics of Solid Adhesion, in Fundamentals of Adhesion, pp 1-86.* Edited by Lieng-Huang Lee, Plenum Press, 1991.

[Lifshitz, 1956] E. Lifshitz. *The theory of molecular attractive forces between solids. Soviet Physics*, 2 :73–83, 1956.

[Lowell et Rose-Innes, 1980] J. Lowell et A.C. Rose-Innes. *Contact electrification. Advances in Physics*, 29, No. 6 :947–1023, 1980.

[Luo et Nelson, 2001] Y. Luo et B.J. Nelson. *Fusing Force and Vision Feedback for Manipulating Deformable Objects. Journal of Micromechatronics*, 18(3) :103–117, 2001.

[Manalis *et al.*, 1995] S.R. Manalis, S.C. Minne, et C.F. Quate. *Atomic force microscopy for high speed imaging using cantilevers with an integrated actuator and sensor. Appl. Phys. Lett.*, 68(6) :871–873, 1995.

[Mastrangelo, 1993] C. Mastrangelo. *Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces - Part I : Basic theory. Journal of Microelectromechanical Systems*, 2(1) :33–43, 1993.

[Maugis et Barquins, 1978] D. Maugis et M. Barquins. *Fracture Mechanics and the Adherence of Viscoelastic Bodies. Journal of Physics D*, 11 :1989–2023, 1978.

[Maugis, 1992] D. Maugis. *Adhesion of spheres : the JKR-DMT transition model using a Dugdale model. Journal of Colloid and Interface Science*, 150 :243–269, 1992.

[Minne *et al.*, 1995] S.C. Minne, S.R. Manalis, et C.F. Quate. *Parallel atomic force microscopy using cantilever with integrated piezoresistive sensors and integrated piezoelectric actuators. Appl. Phys. Lett.*, 67(26) :3918–3920, 1995.

[Miyazaki et Sato, 1997] H. Miyazaki et T. Sato. *Mechanical assembly of three dimensional microstrutures under a scanning electron microscope.* In *Proc. of the international conference on micromechatronics for information and precision equipment*, pages 335–340, 1997.

[Pollock, 1981] H.M. Pollock. *What part does interfacial energy play in the deformation and adhesion of metals ? Vacuum*, 31, No. 10-12 :609–617, 1981.

[Pouet *et al.*, 1998] B. F. Pouet, Ing R. K., Krishnaswamy S., et Royer D. *Adaptive heterodyne interferometer for ultrasonic NDE.* In *Review of Progress in QNDE*, pages 1937–1942, 1998.

[Ranade, 1987] M.B. Ranade. *Adhesion and removal of fine particles on surfaces. Aerosol Science and Technology*, 7 :161–176, 1987.

[Robbe-Valloire et Barquins, 1998] F. Robbe-Valloire et M. Barquins. *Adhesive contact and kinematics of adherence between a rigid cylinder and an elastomeric solid. International Journal of adhesion and adhesives*, 18(1) :29–34, 1998.

[Rollot *et al.*, 1998a] Y. Rollot, S. Regnier, et J-C. Guinot. *Micro-robotics : A dynamical model of micro-manipulation by adhesion.* In *Proc. of the Twelfth CISM-IFToMM Symposium, Theory and Practice of robots and manipulators, Paris, France , july*, pages 111–118, 1998.

[Rollot *et al.*, 1998b] Y. Rollot, S. Regnier, et J-C. Guinot. *Microrobotique : modèle dynamique et loi horaire pour une micromanipulation par adhésion. C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 326, Série II b :469–474, 1998.

[Rollot *et al.*, 2001] Y. Rollot, S Régnier, et J.C. Guinot. *Confirmation expérimentale d'une micromanipulation par adhésion. C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 329, Série II-b :1–6, 2001.

[Rollot, 2000] Y. Rollot. *Micro-manipulation par adhésion : Modélisations dynamiques et expérimentations, Thèse soutenue en janvier 2000, Paris 6*, 2000.

[Rougeot et Chaillet, 2002] P. Rougeot et N. Chaillet. *AMIS : an AFM based micromanipulation system.* In *Proc. of the 12th International Symposium on Measurement and Control in Robotics*, pages CD–ROM, 2002.

[Rumpf, 1977] H. Rumpf. *Particle Adhesion.* In *Agglomeration 77, proc. of the 2nd International Symposium on Agglomeration, K.V.S. Sastry editor*, pages 97–129, 1977.

[Saito *et al.*, 2002] S. Saito, H. Miyazaki, et T. Sato. *Micro-object Pick and Place Operation under SEM based on Micro-Physics. Journal of Robotics and Mechatronics*, 14(3) :227–237, 2002.

[Stemmer *et al.*, 1996] A. Stemmer, H. Jacobs, et H.F. Knapp. *Approaching the Nanoworld.* In *Proc. Microrobotics : Components and Applications*, pages 80–85. SPIE, 1996.

[Takahashi *et al.*, 2001] K. Takahashi, H. Kajihira, M. Urago, S. Saito, Y. Mochimaru, et T. Onzawa. *Voltage Required to Detach an Adhered Object Particle by Coulomb Interaction for Micromanipulation. Journal of Applied Physics*, 90(1) :432–437, 2001.

[Tanikawa *et al.*, 1996] T. Tanikawa, T. Arai, et T. Masuda. *Development of Micro Manipulation System with Two-Finger Micro Hand.* In *Proc. of the International Conference on Intelligent Robotics Systems*, pages 850–855, 1996.

[Timoshenko et Goodier, 1970] S.P. Timoshenko et J. N. Goodier. *Theory of Elasticity.* McGraw Hill International Editions, Third Edition, 1970.

[Tortonese *et al.*, 1991] M. Tortonese, H. Yamada, R.C. Barrett, et C.F. Quate. *Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever.* In *proc. of Int. Conf. IEEE*, pages 448–451, 1991.

[Turner et Wiehn, 2001] J. Turner et J. Wiehn. *Sensivity of Flexural and Torsional Vibration Modes of Atomic Force Microscope Cantilevers to Surface Stiffness Variations. NANOTECHNOLGY*, 12 :322–330, 2001.

[Uchi, 1995] K. Uchi. *Recent Developments in Ceramic Actuators - Comparison among USA, Japan and Europe. mst news special issue USA & CANADA, Workshop November 1995*, pages 28–36, 1995.

[Uchino, 1997] K. Uchino. *Piezoelectric actuator and ultrasonic motors.* Kluwer Academic Publishers, Series Editor : Harry L. Tuller, 1997.

[Vallet et Barquins, 2002] D. Vallet et M. Barquins. *Adhesive contact and kinetics of adherence of a rigid conical punch on an elastic half-space. International Journal of adhesion and adhesives*, 22(1) :41–46, 2002.

[Vikramaditya *et al.*, 2001] B. Vikramaditya, B.J. Nelson, Yang G., et E. Enikov. *Microassembly of Hybrid Magnetic MEMS. Journal of Micromechatronics*, 1(2) :51–59, 2001.

[Waché *et al.*, 2000] P. Waché, X. Wang, M. Lucius, JF. Seltz, et D. Giddens. *Three dimensional simulation of the deformation of a model endothelial cell in a laminar flow.* In *12th conference of European Society of biomechanic*, pages 89–93, 2000.

[Yamanaka *et al.*, 1999] K. Yamanaka, Noguchi A., Tsuji T., Koike T., et Goto T. *Quantitative Material Characterization by Ultrasonic AFM. SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS*, (27) :600–606, 1999.

[Yamanaka *et al.*, 2000] K. Yamanaka, Tsuji T., Noguchi A., et T. Koike. *Nanoscale Elasticity Measurement With In Situ Tip Shape Estimation in Atomic Force Microscopy. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, (71) :2403–2408, 2000.

[Zesch *et al.*, 1997] W. Zesch, M. Brunner, et A. Weber. *Vacuum Tool for Handling Microobjects with a Nanorobot.* In *Proc. of the International Conference on Robotics and Automation*, pages 1761–1766, 1997.

[Zesch et Fearing, 1998] W. Zesch et R.S. Fearing. *Alignment of Microparts Using Force Controlled Pushing.* In *Proc. of the SPIE conference on Microrobotics and Micromanipulation*, pages 148–156, 1998.

[Zhou *et al.*, 2000] Y. Zhou, B.J. Nelson, et B. Vikramaditya. *Integrating Optical Force Sensing and Visual Servoing for Microassembly. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 28(3) :259–276, 2000.

[Zhou *et al.*, 2001] Q. Zhou, A. Albut, C. Corral, P. Esteban, P. Kallio, B. Chang, et H.N. Koivo. *A Microassembly Station with Controlled Environment.* In *Proc. of Photonics Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, pages 252–260. Microrobotics and Microassembly SPIE, 2001.

[Zhou et Nelson, 1998] Y. Zhou et B.J. Nelson. *Adhesion force modeling and measurement for micromanipulation.* In *Proc. of SPIE Microrobotics and Micromanipulation, November 1998*, pages 169–180, 1998.

[Zhou et Nelson, 1999] Y. Zhou et B.J. Nelson. *Calibration of a Parametric Model of an Optical Microscope. Optical Engineering*, 38(12) :1989–1995, 1999.

Annexe A

Piézoélectricité

Le phénomène de piézoélectricité a été découvert par Pierre et Jacques CURIE en 1880, comme un résultat découlant du principe de symétrie. Il se traduit par un couplage entre les excitations et les réponses électriques et mécaniques aperçues dans certains matériaux. En effet, les cristaux piézoélectriques, grâce à leur structure dépourvue de centre de symétrie, produisent une déformation mécanique en réponse à une excitation électrique et vice versa. De plus cette relation est linéaire.

1 Tenseur de déformation

Considérons un point d'un solide occupant une région notée $\mathbf{V_0}$ dans sa configuration initiale, défini par un vecteur $\vec{\mathbf{X}}$ dans un repère cartésien. Supposons que ce solide subisse une déformation, de façon à occuper la région $\mathbf{V}$. Le point est repéré maintenant par le vecteur $\vec{\mathbf{x}}$. Le déplacement est donc défini par le vecteur $\vec{\mathbf{u}}$ tel que :

$$\vec{\mathbf{u}} = \vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{X}}$$

ou :

$$\mathbf{u_i} = \mathbf{x_i} - \mathbf{X_i} \qquad \textbf{avec} \quad \mathbf{i} = 1, 2, 3$$

En considérant un élément infinitésimal $\mathbf{dX}$ à $\mathbf{t} = 0$ devenant $\mathbf{dx}$ à $\mathbf{t} = \mathbf{dt}$ nous avons $\mathbf{du_i} = \mathbf{dx_i} - \mathbf{dX_i}$ et donc :

$$\mathbf{dx_i} = \mathbf{dX_i} + \sum_{\mathbf{j}=1}^{3} \left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial \mathbf{X_j}} \right) \mathbf{dX_j}$$

En prenant le carré de cette équation et sommant sur $\mathbf{i}$, nous obtenons :

$$|\mathbf{dx}|^2 - |\mathbf{dX}|^2 = 2\sum_{i,j}\left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial \mathbf{X_j}}\right)\mathbf{dX_j dX_i} + \sum_{i,j,k}\left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial \mathbf{X_j}}\right)\left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial \mathbf{X_k}}\right)\mathbf{dX_j dX_K} \quad (1)$$

Dans le cas des déformations infinitésimales, le second terme est négligeable devant le premier. En introduisant **le tenseur de déformation infinitésimale** comme suit :

$$\mathbf{S_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \mathbf{u_i}}{\partial \mathbf{X_j}} + \frac{\partial \mathbf{u_j}}{\partial \mathbf{X_i}}\right) \quad (2)$$

nous obtenons pour l'équation 1 :

$$|\mathbf{dx}|^2 - |\mathbf{dX}|^2 = 2\sum_{i,j}\mathbf{S_{ij}dX_j dX_i} \quad (3)$$

$\mathbf{S_{ij}}$ est un tenseur symétrique d'ordre 2. Pour des raisons de simplification, nous le remplaçons par $\mathbf{S}_\alpha$ en utilisant **la notation de Voight**, tel que : $\mathbf{S_1} = \mathbf{S_{11}}, \mathbf{S_2} = \mathbf{S_{22}}, \mathbf{S_3} = \mathbf{S_{33}}, \mathbf{S_4} = 2\mathbf{S_{23}}, \mathbf{S_5} = 2\mathbf{S_{13}}, \mathbf{S_6} = 2\mathbf{S_{12}}$ [Grindlay, 1970],[Dieulesaint et Royer, 1974].

2 Tenseur de contraintes

Considérons un corps de volume $\mathbf{V}$. Nous nous intéressons à un volume arbitraire $\mathbf{v}$ de ce corps, inclus dans la surface $\mathbf{s}$. Nous supposons que la matière incluse dans $\mathbf{v}$ est soumise à une densité de force volumique $\mathbf{f}$ et surfacique $\mathbf{t}$. Exprimons la force $\mathbf{F}$ et le moment Γ agissant sur $\mathbf{v}$:

$$\mathbf{F} = \int_{\mathbf{v}} \mathbf{f}\,\mathbf{dv} + \oint_{\mathbf{v}} \mathbf{t}\mathbf{dS} \quad (4)$$

$$\Gamma = \int_{\mathbf{v}} \mathbf{x} \times \mathbf{f}\,\mathbf{dv} + \oint_{\mathbf{v}} \mathbf{x} \times \mathbf{t}\mathbf{dS} \quad (5)$$

or, par le principe de conservation, il vient :

$$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}}\int_{\mathbf{v}} \rho\dot{\mathbf{x}}\mathbf{dv} = \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}}\int_{\mathbf{v}} \rho x \times \dot{\mathbf{x}}\mathbf{dv} = \Gamma \quad (7)$$

où ρdv désigne l'élément de masse inclus dans $\mathbf{v}$, situé à $\mathbf{x}$ et se déplaçant à la vitesse $\dot{\mathbf{x}}$.

Nous déduisons des équations précédentes :

$$\int_{\mathbf{v}} \mathbf{f}\,\mathbf{dv} + \oint_{\mathbf{v}} \mathbf{t}\mathbf{dS} = \int_{\mathbf{v}} \rho\ddot{\mathbf{x}}\mathbf{dv} \tag{8}$$

$$\int_{\mathbf{v}} \mathbf{x} \times \mathbf{f}\,\mathbf{dv} + \oint_{\mathbf{v}} \mathbf{x} \times \mathbf{t}\mathbf{dS} = \int_{\mathbf{v}} \rho x \times \ddot{\mathbf{x}}\mathbf{dv} \tag{9}$$

En général, la force infinitésimale $\mathbf{tdS}$ agissant sur $\mathbf{s}$ est fonction de la position et de l'orientation de $\mathbf{s}$, donc $\mathbf{t} = \mathbf{t}(x, \mathbf{n})$ où n est le vecteur unitaire normal à la surface. Nous posons $\mathbf{T_{ij}}$, le tenseur des contraintes,tel que :

$$\mathbf{t_i} = \sum_{\mathbf{j}} \mathbf{T_{ji}}\mathbf{n_j} \tag{10}$$

donc, les composantes du vecteur de contraintes agissant sur une surface sont des combinaisons linéaires des 9 composants du tenseur des contraintes. Écrivons maintenant $\mathbf{F_i}$ et $\Gamma_{\mathbf{i}}$ en utilisant $\mathbf{T}$ et la densité de Levi-Civita $\mathbf{e_{ijk}}$ définie par $\mathbf{e_{ijk}} = +1(-1)$ si $i, j, \mathbf{k}$ est une permutation paire (impaire), sinon $\mathbf{e_{ijk}} = 0$.

$$\mathbf{F_i} = \int_{\mathbf{v}} \mathbf{f_i}\mathbf{dv} + \oint_{\mathbf{v}} \mathbf{T_{ij}}\mathbf{n_j}\mathbf{dS} \tag{11}$$

$$\Gamma_{\mathbf{i}} = \sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}} \left[\int_{\mathbf{v}} \mathbf{x_j}\mathbf{f_k}\mathbf{dv} + \sum_{\mathbf{l}} \left(\oint_{\mathbf{v}} \mathbf{T_{lk}}\mathbf{x_j}\mathbf{n_l}\mathbf{dS} \right) \right] \tag{12}$$

En transformant les équations de surface en équations de volume et en remplaçant dans les équations 8 et 9, nous obtenons :

$$\int_{\mathbf{v}} \rho\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{i}}\mathbf{dv} = \int_{\mathbf{v}} \left(\mathbf{f_i} + \sum_{\mathbf{j}} \frac{\partial \mathbf{T_{ji}}}{\partial \mathbf{x_j}} \right) \mathbf{dv} \tag{13}$$

$$\sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}} \int_{\mathbf{v}} \rho x_{\mathbf{j}}\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{k}}\mathbf{dv} = \sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}} \int_{\mathbf{v}} \left[\mathbf{x_j} \left(\mathbf{f_k} + \sum_{\mathbf{l}} \frac{\partial \mathbf{T_{lk}}}{\partial \mathbf{x_l}} \right) + \sum_{\mathbf{l}} \mathbf{T_{lk}}\delta_{\mathbf{jl}} \right] \mathbf{dv} \tag{14}$$

Puisque le volume $\mathbf{v}$ est arbitraire, ces équations se traduisent par :

$$\rho\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{i}} = \mathbf{f_i} + \sum_{\mathbf{j}} \frac{\partial \mathbf{T_{ji}}}{\partial \mathbf{x_j}} \tag{15}$$

$$\sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}}\rho x_{\mathbf{j}}\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{k}} = \sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}} \left[\mathbf{x_j} \left(\mathbf{f_k} + \sum_{\mathbf{l}} \frac{\partial \mathbf{T_{lk}}}{\partial \mathbf{x_l}} \right) + \mathbf{T_{jk}} \right] \tag{16}$$

En remplaçant l'expression de $\rho\ddot{\mathbf{x}}_\mathbf{i}$ de l'équation 15 dans l'équation 16, nous obtenons :

$$\sum_{j,k} \mathbf{e_{ijk}T_{jk}} = 0 \tag{17}$$

La solution de cette équation est triviale, et implique que $\mathbf{T_{ij}} = \mathbf{T_{ji}}$. Donc $\mathbf{T}$ est symétrique.

Comme dans le cas du tenseur des déformations, nous appliquons la notation de Voight et obtenons $\mathbf{T}_\alpha$ tel que $\mathbf{T_1} = \mathbf{T_{11}}, \mathbf{T_2} = \mathbf{T_{22}}, \mathbf{T_3} = \mathbf{T_{33}}, \mathbf{T_4} = \mathbf{T_{23}}, \mathbf{T_5} = \mathbf{T_{13}}$ et $\mathbf{T_6} = \mathbf{T_{12}}$ [Grindlay, 1970],[Dieulesaint et Royer, 1974].

3 Champ électrique

Du fait que l'énergie magnétique produite par une déformation est négligeable devant l'énergie électrique, et compte tenu du fait que le champ électromagnétique associé au champ élastique est quasi-statique, les équations de Maxwell se réduisent à :

$$\mathbf{r\vec{o}t\vec{E}} = -\frac{\partial \mathbf{\vec{B}}}{\partial \mathbf{t}} \cong 0 \tag{18}$$

Les seules grandeurs nécessaires à la description d'un solide piézoélectrique sont le champ $\mathbf{E}$ et l'induction $\mathbf{D_i}$, comme en électrostatique [Dieulesaint et Royer, 1974].

Le champ électrique dérive d'un potentiel scalaire ϕ :

$$\mathbf{E(x)} = -\mathbf{gr}ad\phi \tag{19}$$

L'induction électrique obéit à la loi de poisson :

$$\frac{\partial \mathbf{D_j}}{\partial \mathbf{x_j}} = \rho_\mathbf{e} \tag{20}$$

où $\rho_\mathbf{e}$ est la densité des charges libres par unité de volume.

4 Loi de Hooke

Dans l'hypothèse des petites déformations, la relation entre contraintes et déformations, dans le cas non-piézoélectrique, est définie par :

$$\mathbf{T_{ij}} = \mathbf{c_{ijkl}S_{kl}} \tag{21}$$

ou encore, par la notation de Voight,

$$\mathbf{T}_\alpha = \mathbf{c}_{\alpha\beta}\mathbf{S}_\beta \tag{22}$$

en posant :

$$\mathbf{c}_{\alpha\beta} = \left(\frac{\partial \mathbf{T}_\alpha}{\partial \mathbf{S}_\beta}\right)_{\mathbf{S}_\beta = 0} \tag{23}$$

$\mathbf{c_{ijkl}}$ est un tenseur de rang quatre et possède donc $3^4 = 81$ composantes. Le fait que les tenseurs $\mathbf{T}$ et $\mathbf{S}$ soient symétriques nous ramène à 36 termes indépendants. De la même façon, l'inverse de la loi de Hooke s'écrit :

$$\mathbf{S_{ij}} = \mathbf{s_{ijkl}}\mathbf{T_{kl}} \tag{24}$$

donc,

$$\mathbf{s}_{\alpha\beta} = (\mathbf{c}_{\alpha\beta})^{-1}$$

5 Tenseur piézoélectrique

La nature piézoélectrique d'un matériau est définie par le tenseur piézoélectrique, $\mathbf{e_{ijk}}$, d'ordre 3, reliant la variation d'induction à champ électrique constant aux déformations $\mathbf{S_{jk}}$ subies par le solide :

$$\mathbf{e_{ijk}} = \left(\frac{\partial \mathbf{D_i}}{\partial \mathbf{S_{jk}}}\right)_{\mathbf{E}} \tag{25}$$

Ces constantes s'expriment en $\mathbf{C}/m^2$. Comme $\mathbf{S}$ est symétrique, $\mathbf{e_{ijk}}$ est symétrique par rapport à ses deux indices $\mathbf{j}$ et $\mathbf{k}$. Le nombre de constantes piézoélectriques est ainsi réduit à 18. En effet, le couple des deux derniers indices ne prend que six valeurs distinctes, ce qui nous permet d'adopter la notation de Voight :

$$\mathbf{e}_{i\alpha} = \mathbf{e_{ijk}} \qquad \mathbf{i} = 1, 2, 3 \qquad \alpha = (j, \mathbf{k}) = 1, 2, ..6$$

Donc les modules piézoélectriques se rangent dans un tableau de 3 lignes et 6 colonnes :

$$\mathbf{e}_{i\alpha} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_{11} & \mathbf{e}_{12} & \mathbf{e}_{13} & \mathbf{e}_{14} & \mathbf{e}_{15} & \mathbf{e}_{16} \\ \mathbf{e}_{21} & \mathbf{e}_{22} & \mathbf{e}_{23} & \mathbf{e}_{24} & \mathbf{e}_{25} & \mathbf{e}_{26} \\ \mathbf{e}_{31} & \mathbf{e}_{32} & \mathbf{e}_{33} & \mathbf{e}_{34} & \mathbf{e}_{35} & \mathbf{e}_{36} \end{vmatrix}$$

De la même façon, un autre tenseur piézoélectrique $\mathbf{d}$ est défini :

$$\mathbf{d}_{i\beta} = \mathbf{e}_{i\alpha}\mathbf{s}_{\alpha\beta}$$

Dans les documentations techniques, le tenseur $\mathbf{d}_{i\alpha}$ a une prédominance sur le tenseur $\mathbf{e}_{i\alpha}$.

6 Équation piézoélectrique directe

À l'aide des tenseurs que nous avons étudiés précédemment, l'équation piézoélectrique directe s'écrit sous deux formes :

$$\mathbf{T}_\alpha = \mathbf{c}_{\alpha\beta}\mathbf{S}_\beta - ei\alpha\mathbf{E_i} \qquad \left(\mathbf{i} = 1, 2, 3 \quad \alpha, \beta = 1, 2, ..6\right) \tag{26}$$

$$\mathbf{S}_\alpha = \mathbf{s}_{\alpha\beta}\mathbf{T}_\beta + \mathbf{d}_{i\alpha}\mathbf{E_i} \qquad \mathbf{i} = 1, 2, 3 \quad \left(\alpha, \beta = 1, 2, ..6\right) \tag{27}$$

Ce sont ces deux équations que nous utiliserons pour déterminer le comportement dynamique de l'actionneur.

Annexe B

Simulateur de comportement dynamique des céramiques piézoélectriques

1 Algorithme de calcul dynamique

L'agorithme dynamique de l'actionneur est basé sur l'équation III.5 :

$$\ddot{u}_z(t) = \left(d_{33}v(t) - u_z(t)\right)\frac{A}{s_{33} \cdot M \cdot e} \tag{1}$$

Pour une modélisation discrète, un pas de temps dt et un indice de pas k tel que

$$k + 1 = t + dt$$

sont attribués.

En supposant que $\ddot{u}_z(t)$ est d'ordre 0 et constant dans l'intervalle $[t, dt[$, Les dérivées discrètes de premier et second ordre par la méthode de trapèzes sont exprimées :

$$\dot{u}_z(k + 1) = dt \cdot \ddot{u}_z(k) + \dot{u}_z(k)$$

$$u_z(k) = \frac{dt}{2} \cdot \left(\dot{u}_z(k + 1) + \dot{u}_z(k)\right) + u_z(k)$$

L'algorithme sera construite de la façon suivante :

1. Toutes les dérivées de u_z à $t = 0$ sont nulles
2. Connaissant $u_z(k)$ et $v(k)$, on calcule $\ddot{u}_z(k + 1)$ en utilisant l'équation 1
3. En utilisant les formules de dérivées discrètes, on calcule $u_z(k + 1)$

4. On calcule la valeur de $\ddot{u}_z(k+2)$ et ainsi de suite

Pour cet algorithme, v(k) est supposé connu à tout moment. Il est possible d'inverser cet algorithme, et de déterminer $v(k)$ pour chaque instant en imposant les valeurs de $\ddot{u}_z(k)$.

2 Le code C du simulateur

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include  <math.h>


main()
{
double u[240001],
      u1[240001],
      u2[240001],
      v[240001],
      d33,
      s33,
      masse,
      epaisseur,
      surface,
      pas ;

int t,j,pic;
FILE *fd1, *fd2, *fd3 ;

d33 = 240.0*pow(10,-12);
s33 = 13.25*pow(10,-12);
epaisseur = 0.001 ;
masse = 0.0001 ;
surface = 0.000040 ;
pas = pow(10,-9);


u[0] = 0;
u1[0]= 0;
 pic = 240000;
```

```
fd1 = fopen("200data1","w");
fd2 = fopen("200data2","w");
fd3 = fopen("200data3","w");
j=-1;


for (t=0;t<=pic;t++)

    {
    if (t< 228700) v[t]=(float)t*(400./228700.);
    else v[t]=400. ;

    u2[t+1] = (d33*v[t]-u[t])*surface/(s33*masse*epaisseur);
    u1[t+1] = pas* u2[t+1] + u1[t] ;
    u[t+1] = (pas/2) * (u1[t+1]+u1[t])+u[t];

    j++;
    j=j%50;

    if (j==0)
        {
        fprintf(fd1,"%g\n",u[t]);
        fprintf(fd2,"%g\n",(d33*v[t]));
        fprintf(fd3,"%g\n",u2[t]);
        }

    }

fclose(fd1);
fclose(fd2);
}
```

Annexe C

Code CASTEM pour le comportement dynamique du préhenseur

```
************************************************************************
*                                                                      *
*      COMPORTEMENT D'UNE POUTRE SOUMISE A UNE DEPLACEMENT A SA BASE  *
*                                                                      *
*                                                                      *
* SINAN HALIYO - L.R.P                                  *
*                           1999                                       *
*                                                                      *
************************************************************************

 OPTI DIME 3 ELEM cU20 MODE TRID 10 acquerir 'r1v400.data';


* DONNEES GEOMETRIQUES
*----------------------------

LONG = 600.E-6 ;
LARG = 140.E-6 ;
EPAI = 10.E-6  ;

*GEOMETRIE
*---------
```

```
P1 = 0. 0. 0. ;
P2 = LONG 0. 0. ;
P3 = LONG LARG 0. ;
P4 = 0. LARG 0. ;
P5 = LONG 0. EPAI ;
P6 = LONG LARG EPAI ;
P7 = 0. LARG EPAI ;
P8 = 0. 0. EPAI ;

PP1 = 0. 70.E-6 0. ;

vec1 = 0. 0. 1.E-8;

P10 = LONG 70.E-6 0.;
P11 = LONG 70.E-6 -50.E-6;
P11A = LONG 70.00001E-6 -50.E-6;
P11B = LONG 69.99999E-6 -50.E-6;
P12 = LONG 70.E-6 -100.E-6;
P9 = 650.E-6 70.E-6 -50.E-6;
P13 = 550.E-6 70.E-6 -50.E-6;

SP1 = 550.E-6 0. -100.E-6;
SP2 = 650.E-6 0. -100.E-6;
SP3 = 550.E-6 140.E-6 -100.E-6;
SP4 = 650.E-6 140.E-6 -100.E-6;

LSP1 = D 2 SP1 SP2;
LSP2 = D 2 SP2 SP4;
LSP3 = D 2 SP4 SP3;
LSP4 = D 3 SP3 SP1 ;

LTS = LSP1 ET LSP2 ET LSP3 ET LSP4;

*C11 = CERC 3 P12 P11 P9 ;
*C22 = CERC 3 P9 P11 P10 ;
*C1 = C11 ET C22 ;
c1 = CER3 5 P10 P9 P12;
C2 = CER3 5 P12 P13 P10 ;

CTOT = C1 ET C2;
```

```
LC11 = D 1 P10 P11;
LC22 = D 1 P11 P12;
LC1 = LC11 ET LC22;

L1 = D 9 P1 P2;
L2A = D 2 P2 P10;
L2B = D 2 P10 P3;

L3 = D 9 P3 P4;
L4A = D 2 P4 PP1;
L4B = D 2 PP1 P1;

LM = D 9 PP1 P10 ;

L5 = D 9 P8 P5;
L6 = D 4 P5 P6;
L7 = D 9 P6 P7;
L8 = D 4 P7 P8;

L9 = D 1 P1 P8;
L10 = D 1 P2 P5;
L11 = D 1 P3 P6;
L12 = D 1 P4 P7;

DESSOUS1 = L1 ET L2A ET LM ET L4B ;
DESSOUS2 = LM ET L2B ET L3 ET L4A ;
DESSOUS = DESSOUS1 ET DESSOUS2 ;
DESSUS = L5 ET L6 ET L7 ET L8 ;
BASE = L4A ET L4B ET L9 ET L8 ET L12 ;
EXTRE =  L2A ET L2B ET L10 ET L6 ET L11;
CONTOT = DESSOUS ET DESSUS ET L9 ET L10 ET L11 ET L12;
COTE1 = L1 ET L10 ET L5 ET L9 ;
COTE2 = L3 ET L11 ET L7 ET L12 ;
CC = C1 ET LC1;

* GENERATION DU MAILLAGE
*------------------------


M1 = SURF BASE PLANE ;
M2 = SURF EXTRE PLANE ;
```

```
M3A = SURF DESSOUS1 PLANE ;
M3B = SURF DESSOUS2 PLANE ;
M3 = M3A ET M3B ;
M4 = SURF DESSUS PLANE ;
M5 = SURF COTE1 PLANE ;
M6 = SURF COTE2 PLANE ;
SUPO = SURF LTS PLANE;

opti elem tri4;
CC1 = SURF CTOT SPHERIQUE P11A;
CC2 = SURF CTOT SPHERIQUE P11B;

M = M1 ET M2 ET M3 ET M4 ET M5 ET M6;

* GENERATION DU VOLUME
* ----------------------
* V = partie libre de la  poutre
* V2 = partie encastre de la poutre

*V  = M VOLU ;

OPTI ELEM CU20 ;

V = M3 VOLU M4 P3 P6 1;
*V1 = (CC1 ET CC2) VOLU;
*V2 = SUPO VOLU 1 'TRANS' VEC1 ;


*V2 = M1 VOLU 4 'TRAN' VEC1  ;
*V2 = V2 COUL BLEU;

VTOT = V  ;
*VTOT = V ET V1 et v2;
V =  0. ;

*TRACE (VTOT ) ;



*DEFINITON DU MATERIAU
*----------------------
```

```
MOD1 = MODEL VTOT MECANIQUE ELASTIQUE ;
*MOD2 = MODEL V2 MECANIQUE ELASTIQUE ;

YOUNG = 1.3E11 ;
NUP =  0.28 ;
MV = 2330 ;

MAT1 = MATER MOD1 YOUN YOUNG NU NUP RHO MV ;
*MAT2 = MATER MOD2 YOUN YOUNG NU NUP RHO MV ;

*CONDITIONS AUX LIMITES
*-----------------------
*conditions sur la partie encastre

*LIAISON LINEAIRE SUIVANT UZ
CL1 = BLOQ BASE  UX UY RX RY RZ ;

*DEPLACEMENT IMPOSE SUIVANT UZ SUR V2
CL2 = BLOQ BASE UZ ;

*SUPPORT

*CL3 = BLOQ V2 UX UY UZ RX RY RZ ;

*CALCUL DE MATRICES DE RIGIDITE ET MASSE
*---------------------------------------

RIG1= RIGI MOD1 MAT1;
RIG1 = RIG1 ET CL1 ET CL2;
MAS1 = MASS MOD1 MAT1 ;

*RIG2 = RIGI MOD2 MAT2;
*RIG2 = RIG2 ET CL3;

*opti donn 4;

*EVOLUTION TEMPORELLE
*---------------------
opti acqu 'r1v400.data';
```

```
*DEPLACEMENT IMPOSE
TIME = PROG 0. PAS 50.E-9 5000.E-9;
TIME = TIME ET (PROG 1.);

TIME2 = PROG ;

REPETER BOUCLE 100;

ACQU J*FLOTTANT;
TIME2 = TIME2 ET (PROG J);

FIN BOUCLE;
TIME2 = TIME2 ET (PROG J);
TIME2 = TIME2 ET (PROG J);

*GRAVITE
GTIME1 = PROG 0. 1. ;
GTIME2 = PROG 1. 1. ;


EVT2 = EVOL MANU T GTIME1 G(T) GTIME2 ;
EVT1 = EVOL MANU T TIME D(T) TIME2 ;

*CHARGEMENT
*-----------

*DEPLACEMENT IMPOSE
FOR1 = DEPI CL2 1. ;
CHA1 = CHAR DIMP FOR1 EVT1;

*GRAVITE
CHP1 = MANU CHPO VTOT 1 UZ -9.81 ;
GRAV1 = MAS1*CHP1 ;
CHA2 = CHAR FORC GRAV1 EVT2;

*opti donn 4;

* TABLE DES DONNEES
*---------------------

TAB2 = TABLE ;
```

```
TAB2.CHAR = CHA1 et CHA2;
TAB2.RIGI = RIG1 ;
TAB2.MASS = MAS1 ;
TAB2.INST= (PROG 0. PAS 2.5E-9 5.E-6) ;
TAB2.DEPL = MANU CHPO VTOT 3 UX 0. UY 0. UZ 0. ;
TAB2.VITE = MANU CHPO VTOT 3 UX 0. UY 0. UZ 0. ;
TAB2.FREQ = 1.E8;

TIME = 0.;
TIME2 = 0.;
EVT1 = 0.;
evt2 = 0.;

*-------------RESOLUTION PAS A PAS----------------*
TAB1 = DYNAMIC TAB2 ;


*-------------------RESULTATS---------

* DEPLACEMENT DE LA BASE ET L'EXTREMITE
*-------------------------------------

LT = PROG ;
LUZ2 = PROG ;
LUZ1 = PROG;
LUZ = PROG;

I= 0;

NBB = (DIME (TAB2.INST) - 1);
REPETER READ NBB;

 I = I + 1;
 LT=LT ET (PROG (TAB1.I.TEMP));
 DEP1=TAB1.I.DEPL;
 A = EXTR DEP1 UZ P10;
 B = EXTR DEP1 UZ P1 ;
 C = A - B ;
 LUZ2=LUZ2 ET (PROG A);
 LUZ1=LUZ1 ET (PROG B);
 LUZ = LUZ ET (PROG C);
```

```
FIN READ ;
EVZ1 = EVOL MANU 'TEMPS' LT 'UZ(BASE)' LUZ1 ;
EVZ2 = EVOL MANU 'TEMPS' LT 'UZ(EXTR)' LUZ2 ;
EVZ3 = EVOL MANU 'TEMPS' LT 'UZ(EXTR/BASE)' LUZ ;
EVZ= EVZ1 ET EVZ2;


* CALCUL  DE L'ACCELERATION ET LA VITESSE
*-----------------------------------------

I = 2;

acc1 =prog 0.;
vites1 = prog 0. ;


vit11 = 0. ;

repeter b (nbb - 1);

vit2 = tab1 . I .VITE ;
vit22 = extr vit2 uz p10 ;

vit = vit22 - vit11 ;
tt = (tab1 . I . TEMP) - (tab1 . (I-1) . TEMP );

acc = vit/tt ;

acc1 = acc1 et (prog acc);
vites1 = vites1 et (prog vit22);

i = i+1;
VIT11 = VIT22 ;
fin b;



EVACC = EVOL MANU 'TEMPS' LT 'ACCELERATION' acc1;

EVVITE = EVOL MANU 'TEMPS' LT 'VZ(EXTR)' vites1;
```

```
* PLOTS
*-------------------------------------------------------------


DESS EVZ TITR 'UZ P2' MIMA;

DESS EVZ3 TITR 'UZ REL' MIMA ;

DESS EVACC TITR 'ACCELERATION P2' MIMA;

DESS EVVITE TITR 'VZ P2' MIMA;


* DIFFERENTS DEFORMES
*--------------------

I=0;

REPETER BOUCLE2 49;

  I = I+4 ;

  DEP = TAB1 . I . DEPL ;
  DEF0 = DEF0 VTOT DEP  ;
  DEF1 = DEF0 VTOT DEP 0. ;
  DEFF = DEF0 ET DEF1;

  TRACE DEFF ;

FIN BOUCLE2;
```