

# Préhenseurs, conditions et stratégies pour une micromanipulation de précision

THÈSE N° 4160 (2008)

PRÉSENTÉE LE 20 AOÛT 2008

À LA FACULTE SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR  
Laboratoire de systèmes robotiques 2  
SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Mélanie DAFFLON**

ingénieure en microtechnique diplômée EPF  
de nationalité suisse et originaire de Vaulruz (FR)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J. Jacot, président du jury  
Prof. R. Clavel, directeur de thèse  
Prof. J. Brugger, rapporteur  
Prof. N. Chaillet, rapporteur  
Dr A. Codourey, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Lausanne, EPFL  
2008



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>VII</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte général	1
1.2 Contexte au Laboratoire de Systèmes Robotiques (LSRO)	4
1.3 Motivations	6
1.4 Objectif	6
1.5 Originalités	6
1.6 Définition du domaine d'étude	7
1.7 Organisation du mémoire	7
<b>2 LA MANIPULATION DE MICROCOMPOSANTS</b>	<b>9</b>
2.1 Micropinces	9
2.1.1 Structure et mobilité	10
2.1.2 Principes d'actionnement	11
2.1.3 Mesure	17
2.1.4 Conclusion	18
2.2 Préhenseurs électrostatiques	18
2.3 Préhension par vacuum	20
2.4 Manipulation basée sur l'adhésion	21
2.5 Manipulation par capillarité	22
2.6 Préhenseurs à changement de phase	23
2.7 Manipulation sans contact	24
2.7.1 Acoustique	24
2.7.2 Aérodynamique	24
2.7.3 Optique	25
2.8 Assemblage et manipulation par lots (« <i>parallel assembly</i> »)	25
2.9 Conclusion	26

---

### **3 LES FORCES D'ADHÉSION - PROBLÉMATIQUE DU MICROMONDE 29**

---

3.1 Causes majeures de l'adhésion .....	29
3.1.1 Energie d'interaction .....	30
3.2 Les forces de van der Waals .....	32
3.2.1 Généralités .....	32
3.2.2 Interactions entre surfaces .....	33
3.2.3 Orientation des surfaces .....	36
3.2.4 Influence de la rugosité .....	36
3.2.5 Résumé .....	37
3.3 La force de capillarité .....	38
3.3.1 Condensation capillaire .....	39
3.3.2 Influence de la rugosité .....	39
3.3.3 Orientation des surfaces .....	41
3.3.4 Résumé .....	41
3.4 Les forces électrostatiques .....	42
3.4.1 Interactions de Coulomb .....	42
3.4.2 Triboélectrification .....	43
3.4.3 Résumé .....	44
3.5 Force et déformation au contact .....	45
3.5.1 Théorie de Hertz .....	45
3.5.2 Théorie JKR .....	45
3.5.3 Théorie DMT .....	47
3.5.4 Modélisation de Maugis-Dugdale .....	47
3.6 Comportement sous un effort latéral .....	48
3.6.1 Résistance au glissement .....	48
3.6.2 Résistance au roulement .....	49
3.6.3 Influence sur la force d'adhésion .....	50
3.7 Plasticité du contact .....	51
3.8 Contribution des forces surfaciques à l'adhésion .....	52
3.9 Manipulation en milieu liquide .....	54
3.9.1 Force de van der Waals .....	54
3.9.2 Force de capillarité .....	55
3.9.3 Force électrostatique .....	55
3.9.4 Effet hydrodynamique .....	55
3.10 Conclusion .....	55

### **4 PRINCIPES DE MANIPULATION 57**

---

4.1 Aspects de fiabilité et de positionnement .....	58
4.1.1 Rapport d'adhésion aux interfaces .....	59
4.1.2 Stratégies de positionnement .....	61
4.2 Micromanipulation par adhésion .....	62
4.2.1 Limite de prise/dépose .....	63
4.2.2 Limite de glissement aux interfaces .....	64
4.2.3 Expressions générales des efforts aux interfaces .....	65
4.2.4 Comportement du micro-objet .....	69
4.2.5 Caractéristiques d'une préhension par adhésion .....	75
4.3 De l'utilisation de pinces en micromanipulation .....	75
4.3.1 Prise par serrage .....	75
4.3.2 Dépose .....	76
4.3.3 Caractéristiques d'une micropince .....	83

4.4	Micromanipulation vacuum .....	84
4.4.1	Adhésion au préhenseur .....	85
4.4.2	Sous-pression minimale de prise .....	86
4.4.3	Généralisation .....	89
4.4.4	Opération de dépose .....	89
4.4.5	Caractéristiques d'un préhenseur Vacuum .....	90
4.5	Utilisation des effets de capillarité .....	91
4.5.1	Les forces de capillarité comme principe de micromanipulation .....	91
4.5.2	Préhension par capillarité .....	94
4.5.3	Caractéristiques d'une préhension par capillarité .....	98
4.6	Effet d'une vibration à l'interface .....	99
4.6.1	Remarques pour l'utilisation d'une vibration .....	100
4.7	Dépose inertielle .....	100
4.7.1	Vers un positionnement contrôlé .....	101
4.7.2	Généralisation .....	104
4.7.3	Conclusion .....	104
4.8	Conclusion .....	105
<b>5</b>	<b>MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION</b> .....	<b>107</b>
5.1	Cahier des charges de l'application .....	109
5.1.1	Aspects de positionnement et de référencement .....	110
5.2	Spécifications du préhenseur .....	110
5.3	Principes de manipulation .....	111
5.4	Démonstrateur de principe .....	112
5.5	Faisabilité .....	113
5.6	Conception finale .....	113
5.7	Validation du préhenseur .....	113
5.8	Validation du processus .....	113
5.9	Conclusion .....	114
<b>6</b>	<b>INSTALLATION DE MICROMANIPULATION</b> .....	<b>115</b>
6.1	Cahier des charges .....	115
6.1.1	Module de mouvement .....	116
6.1.2	Module environnement .....	116
6.1.3	Module vision .....	117
6.1.4	Module logiciel .....	117
6.2	Description de l'installation actuelle .....	117
6.2.1	Module mouvement .....	117
6.2.2	Module environnement .....	122
6.2.3	Module vision .....	123
6.2.4	Module logiciel .....	124
6.2.5	Conclusion .....	127
<b>7</b>	<b>CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUTILS</b> .....	<b>129</b>
7.1	Familles de micropréhenseurs .....	129
7.2	Micropinces .....	130
7.2.1	Préhenseur modulaire : micropince pneumatique .....	130

7.2.2	Micropince monolithique - pince MEMS	134
7.2.3	Préhenseur à mobilité augmentée	136
7.2.4	Remarque sur la conception des micropinces	137
7.3	Préhenseur inertielle .....	137
7.3.1	Préhenseur inertielle actif	138
7.3.2	Relâche par impact	140
7.4	Préhenseur thermodynamique .....	141
7.5	Préhenseur vacuum .....	143
7.6	Préhenseur électrostatique .....	145
7.7	Conclusion .....	146
<b>8</b>	<b>OPÉRATIONS DE MICROMANIPULATION</b>	<b>147</b>
8.1	Paramètres d'évaluation .....	147
8.2	Manipulations avec des micropinces .....	149
8.2.1	Opérations de prise	149
8.2.2	Direction de retrait	149
8.2.3	Influence de l'humidité relative	150
8.2.4	Influence des matériaux	152
8.2.5	Discussion de la manipulation avec une micropince	153
8.3	Préhenseur inertielle .....	154
8.3.1	Prise par adhésion	154
8.3.2	Dépose inertielle	156
8.3.3	Conclusion	160
8.4	Manipulation par capillarité .....	161
8.4.1	Manipulation par condensation/évaporation	161
8.4.2	Dépose par réduction de la surface de contact	162
8.5	Préhenseur électrostatique .....	164
8.5.1	Déroulement des opérations	164
8.5.2	Tension minimale de prise	164
8.5.3	Remarques et discussion	166
8.6	Préhenseur vacuum .....	167
8.7	Synthèse .....	169
<b>9</b>	<b>MICROASSEMBLAGE : SYSTÈME DE MESURE AFM MULTISONDE</b>	<b>171</b>
9.1	Cahier des charges .....	172
9.2	Spécifications du préhenseur .....	173
9.3	Principe de préhension - stratégie d'assemblage .....	174
9.3.1	Mode opératoire	175
9.4	Interaction «préhenseur - composant - récepteur» .....	176
9.5	Conception des micropinces .....	177
9.6	Opérations d'assemblage .....	178
9.6.1	Installation de microassemblage	178
9.6.2	Description des opérations	179
9.6.3	Analyse des opérations	181
9.7	Conclusion .....	183

---

**10 CONCLUSION** **185**

---

10.1 Contributions .....	185
10.2 Perspectives .....	186
10.2.1 Au niveau de la modélisation .....	186
10.2.2 Variantes de préhenseurs .....	187
10.2.3 Caractérisation .....	188
10.3 Note finale .....	188

**ANNEXES**

---

<b>A. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX</b>	<b>191</b>
<b>B. ÉTUDES DES COMPORTEMENTS POUR LES COMBINAISONS DE <math>\Gamma</math></b>	<b>195</b>
<b>C. REPRÉSENTATIONS COMPLÉMENTAIRES DES MESURES</b>	<b>199</b>
3.1 Manipulation avec des micropinces .....	200
3.2 Préhenseur vacuum .....	201
3.3 Préhenseur inertiel .....	202
3.4 Manipulation par capillarité .....	203

**LISTE DES SYMBOLES** **205****BIBLIOGRAPHIE** **209****CURRICULUM VITAE** **219**



# REMERCIEMENTS

---

Au terme de ce travail, j'aimerais remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenue et aidée.

J'exprime en particulier ma reconnaissance au Professeur Reymond Clavel, mon directeur de thèse, pour sa confiance et la grande autonomie qu'il m'a offerte, tout en m'appuyant par ses remarques constructives et son engagement soutenu.

Je remercie les membres du jury, Prof. Jürgen Brugger (EPF Lausanne), Prof. Nicolas Chaillet (FEMTO-ST, Besançon) et Dr Alain Codourey (Asyrl SA) pour leur lecture attentive et critique et pour leurs remarques pertinentes, ainsi que Prof. Jacques Jacot qui présida ce jury.

Merci au Dr Jean-Philippe Bacher qui a accompagné mes premiers pas dans le domaine de la micro-manipulation et avec qui le projet a démarré.

Je souhaite remercier vivement et chaleureusement Benoit Lorent pour sa collaboration intense et fructueuse, pour son amitié et pour nos nombreuses discussions animées. Cette thèse repose sur nombre de développements dont il est à l'origine que ce soit au niveau des préhenseurs ou de l'installation qui a évoluée au fil des besoins. Un grand MERCI pour ton enthousiasme et ton esprit critique.

Mes collègues, tout au long de ces années, ont contribué par leurs questions, remarques, idées à faire évoluer mon travail. Je souhaite aussi les remercier pour l'ambiance agréable et amicale qui règne au Laboratoire de Systèmes Robotiques, changeant au fil des arrivées et des départs, mais toujours avec le plaisir de se côtoyer. Merci aussi au personnel administratif pour leur aide et à Lionel Beerens et Emanuele Lubrano pour le support informatique. Je remercie aussi Jamasp Jhabvala pour avoir apporté une application concrète de micromanipulation à un moment clé du projet et pour la petite collaboration inter-laboratoire qui en est née.

Les développements des prototypes et de l'installation n'auraient pu aboutir sans l'apport précieux et la grande compétence des personnes des ateliers de microtechnique et de fabrication de circuits imprimés (ACI/ACORT). J'adresse en particulier mes remerciements à Jean-Jacques Crausaz, Claude Amendola, Pascal Zbinden et Jean-Pierre Rougnon.

J'ai eu le plaisir d'encadrer plusieurs étudiants qui ont participé directement à cette recherche au cours de leur travail de semestre ou de diplôme. Je remercie ainsi Thomas Wimböck, Julien Moulin, Jürg Marti, Laurent Winkler, Fabian Winter, Julien Chassot et Frédéric Weibel.

Merci à Stéphane Régnier, Pierre Lambert, Michaël Gauthier, Beatriz López-Walle, Terunobu Akiyama, Martin Jenke pour les nombreux échanges au sujet de la micromanipulation.

Finalement, merci à ma famille et en particulier à mes parents pour votre soutien indéfectible et pour toutes les valeurs que vous m'avez si patiemment transmises.



# RÉSUMÉ

---

A l'heure actuelle, les microsystèmes intègrent de plus en plus de fonctionnalités dans des volumes également toujours plus petits. Les composants suivent donc le chemin de la miniaturisation, les amenant vers les échelles micro-, puis nanométriques. Les installations permettant leur fabrication, puis leur assemblage sont comparativement de taille importante, même si l'on observe une tendance nouvelle et bienvenue à réduire leur encombrement. Les technologies de la robotique permettent cependant déjà d'atteindre des positionnements de résolutions et précisions nanométriques. Et pourtant, l'assemblage de microcomposants reste une étape mal contrôlée, sujette à beaucoup d'incompréhensions et donc de surprises, nous mettant ainsi au défi de les anticiper. Effectivement, passés sous la barre du millimètre, les objets deviennent insensibles à la gravité tant les effets de surface sont devenus importants. La manipulation de tels composants requiert donc de nouveaux moyens pour maîtriser ces forces et ainsi permettre les déposes.

Dans cette étude, les opérations de prise et de dépose ont été modélisées sur la base d'un paramètre adimensionnel  $\Gamma$  représentant le rapport des forces aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat». Les effets d'adhésion sont ainsi pris en compte de manière comparative. L'évaluation de ces forces d'adhésion fait intervenir de nombreux paramètres difficilement contrôlés ou mesurables. L'introduction de ce paramètre de comparaison nous a permis d'étudier le comportement d'un objet lors de phases de prise et de dépose, puis d'en extraire les éléments assurant un transfert fiable tout en ne générant qu'un minimum de perturbation au niveau du positionnement du micro-objet. La généralisation de ces modèles permet ensuite d'étudier différents principes de manipulation.

La conception de micropréhenseurs doit donc tenir compte de ces effets d'adhésion. A cet effet, une méthodologie de conception est proposée. Elle prône un développement concerté du système à assembler et du préhenseur afin d'optimiser le choix des surfaces et des principes de manipulation. La difficulté d'évaluer les effets d'adhésion en conditions réelles engendre la nécessité de valider rapidement la faisabilité des opérations expérimentalement après avoir défini les tendances principales par modélisation.

Une installation permettant de mener des tests comparatifs entre préhenseurs fonctionnant avec différents principes de prise et de dépose a donc été développée. Celle-ci permet la caractérisation des préhenseurs notamment en terme de mesure des erreurs de positionnement résultant de l'opération de dépose. Plusieurs familles de préhenseurs ont de ce fait été conçues durant ce travail. Il s'agit de micro-pincettes, de préhenseurs inertiels mettant à profit les effets d'adhésion pour la saisie, de préhenseurs par capillarité basés sur les phénomènes d'évaporation/condensation de l'humidité relative ambiante, de préhenseurs électrostatiques et finalement de préhenseurs vacuum. A noter que les expériences se sont focalisées sur la manipulation de billes de polystyrènes de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

Les aspects sensibles des opérations concernent essentiellement la finesse de l'alignement des doigts ou de la surface de préhension avec le composant dans le but de limiter les forces appliquées à ce dernier. L'importance de la direction du retrait du préhenseur a notamment été mise en évidence.

Finalement, l'assemblage robotisé de composants MEMS en une structure tridimensionnelle a été réalisé avec succès. Ce développement a permis de mettre en pratique cette méthodologie de conception et de relever l'importance d'une forte interaction entre les divers concepteurs des éléments composant, récepteur et préhenseur. Les méthodes de référencement y ont aussi été analysées.

Nous proposons une démarche claire ainsi que des modèles permettant d'évaluer les tendances des différents comportements en intégrant l'action des forces d'adhésion. Les modèles englobent de plus l'ensemble des dispositions des zones de contact ainsi que toutes les forces actives au cours des opérations. Les caractéristiques des interfaces «objet-préhenseur» et «objet-substrat» sont donc analysées, permettant alors de définir les stratégies optimales.

***Cette étude est un outil pour le concepteur d'installation de microassemblage. Par la méthodologie proposée, nous espérons ou plutôt offrons les moyens de stimuler l'intégration ou la combinaison de principes novateurs de micromanipulation.***

Mots clés :

Micromanipulation, micropréhenseurs, forces d'adhésion, méthodologie de conception, micropince, préhenseur inertiel, préhenseur vacuum, préhenseur par capillarité, préhenseur électrostatique.

# ABSTRACT

---

Currently microsystems consist of more and more functionalities in even smaller volumes. Components size has then to be reduced as well, coming through micro- and then nanoscale. The industrial equipments dedicated to their fabrication and assembly have comparatively a huge size, but one observes now a new and welcome trend for reducing their overall dimensions. However the latest robotic technologies allow achieving nanometric resolution and precision of positioning. Microcomponents assembly is still yet badly controlled and many surprising effects can occur without understanding of the real phenomenon. In fact, below one millimeter size objects are becoming insensitive to gravity comparing to surface forces. The manipulation of such components needs new and innovative ways to control these forces and so on to allow the release.

In this study pick and place operations have been analyzed with an adimensional parameter  $\Gamma$ . It represents the ratio of the forces that act at the «object - gripper» and «object - target surface» interface. The adhesion effect is then taken into account in a comparative manner. The advantage of such procedure is due to the large amount of uncontrolled or unknown parameters that are needed to evaluate the adhesive forces. The behaviors of the micro object during pick and place operations are then studied on the base of  $\Gamma$ . Characteristics allowing a reliable transfer can be extracted with focus on the ones that generate fewer disturbances on the position. Generalization of the models allows finally to study different manipulation principles.

The conception of microgrippers needs to consider the adhesion effects. Thus a methodology is proposed. Its main point concerns the importance of a strong interaction between the designers of the different elements that are the component, the receiver and the gripper. In such a way optimal choices for the surfaces and principles of manipulation can be done. After having defined the main trends theoretically, the difficult evaluation of the adhesion effect in real conditions causes the need to check rapidly by experiments the feasibility of the pick&place operations.

A micromanipulation setup has been developed in order to make comparative tests between the different gripper principles. Gripper characterization means in particular the measurement of the positioning errors induced during the placing step. Several gripper families were conceived during this study: microtweezers, inertial gripper based on adhesion, capillary grippers that use the condensation/evaporation of the relative humidity, electrostatic grippers as well as vacuum gripper. Experiments were conducted with polystyrene spheres of  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

A high sensitivity to the alignment between finger tip or gripper tip and micro object was observed. It concerns in fact mainly the need to limit the force applied on the component during manipulation. The gripper withdrawal direction has also showed to be of the most importance to control the operations and their reliability.

Finally robotic assembly of MEMS components was realized to get a 3D structure. The methodology was experimented on this application. The importance of a close interaction of the different designers has been demonstrated.

We proposed here an approach as well as the models allowing studying the main trends with taking into account the adhesion forces. The whole arrangement of the contact areas as well as each force present during the operations is included into the models. The interfaces characteristics can so be analyzed. This allows defining the optimal strategy.

***This study is a tool for the designer of microassembly equipment. With the proposed methodology we hope or rather give the opportunity to stimulate integration or combination of innovative micromanipulation principles.***

Keywords:

Micromanipulation, microgripper, adhesion force, methodology of conception, microtweezers, inertial gripper, vacuum gripper, capillary gripper, electrostatic gripper.

# INTRODUCTION

---

La tendance à une miniaturisation toujours plus poussée a permis le développement de nombreux nouveaux produits. De ce fait les procédés de fabrication ont évolué et permettent aujourd'hui de produire des composants ayant des résolutions sub-micrométriques, voire même nanométriques. Les axes motorisés, et autres robots, ont suivi une tendance parallèle au niveau de leurs performances. Nous avons donc à disposition des composants hyper-miniaturisés et des robots de très hautes précisions.

Ce travail de thèse s'insère dans l'interstice reliant ces deux «mondes», à l'interface entre microcomposants et manipulateurs. Il s'agit d'une part d'une interface physique entre deux systèmes dont les tailles diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. D'autre part, les opérations sur des composants micrométriques ont ceci de spécifique qu'à cette échelle, les forces de surfaces deviennent nettement plus importantes que la force gravitationnelle. Par conséquent, les objets ont tendance à adhérer aux surfaces et leur manipulation devient problématique. Ces effets d'adhésion perturbent fortement la relâche des composants, ruinant tout effort antérieur de positionnement. Il nous semble alors essentiel de s'intéresser à la manipulation proprement dite de ces microcomposants et d'étudier la liaison entre ceux-ci et le robot à savoir : les micropréhenseurs ou micro *grippers*<sup>1</sup>.

## 1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Les produits microtechniques, par exemple les téléphones portables, les montres, les prothèses médicales, intègrent de plus en plus de fonctionnalités très diversifiées pour des encombrements toujours plus faibles. Bien que la miniaturisation implique la réduction du nombre de composants pour limiter la taille finale du microsystème, l'augmentation du nombre de fonctionnalités implique souvent, au contraire, l'utilisation de composants supplémentaires.

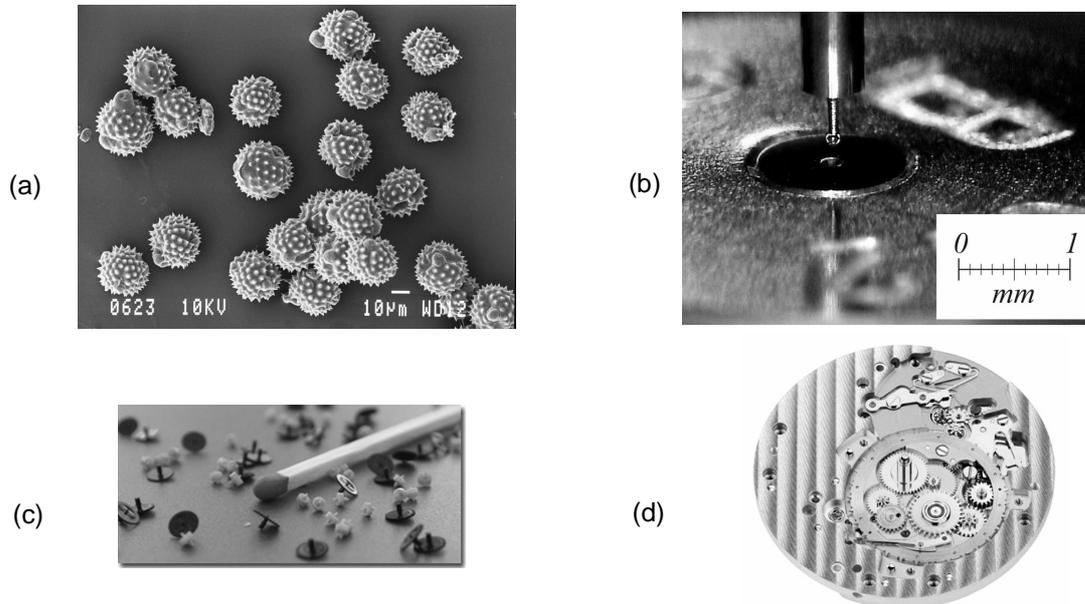
Une fonctionnalité peut, elle-aussi, faire appel à plusieurs sous-systèmes. Par exemple comprendre une partie mécanique assurant le positionnement actif d'un élément optique et un module électronique capable de traiter l'information localement pour contrôler le système tout en communiquant avec d'autres composants. Les sous-systèmes mécaniques, électroniques ou optiques sont issus de technologies variées pour lesquelles les procédés de fabrication ne sont souvent pas compatibles. Il n'est alors pas

---

1. Terminologie anglophone souvent usitée.

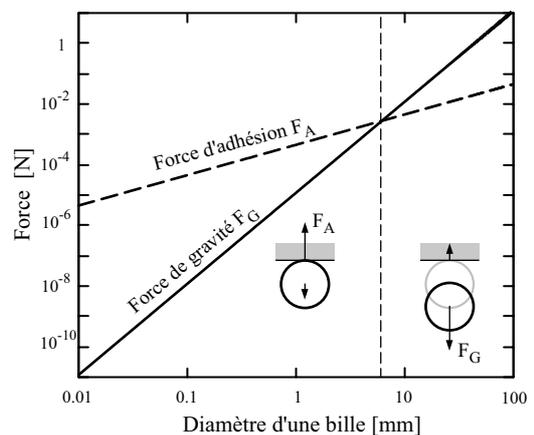
possible d'intégrer ces différents modules sur un composant monolithique. Qui plus est, dans le cas des MEMS<sup>2</sup>, les procédés de fabrication sont généralement adaptés uniquement à des structures planaires (2D), voire à du «2D et demi»<sup>3</sup>. L'obtention de la troisième dimension nécessite alors une opération d'assemblage.

Dans ce contexte, la Fig. 1.1 donne un bref aperçu de quelques composants micromécaniques (b,c,d), comparés à des grains de pollen (a) et permet une première idée de l'échelle considérée dans cette étude.



**Figure 1.1 :** Exemples de microcomposants : (a) grains de pollen [Wales08], (b) bille d'un palpeur de mesure ( $\varnothing 120\mu\text{m}$ ), (c) composants micromécaniques : pignons en polymère [©Mimotec], (d) composants horlogers (calibre 160 Ulysse Nardin).

Tout un chacun a déjà fait l'expérience des forces d'adhésion, par exemple en humectant le bout de son doigt à dessein d'attraper un petit objet. En effet, les objets de taille inférieure au millimètre sont soumis à des forces d'adhésion qui deviennent plus importantes que l'effet de la gravité (Fig. 1.2). L'amplitude de ces effets dépend des matériaux, du profil des surfaces en contact et est aussi sensible aux conditions ambiantes de l'environnement et avant tout à l'humidité relative. La gravité devenant négligeable en regard des forces d'adhésion, la manipulation de tels composants s'en trouve perturbée, notamment la dépose ne se fait plus d'office. Il est alors nécessaire de développer des stratégies qui permettent de rompre l'interface d'adhésion entre le composant et le préhenseur pour assurer cette opération.



**Figure 1.2 :** Ordre de grandeur des forces d'adhésion et de gravité.

2. Micro Electro Mechanical Systems : cet acronyme représente les microsystèmes qui comportent, comme leur nom l'indique, une partie mécanique et électronique. Lorsqu'un module optique est présent, on parle plutôt de MOEMS. Le terme MEMS est surtout utilisé pour tout microsystème obtenu par des technologies de fabrication lithographique (typiquement en silicium, mais pas exclusivement).
3. Notamment par des dépôts de couche ou par élimination de couches résiduelles, il est possible de travailler sur l'épaisseur du wafer et pas seulement sur la surface, d'où l'appellation «2D et demi».

La manipulation de microcomposants revêt des caractéristiques diverses qui concernent notamment l'environnement de manipulation ou encore la stratégie choisie pour transférer ou saisir ces objets. L'application dicte bien entendu les spécifications globales.

L'environnement de manipulation peut ainsi varier très fortement suivant les applications :

- Il peut bien sûr s'agir d'un **environnement gazeux**, comparable typiquement à une atmosphère de laboratoire, à une salle blanche ou en un gaz spécifique (Argon, Azote, etc). Les caractéristiques principales sont les conditions d'humidité relative, de température et de propreté qui peuvent être plus ou moins stabilisées.
- Les manipulations peuvent aussi avoir lieu dans un **liquide**, ce qui est usuel pour les opérations de biologie. L'avantage de la manipulation en milieu liquide est la diminution notable des effets d'adhésion.
- Enfin, plus les composants sont petits, plus ils deviennent difficiles à observer! L'utilisation d'un microscope électronique à balayage (*Scanning Electron Microscope SEM*) peut alors devenir nécessaire, voire indispensable. Ces opérations ont alors lieu dans le **vide**.

En outre, deux approches principales concernant l'assemblage de microcomposants existent : l'assemblage sériel et l'auto-assemblage.

1. Par **assemblage sériel**, nous entendons les méthodes où les composants sont manipulés les uns après les autres soit par un opérateur, soit de manière robotisée. Cette pratique repose sur l'utilisation d'outils de préhension et convient particulièrement aux petites et moyennes séries. Les temps de prise et dépose limitent donc la cadence possible. L'avantage de cette approche consiste en sa grande flexibilité.
2. L'**auto-assemblage**, également dénommé assemblage en parallèle, s'inspire des procédés de production de masse (sur wafer), où tous les composants sont fabriqués en même temps, ainsi que des procédés d'assemblages moléculaires. En utilisant des zones préférentielles, par structuration d'électrodes (électrophorèse), aux surfaces hydrophiles/hydrophobes, par champ magnétique ou encore profitant de la dissymétrie des composants, le positionnement et l'orientation peuvent être induits à un certain nombre de composants simultanément [Fang06]. Cette approche stochastique conviendrait particulièrement bien à l'assemblage de grandes séries, mais son rendement est actuellement encore trop faible.

Ces deux approches pourraient aussi être combinées de manière à permettre un assemblage de très grande série par auto-assemblage, puis une étape spécifique de personnalisation sur tout ou partie des composants. Cette dernière étape correspond plus aux caractéristiques d'un assemblage sériel permettant notamment une meilleure flexibilité.

Dans l'étude présentée ici, nous explorons les possibilités de manipulations de composants microtechniques, soit des objets solides, dont la taille se situe entre 5 et 500 $\mu\text{m}$ . Le domaine de la biologie recense de nombreux composants aux tailles similaires. Les problématiques intervenant lors de leur manipulation ont d'ailleurs de nombreux points communs avec les opérations sur des objets microtechniques, telle la présence de forces d'adhésion aux interfaces. Nous restreignons cependant le champ d'étude aux objets rigides (a contrario des corps mous) et aux manipulations en environnement gazeux, plus commun aux assemblages microtechniques.

Nous nous pencherons plus particulièrement sur les aspects d'une manipulation robotisée et plus précisément sur l'interaction entre le préhenseur, le composant à manipuler et la surface de manipulation que ce soit le récepteur ou le lieu de saisie du micro-objet. Dans ce cadre, nous nous focaliserons principalement sur les aspects de fiabilité des opérations ainsi que sur leurs performances en terme de positionnement. L'automatisation des opérations de microassemblage ne pourra effectivement se faire que

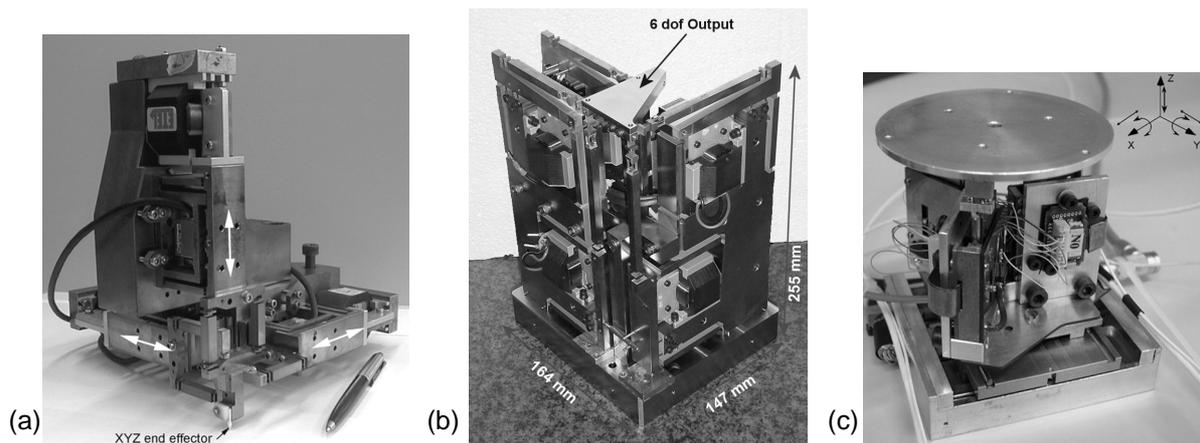
si les opérations de prise et de dépose sont en elles-mêmes fiables et répétables. Idéalement, les étapes de prise et de dépose devraient donc perturber le moins possible les performances de positionnement atteintes au niveau du manipulateur.

Cette étude débouche sur l'élaboration d'une méthodologie de conception de micropréhenseurs qui intègrent les effets d'adhésion si problématiques à cette échelle, tout en privilégiant une approche globale de l'ensemble «préhenseur - microcomposants - récepteur - installation».

## 1.2 CONTEXTE AU LABORATOIRE DE SYSTÈMES ROBOTIQUES (LSRO)

Ce travail de thèse prend corps au Laboratoire de Systèmes Robotiques dans la suite des projets *TopNano21*<sup>4</sup> qui ont permis l'évolution de la robotique de haute précision dans le domaine des robots compacts basés sur des structures parallèles et des articulations et actionneurs «sans frottement» [Bacher03, Helmer06] (Fig. 1.3(a,b)). Ces robots présentent des répétabilités de positionnement de  $\pm 10\text{nm}$  et  $0.1\text{arcsec}$ . Après calibration et stabilisation thermique, des précisions de  $100\text{nm}$  et  $3\text{arcsec}$  peuvent être espérées [Fazenda06].

Les aspects «robotiques» sont aussi étudiés sous l'angle des actionneurs piézoélectriques stick-slip. Ainsi, des résolutions nanométriques sont possibles pour des courses de plusieurs millimètres, voire virtuellement «infinie» dans le cas de robots autonomes. Cette technologie permet de développer des microrobots qui peuvent évoluer dans le vide et qui sont ainsi parfaitement adaptés à une utilisation dans un microscope électronique [Breguet07] (Fig. 1.3(c)).

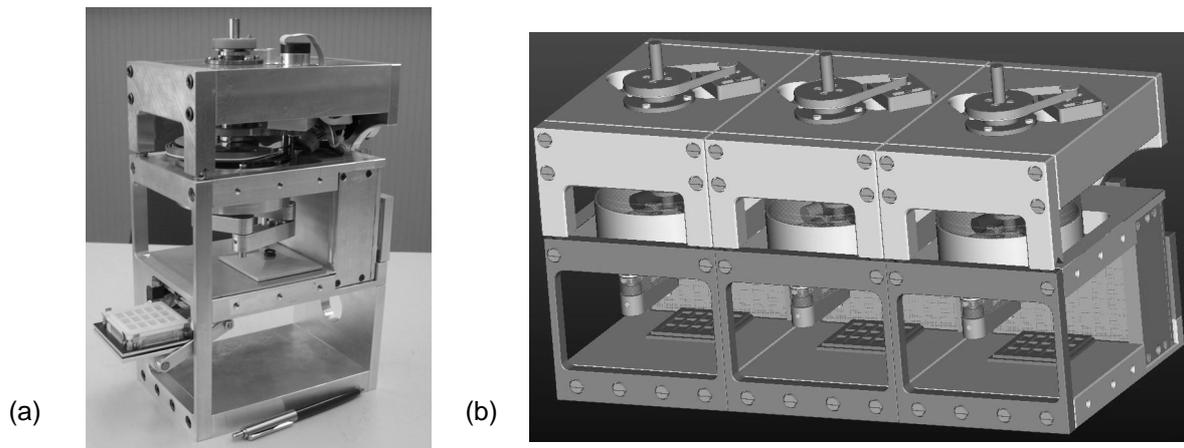


**Figure 1.3 :** (a) Robot DELTA<sup>3</sup> et (b) Robot Sigma6 basés sur des articulations flexibles; (c) robot Z-Tilt à 5 degrés de liberté à actionneurs piézoélectriques spécialement conçu pour des travaux dans un microscope électronique.

Simultanément, le concept de MicroFactory a engendré des réflexions sur les aspects d'intégration des robots en salle blanche et de la miniaturisation de celle-ci. Ce concept résulte notamment de l'étonnante et importante différence de volume entre les installations actuelles de production et d'assemblage (de l'ordre de  $10^0$  à  $10^2 \text{m}^3$ ) et les microcomposants eux-mêmes ( $10^{-9}$ - $10^{-12} \text{m}^3$ ); soit d'environ 9 à 14 ordres de grandeurs. L'infrastructure amorce donc elle aussi une tendance à la miniaturisation qui permettra de réduire de plus en plus les espaces dédiés à la fabrication et au traitement de ces composants, tout en conservant, voire en améliorant le contrôle et la qualité de l'environnement ambiant et en abaissant les coûts énergétiques. La génération d'un flux d'air propre et homogène dans un petit espace confiné ainsi que la problématique du transfert des composants dans et hors de ce petit volume ont notamment été étudiés [Verettas06]. Une mini salle blanche autonome munie d'un robot à trois degrés de liberté, la Poc-

4. Le programme *TopNano21* est un programme de technologie soutenu par la Confédération Suisse dans le domaine des nanotechnologies et des techniques de microsystèmes.

ketFactory, en est issue et permet d'effectuer des opérations de fabrication, de finition, d'assemblage ou encore de contrôle pour des microcomposants. Une ligne de production complète peut être créée par la mise en série de ces petits modules (Fig. 1.4).



**Figure 1.4 :** (a) Prototype d'une PocketFactory avec sa mini salle blanche (partie centrale), son système de sas pour les palettes de composants (étage du bas) et son robot (l'étage du dessus étant dévolu aux actionneurs et éléments de transmission générateurs de poussières); (b) concept d'une ligne de production miniature par la mise en série de plusieurs modules : chacun des robots assure le transfert des composants d'un module à l'autre.

Des robots de haute précision et des infrastructures adaptées aux microcomposants sont les atouts indispensables d'une installation de micromanipulation. Les opérations de prise et de dépose de microcomposants sont actuellement le chaînon faible limitant la précision. Il est donc essentiel de proposer des outils de manipulation adaptés et pensés à la lumière des connaissances des problématiques des forces d'adhésion. D'autre part, il s'agira d'étudier leurs capacités de positionnement.

Ce travail a débuté dans le cadre du projet *TopNano21* «Manipulating Microscale Objects with Nanoscale Precision» qui regroupait quatre groupes de recherche des deux Ecoles Polytechniques Fédérales (EPF) encadrés par la CTI (*Agence de la Confédération Suisse pour la promotion de l'innovation*). Chaque groupe a apporté sa contribution à la problématique de la micromanipulation par une expérience et des domaines d'expertise complémentaires au travers des tâches suivantes :

1. Intégration, conception et fabrication des éléments d'actionnement et de mesure sous la forme de micropinces MEMS (Institute of Robotics and Intelligent Systems (IRIS) - EPF Zürich);
2. Développement de surfaces actives hydrophile/hydrophobe et de dépôts hydrophobes permettant la manipulation basée uniquement sur les phénomènes d'adhésion (Laboratoire d'Optique Appliqué (LOA) - EPF Lausanne);
3. Positionnement par ultrasons des microcomposants en milieu liquide (Institut für mechanische Systeme (IMES) - EPF Zürich);
4. Développement d'une station de micromanipulation semi-automatisée pour la caractérisation de différents principes de manipulation (LSRO - EPF Lausanne).

Grâce à cette collaboration, différents éléments ont permis d'élargir l'éventail des outils et principes de micromanipulation expérimentés durant ce travail de thèse notamment avec les micropinces MEMS, développées par l'IRIS, ainsi que les dépôts hydrophobes et les électrodes développés par le groupe du Dr Hoffmann du LOA de l'EPFL.

Le projet CIMENT «Exploratory Nanoscale Systems» a ensuite donné lieu à de fructueux échanges, notamment par la collaboration avec le groupe du Prof. Urs Staufer de l'Institut de Microtechnique (IMT) à Neuchâtel. L'assemblage de composants MEMS mis en place à cette occasion sert d'ailleurs d'exemple applicatif à cette thèse. Un brevet est issu de cette collaboration.

### 1.3 MOTIVATIONS

Dans la course effrénée au micromètre, voire au nanomètre, qui tient en haleine le monde de la micro-technique, l'imprécision des opérations d'assemblage provient du manque de compréhension des phénomènes d'adhésion et dès lors du manque de fiabilité des outils de manipulation. ***Cette liaison quelque peu hasardeuse entre des composants de technicité élevée et des robots de haute précision mérite dès lors une attention toute particulière qui devrait nous permettre de bénéficier des efforts de précision effectués à tous les niveaux.***

La fiabilité des opérations pourrait être améliorée en tenant compte des effets d'adhésion aux interfaces des microcomposants. Leur étude élargit aussi la palette des préhenseurs à des principes simplement impensables avec des composants plus grands. Le temps des pinces et des préhenseurs vacuum n'est de loin pas révolu pour nombre d'applications, mais leur utilisation pourrait néanmoins s'en trouver modifiée par une combinaison intelligente intégrant particulièrement les aspects d'adhésion.

La capacité de prendre et déposer un micro-objet n'est pas suffisante à l'automatisation des opérations. Il s'agit aussi d'en contrôler le positionnement. Que l'alignement et l'orientation soient assurés par des éléments de référencement mécanique ou par un positionnement actif basé sur une mesure, la répétabilité des opérations de prise et de dépose ainsi que la répétabilité du positionnement lors de ces opérations sont donc des éléments de qualité indispensables.

### 1.4 OBJECTIF

Ce mémoire a pour ambition d'être une aide aux concepteurs d'installations de micromanipulation afin que ceux-ci effectuent les choix les plus judicieux en cours de développement d'un micropréhenseur. Le but est de proposer une démarche de développement qui permette de prendre en compte tous les aspects de la manipulation. Plus particulièrement de considérer les relations entre le préhenseur et le composant, ainsi qu'entre le composant et le récepteur par rapport aux effets d'adhésion et stratégies de référencement.

L'objectif principal se résume donc ainsi :

***Proposer une méthodologie systématique de conception de préhenseurs adaptés à l'assemblage de microcomposants et intégrant la problématique des forces de surface.***

### 1.5 ORIGINALITÉS

Les principales originalités de ce travail sont les suivantes :

- Analyse et modélisation des opérations et principes de micromanipulation sur la base du rapport des forces aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat» afin de mettre en évidence les conditions et stratégies optimales.
- Comparaison de différents principes de micromanipulation, propositions de combinaisons pour améliorer les opérations de prise et de dépose.
- Analyse du positionnement : pour permettre des opérations automatisées, notons que la répétabilité des opérations est nécessaire. La plupart des études en micromanipulation s'intéressent au fonctionnement d'un principe en particulier et plus spécifiquement à la faisabilité et la fiabilité des opérations, mais négligent les aspects importants de positionnement.
- Approche globale des opérations par la prise en compte du système «composant - substrat - préhenseur - environnement - installation».

## 1.6 DÉFINITION DU DOMAINE D'ÉTUDE

La manipulation de microcomposants fait référence à une multitude d'applications variées. Cette étude ne porte pas sur une application typique, bien définie. Son domaine a été délimité de la façon suivante :

### Microcomposants

Nous nous focalisons sur des objets de taille caractéristique de  $50\mu\text{m}$ , bien que l'intérêt se porte sur des composants de  $5$  à  $500\mu\text{m}$ . Ce choix est motivé par le fait qu'il existe déjà des applications industrielles destinées à assembler des éléments sub-millimétriques et, manuellement du moins, des composants jusqu'à  $\sim 150\mu\text{m}$ . Nous nous intéressons donc à des composants de plus petites tailles mais néanmoins micrométriques. Nos résultats pourront ensuite être extrapolés à des composants de taille supérieure puisque les problématiques des effets d'adhésion concernent évidemment aussi ceux-ci.

Les composants ont des formes simples, sphériques ou cubiques, pour la modélisation et pour la caractérisation des préhenseurs. Des objets plus complexes sont utilisés dans le cadre de l'assemblage réel de composants MEMS et permettent d'aborder les problématiques du référencement et de la fixation des microcomposants.

Les composants servant de base aux modèles et expérimentations sont des billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

### Environnement de manipulation

La manipulation se fait en laboratoire dans un environnement ambiant d'air ou d'azote avec un taux d'humidité relatif stable.

### Modélisation

Il s'agit d'une modélisation analytique des efforts aux interfaces dans le domaine statique. Les effets d'adhésion sont étudiés de façon globale, mais leur prise en compte dans la modélisation des principes de micromanipulation utilise des hypothèses simplificatrices en se basant notamment sur des géométries simples des contacts. Le but des modélisations est de définir les zones d'intérêts de chaque principe et de les comparer.

### Développement

Les micropréhenseurs correspondent à des démonstrateurs de principes, c'est-à-dire que durant leur conception, les aspects fonctionnels ont été favorisés au détriment des procédés d'intégration. Ces outils servent aux validations des principes. Certaines itérations d'optimisation ont été effectuées, mais aucun de ces démonstrateurs n'est encore adapté à une utilisation industrielle.

## 1.7 ORGANISATION DU MÉMOIRE

### Chapitre 1 : Introduction

Ce chapitre présente le contexte et la problématique de la micromanipulation. Les objectifs et motivations de cette thèse y sont décrits.

### Chapitre 2 : La manipulation de microcomposants

L'état de l'art des micropréhenseurs et surtout des nombreux principes de micromanipulation présentés dans la littérature internationale permet de faire un tour d'horizon des moyens à disposition et des recherches actuelles.

### Chapitre 3 : Les forces d'adhésion - Problématique du micromonde

Cette partie traite des effets d'adhésion sous la forme d'un état des connaissances. Synthèse de nombreuses publications, elle permet une première approche assez détaillée pour comprendre

et évaluer les différentes contributions des forces au contact pour tout ingénieur impliqué dans l'assemblage de microcomposants.

#### **Chapitre 4 : Principes de manipulation**

Différents principes de manipulation sont décrits, faisant intervenir le mouvement de retrait du préhenseur, les forces appliquées au composant ou à l'une des interfaces. Par la modélisation des interactions aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat», les aspects de faisabilité, de fiabilité, puis de positionnement sont analysés.

#### **Chapitre 5 : Méthodologie de conception**

Ce chapitre propose une méthodologie de conception d'une tâche de micromanipulation. Les aspects de validation de principe et le développement simultané du composant, du récepteur et du préhenseur sont mis en évidence.

#### **Chapitre 6 : Installation de micromanipulation**

L'installation développée et utilisée durant ce travail est présentée sur la base d'un cahier des charges global d'une installation de micromanipulation.

#### **Chapitre 7 : Conception et réalisation des outils**

Cette partie traite du développement de différents micropréhenseurs. Ces derniers sont généralement le résultat d'une combinaison des principes de manipulation étudiés au chapitre 4.

#### **Chapitre 8 : Opérations de micromanipulation - Résultats expérimentaux**

Les résultats des opérations de micromanipulation sont exposés dans ce chapitre. Les mesures sont principalement concentrées sur les aspects de taux de succès et de répétabilité de positionnement. Celles-ci relatent aussi la sensibilité aux caractéristiques aux interfaces (matériaux) et à l'environnement.

#### **Chapitre 9 : Microassemblage : Système de mesure AFM multisonde**

L'assemblage de pointes AFM, réalisées sous la forme de modules de type LEGO, en une matrice bidimensionnelle illustre une application type où les aspects de référencement sont essentiels.

#### **Chapitre 10 : Conclusion**

Après une synthèse des principaux éléments de ce travail, les contributions majeures sont décrites. Finalement, les perspectives et travaux futurs sont présentés.

# LA MANIPULATION DE MICROCOMPOSANTS

---

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art des différents préhenseurs permettant la manipulation de micro-composants. L'intérêt est porté principalement sur les principes de prise et de dépose qui dépendent implicitement d'un contact mécanique avec l'objet. Quelques techniques de manipulation sans contact ou permettant des opérations sur des lots entiers de composants simultanément sont aussi présentées.

La manipulation de microcomposants peut faire intervenir différents principes qui découlent soit de la miniaturisation de principes déjà utilisés en macromanipulation, soit de principes physiques qui deviennent applicables du fait des lois d'échelles ou par l'importance des forces de surfaces. Les développements de préhenseurs de type *micropince* sont très répandus. Parmi les outils de micromanipulation impliquant un contact mécanique avec le composant, nous pouvons citer les principes basés sur les forces suivantes : le *vacuum*, les *forces électrostatiques*, les *forces de capillarité*, les *forces d'adhésion* en général, l'*effet inertiel* ou encore la *cryogénie*. La manipulation peut aussi être effectuée sans contact par des *techniques de lévitation* magnétique, optique, aérodynamique ou acoustique.

## 2.1 MICROPINCES

L'utilisation de pince pour manipuler un composant fait intervenir une force normale (force de serrage) et des forces de frottement. La prise est possible pour autant que ces forces de frottement soient plus importantes que la gravité pour les pièces de grande taille et surtout que les forces d'adhésion entre le composant et sa palette dans le cas des microcomposants.

De très nombreux développements sont relatés dans la littérature. Ces micropinces se différencient notamment en fonction de leur structure articulée, que ce soit par le nombre et la répartition des mobilités de chaque doigt de la pince ou par le type de mouvement des doigts, ainsi que selon le principe d'actionnement intégré.

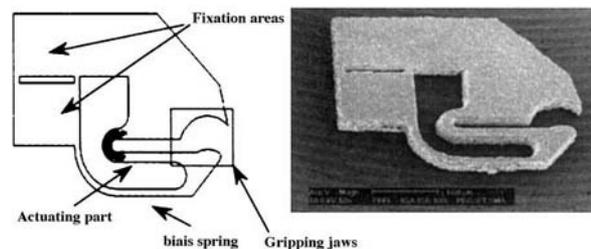
L'intérêt des micropinces réside dans l'obtention d'une force contrôlable, pouvant être limitée pour la manipulation d'objets fragiles ou de corps mous ou au contraire suffisamment importante pour permettre

de retenir un objet durant une action spécifique (par exemple en cas d'usinage, de polissage, ou simplement pour détacher l'objet de sa palette). La position et l'orientation du composant peuvent en outre être définies par la forme adaptée des doigts de la pince. Cet aspect est très avantageux en vue d'une manipulation rapide et précise car il permet notamment de limiter le nombre de capteur nécessaire à contrôler ces informations de position.

### 2.1.1 STRUCTURE ET MOBILITÉ

Les articulations des micropinces sont en général basées sur les déformations élastiques de la structure. Cet aspect est promu par les nécessités de miniaturisation et surtout par les procédés de fabrication (gravure, lithographie, microstructuration, découpe laser ou encore par électro-érosion) qui permettent de réaliser de fines structures flexibles. En outre, le frottement entre deux éléments mobiles génère des poussières et doit donc être évité pour limiter la contamination des microcomposants. La grande majorité des micropinces sont en outre pourvues d'actionneur unidirectionnel. Le retour en position s'effectue sous l'action de la force de rappel induite par la déformation de la structure élastique.

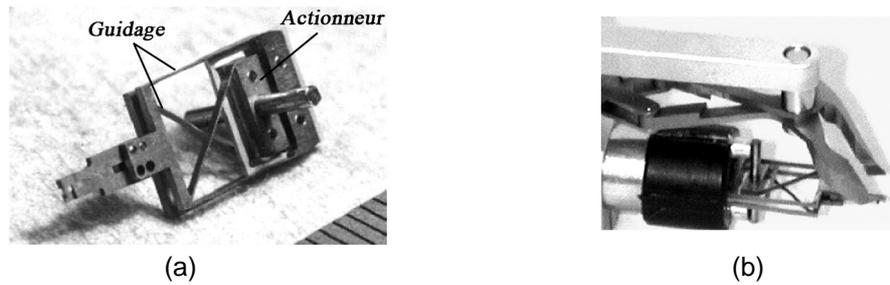
Les micropinces ont généralement deux doigts. La structure la plus simple, mais qui permet aussi un référencement mécanique optimal, est constituée d'un doigt fixe et d'un doigt mobile [Bellouard99, Anderson08, Zhang04] (Fig. 2.1).



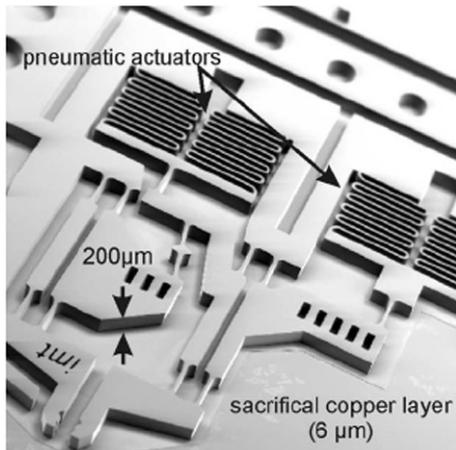
**Figure 2.1 :** Micropince monolithique en alliage à mémoire de forme [Bellouard99].

Plusieurs micropinces ont cependant été conçues avec leurs deux doigts mobiles. On distingue alors deux catégories :

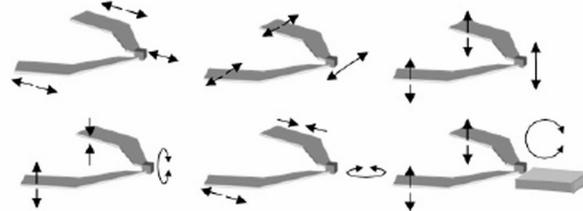
- Les micropinces à ouverture «symétrique» : l'actionnement de l'un des doigts entraîne le déplacement opposé de l'autre doigt. De tels préhenseurs ont été présentés par [Seidemann02, Nah07, Petrovic02, Kohl02, Menciassi03, Skidmore03]. L'intérêt est d'obtenir ainsi un mouvement symétrique et simultané d'ouverture/fermeture. Cependant, les tolérances dimensionnelles liées à la fabrication peuvent affecter de manière différente la rigidité de la structure de chaque doigt. L'attrait est souvent observé pour ce genre de mouvement : il semble a priori simplifier la prise, mais entraîne en fait une incertitude sur la position du composant du fait de l'absence de référence mécanique fixe. La Fig. 2.3 illustre ce type de structure dans le cas d'un actionnement différentiel qui permet d'agir de manière bi-directionnelle, soit en ouverture et en fermeture. Notons par ailleurs la structure «multicouches» présentée par [Henein03] qui associe une ouverture symétrique rectiligne à une rigidité hors-plan élevée (Fig. 2.2).
- Chaque doigt peut aussi être actionné indépendamment l'un de l'autre [DeLit04, Zhou05, Mita03, Chan03]. En fonction des mobilités de chaque doigt et de leur mouvement combiné, le composant peut alors être déplacé selon plusieurs degrés de liberté. La Fig. 2.4 illustre les différents mouvements obtenus au niveau du composant dans le cas de doigts munis chacun des trois mobilités en translation.



**Figure 2.2 :** Micropince pour la manipulation de fils de  $\varnothing 80\mu\text{m}$  avec (a) la structure élastique de guidage des doigts, (b) la micropince à actionneur piézoélectrique combinée à un outil de découpe du fil. Les embouts de la pince sont interchangeables. La course est de 2mm pour un encombrement (sans actionneur) de  $15 \times 6 \times 2 \text{ mm}^3$ . [Henein03]



**Figure 2.3 :** Micropince à actionnement bi-directionnel : chaque actionneur pneumatique contrôle l'un des mouvements d'ouverture ou de fermeture, mais simultanément aux deux doigts [Seidemann02].



**Figure 2.4 :** Schéma des mouvements obtenus au niveau du composant selon la combinaison des mouvements de chaque doigt [Zhou07].

## 2.1.2 PRINCIPES D'ACTIONNEMENT

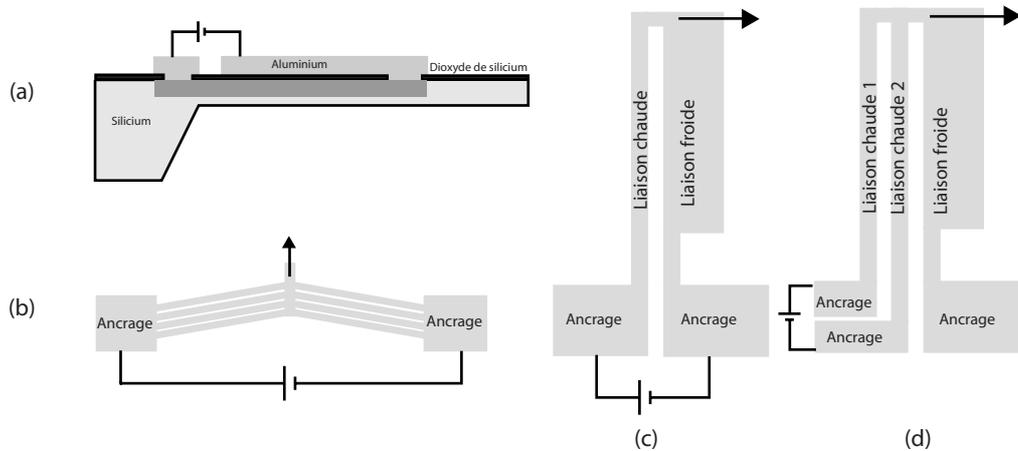
La miniaturisation des structures et les faibles forces nécessaires à la manipulation permettent d'utiliser des matériaux dits intelligents («smart materials») comme actionneur. Ces matériaux ont la propriété de transformer par exemple une énergie électrique ou thermique en énergie mécanique. Les plus connus sont notamment les matériaux piézoélectriques, les alliages à mémoire de forme, les polymères électroactifs ou encore les matériaux magnétostrictifs. Les actionneurs électrothermiques et électrostatiques sont quant à eux aussi couramment utilisés dans le domaine des microsystèmes et ont de ce fait aussi été intégrés à des micropinces.

### 2.1.2.1 Actionneur électrothermique

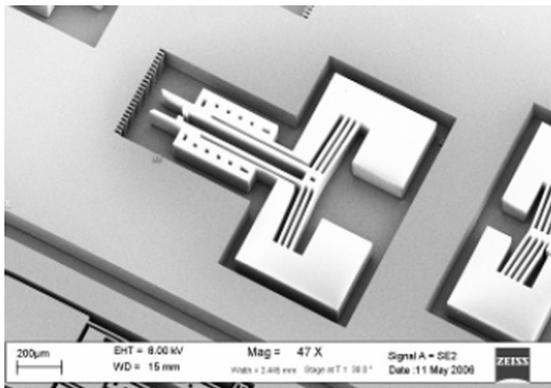
Les actionneurs électrothermiques sont basés sur la déformation générée par une différence de dilatation thermique entre deux éléments couplés qui peuvent être de matériaux différents (bimorphe thermique) ou de tailles différentes. La flexion de la structure est obtenue par l'application d'un courant électrique au travers de la structure ou de l'une des couches par effet Joule.

Par la superposition de deux couches de matériaux de coefficients de dilatation différents, un mouvement hors-plan est induit et peut être utilisé comme l'un des doigts d'une micropince [Greitmann96] (Fig. 2.5(a)). Les mouvements dans le plan sont obtenus par une dilatation thermique asymétrique (configu-

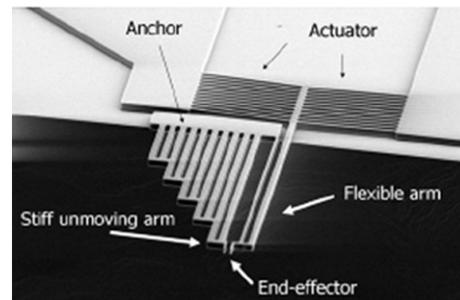
ration en U) ou symétrique (configuration en chevrons) [Mayyas07] (Fig. 2.5(b-d)). Les figures (2.6) et (2.7) illustrent des réalisations de ce principe d'actionnement.



**Figure 2.5 :** Différentes configurations d'actionneurs électrothermiques : (a) bimorphe thermique induisant un déplacement hors-plan par la superposition de couches de matériaux de coefficients de dilatation différents ([Greitmann96]); (b) configuration en chevrons, (c) et (d) configurations un U induisant une dilatation thermique asymétrique à une liaison et deux liaisons chaudes ([Mayyas07, Volland07]).



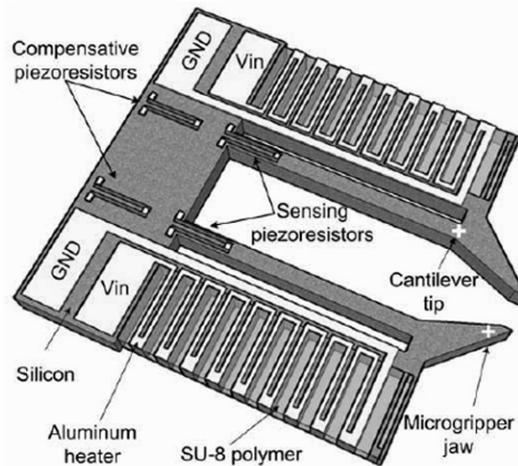
**Figure 2.6 :** Micropinse à actionneur électrothermique en silicium : d'une ouverture nominale de  $90\mu\text{m}$ , l'ouverture sous 20V est de  $140\mu\text{m}$  pour une fréquence opérationnelle maximale de 100Hz [Mayyas07].



**Figure 2.7 :** Micropinse électrothermique en silicium adaptée à la manipulation de nanotubes de carbone ( $\varnothing 100\text{nm}$ ) (fermeture de  $2\mu\text{m}$  pour 8mA) [Anderson2008].

Ce type d'actionnement convient très bien aux méthodes de fabrication de circuits intégrés. Il présente par contre le désavantage d'atteindre des températures très élevées (jusqu'à  $700^\circ\text{C}$ ) pouvant être incompatibles avec les composants à manipuler.

Grâce à un coefficient de dilatation thermique élevé, l'utilisation d'une structure en polymère (SU8) permet d'induire des déplacements plus importants à température et tension moins élevées. La structure, de configuration similaire à celle présentée en Fig. 2.5(c), est recouverte d'une fine couche métallique qui sert d'élément chauffant. [Chronis05] présente ainsi une micropinse de  $650\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ , permettant un déplacement de  $12\mu\text{m}$  pour 2V et une température maximale inférieure à  $100^\circ\text{C}$  au niveau de l'actionneur, alors que la différence de température est négligeable au bout des doigts. La zone actionnée est déterminée par la surface de la couche métallique. La structure en polymère ayant une faible conductivité thermique, le transfert thermique n'est pas très efficace, limitant le déplacement généré et créant un mouvement vertical parasite. En vue d'optimiser le transfert de chaleur, [Chu



**Figure 2.8 :** Schéma d'une micropince à actionneurs électrothermiques silicium-polymère (SU8) doté de capteurs piézorésistifs. D'un encombrement de  $490\mu\text{m} \times 350\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ , des objets de  $8$  à  $40\mu\text{m}$  peuvent être manipulés. Le déplacement est de  $32\mu\text{m}$  sous  $4.5\text{V}$  [Chu Duc07A].

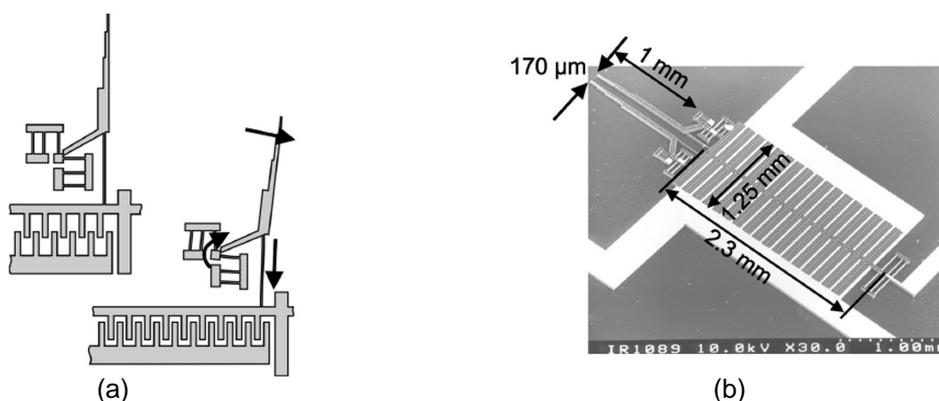
[Duc07B] propose de remplir une structure en forme de peigne en silicium avec un polymère à coefficient de dilatation thermique élevé (Fig. 2.8). Cette configuration permet donc d'accroître la surface impliquée dans le transfert de chaleur. Simultanément le polymère est contraint entre deux surfaces ce qui occasionne une dilatation thermique trois fois plus élevée que pour un polymère non contraint.

### 2.1.2.2 Actionneur électrostatique

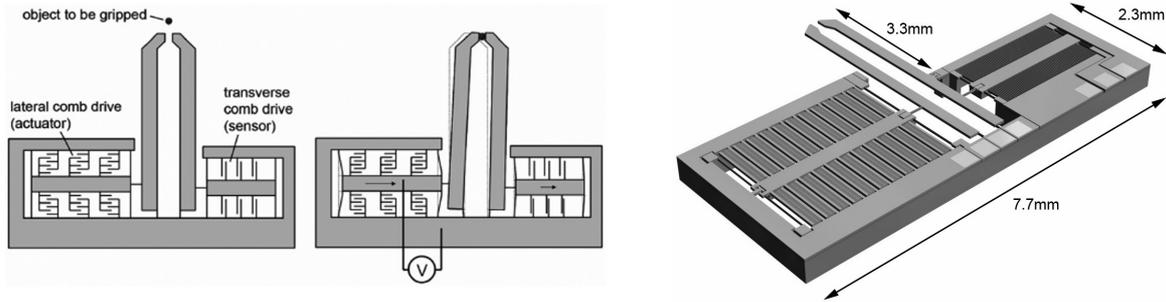
Le principe d'un actionneur électrostatique consiste à appliquer une tension entre une électrode fixe et une électrode suspendue pour induire son déplacement sous l'action des forces de Coulomb ainsi générées. Les électrodes sont généralement des structures en peigne (*comb drive*) dont l'électrode mobile est reliée à la structure de guidage des doigts (Fig. 2.9). Plusieurs degrés de liberté peuvent être combinés [Sun02, Chang06].

Les capteurs capacitifs peuvent être construits au moyen de structures similaires. Actionneurs et capteurs peuvent ainsi être intégrés sur une micropince au moyen des mêmes procédés de fabrication [Beyeler07] (Fig. 2.10). Les principales limitations de ce type d'actionneur proviennent des tensions de commande élevées et d'un encombrement important. Ils peuvent par contre être fabriqués au moyen de technologie compatible CMOS.

Deux surfaces planes chargées et soumises à une différence de potentiel suffisent à obtenir un actionneur électrostatique. Ainsi, d'autres formes d'électrodes que les structures en peigne peuvent a priori être intégrées [Chu94, Mita03]. Un autre type d'actionneur électrostatique, les actionneurs *scratch drive*



**Figure 2.9 :** Micropince à actionneur électrostatique (a) schéma de fonctionnement avec/sans tension appliquée et (b) réalisation permettant un déplacement de  $20\mu\text{m}$  sous  $80\text{V}$  [Volland02].



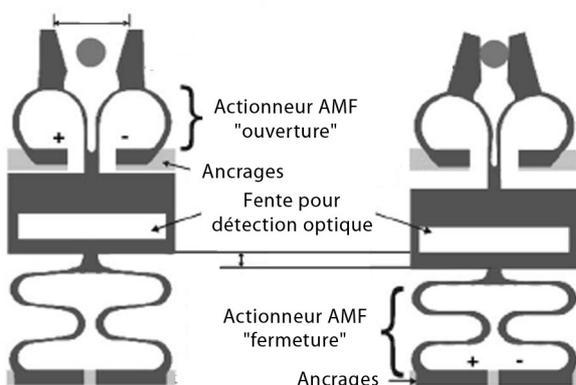
**Figure 2.10 :** Micropince à actionneur électrostatique et capteur de force capacitif intégré. Un déplacement de  $100\mu\text{m}$  sous  $150\text{V}$  est atteint. Le capteur de force a une résolution de  $0.55\mu\text{N}$  pour une plage de  $2.8\text{mN}$  [Beyeler07].

(SDA) ont été utilisés sur une micropince [Millet04]. Seize actionneurs SDA élémentaires, délivrant chacun  $50\mu\text{N}$ , ont ainsi été intégrés à la base d'une structure d'amplification. La tension de commande y est de  $75\text{V}$  pour une fréquence d'actionnement de  $45\text{Hz}$ .

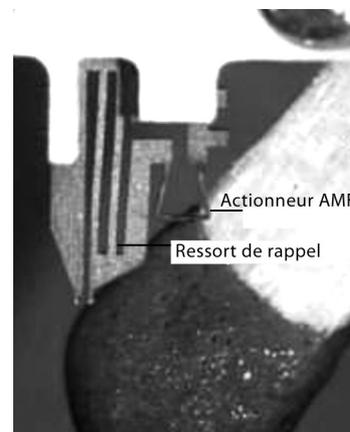
### 2.1.2.3 Alliage à mémoire de forme

Les matériaux à mémoire de forme sont des alliages qui, une fois déformés, reviennent à leur forme d'origine lorsque leur température augmente au-dessus d'un certain seuil. Ils ont donc la caractéristique de transformer une énergie thermique en un travail mécanique. Les alliages les plus répandus sont à base de nickel-titane ( $\text{TiNi}$ ).

Différentes configurations de montage et d'utilisation existent pour ce type d'actionneur. Sans traitement spécifique, l'effet mémoire de forme ne se fait que dans un sens. Il est donc nécessaire d'opposer une force de rappel à l'actionneur pour obtenir un mouvement réversible. Cette force de rappel peut provenir du montage antagoniste de deux actionneurs. Une micropince fonctionnant sur ce principe est proposée par [Kohl02] (Fig. 2.11). Une autre méthode consiste à opposer l'actionneur à un élément ressort (Fig. 2.1 et Fig. 2.12). L'effet mémoire de forme est obtenu après un recuit. Pour une structure monolithique et afin de différencier l'actionneur du ressort de rappel et donc d'instaurer l'effet mémoire uniquement au niveau de l'actionneur, un recuit local peut être effectué [Bellouard99]. Ces structures monolithiques doivent néanmoins être déformées durant le montage afin de précontraindre les actionneurs en position de repos, donc à température ambiante. Dans les cas présentés ici, l'augmentation de la température est générée par effet Joule. D'autres méthodes de chauffage peuvent être utilisées, par exemple par un élément Peltier ou par l'action d'un laser.



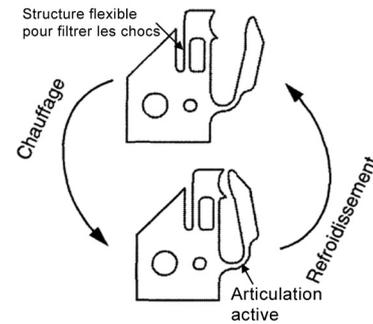
**Figure 2.11 :** Micropince à actionneurs à mémoire de forme (AMF) montés en antagoniste ([Kohl02]).



**Figure 2.12 :** Micropince à actionneur à mémoire de forme ayant subi un recuit local [Zhang04] et opposé à structure élastique induisant la force de rappel.

Finalement, un effet mémoire à double sens peut être obtenu par des méthodes d'éducation. Une des méthodes consiste à effectuer des cycles thermiques sous contrainte [Bellouard00]. Il n'est ainsi plus nécessaire d'intégrer un élément de force de rappel (Fig. 2.13).

Les actionneurs à mémoire de forme peuvent être obtenus par des moyens technologiques courants en microtechnique, soit par découpage laser, étampage, électro-érosion ou encore microstructuration. Ils présentent des déformations typiques de 1 à 8% et des densités d'énergie de  $10^6 - 10^7 \text{ J/m}^3$ . En comparaison, les matériaux piézoélectriques PZT ont une densité d'énergie de  $10^2 \text{ J/m}^3$ . Leur limitation provient de leur faible bande passante du fait que l'activation thermique est un procédé lent. Le temps d'activation dépend de la taille de l'actionneur, mais les plus rapides sont de l'ordre de 10ms.



**Figure 2.13 :** Principe de fonctionnement d'une micropince à effet mémoire double sens [Bellouard00].

#### 2.1.2.4 Piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques ont la capacité de transformer une énergie électrique en un travail mécanique et inversement. Les déformations typiques des actionneurs piézoélectriques sont faibles, de l'ordre de 0.12-0.15%, mais ils permettent d'appliquer de grandes forces à fréquence élevée (>100kHz) et d'atteindre de très hautes résolutions.

Les actionneurs piézoélectriques se déclinent sous diverses configurations permettant notamment d'amplifier la course : empilement multicouches (*stack*), effet bimorphe, mouvements pas-à-pas (*inch worm*, *stick slip*, *inertiel*), effet de genouillère et de levier.

Dédiée à la manipulation de fils de cuivre de  $\varnothing 80\mu\text{m}$ , une micropince pourvue d'un actionneur piézoélectrique *inch worm* a été présentée par [Henein03]. La structure élastique transforme le déplacement linéaire de l'actionneur en un mouvement symétrique, linéaire et transverse des doigts (Fig. 2.2).

De nombreux développements intègrent des actionneurs piézoélectriques commercialisés, généralement sous forme de *stacks*, dont notamment [Menciassi03] et [Nah07]. Ces éléments agissent sur une structure compliant qui permet d'adapter la course de l'actionneur au mouvement d'ouverture/fermeture désiré. L'intégration d'actionneur *stack* peut être limitée par l'encombrement total de la micropince. Par contre, la structure compliant peut être conçue monolithiquement, à partir de matériaux et technologies variés et interchangeable pour s'adapter par exemple aux composants. Des capteurs de forces tels des jauges de contraintes piézorésistives peuvent y être intégrés [Menciassi03].

L'utilisation d'éléments bimorphes permet d'actionner le doigt d'une pince sans autre élément d'amplification. Les actionneurs *duo-bimorphes* [Agnus03] offrent deux degrés de liberté découplés. La micropince MMOC intègre deux de ces actionneurs, un par doigt (Fig. 2.14). L'encombrement de chaque actionneur est de  $13 \times 1 \times 0.4 \text{ mm}^3$  auquel s'ajoute un organe terminal de 12mm de long. Ce dernier peut être façonné selon les caractéristiques des composants à manipuler. Le changement automatique des organes terminaux, basé sur l'utilisation d'une colle thermique, a été présenté par [Clévy05]. Pour des tensions de  $\pm 100\text{V}$ , le déplacement de l'extrémité du doigt est de  $\pm 80\mu\text{m}$  dans le plan et de  $\pm 200\mu\text{m}$  hors plan. Une volonté de standardisation a permis l'intégration de cette micropince MMOC dans des boîtiers DIL et LEMO®.

Une micropince à six degrés de liberté, intégrant deux actionneurs piézoélectriques *stacks* et deux actionneurs *double bender* (déformation d'un élément multicouche en flexion selon deux directions orthogonales), est proposée par [Zhou05] (Fig. 2.15). Les courses sont de  $30\mu\text{m}$  pour les actionneurs *stacks* et de  $180\mu\text{m}$  dans les deux directions pour les *double benders*. Des jauges de contrainte permettent de contrôler les mouvements de chaque actionneur en boucle fermée.

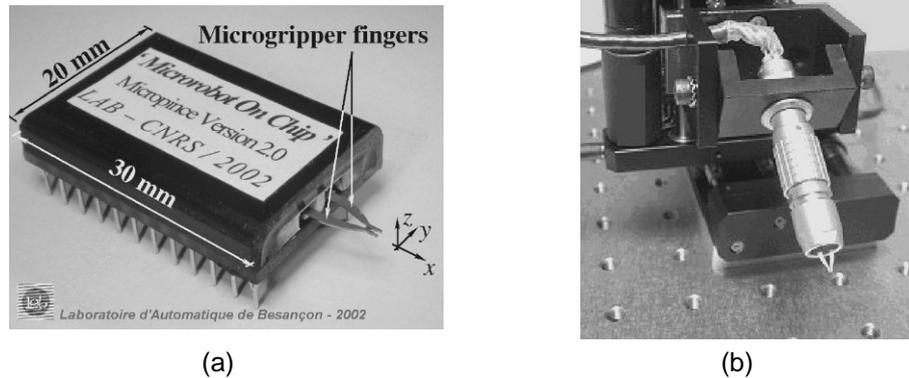


Figure 2.14 : Micropince MMOC dans boîtier DIL et LEMO® [Agnus03].

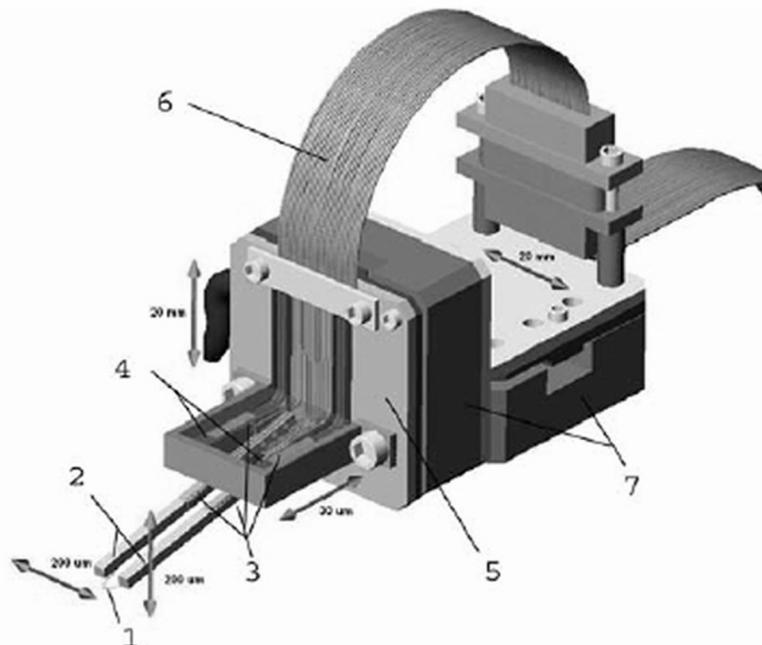


Figure 2.15 : Micropince à six degrés de liberté : 1) organes terminaux, 2) double benders, 3) jauges de contraintes, 4) stacks, 5) support, 6) câble plat, 7) table x-y [Zhou05].

### 2.1.2.5 Actionneur pneumatique

Les actionneurs pneumatiques sont couramment utilisés en automatisation et nombre de «macro-pinces» commercialisées fonctionnent sur ce principe connu et efficace. Les organes terminaux peuvent être adaptés aux composants et donc miniaturisés. La limitation provient du frottement dans les articulations, générant des effets de stick-slip. L'intégration de structures compliantes devient alors indispensable. [Schlick01] propose une pince pneumatique adaptée à des composants de 200 $\mu$ m à 3.5mm et induisant une force de serrage de 1.4N sous 2bar.

[Bütefisch02] propose l'intégration d'actionneurs pneumatiques sous forme de structures MEMS réalisées en SU8 et en silicium pris en sandwich entre deux surfaces en Pyrex (Fig. 2.3). Pour un encombrement de 6mm  $\times$  6mm, des déplacements jusqu'à 600 $\mu$ m et des forces de serrage de 10mN sont générés à 150kHz et pour une pression de 400mbar. La fréquence d'actionnement est limitée non pas par le piston, mais par la valve électromagnétique contrôlant la pression.

### 2.1.2.6 Autres méthodes d'actionnement

Certains développements intègrent des actionneurs plus communs en macro-automatisation, tel un moteur pas à pas [Petrovic02], des actionneurs à bobine mobile [Kim03], un servo-moteur [Jones06]. L'outil proposé par [Jones06] permet de fixer des brucelles sur une structure motorisée.

Une micropince contrôlée par laser est proposée par [Nogimori97]. Le liquide, du mercure, contenu dans un piston est chauffé au moyen d'un laser. Son expansion provoque le déplacement du piston et permet ainsi d'actionner la pince. Pour un diamètre intérieur du piston de 0.7mm, une force maximale de 2.3mN est obtenue pour une puissance de 80mW. Le déplacement maximal est de 900µm. Les expériences ont été menées à une fréquence d'actionnement de 1Hz.

L'utilisation d'actionneurs électrothermique et électrostatique en milieu liquide est limitée par les tensions d'actionnement trop élevées, provoquant des phénomènes d'électrolyse dans l'eau. En outre, les températures atteintes par les actionneurs électrothermiques sont généralement non compatibles avec un milieu liquide ainsi qu'avec tout composant organique. [Chan03] propose l'utilisation d'actionneurs polymères et notamment d'un actionneur trimorphe thermique à base de *parlylène C*. Une température de 60°C suffit à fléchir de 90° les doigts d'une pince à quatre doigts. Les connexions électriques au travers d'une couche métallique centrale peuvent être utilisées pour contrôler l'actionnement, mais la température du milieu liquide peut également être modifiée. D'autres types d'actionneurs polymères sont potentiellement intégrables à une micropince, par exemple les films polymères conducteurs ioniques (ICPF) qui réagissent à un champ électrique, les polymères à mémoire de forme, ou encore ceux dont le volume est sensible au pH du milieu (tel le Polyaniline (PANI)) [Zhou04].

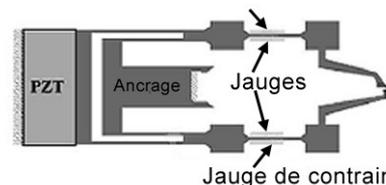
### 2.1.3 MESURE

Des capteurs sont souvent associés aux micropinces. Les mesures concernent principalement le déplacement généré par l'actionneur et la force de serrage.

L'information de la force de serrage provient en général de la mesure de la déformation engendrée, rapportée à une raideur connue et donc calibrée. La déformation est détectée soit par la modification de certaines propriétés du capteur (typiquement une modification de la résistance ou de la capacitance) ou directement mesurée optiquement. Les opérations de micromanipulation concernent des forces de moins de 1µN à plusieurs mN. Les capteurs les plus courants sont les jauges de déformation, les capteurs capacitifs et optiques. Une autre méthode de mesure de force consiste à compenser activement la force mesurée pour éviter le déplacement. Cette méthode est typiquement utilisée dans les balances de précision (Mettler-Toledo).

Au niveau des micropinces, l'intégration d'un capteur capacitif est illustrée en (Fig. 2.10) [Beyeler07]. Il permet une résolution de 0.55µN pour une plage de 2.8mN. Ce type de capteur a par exemple été utilisé dans l'étude de propriétés mécaniques de matériaux biologiques, notamment par l'utilisation du capteur à deux degrés de liberté présenté par [Sun03].

Les jauges de déformation utilisent les propriétés résistives des matériaux. Lorsqu'ils sont contraints ou déformés, leur résistance électrique change. La mesure à l'aide de telles jauges est très sensible à la qualité de leur disposition. Leur intégration se fait en général au niveau des organes terminaux qui comportent alors une structure compliant. Les jauges peuvent être placées symétriquement de part et d'autre de la structure [Menciassi03] (Fig. 2.16). Cette configuration permet une meilleure compensation thermique ainsi qu'une augmentation du rapport signal/bruit.



**Figure 2.16 :** Disposition symétriques des jauges de déformation sur les organes terminaux [Menciassi03].

Le capteur de force peut aussi être directement en contact avec le composant manipulé en fixant par exemple une poutre piézorésistive au doigt fixe de la micropince [Fahlbusch02]. Les poutres piézorésistives utilisent en général la sensibilité due aux caractéristiques piézorésistives du silicium.

Un capteur de force PVDF (polyvinylidène fluoride) a été conçu et intégré à une micropince. Il bénéficie des caractéristiques piézoélectriques d'un film PVDF. Ce type de capteur permet des mesures à haute fréquence. Le capteur a été placé directement au contact du composant. Des forces inférieures à 100µN sont mesurées [Kim03].

Les capteurs optiques employés en mesure de force sont généralement composés de photodiodes et de phototransistors. Le déplacement de l'élément compliant est alors mesuré. Ce principe est couramment exploité en mesure AFM. L'intégration d'un élément photosensible et d'une diode émettrice sur chaque doigt d'une micropince est exposée par [Petrovic02]. La mesure de force y est utilisée pour détecter des collisions ou une force disproportionnée.

Des méthodes de mesure de force par vision sont présentées par [Greminger04, Greminger05]. La détection puis la mesure optiques des structures déformées permet d'extraire les informations de forces.

#### 2.1.4 CONCLUSION

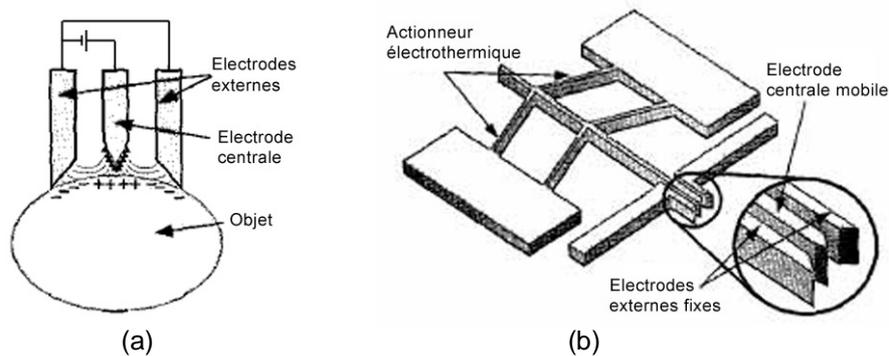
Les développements de micropinces aboutissent à une grande variété de structures, de matériaux et d'actionnements. Les spécifications de chaque application permettent de réaliser les choix optimaux. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant traitant des effets d'adhésion, les caractéristiques des surfaces affectent de manière importante les forces d'adhésion. Les surfaces des extrémités des doigts sont donc des zones sensibles. Des modifications de surfaces, en terme de rugosité, de géométrie spécifique ou encore de déposition de matériaux de faible adhésion sont donc régulièrement proposées.

Les micropinces offrent des possibilités de contrôle des forces exercées sur les composants très intéressantes et utiles, ainsi que des moyens de positionnement par référencement, voire par correction active pour les outils intégrant plusieurs degrés de liberté. Les limitations proviennent du manque d'accessibilité dû à leur encombrement important. La sensibilité des actionneurs à l'environnement de manipulation peut aussi être un facteur limitant le choix de ce type de principe de manipulation.

## 2.2 PRÉHENSEURS ÉLECTROSTATIQUES

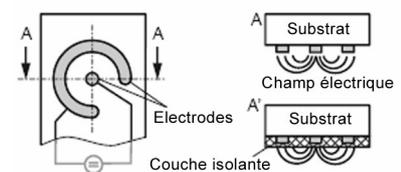
Les préhenseurs électrostatiques utilisent un champ électrique généré entre des électrodes pour maintenir les micro-objets. Cet effet attractif, dû aux forces électrostatiques, résulte des charges accumulées en surface de l'objet par le champ électrique. La force générée dépend de la différence de potentiel appliquée aux électrodes, de leur géométrie et de leur disposition ainsi que des caractéristiques diélectriques du composant.

Un préhenseur électrostatique constitué par une électrode centrale mobile et deux électrodes externes fixes est proposé par [Lee03]. La tension est appliquée entre les électrodes externes et l'électrode centrale, générant un champ électrique permettant de prendre les composants (Fig. 2.17(a)). Pour la dépose, l'électrode mobile est rétractée ce qui permet de réduire rapidement l'effet attractif dû aux charges ainsi que la surface de contact et d'augmenter la distance d'interaction. La structure monolithique du préhenseur est obtenue à partir d'un wafer SOI et intègre un actionneur électrothermique (Fig. 2.17(b)). La forme triangulaire des électrodes permet d'optimiser le flux tout en réduisant les surfaces de contact. Des billes de verre de 170µm de diamètre ont été manipulées. La tension nécessaire à la prise dépend fortement de l'épaisseur du préhenseur, donc de la taille des électrodes. Pour des épaisseurs de 20µm à 40µm, la tension est réduite de 250V à 100V.



**Figure 2.17** : Schéma de fonctionnement d'un préhenseur électrostatique à électrode mobile : (a) charges induites au micro-objet, (b) construction des électrodes ([Lee03]).

L'utilisation d'électrodes structurées permet d'adapter le préhenseur à la forme et à la taille des composants. Un effet d'auto-centrage et d'auto-alignement du composant peut être obtenu par les «effets de bord» selon la géométrie des électrodes [Hesselbach01, White07]. Pour un composant présentant une surface plane dont la taille est équivalente ou supérieure à une paire d'électrode, le système «électrodes - composant» se comporte comme des capacités mises en série [Enikov01]. Une force résiduelle, attribuée aux charges piégées aux interfaces, apparaît à tension nulle et perturbe voire empêche la dépose. L'opération de dépose est d'ailleurs le facteur limitant de ces préhenseurs. La mise à terre des électrodes améliore en partie l'opération [Hesselbach01], ainsi qu'une tension à haute fréquence en signal carré positif et négatif [Enikov01].



**Figure 2.18** : Exemple d'électrode structurée avec effet d'auto-centrage [Hesselbach07].

Les tensions de prise sont élevées. [Hesselbach01] rapporte la prise de billes en verre entre 100µm et 800µm de diamètre ainsi que de cubes en silicium de 80µm. Les tensions varient entre 300 et 1200V suivant la géométrie et la taille des composants. Néanmoins la tension devrait être limitée à 400V pour éviter des phénomènes de décharge. En outre, les déposes sont fiables pour des objets de plus de 400µm de diamètre lorsque les électrodes sont court-circuitées [Hesselbach07].

La déposition des électrodes sur un substrat transparent est un avantage pour la détection et le suivi de position par vision. Avec un tel préhenseur, des objets millimétriques en nickel ( $0.5 \times 2 \times 0.02 \text{ mm}^3$ ) sont pris puis insérés dans les encoches d'un wafer en mode automatique [Enikov05].

Une alternative à l'intégration d'électrodes au niveau du préhenseur et aux tensions élevées qui doivent y être appliquée consiste à utiliser des éléments externes de génération, puis de neutralisation des charges électriques. Un générateur de charges DC et un ionisateur AC ont été utilisés à cet effet. Présenté par [Hesselbach07], ce principe a été testé sur un préhenseur simple (plaquette en SU8) ainsi que sur des palettes de stockage. Des sphères en rubis ( $\varnothing 400\mu\text{m}$ ) ont adhéré pour plus de 24h à la surface chargée d'une palette avant de se détacher sous l'effet de la gravité.

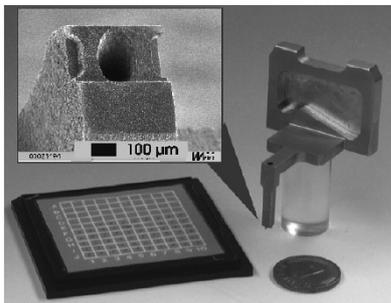
Dans le cas d'un composant métallique, une tension appliquée entre les surfaces métalliques du préhenseur et du substrat génère une force électrostatique permettant de transférer le composant d'une surface à l'autre. Bien que limité aux composants métalliques uniquement, l'avantage de ce principe est la simplicité des électrodes qui n'ont pas besoin d'être structurées. Le transfert de billes de soudure (PbSn  $\varnothing 30\mu\text{m}$ ) d'une pointe (50µm de rayon) à une surface plane, ces dernières en acier inoxydable, nécessite des tensions entre 100V et 400V [Saito02]. La tension tend à diminuer avec la racine carré de la distance de séparation d'où la nécessité de contrôler précisément la position des composants avant relâche. Quelle que soit cette distance, des tensions supérieures à 400V résultent en la pulvérisation des billes.

### 2.2.0.1 Diélectrophorèse

[Gauthier06] propose une méthode de relâche par diélectrophorèse répulsive. Ce principe est habituellement utilisé en biologie pour la manipulation de cellules au moyen d'électrodes fixes. L'originalité tient notamment au fait de l'utilisation d'électrodes mobiles qui sont en fait les doigts d'une micropince. Il s'agit donc d'un préhenseur hybride doté d'une nouvelle stratégie de dépose pour des manipulations en milieu liquide. La diélectrophorèse permet de créer un mouvement sur une particule polarisable à l'aide d'un champ électrique non uniforme. Cette technique est particulièrement efficace en milieu liquide et se contrôle au moyen d'un champ électrique alternatif. La force obtenue dépend de la conductivité et des propriétés diélectriques des composants et du milieu et peut être attractive ou répulsive. Des microbilles de  $\varnothing 20\mu\text{m}$  en verre ont ainsi été déposées avec un signal sinusoïdal de  $20V_{pp}$ .

## 2.3 PRÉHENSION PAR VACUUM

Les préhenseurs vacuum sont largement utilisés pour les opérations de pick&place de composants millimétriques et plus importants. Pour les objets sub-millimétriques, l'obtention d'orifices de petite taille est un des problèmes du développement de tels outils. Les micro-outils étant fragiles, [Zesch97, Petrovic02] optent pour un procédé simple, bien connu, et bon marché : l'utilisation de pipettes en verre telles que couramment utilisées en biologie. La taille optimale du diamètre des pipettes résulte d'un compromis permettant d'obtenir une prise et une dépose fiables. Expérimentalement, sur la base de manipulations de cristaux de borosilicate de  $80\text{-}150\mu\text{m}$  sur une surface en silicium, [Zesch97] observe que la taille optimale correspond à 25-50% de la taille de l'objet. La tâche de prise ne pose pas de problème particulier et réussit à chaque opération. La probabilité de déposer l'objet sur une surface plane en silicium est par contre de 75%.

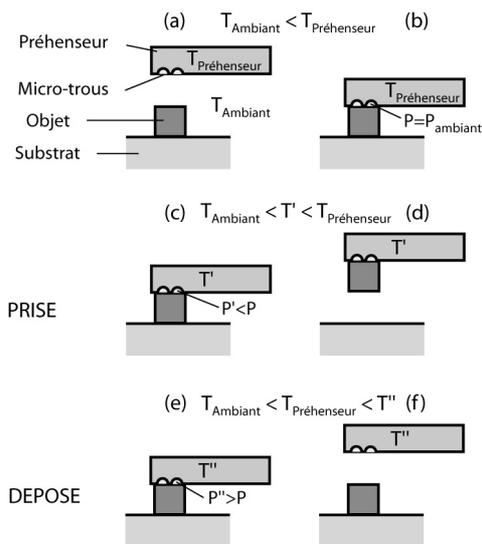


**Figure 2.19 :** *Préhenseur vacuum spécifique à la prise de diodes de  $520\mu\text{m} \times 220\mu\text{m}$  [Nienhaus98].*

Les composants électroniques et optiques peuvent présenter des zones fragiles interdisant tout contact en cours de manipulation ou être constitués de matériaux cassants qu'il faut donc manier avec prudence. [Nienhaus98] présente le développement de préhenseurs vacuum dont la géométrie de l'organe terminal est adaptée aux caractéristiques du composant (Fig. 2.19). L'adaptabilité du préhenseur aux caractéristiques variées des composants à manipuler est résolue par un système modulaire où seul l'organe terminal dépend du composant.

[Arai97] propose une méthode qui utilise la modification de pression obtenue par une variation de température à l'intérieur d'orifices disposés à la surface du préhenseur. En vue de prendre un composant, le préhenseur est chauffé à une température plus élevée ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ) que la température ambiante avant d'être mis en contact avec le composant. La température est alors abaissée et un gradient de pression négatif est engendré<sup>1</sup>. Cette différence de pression génère une force proportionnelle à la surface de contact, qui est utilisée pour prendre le composant. Pour la dépose, le préhenseur est à nouveau chauffé pour ré-équilibrer les pressions et annuler la force de succion (Fig. 2.20). Les mesures effectuées sur des composants en silicium de  $270 \times 270 \times 250 \mu\text{m}^3$  avec des orifices de  $\varnothing 15\mu\text{m}$  au préhenseur ont montré la faisabilité du principe et l'évolution de la force avec la surface structurée du préhenseur. L'augmentation de la température génère une pression plus importante à l'intérieur des microtrous qui a effectivement permis de déposer plus facilement les composants. A cette force de succion viennent s'ajouter les forces d'adhésion au contact. Ces dernières doivent être réduites pour améliorer la fiabilité du procédé.

1. En considérant le volume  $V$  constant et selon l'expression de Boyle-Mariotte ( $PV/T = \text{const}$ ) : pour une diminution de la température de  $T_{\text{préhenseur}}$  à  $T'$  et avec  $P$  la pression avant contact, la pression  $P'$  à l'intérieur des microtrous et après contact devient :  $P' = P(T'/T_{\text{préhenseur}})$ .



**Figure 2.20 :** Manipulation vacuum par variation de la température : (a) augmentation de la température du préhenseur, (b) mise en contact, (c) diminution de la température induisant une diminution de la pression dans les microtrous, (d) prise, (e) mise en contact au substrat, puis augmentation de la température, (f) dépose (adapté de [Arai97]).

## 2.4 MANIPULATION BASÉE SUR L'ADHÉSION

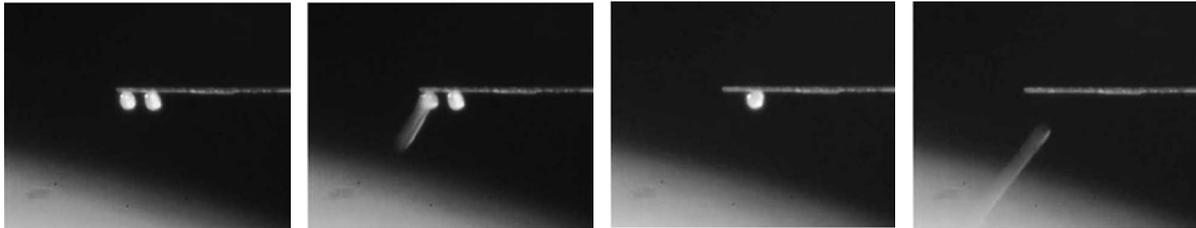
L'effet prépondérant de l'adhésion par rapport à la gravité pour des objets de taille inférieure au millimètre engendre la possibilité d'utiliser ces forces d'adhésion comme principe même de micromanipulation. Le déséquilibre des forces aux interfaces qui résultent des contacts «substrat - composant - préhenseur» engendre la prise, soit pour une force d'adhésion au préhenseur supérieure à celle au substrat, ou la dépose dans le cas opposé. Les forces d'adhésion sont dues aux forces de Van der Waals, aux forces électrostatiques et aux forces de capillarité. Elles sont notamment influencées par les matériaux en contact, les géométries de ces contacts, ainsi que les conditions de l'environnement de manipulation. Les préhenseurs utilisant les forces électrostatiques ont été présentés au § 2.2. Le cas spécifique de l'utilisation d'un ménisque à l'interface, donc des forces de capillarité, est traité ci-après (§ 2.5).

Le microscope à force atomique (AFM) est un outil de mesure couramment utilisé pour caractériser non seulement les surfaces, mais aussi les effets d'adhésion dans différentes conditions, telles que l'environnement ou les matériaux considérés. Les caractéristiques tribologiques des matériaux peuvent aussi y être évaluées. Les pointes AFM peuvent être utilisées pour manipuler des micro- et nanocomposants par adhésion. Le positionnement 2D de particules de quelques micromètres (1-3 $\mu\text{m}$ ) par AFM sous un microscope optique permet ainsi de bénéficier d'un contrôle en force et en position [Sitti00].

La manipulation par adhésion n'est pas une opération réversible. Si la prise d'un microcomposant est possible, sa dépose dans les mêmes conditions est improbable voire impossible. Différentes solutions telles qu'incliner le préhenseur, réduire la surface de contact, modifier la rugosité, contrôler les forces électrostatiques et de capillarité ont été proposées par [Arai95] et [Feddema99]. La dépose par adhésion peut aussi être induite en gérant les états de glissement et de roulement de l'objet au niveau du préhenseur et du substrat [Saito01]. Les caractéristiques de résistance au frottement et au roulement sont déterminantes pour évaluer les stratégies de prise et dépose par adhésion. [Sitti04] présente une méthode de caractérisation par AFM des paramètres de frottement et des comportements des micro-objets dans différents environnements (air, liquide, vide). La taille des microcomposants atteint les limites d'observation par microscopes optiques; la manipulation de tels composants et surtout de nanocomposants nécessite l'utilisation de microscopes électroniques (SEM). L'influence de ce dernier sur les phénomènes d'adhésion intervenant durant les manipulations est présentée par [Miyazaki00].

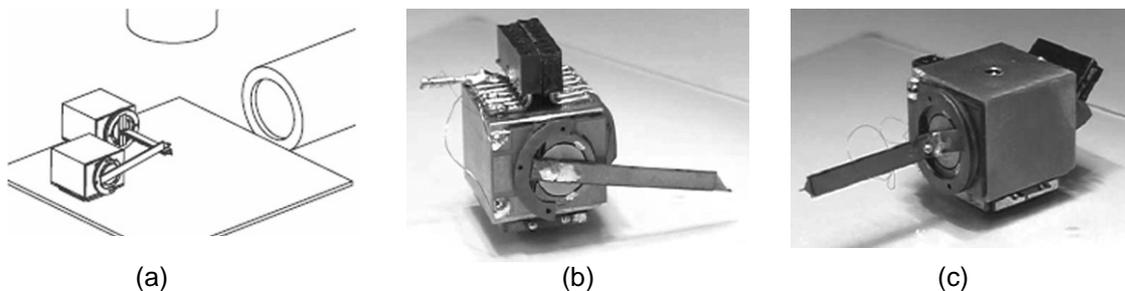
Sur la base d'opérations de manipulation par adhésion, une étude dynamique des tâches de prise et de dépose est proposée par [Rollot00]. Un seuil d'accélération limitant la faisabilité des opérations de prise et de dépose apparaît du fait de la force d'inertie appliquée au composant. Sur cette base, un composant

peut être saisi par adhésion suivant un mode quasi-statique, puis déposé dynamiquement, ce qui permet en outre de s'affranchir de l'influence du substrat lors de la dépose. Générer une force d'inertie supérieure aux forces d'adhésion nécessite de très grandes accélérations (de l'ordre de  $10^4$  à  $10^6 \text{m/s}^2$ ) vu la très faible masse du composant. L'utilisation d'un actionneur piézoélectrique couplé à une poutre piézorésistive permet d'atteindre de telles accélérations tout en assurant le suivi des opérations [Haliyo03]. Des billes de verre de  $20\mu\text{m}$  à  $40\mu\text{m}$  de diamètre, ainsi que des grains de pollen de  $\varnothing 20\mu\text{m}$  ont été manipulés avec ce principe. Notons par ailleurs la possibilité offerte par ce préhenseur d'effectuer des déposes sélectives (Fig. 2.21). Les microcomposants ayant tendance à adhérer les uns aux autres, la prise par adhésion se conclut souvent par une prise multiple d'où l'avantage de pouvoir déposer les composants un à un.



**Figure 2.21 :** Dépose sélective de grains de pollen ( $\varnothing 20\mu\text{m}$ ) [Haliyo03]. L'accélération est maximale à l'extrémité du préhenseur et dans le premier mode de résonance. De plus, la fréquence propre du système augmente à chaque fois qu'une bille est déposée. La variation de la fréquence sinusoïdale d'excitation de l'actionneur permet ainsi de déposer les composants un à un.

Par l'utilisation de microrobots mobiles (Fig. 2.22), la saisie, le transfert et la dépose par adhésion de grains de pollens de  $\varnothing 40\mu\text{m}$  ont été démontrés [Driesen05]. Les stratégies telles que la prise par adhésion à partir d'un substrat de plus basse énergie de surface, le transfert par roulement de l'objet entre deux surfaces parallèles, par raclement entre deux surfaces perpendiculaires ou encore en appliquant une accélération élevée ont été expérimentées. Leur faisabilité a été démontrée sans nécessiter l'intégration d'un capteur de force ou de position.



**Figure 2.22 :** Collaboration de microrobots mobiles ( $2\text{cm}^3$ ) munis d'une poutre piézoélectrique : (a) vue d'ensemble d'une manipulation par collaboration; microrobots à 4 degrés de liberté avec le bras de rotation (b) dans le plan et (c) normal au plan de rotation [Driesen05].

## 2.5 MANIPULATION PAR CAPILLARITÉ

La présence de liquide au contact entre un microcomposant et la surface du préhenseur ou du substrat génère une force, dite de capillarité, nettement supérieure aux autres contributions des forces de surface. Suivant le volume de liquide et la taille relative du préhenseur et du composant, un effet de centrage est induit par la position d'équilibre du ménisque [Bark98]. En outre un effet d'amortissement lors de la saisie rend ce principe intéressant pour la manipulation de composants fragiles.

La forme et le volume du ménisque à l'extrémité du préhenseur peuvent être modifiés par le biais de mouvements rapides d'aller-retour d'un piston magnétique à l'intérieur d'un capillaire contenant le liquide de préhension. De cette manière, la goutte de liquide grossit jusqu'à atteindre le composant, puis se rétracte en emportant ce dernier. [Aoyama95] présente ainsi un préhenseur par capillarité qui permet une grande distance d'approche et est peu sensible à la taille des composants. Des objets de 0.1mm à quelques millimètres ont été saisis en 30ms. La dépose est effectuée par éjection d'une goutte en augmentant l'accélération du piston.

Notons le développement d'un outil d'assemblage par capillarité proposé par [Lambert06] et dont la conception fait suite à une étude détaillée de l'utilisation des effets de capillarité en micromanipulation [Lambert04]. L'assemblage de roulements horlogers, dont les billes en zirconium mesurent 300 à 500 $\mu$ m de diamètre, a servi de cadre applicatif. Le préhenseur se présente sous la forme d'un cylindre d'acier dont le bout est de forme conique et le diamètre est de taille similaire à celui des billes à manipuler (Fig. 2.23). Différents liquides de manipulation ont été testés dont une huile qui présente ainsi l'avantage de ne pas s'évaporer et dont les résidus ne perturbent pas le système puisqu'agissant comme lubrifiant. Les composants sont alors placés sur une goutte ce qui permet d'améliorer la prise et l'alimentation. Pour la dépose, la stratégie est d'insérer la bille dans son logement et de repartir latéralement comme un racloir. L'alimentation en liquide de manipulation se fait simplement en trempant le bout du préhenseur dans le liquide. Bien qu'à chaque manipulation une petite partie du liquide reste sur l'objet lors de la dépose, jusqu'à une centaine d'opérations sans rechargement ont pu être effectuées. L'alimentation en liquide n'est alors qu'occasionnelle pour autant, bien entendu, que le liquide ne s'évapore pas.



**Figure 2.23 :** Prototype de préhenseur par capillarité développé par Lambert (la distance entre graduation est de 1mm) [Lambert06].

## 2.6 PRÉHENSEURS À CHANGEMENT DE PHASE

Ces préhenseurs comportent un matériau intermédiaire entre les surfaces du préhenseur et du composant. Les opérations de prise et de dépose sont alors effectuées en variant la phase de ce matériau, généralement d'une phase liquide à solide et inversement. Différents intermédiaires peuvent théoriquement être intégrés, mais le liquide le plus couramment utilisé est l'eau. Leur utilisation est discutée dans [Lang06] et un polymère thermoplastique (FlexWax) est expérimenté ainsi que des polymères sensibles aux UV.

Les préhenseurs à changement de phase sont peu sensibles aux variations de géométrie et de matériaux des composants. Ils sont adaptés à la manipulation de composants aux surfaces fragiles tout en pouvant générer des forces importantes de maintien (1N/mm<sup>2</sup> dans le cas de la glace).

L'utilisation d'eau comme intermédiaire a fait l'objet de plusieurs développements. Des composants de 0.5mm à 5mm sont manipulés par un préhenseur à glace et celui-ci permet d'assembler uniformément différents composants autant optiques, que mécaniques ou électroniques sans adaptation [Kochan97]. A une autre échelle, la manipulation de bandes de tissus est notamment proposée par [Seliger00], démontrant la possibilité de saisie de corps mous. Ce principe est aussi applicable en milieu liquide où

un volume de glace se forme au contact du préhenseur, recouvrant partiellement ou totalement le composant à manipuler [López-Walle07].

## 2.7 MANIPULATION SANS CONTACT

Les forces d'adhésion s'établissent au contact entre préhenseur et microcomposant. Elles peuvent être réduites en choisissant les paramètres adéquats de matériaux, de géométrie ou encore d'environnement, mais le seul moyen de les annuler consiste à éliminer tout contact mécanique. Les microcomposants sont en outre souvent fragiles ou comportent des surfaces sensibles qu'un contact mécanique pourrait endommager. Les techniques de lévitation peuvent donc offrir une solution intéressante aux désavantages inhérents de la manipulation avec contact.

On distingue cinq techniques distinctes de lévitations : la lévitation magnétique, électrique, optique, aérodynamique et acoustique. Pour un compte rendu détaillé des techniques de lévitations relatées dans la littérature, le lecteur pourra se référer à [Vandaele05]. En terme de micromanipulation, les techniques de lévitation acoustiques, aérodynamiques et optiques ont été intégrées.

### 2.7.1 ACOUSTIQUE

La lévitation acoustique peut être divisée en deux catégories : la lévitation par onde stationnaire et la lévitation *squeeze film* (traduction littérale : *film écrasé*). En lévitation par onde stationnaire, les composants sont maintenus aux noeuds de pression entre une plaque vibrante et un réflecteur, alors qu'en lévitation *squeeze film*, le réflecteur est remplacé par l'objet en lévitation lui-même.

La lévitation par onde stationnaire de composants sub-millimétriques dans l'air est proposée dans [Vandaele08]. En milieu liquide, des particules (10 $\mu$ m) peuvent être concentrées en des positions données ou selon des lignes et ceci à des hauteurs différentes en fonction d'un champ de forces acoustique. Ce dernier peut être généré par une plaque de verre qui vibre (~1MHz) sous l'effet d'actionneurs piézoélectriques [Haake02].

La technique de lévitation *squeeze film* a été intégrée à un préhenseur en combinant une vibration ultrasonique à un effet vacuum [Zäh03]. Le composant est attiré vers le préhenseur par l'effet vacuum alors que la haute fréquence d'oscillation (> 20kHz) de la sonotrode produit un effet répulsif sur le composant. Un effet similaire à un coussin d'air est créé. Ce principe est applicable pour des composants planaires, c'est-à-dire d'un rapport diamètre sur épaisseur élevé. Des composants de 2x6x0.4mm<sup>3</sup> sont ainsi manipulés. La distance de prise est de 50 $\mu$ m. La précision de positionnement du préhenseur au-dessus du composant lors de la prise, soit avant l'enclenchement de la vibration, est un point crucial. Une force latérale de centrage de 4mN est atteinte, ce qui correspond à un facteur 4 par rapport à la masse transportée. Les forces latérales sont influencées par la forme de la sonotrode.

### 2.7.2 AÉRODYNAMIQUE

La lévitation aérodynamique se divise aussi en deux catégories. La première correspond à l'utilisation d'un flux pressurisé qui s'oppose au poids des composants et s'apparente à un coussin d'air. Cette méthode est utilisée pour transférer des composants, notamment par le biais d'un champ électrique [Gengenbach00], permettant ainsi d'annuler les forces de frottement. La seconde catégorie est l'application du principe de Bernoulli. Un flux d'air est injecté au travers d'une buse placée sur une surface parallèle à celle du composant à manipuler. Le flux radial qui en découle subit une accélération qui provoque une chute de pression entre les deux surfaces. Ce principe est utilisé pour le transfert sans contact de wafers de silicium. La manipulation de composants de 3 à 13mm est présentée par [Segovia99]. L'utilisation de deux flux permet de générer une force attractive et un effet de centrage qui remplace avantageusement l'utilisation de doigts de centrage. Une force axiale de 5.5mN est obtenue sous 2.5bar pour

un préhenseur de diamètre externe de 3.8mm et interne de 1mm. Les composants ont subi avec succès des accélérations de 10G.

### 2.7.3 OPTIQUE

La lévitation optique utilise la pression de radiation d'un laser pour piéger et manipuler des micro- et nanoparticules diélectriques. Un objet piégé par un faisceau laser subit deux forces, axiale et radiale. Proportionnelle à l'intensité optique, la composante axiale (*force de diffusion* ou *pression de radiation*) pointe en direction du rayon incident. La force radiale (*force de gradient*) dépend du gradient d'intensité et de l'indice de réfraction de l'objet. Un objet d'indice plus élevé que le milieu subira un effet de centrage alors que dans le cas inverse il sera poussé hors du faisceau [Ashkin70]. Les forces générées sont faibles comparativement aux forces d'adhésion (de l'ordre de 0.1-10pN). Les manipulations ont donc généralement lieu en milieu liquide. Les applications principales concernent la manipulation de particules biologiques, dont des cellules vivantes.

Le terme de *pince optique* correspond à un rayon laser focalisé par un objectif de microscope à grande ouverture numérique pour créer un piège unique. La particule manipulée est alors piégée près du point focal. Différentes configurations utilisant un ou plusieurs faisceaux lasers sont possibles, de même que la structuration en plusieurs puits optiques par franges d'interférence ou par diffraction [Rohner06]. La disposition des puits optiques peut être contrôlée au moyen d'un PC puis générée dynamiquement par SLM (*Spatial Light Modulator*). L'alignement, la translation et la rotation de plusieurs particules simultanément peuvent ainsi être effectués [Eriksen03]. Le piégeage optique est compatible avec les systèmes microfluidiques et notamment les laboratoires sur puce (*Lab on chip*).

## 2.8 ASSEMBLAGE ET MANIPULATION PAR LOTS («PARALLEL ASSEMBLY»)

Les manipulations présentées jusqu'ici étaient de type sérielles : les composants sont manipulés les uns après les autres. Quelques exemples de manipulations simultanées d'un lot de composants ont été présentés dans le cadre des manipulations sans contact par onde stationnaire et par la création de puits optiques. Il existe de nombreuses méthodes de manipulation par lots, qui peuvent s'apparenter à des méthodes de transfert et pourraient donc dans certains cas être utilisées comme élément d'alimentation en microcomposants. Un exemple est donné par [Beyeler07] où une micropince saisit les composants dans un système d'alignement par ultrasons. Ces techniques ont souvent été développées dans le cadre des *labs on chip*. Le transfert y a lieu dans un liquide. Les forces d'adhésion y sont nettement moins importantes. Les composants ont donc moins tendance à adhérer aux surfaces des canaux ainsi que les uns aux autres. D'autre part, les applications visées concernent souvent des particules biologiques qui ont besoin d'un environnement liquide.

Les particules peuvent être transférées en manipulant un volume de liquide les contenant. Il s'agit alors de créer des flux contrôlés dans les microcanaux, avec parfois des opérations de tri, de séparation ou au contraire de mélange. Une manière intuitive de déplacer un liquide dans un canal est d'appliquer une différence de pression entre l'entrée et la sortie. En présence de surfaces chargées, un champ électrique dirigé parallèlement au canal permet d'induire un flux électro-osmotique à un liquide conducteur par électrophorèse<sup>2</sup>. Enfin, une goutte peut être déplacée sur une surface hydrophobe par électromouillage [Lee02, Moon06, Lazarou06].

La création de puits de potentiel, qui représentent chacun une position attractive pour un micro-objet, puis le déplacement de ces puits permet un transfert «ordonné» des particules, par exemple par onde ultrasonique ou par pinces optiques. D'autres méthodes d'auto-positionnement, parfois aussi appelé

---

2. L'électrophorèse permet d'engendrer le mouvement d'une particule conductrice par un champ électrique continu. Le champ électrique induit une force électrostatique à une particule chargée. La particule migre alors à une certaine vitesse selon sa polarité et sa mobilité (en fonction de sa forme et de la viscosité du milieu).

auto-assemblage (*self assembly*), ont été développées. Les particules peuvent être déplacées et positionnées simultanément dans le volume de liquide par diélectrophorèse [Seger06, Heeren07]. [Subramanian05] propose une méthode d'assemblage de nanotubes de carbones par diélectrophorèse positive dans l'air. Dans le but d'éliminer les forces de frottement et d'adhésion et donc de faciliter le mouvement des microcomposants, une vibration ultrasonique est appliquée soit à la surface de manipulation en cas d'assemblage à sec, soit en terme d'agitation par ultrasons dans un liquide. [Böhringer98] propose alors d'utiliser des forces électrostatiques pour positionner et aligner les composants sur une plaque vibrante, alors que [Hori03] crée des potentiels gravitationnels pour positionner des cylindres de  $\text{Ø}0.5\text{mm} \times 1\text{mm}$  dans des trous de  $\text{Ø}2\text{mm}$ . L'utilisation de zones hydrophobes au niveau récepteur et composant permet, en milieu liquide, de définir les sites récepteurs et d'y fixer les composants. Un tel principe est proposé et implémenté pour l'assemblage de micromiroirs [Srinivasan01]. On trouve un principe similaire chez [Onoe03]. Les forces de capillarité ainsi que des critères géométriques servent à l'auto-alignement et à la fixation de structure 2D présentées par [Hosokawa96]. Finalement la présence locale d'un liquide permet d'engendrer une force de capillarité au composant avec un effet sélectif de la surface en cas de structure hydrophile/hydrophobe [Fang06], ainsi qu'un effet de centrage. Ce dernier apparaît notamment lors de l'utilisation de billes de soudure liquides [Harsch99].

## 2.9 CONCLUSION

La comparaison des différents principes de micromanipulation tirés de la littérature et présentés dans ce chapitre est synthétisée au tableau 2.1. Sans qu'il n'y ait un préhenseur universel, les micropinces sont les outils les plus polyvalents en terme de composants et de conditions de manipulation. La force de maintien peut être limitée, par exemple pour préserver des surfaces fragiles, mais des forces importantes peuvent aussi être générées en fonction des opérations à effectuer. La diversité des matériaux, des structures, des actionneurs à disposition permet une conception sur mesure de l'application visée. Néanmoins la dépose des microcomposants peut être très problématique pour cause d'adhésion. Un autre facteur limitant concerne leur encombrement. Cet aspect, propre au principe même de la prise par frottement, peut être un désavantage lorsqu'il s'agit de saisir ou de positionner un composant sur un ensemble déjà encombré.

Les préhenseurs par capillarité et à changement de phase permettent une saisie «douce» ou amortie. Le risque de contamination des surfaces peut par contre empêcher leur utilisation avec certains composants aux surfaces sensibles. A leur avantage, les forces de préhension sont appliquées sur des surfaces plus importantes, d'où une pression au contact réduite. De même que pour les préhenseurs électrostatiques, à vacuum ou à adhésion, les forces de préhension suffisent à maintenir le composant durant les trajets, même latéralement. Lors de l'assemblage, une compliance intéressante est obtenue par la présence d'un ménisque à l'interface, tout en maintenant une direction ferme de référence. La manipulation par adhésion est réalisée avec des composants de taille de quelques dizaines de micromètres et inférieure. L'utilisation du vacuum est généralisée pour des composants de taille millimétrique mais la limite inférieure vient «buter» sur les phénomènes d'adhésion. Il en va de même pour les préhenseurs électrostatiques pour lesquels les charges électriques résiduelles perturbent de manière trop importante la dépose des microcomposants.

Les techniques de lévitation ainsi que de manipulation par lots ont permis, ou en ont le potentiel, de développer des éléments de transfert et d'alimentation en composants. Ce point n'est pas traité dans la présente étude où nous nous intéressons avant tout aux opérations de prise et dépose en vue d'un assemblage sériel et pour lesquelles les critères de positionnement et de référencement sont importants.

Finalement, la maîtrise du positionnement d'un composant peut aussi être obtenue par des procédés hybrides mettant à profit les effets de centrage ou d'attraction utilisés lors de manipulations par lot. [Zhou06] propose ainsi de combiner la manipulation par l'intermédiaire d'une micropince avec l'auto-alignement par capillarité.

PRINCIPE	COMPOSANTS			DÉPOSE	ENVIRONNEMENT (RH : HUMIDITÉ RELATIVE)	FORCE DE MAINTIEN	POSITION DU COMPOSANT
	MATÉRIAUX	TAILLE, FORME	PRISE				
Micropince (§ 2.1)	pas de limitation	limitée par taille des doigts	OK	adhésion aux doigts	pas de contrainte, mais adhésion réduite à bas RH	pas limitée	référencement par les doigts
Electrostatique (§ 2.2)	matériaux conducteurs, dépend des caractéristiques diélectriques, pas comp. mélectroniques	optimal pour surface plane	OK	perturbée par les charges résiduelles	pas efficace pour RH > 65%	limitée par tension de claquage	effet de centrage selon forme électrodes
Vacuum (§ 2.3)	porosité peut limiter à cause de fuites ou de génération de particules	adéquation buse et surface composant	OK	Adhésion à l'outil	contrôle du RH pour limiter les effets d'adhésion	selon taille buse et sous-pression	pas contrôlée, mais dépend de la forme de préhenseur
Adhésion (§ 2.4)	pas de limitation (par contre choix critique pour substrat et préhenseur)	optimal avec diminution de la taille (Fadh>>Gravité)	Stratégies de transfert, dépend de l'adhésion à chaque surface		très sensible	selon RH, matériaux, géométrie	pas contrôlée
Inertiel (§ 2.4)	pas de limitation	accélération nécessaire augmente avec la diminution de la taille	-	OK	accélération augmente avec adhésion et donc avec RH	-	pas contrôlée
Capillarité (§ 2.5)	tendance hydrophile	force maximale pour surface plane, mais ok pour toute forme	OK	nécessite stratégie supplémentaire	pas dans liquide	selon liquide, matériau, géométrie	effet de centrage possible ou référence selon la forme du préhenseur
Changement de phase (§ 2.6)	pas de limitation	pas de limitation	OK	adhésion avec l'intermédiaire (l'eau)	en fonction de l'intermédiaire (eau)	glace 1N/mm <sup>2</sup>	pas contrôlée
Ultrasound (§ 2.7.1) (squeeze film)	pas de limitation	surface plane >> épaisseur	OK	OK	pas dans le vide, ni dans liquide	dépend de pression & vibration	force latérale (centrage)
Bernouilli (§ 2.7.2)	la porosité peut limiter l'utilisation	surface plane	OK	OK	pas dans le vide	selon distance, diamètre, pression	faible stabilité latérale
Pinces optiques (§ 2.7.3)	diélectrique, transparent, indice réfraction > indice du milieu	< 50µm	OK	OK	liquide	max 1nN	effet de centrage selon le rapport des indices de réfraction

Tableau 2.1 : Comparaison des différents principes de micromanipulation.

Une revue de différents principes, développements et réalisations de micropréhenseurs relatés dans la littérature a été présentée dans ce chapitre. Les problématiques découlant des phénomènes d'adhésion au contact ont été mentionnées. Les forces de surfaces, leur évaluation ainsi que leur sensibilité, sont étudiées au chapitre suivant.

Le chapitre 4 concerne la modélisation des opérations de manipulation (saisie et dépose) et aborde en particulier les principes de manipulation par adhésion, par frottement, par vacuum, par capillarité, ainsi que la dépose inertielle.

Ce chapitre offre une vue d'ensemble de différentes réalisations actuelles. Il s'agit d'une base du catalogue de solutions, donnant ainsi un point de départ à la conception de micropréhenseurs.

# LES FORCES D'ADHÉSION - PROBLÉMATIQUE DU MICROMONDE

---

La manipulation de composants micrométriques ne peut se faire sans une bonne compréhension des phénomènes intervenant aux interfaces entre le préhenseur, le composant et le substrat. A une échelle inférieure au millimètre, les forces dites surfaciques, donc variant avec le carré de la taille, deviennent prépondérantes face aux forces volumiques que sont la gravité et l'inertie et dont la variation avec le cube de la longueur décroît plus rapidement. A l'échelle macroscopique par contre, les forces surfaciques sont considérées comme négligeables. Cette prépondérance par rapport à la gravité rend leur connaissance indispensable pour expliciter et comprendre les phénomènes physiques intervenant lors d'opérations sur des composants inférieurs au millimètre et donc pour concevoir des micropréhenseurs fiables. Ces effets d'adhésion sont en outre dépendants de plusieurs facteurs concernant non seulement les caractéristiques propres au composant, mais aussi celles de l'environnement dans lequel ont lieu les opérations.

Ce chapitre présente les causes majeures des effets d'adhésion ainsi que leurs modèles tirés de la littérature. Les forces surfaciques, les forces au contact et les forces de frottement y sont explicitées. Cette base théorique doit ensuite permettre de fonder les modèles des différents principes de prise et de dépose dans le micromonde, c'est pourquoi la sensibilité des effets d'adhésion face à une variation des conditions de la manipulation ainsi que des caractéristiques du composant et du récepteur sont abordées.

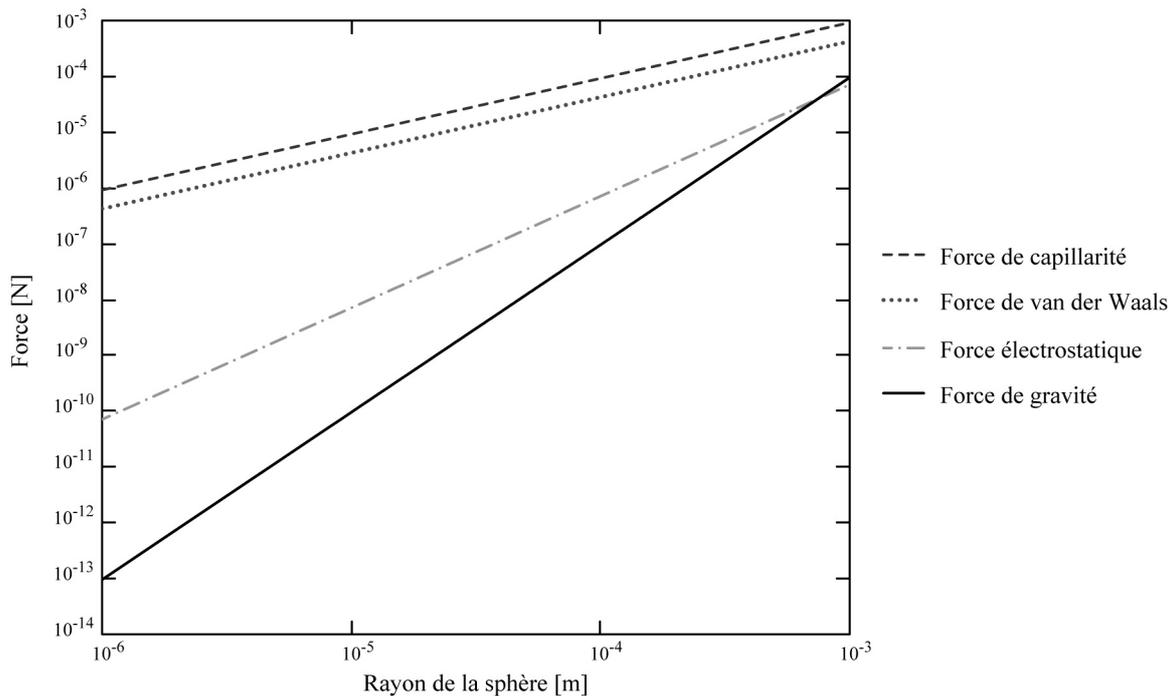
## 3.1 CAUSES MAJEURES DE L'ADHÉSION

Les effets d'adhésion sont majoritairement représentés par trois types de forces surfaciques :

- les **forces de van der Waals** dues aux phénomènes de polarisation instantanée entre les molécules des corps en présence (§ 3.2);
- les **forces de capillarité** causées par la présence d'un film liquide sur les surfaces (§ 3.3);
- les **forces électrostatiques** qui apparaissent en présence de particules chargées ou suite au transfert ou à la génération de charges durant le contact (§ 3.4).

Les liaisons chimiques, qui interviennent dans la cohésion des solides, ne sont pas considérées dans cette étude. Leur énergie est certes non négligeable, mais leurs effets sont en pratique importants seulement dans des conditions très strictes comme dans l'ultra vide par exemple. Pour toute autre condition, la présence de substances contaminantes, comme une couche d'oxydation, diminue considérablement la capacité de créer de telles liaisons entre deux corps en contact.

Les forces surfaciques ont des influences variables selon la distance entre les surfaces, la géométrie considérée et bien entendu la taille des objets. La Fig. 3.1 compare ces forces dans le cas d'un contact entre une sphère et une surface plane en verre en fonction du rayon de la sphère. On y voit clairement la prédominance des forces d'adhésion sur la force de gravité et dans une certaine mesure sur les forces électrostatiques. Il convient de noter, pour ces dernières, l'incertitude liée à la présence de charges et à leur répartition et de ce fait la grande variabilité de ces forces.



**Figure 3.1 :** Comparaison des forces de van der Waals, de capillarité, électrostatique et de gravité dans le cas d'un contact entre une sphère et un plan en verre en fonction du rayon de la sphère (paramètres utilisés : (force de Van der Waals) constante de Hamaker  $A^H = 6.5 \times 10^{-20} \text{ J}$ ; (force de capillarité) tension de surface :  $\gamma = 73 \text{ mN/m}$ , angle de contact :  $\theta = 0^\circ$ ; (force électrostatique) densité de charges :  $\sigma = 10^{-5} \text{ C/m}^2$ ; (gravité) densité :  $\rho = 2.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ).

### 3.1.1 ENERGIE D'INTERACTION

Avant d'aborder plus en détails les forces d'adhésion, il est nécessaire d'introduire les notions d'énergie de surface et d'énergie interfaciale qui interviennent dans les phénomènes d'adhésion au contact et dépendent des caractéristiques intrinsèques des matériaux [Israelachvili97].

#### 3.1.1.1 Travaux de cohésion et d'adhésion

Le travail d'adhésion correspond à l'énergie nécessaire à séparer deux milieux distincts 1 et 2, de surface unitaire, du contact jusqu'à l'infini dans le vide et est notée  $W_{12}$ . Pour deux milieux identiques, cette énergie est appelée travail de cohésion et est notée  $W_{11}$ .

#### 3.1.1.2 Energie de surface ou tension de surface

L'énergie de surface, ou tension de surface,  $\gamma_1$  correspond à l'énergie par unité de surface nécessaire à accroître la surface libre d'un milieu 1. Elle s'exprime en  $[\text{J/m}^2]$  pour les solides alors que dans le cas

de liquide on la nomme plus souvent tension de surface, donnée en [N/m]. Cette énergie représente la moitié du travail de cohésion  $W_{11}$  soit :

$$\gamma_1 = \frac{1}{2}W_{11} \quad (3.1)$$

L'énergie de surface d'un matériau dépend des forces intermoléculaires qui assurent sa cohésion de la même manière qu'en dépend son point d'ébullition. Les matériaux à haute température d'ébullition ( $T_B > 2000^\circ\text{C}$ ) présentent ainsi des énergies de surface élevées ( $\gamma > 1000\text{mN/m}$ ), alors qu'en ce qui concerne les matériaux de plus basses températures d'ébullition les énergies de surface décroissent, comme par exemple dans le cas de l'eau ( $T_B = 100^\circ\text{C}$  et  $\gamma = 73\text{mN/m}$ ).

### 3.1.1.3 Energie interfaciale

L'énergie interfaciale  $\gamma_{12}$  est l'énergie par unité de surface nécessaire à étendre l'interface de deux milieux en contact. L'énergie interfaciale est reliée aux travaux d'adhésion  $W_{12}$  et de cohésion  $W_{11}$  et  $W_{22}$  par l'équation de Dupré :

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2}W_{11} + \frac{1}{2}W_{22} - W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - W_{12} \quad (3.2)$$

La travail d'adhésion peut aussi être évalué en fonction des travaux de cohésion ou des énergies de surface selon l'expression plus usitée suivante<sup>1</sup> :

$$W_{12} = \sqrt{W_{11}W_{22}} = 2\sqrt{\gamma_1\gamma_2} \quad (3.3)$$

Dans le cas où cette interaction a lieu dans un autre milieu que le vide, le travail nécessaire à séparer les éléments 1 et 2 dans un milieu 3 correspond à :

$$W_{132} = W_{12} + W_{33} - W_{13} - W_{23} = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12} \quad (3.4)$$

### 3.1.1.4 Angle de contact

Pour une goutte posée sur une surface solide et interagissant dans une atmosphère inerte, on distingue trois phases (solide, liquide, gazeux) séparées par trois interfaces qui se rejoignent selon une ligne de contact. Ces trois interfaces sont caractérisées par les énergies de surface intervenant aux contacts liquide/gazeux ( $\gamma$ ), solide/gazeux ( $\gamma_{SG}$ ) et solide/liquide ( $\gamma_{SL}$ ) et par l'angle de contact  $\theta$  (Fig. 3.2). Elles interagissent selon la relation de Young :

$$\gamma \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (3.5)$$

Avec cette notation, l'équation (3.2) devient  $\gamma_{SL} = \gamma_{SG} + \gamma - W_{SL}$ . Combinée à l'expression (3.5), on trouve l'équation de Young-Dupré :

$$\gamma(1 + \cos \theta) = W_{SL} \quad (3.6)$$

L'angle de contact  $\theta$  est une donnée physique facilement mesurable et décrivant la mouillabilité d'une surface. Cet angle permet aussi de différencier les matériaux à tendance hydrophile ( $\theta < 90^\circ$ ) de ceux à tendance hydrophobe ( $\theta > 90^\circ$ ), sachant qu'un angle  $\theta$  nul ( $\theta = 0$ ) correspond à un matériau parfaitement hydrophile alors qu'un matériau parfaitement hydrophobe induira un angle  $\theta = 180^\circ$ .

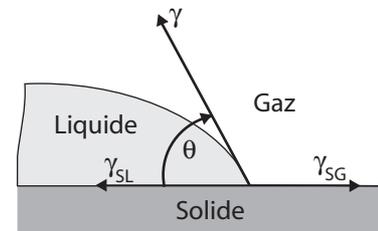


Figure 3.2 : ligne de contact à l'intersection des trois phases.

1. Cette expression n'est pas valable pour les molécules hautement polarisées, telles les molécules d'eau. Cette même limitation sera évoquée dans l'évaluation de la constante d'Hamaker pour les milieux où les interactions moléculaires ne sont pas générées essentiellement par les phénomènes de dispersion. Selon [Israelachvili97], le travail d'adhésion peut être évalué suivant (3.3) en utilisant la contribution des forces de dispersion à la tension de surface  $\gamma^d$ . Pour le cas de l'eau :  $\gamma = 73\text{mJm}^{-2}$  et  $\gamma^d = 20\text{mJm}^{-2}$ .

## 3.2 LES FORCES DE VAN DER WAALS

### 3.2.1 GÉNÉRALITÉS

La force de Van der Waals correspond aux interactions attractives, entre particules, générées par les phénomènes de polarisation instantanée. De manière générale, toutes les interactions entre particules sont représentées par le potentiel d'interaction moléculaire ( $w$ ) obtenu par la sommation des contributions attractives<sup>2</sup> et répulsives entre deux éléments (atomes ou molécules) en fonction de la distance d'interaction ( $r$ ). L'expression la plus connue en est le potentiel de Lennard-Jones, ou potentiel '6-12', qui s'écrit :

$$w(r) = 4\epsilon \left[ \left( \frac{\xi_0}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\xi_0}{r} \right)^6 \right] \quad (3.7)$$

avec  $\xi_0$  la distance interatomique d'équilibre et  $\epsilon$  correspond au seuil d'énergie minimum. La partie attractive ( $< 0$ ) est associée au terme de Van der Waals. Un effet répulsif apparaît à très faible distance (quelques Angströms) du fait des répulsions coulombiennes et des interpénétrations des orbitales électroniques.

Le potentiel d'interaction de Van der Waals suit donc une loi inverse de puissance six selon la distance d'interaction et est composé des trois contributions suivantes :

- les forces d'induction, qui apparaissent entre dipôle et dipôle induit (interactions de Debye),
- les forces d'orientation, générées par deux dipôles (interactions de Keesom),
- les forces de dispersion, qui interviennent entre toutes les particules, même neutres (interactions de London).

L'effet de dispersion, comme l'effet gravitationnel, s'exerce entre tous les atomes et molécules quelles que soient leurs propriétés. Il correspond à la polarisation instantanée créée par les fluctuations de la position des atomes autour du noyau. Les forces de dispersion sont en général prédominantes par rapport aux autres contributions. Cet effet revêt donc une importance considérable notamment pour les effets d'adhésion et de tension de surface, pour les propriétés des gaz, des liquides et des films fins, et pour les résistances des matériaux. Cette prédominance n'a par contre pas lieu dans le cas de petites molécules hautement polarisées telles que l'eau [Israelachvili97].

Dans le cas de deux molécules polaires dans le vide, le potentiel d'interaction de Van der Waals est ainsi représenté par :

$$\begin{aligned} w_{VDW}(r) &= -\frac{(C_{ind} + C_{orient} + C_{disp})}{r^6} \\ &= -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2 r^6} \left[ (u_1^2 \alpha_{02} + u_2^2 \alpha_{01}) + \frac{u_1^2 u_2^2}{3k_B T} + \frac{3\alpha_{01} \alpha_{02} h_P v_1 v_2}{2v_1 + v_2} \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

avec  $\alpha_{01}$  et  $\alpha_{02}$  les polarisabilités électroniques,  $u_1$  et  $u_2$  les moments dipolaires des molécules 1 et 2,  $v_1$  et  $v_2$  les fréquences d'orbite de l'électron,  $h_P$  la constante de Planck ( $h_P v$  est le potentiel d'ionisation),  $\epsilon_0$  la permittivité du vide,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température.  $C_{ind}$ ,  $C_{orient}$  et  $C_{disp}$  représentent les différentes contributions.

La force entre les deux particules dérive de ce potentiel selon :

$$F = -\frac{dw(r)}{dr} \quad (3.9)$$

2. Par convention, on attribue le signe négatif aux effets attractifs et le signe positif aux effets répulsifs.

### 3.2.2 INTERACTIONS ENTRE SURFACES

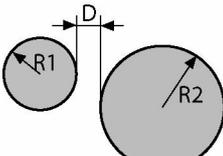
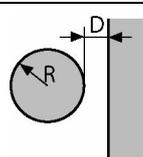
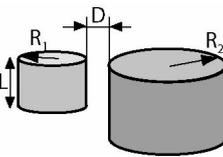
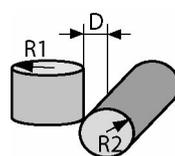
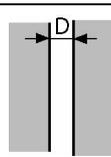
L'expression (3.8) concerne l'interaction entre deux atomes ou molécules. Pour deux corps en présence, l'énergie d'interaction s'obtient en considérant les interactions entre chaque molécule ou atome. Pour des géométries simples de surfaces en présence, une expression analytique peut ainsi être obtenue par l'intégration du potentiel sur toutes les molécules en fonction de la distance  $D$  entre les corps.

La force et le potentiel d'interaction de Van der Waals sont généralement exprimés sur la base de la constante de Hamaker ( $A^H$ ) qui décrit les caractéristiques intrinsèques des matériaux et des conditions expérimentales. Pour deux matériaux interagissant dans le vide, elle s'exprime par :

$$A^H = \pi^2 C \rho_1 \rho_2 \quad (3.10)$$

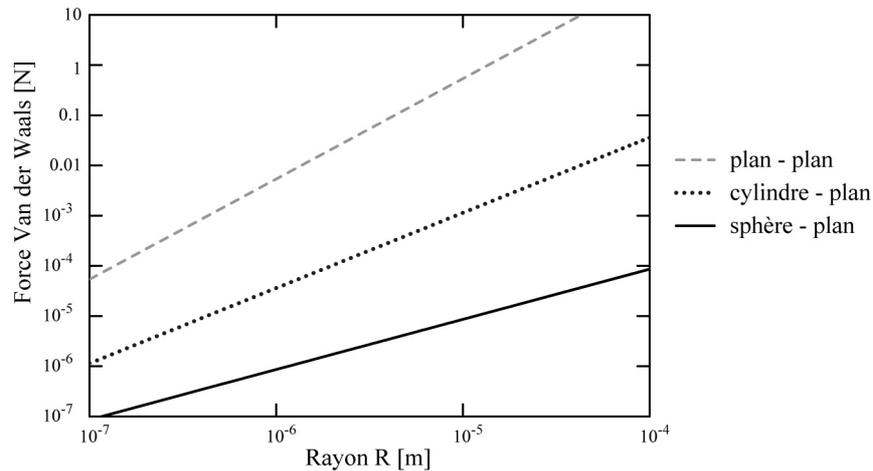
avec  $C$  la constante de London et  $\rho$  la densité moléculaire de chaque solide. La constante de Hamaker peut être évaluée par l'expression (3.10) ou sur la base de la théorie de Lifshitz. Etant données la complexité du modèle et la connaissance approfondie des caractéristiques de permittivité des matériaux qui y sont nécessaires, la constante de Hamaker est généralement obtenue expérimentalement. Elle varie entre  $0.4 \times 10^{-19}$  -  $4 \times 10^{-19}$  J (Annexe A).

Le tableau (3.1) relate les potentiels d'interaction pour différentes géométries simples, ainsi que les forces de Van der Waals correspondantes. La force entre les deux corps dérive du potentiel selon la distance entre les corps ( $D$ ) ( $F_{VDW} = -\partial W / \partial D$ ).

GÉOMÉTRIE	POTENTIEL D'INTERACTION	FORCE DE VAN DER WAALS
Sphère - sphère 	$W(D) = \frac{-A^H R_1 R_2}{6D R_1 + R_2} \quad (3.11)$	$F = -\frac{A^H R_1 R_2}{6D^2 R_1 + R_2} \quad (3.12)$
Sphère - plan 	$W(D) = \frac{-A^H R}{6D} \quad (3.13)$	$F = \frac{-A^H R}{6D^2} \quad (3.14)$
Cylindres parallèles 	$W(D) = \frac{-A^H L}{12\sqrt{2}D^{3/2}} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/2} \quad (3.15)$	$F = \frac{-A^H L}{8\sqrt{2}D^{5/2}} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/2} \quad (3.16)$
Cylindres perpendiculaires 	$W(D) = \frac{-A^H \sqrt{R_1 R_2}}{6D} \quad (3.17)$	$F = \frac{-A^H \sqrt{R_1 R_2}}{6D^2} \quad (3.18)$
Plan - plan 	$\frac{W(D)}{S} = \frac{-A^H}{12\pi D^2} \quad (3.19)$	$\frac{F}{S} = \frac{-A^H}{6\pi D^3} \quad (3.20)$

**Tableau 3.1** : Potentiels d'interaction et forces de Van der Waals pour différentes géométries exprimés selon la constante de Hamaker  $A^H$ .

La force de Van der Waals étant dépendante de la distance entre chaque atome ou molécule des deux corps en présence, la disposition et la géométrie des surfaces sont déterminantes. La Fig. 3.3 illustre l'amplitude de la force de Van der Waals pour différentes configurations géométriques et selon la taille des objets (l'interaction d'un cylindre et d'un plan correspond à l'expression (3.16) avec  $R_1 = R_{cylindre}$  et  $R_2$  infiniment grand). La force est maximale pour l'interaction de deux surfaces planes et se réduit avec la courbure des surfaces. Selon les expressions du tableau (3.1), il est intéressant de noter que l'interaction entre deux cylindres perpendiculaires et de rayon identiques est similaire à celle d'une sphère et d'un plan.



**Figure 3.3 :** Force de van der Waals pour différentes configurations de contact entre un plan et : une sphère (rayon  $R$ ), un cylindre (rayon et longueur  $R$ ) et une surface plane (aire  $\pi R^2$ ) en fonction de  $R$  ( $A^H = 13.2 \cdot 10^{-20} J$ ). On admet que les objets sont idéalement lisses et parfaitement alignés.

Les lois de combinaisons présentées ci-dessous permettent d'estimer une constante de Hamaker inconnue sur la base d'autres constantes connues. La notation  $A_{132}$  correspond à la constante de Hamaker de l'interface des corps 1 et 2 dans un milieu 3, alors que  $A_{12}$  représente l'interface des corps 1 et 2 dans le vide. On peut ainsi écrire :

$$A_{132} \approx (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) \quad (3.21)$$

$$A_{132} \approx \sqrt{A_{131}A_{232}} \quad \text{et de même : } A_{12} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}} \quad (3.22)$$

Ces expressions s'appliquent pour tous les matériaux dont les forces de dispersion sont dominantes. Pour les matériaux fortement polaires tels que l'eau, seul le modèle de Lifshitz permet une évaluation théorique<sup>3</sup>.

La présence d'une couche adsorbée en surface d'un corps modifie la constante de Hamaker et donc l'énergie d'interaction. Selon [Israelachvili97], l'interaction sera dominée par les propriétés des corps eux-mêmes pour une large distance de séparation. Mais pour des distances inférieures à l'épaisseur de cette couche et donc notamment en situation de contact, ce sont les propriétés de la couche déposée qui influencent l'adhésion, justifiant ainsi l'utilisation de dépôts ou coatings afin de limiter les effets d'adhésion.

Les forces de Van der Waals provoquent un effet attractif avant contact. On parle alors d'une distance d'interaction qui peut atteindre  $\sim 100\text{nm}$  dans le cas des forces de Van der Waals. Dans le cas d'un contact entre deux corps, la notion d'énergie de surface  $\gamma$  des solides et liquides est plus souvent utilisée. L'énergie de surface correspond à la moitié de l'énergie d'adhésion  $\bar{W}$ , autrement dit à la moitié de l'énergie nécessaire à séparer deux surfaces planes d'une position de contact à une distance infinie.

3. [Israelachvili97] en a proposé une expression simplifiée sur la base des permittivités diélectriques et des indices de réfraction; pour les matériaux conducteurs, leur haute polarisation induit une constante de Hamaker d'un ordre de grandeur supérieur que pour les matériaux non-conducteurs :  $A^H \approx (3/(16\sqrt{2}))h\nu_e \approx 4 \cdot 10^{-19} J$  avec  $\nu_e \in (3-5) \cdot 10^{15} s^{-1}$ .

On peut dès lors l'exprimer par :

$$W = \frac{A^H}{12\pi D_0^2} = 2\gamma \quad (3.23)$$

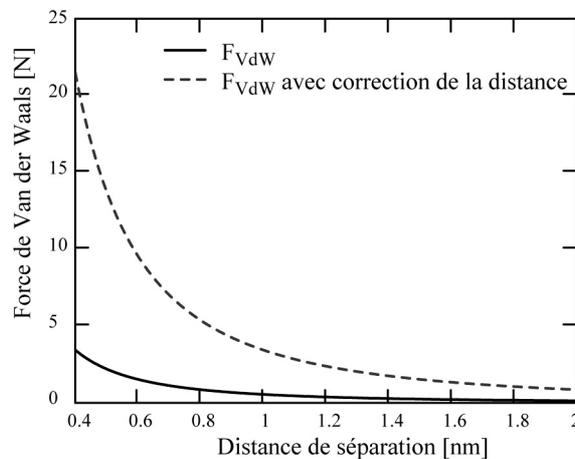
Ainsi la constante de Hamaker et l'énergie de surface sont liées par :

$$\gamma = \frac{A^H}{24\pi D_0^2} \quad (3.24)$$

Le paramètre  $D_0$  correspond à la distance d'interaction au contact et devrait donc a priori correspondre à la distance interatomique  $\sigma$ . Mais étant donné que les modèles utilisés pour évaluer les constantes de Hamaker sont basés sur une approche des milieux continus, les surfaces ont été simplifiées comme étant des surfaces parfaitement lisses sans même la structure due aux atomes. Ces expressions sont donc correctes pour des distances d'interaction plus grandes que les distances intermoléculaires, mais doivent être corrigées pour le cas du contact. Cette correction consiste à diviser  $D_0$  par un coefficient déterminé empiriquement et égal à 2.5. En général  $D_0$  est la valeur moyenne de la distance entre atome ( $\sigma = 0.4\text{nm}$ ), et vaut donc  $0.165\text{nm}$  après correction (Fig. 3.4). La relation entre la constante de Hamaker ( $A^H$ ) donnée en Joules et l'énergie de surface ( $\gamma$ ) exprimée en  $\text{mJ/m}^2$  devient donc :

$$A^H \approx 2.1 \cdot 10^{-21} \cdot \gamma \quad (3.25)$$

D'après [Israelachvili97], la relation (3.25) a montré une bonne corrélation entre les valeurs mesurées des constantes de Hamaker et d'énergie de surface, sauf à nouveau pour les liquides hautement polarisés. Elle sous-estime aussi l'adhésion entre les matériaux conducteurs car d'autres phénomènes issus des interactions à échange d'électrons, appelés liaisons métalliques, plus importants que les forces conventionnelles de Van der Waals apparaissent au contact. Les valeurs des énergies de surface pour les métaux, obtenues expérimentalement et tirées de la littérature, sont de l'ordre de  $400$  à  $4000 \text{mJ/m}^2$ .



**Figure 3.4 :** Evolution de la force de Van der Waals entre une sphère et un plan en fonction de la distance de séparation avec et sans la correction de distance ( $R = 25\mu\text{m}$ ,  $A^H = 13.2 \times 10^{-20} \text{J}$ ).

La force d'adhésion au contact entre deux sphères rigides et incompressibles peut être exprimée en fonction du travail d'adhésion entre deux plans, soit en combinant l'expression (3.23) et la force de Van der Waals dans le cas de deux sphères (3.12) :

$$F = 2\pi \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) W_{132} \quad (3.26)$$

Ce résultat découle de l'approximation de Derjaguin. Les expressions des forces pour les autres géométries simples présentées au tableau (3.1) peuvent être obtenues de même :

Sphère - plan : 
$$F = 2\pi R W_{132} \quad (3.27)$$

$$\text{Cylindres parallèles : } F = \frac{3\pi L}{2\sqrt{2D}} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/2} W_{132} \quad (3.28)$$

$$\text{Cylindres perpendiculaires : } F = 2\pi\sqrt{R_1 R_2} W_{132} \quad (3.29)$$

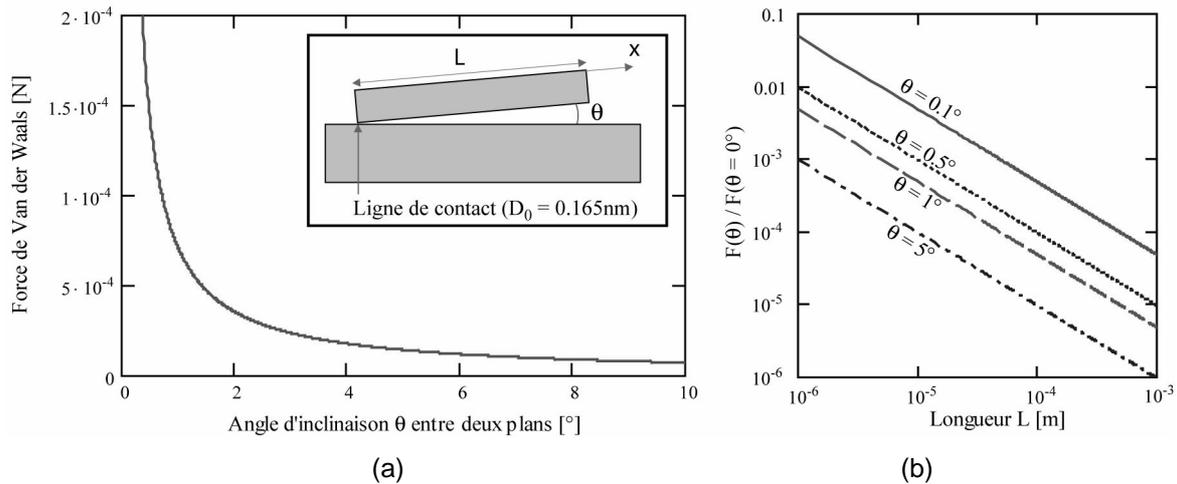
$$\text{Plan - plan : } \frac{F}{S} = \frac{2W_{132}}{D_0} \quad (3.30)$$

### 3.2.3 ORIENTATION DES SURFACES

Enfin, un dernier point concerne les défauts de parallélisme entre les surfaces. Il est en effet ardu d'obtenir à cette échelle des surfaces parfaitement alignées. En outre, comme le montre le graphique Fig. 3.5, la force de Van der Waals y est très sensible. En posant l'orientation de la surface 1 comme étant une fonction de la distance  $D$  ( $D(x) = D_0 + x \cdot \sin\theta$ ), la force de Van der Waals  $F^\theta$  entre ces deux plans (de longueur  $L$  et largeur  $B$ ) est alors obtenue par :

$$F^\theta = \iint_{00}^{LB} \frac{A^H}{6\pi(D_0 + x \sin\theta)^3} dy dx = \frac{A^H \cdot B \cdot L \cdot (2D_0 + L \sin\theta)}{12\pi(D_0 + L \sin\theta)^2 D_0^2} = F^{P-P} \frac{D_0(2D_0 + L \sin\theta)}{2(D_0 + L \sin\theta)^2} \quad (3.31)$$

où  $F^{P-P}$  représente la force de Van der Waals entre deux plans parallèles.



**Figure 3.5 :** Influence d'un défaut de parallélisme entre deux plans sur la force de Van der Waals : (a) pour une surface de  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  ( $A^H = 13.2 \times 10^{-20} \text{J}$ ); (b) atténuation de la force en fonction de la taille, pour différents angles ( $D_0 = 0.165 \text{nm}$ ).

### 3.2.4 INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ

Les forces de van der Waals sont dépendantes de la géométrie des surfaces en contact (tableau (3.1)). En réalité, les surfaces présentent une certaine rugosité en plus de leur géométrie. Cette rugosité a un effet considérable sur les forces de Van der Waals du fait que la surface réellement en contact diminue drastiquement (sauf bien sûr en cas de parfaite adéquation des profils où, au contraire, l'aire de contact augmente). Le profil exacte de rugosité d'une surface n'est en général pas connu et dans tous les cas il présente une ligne complexe qu'il n'est plus possible d'exprimer sous forme analytique.

[Fearing95] proposa de considérer la rugosité des surfaces en estimant que la force réelle correspond à environ 1% de la force théorique entre deux surfaces lisses. Plusieurs méthodes ont alors été proposées afin de tenir compte d'une rugosité  $R_a$  dans la détermination de la force de Van der Waals (Fig. 3.6) :

- La rugosité est réduite à une surface lisse mais placée à une distance  $D + (1/2)R_a$  où  $D$  est la distance de séparation et  $R_a$  la hauteur du plus haut pic [Arai95]. Ce modèle ne tient pas compte de la densité de la rugosité :

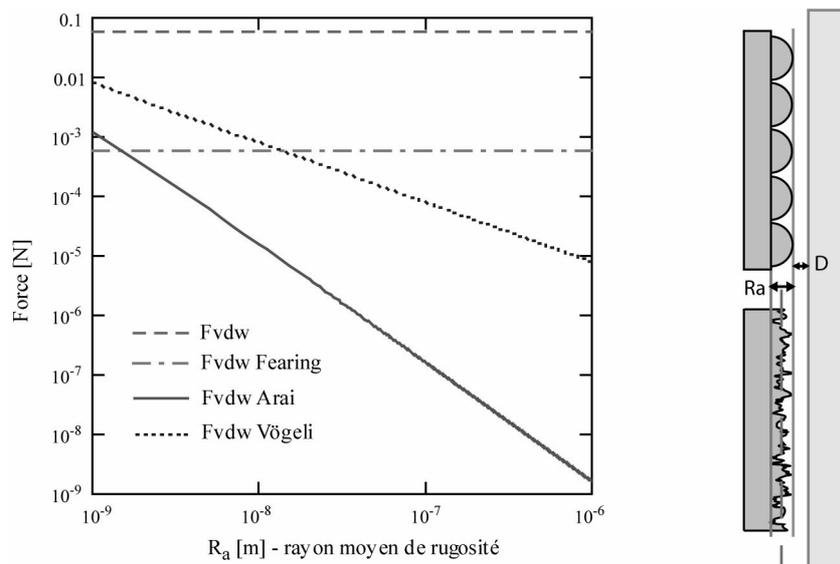
$$F_{vdw}^{R_a}(D) = \left( \frac{D}{D + R_a/2} \right)^2 F_{vdw}(D) \quad (3.32)$$

- La surface rugueuse peut être représentée comme une surface plane ( $S$ ) recouverte de demi-sphères de rayon  $R_a$  et de densité  $n$  [ $m^{-2}$ ] [Voegeli00]. La force devient ainsi la somme de la contribution de la surface plane à une distance  $(D+R_a)$  et des demi-sphères à une distance  $D$  :

$$F_{vdw}^{R_a}(D) = \frac{A^H \cdot S}{6\pi(R_a + D)^3} + \frac{A^H \cdot S \cdot n \cdot R_a}{6D^2} \quad (3.33)$$

Pour  $D \ll R_a$ , la partie de gauche, qui représente l'attraction de deux surfaces planes, peut être négligée.

- [Lambert04] propose des solutions d'intégration numérique, basées sur l'identité de Green ou la méthode de Gauss, permettant de traiter des géométries particulières de surfaces en contact et notamment la rugosité en discrétisant son profil. La force totale consiste alors en la sommation des contributions de chaque élément.
- Actuellement, la prise en compte des profils de rugosité est modélisée au moyen de fractales [Sausse-Lhermould07].



**Figure 3.6 :** Influence de la rugosité  $R_a$  sur la force de Van der Waals entre deux surfaces selon les modèles de Fearing, Arai et Vögeli, en comparaison de la force entre deux surfaces idéalement lisses en contact ( $D = 0.165\text{nm}$ ,  $A^H = 13.2 \cdot 10^{-20}\text{J}$ ,  $S = 10\mu\text{m}^2$ ).

### 3.2.5 RÉSUMÉ

Les forces de Van der Waals sont des forces induisant un effet attractif dit de longue portée ( $\sim 100\text{nm}$ ) résultant des phénomènes de polarisation instantanée au niveau des atomes ou molécules. Dans les cas de l'interaction de surfaces, les forces de Van der Waals dépendent des caractéristiques des matériaux et de leur milieu, représentées par la constante de Hamaker (par l'énergie de surface en situation de contact), ainsi que par la géométrie des surfaces et leur distance de séparation. Au contact, on remarque une importance considérable de la qualité des surfaces et de leur orientation. Une rugosité de  $100\text{nm}$  permet de diminuer la force de Van der Waals d'au moins deux ordres de grandeur, alors qu'une inclinaison de  $0.5^\circ$  pour une surface de  $20\mu\text{m}$  de côté engendre une atténuation d'un facteur  $2 \times 10^3$ . En comparaison, l'énergie de surface varie entre  $\sim 10 - 4000\text{mJ/m}^2$  selon les matériaux.

### 3.3 LA FORCE DE CAPILLARITÉ

La présence de liquide sur les surfaces induit la formation d'un ménisque entre les corps en contact. Ce ménisque fait apparaître une force de capillarité dotée de deux contributions :

- la force de tension qui relate la force exercée par le liquide sur la surface solide,
- la force de Laplace, découlant de la différence de pression à l'interface, qui détermine la courbure du ménisque.

La différence de pression à l'interface liquide/gaz est liée à la courbure du ménisque par l'équation de Laplace :

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} = \gamma \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_e} \right) = 2\gamma H \quad (3.34)$$

avec  $\gamma$  la tension de surface du liquide,  $r_i$  et  $r_e$  les rayons de courbure de l'interface et  $H$  la courbure moyenne du ménisque (Fig. 3.7(a)). La force de Laplace résulte de cette différence de pression agissant sur l'aire de l'interface objet/liquide, de telle sorte que :

$$F_L = \Delta p \cdot S = 2\gamma H \cdot \pi r_1^2 \quad (3.35)$$

La force de tension exprime la contrainte exercée par le liquide sur la surface solide. La force résultante dépend de la projection de la tension de surface  $\gamma$  sur l'axe vertical (axe de symétrie du ménisque) (Fig. 3.7(b)) et de la longueur de la ligne de contact (soit l'intersection des milieux liquide, solide et gazeux) :

$$F_T = 2\pi r_1 \cdot \gamma \sin(\theta_1 + \varphi) \quad (3.36)$$

avec  $r_1$  et  $\varphi$  décrivant la géométrie de la ligne de contact et  $\theta_1$  l'angle de contact décrivant les caractéristiques de l'interface entre les trois milieux liquide, solide et gazeux selon la relation de Young (3.5).

Finalement, la force de capillarité s'écrit :

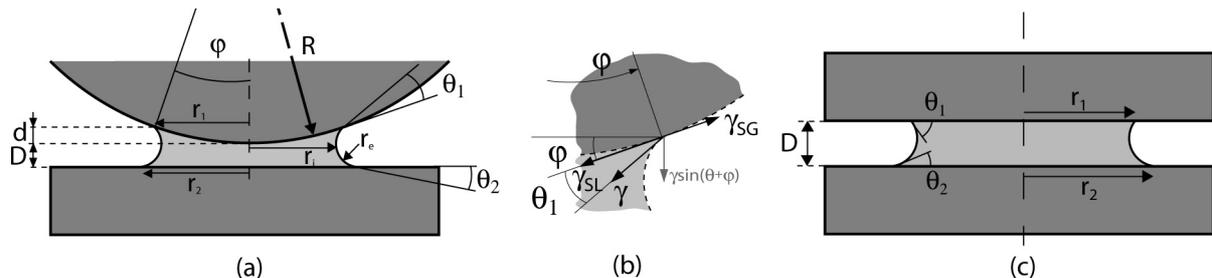
$$F_C = F_L - F_T = \gamma \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_e} \right) \pi r_1^2 - 2\pi\gamma r_1 \sin(\theta_1 + \varphi) \quad (3.37)$$

La force de tension est une composante purement attractive de la force de capillarité, alors que l'influence de la force de Laplace dépend de la différence de pression, donc de la forme du ménisque. Un ménisque concave induira une composante attractive ( $\Delta p < 0$ ,  $r_e < 0$ ), alors qu'un ménisque convexe aura un effet répulsif ( $\Delta p > 0$ ,  $r_e > 0$ ).

Une formulation énergétique permet aussi de représenter la force de capillarité. Elle consiste à dériver l'énergie interfaciale  $W$  totale selon la distance de séparation des deux surfaces :

$$F = - \frac{dW}{dD} \quad \text{avec} \quad W = W_{SL} + W_{SG} + W_{LG} = \gamma_{SL} S_{SL} + \gamma_{SG} S_{SG} + \gamma S_{LG} \quad (3.38)$$

avec  $W_{SL}$ ,  $W_{SG}$  et  $W_{LG}$  les énergies interfaciales des différentes interfaces,  $\gamma_{SL}$  et  $\gamma_{SG}$  les énergies de surface aux interfaces solide-liquide et solide-gazeux,  $\gamma$  la tension de surface du liquide et  $S_{SL}$ ,  $S_{SG}$  et  $S_{LG}$  les surfaces correspondantes.



**Figure 3.7 :** Ménisques modélisés dans les cas d'interaction (a) sphère/plan et (c) plan/plan; (b) détail des énergies de surface à la ligne de contact.

De même que les forces de Van der Waals, la force de capillarité dépend de la géométrie des surfaces en contact. Sous l'hypothèse de petits ménisques, c'est-à-dire pour des objets beaucoup plus grands que la hauteur d'immersion ( $R \gg d$ ), les forces de capillarité pour les géométries simples plan-plan et sphère-plan sont présentées ci-dessous. Les paramètres géométriques utilisés dans ces expressions sont illustrés à la Fig. 3.7. Cette restriction aux petits ménisques est en fait une situation courante en micromanipulation, notamment lors de la présence d'eau sur les surfaces en raison de condensation capillaire (§ 3.3.1).

Dans le cas d'une interaction entre un plan et une pointe sphérique de rayon  $R$  (Fig. 3.7(a)), la force de capillarité s'exprime par [Israelachvili97]:

$$F(D) = \frac{2\pi R\gamma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}{1 + D/d} \quad (3.39)$$

Elle atteint son maximum au contact. Pour deux surfaces de matériaux identiques ( $\theta = \theta_1 = \theta_2$ ), on trouve ainsi l'expression très connue de la force de capillarité :

$$F = 4\pi R\gamma\cos\theta \quad (3.40)$$

et pour deux surfaces parfaitement hydrophiles ( $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ), la force est maximale et vaut  $F = 4\pi R\gamma$ .

Si un film continu et homogène recouvre la surface ( $\theta_2 = 0$ ), la force entre une sphère et cette surface s'exprime par :

$$F = 2\pi R\gamma(1 + \cos\theta_1) \quad (3.41)$$

Pour une interaction entre deux plans avec une distance de séparation  $D$  inférieure aux rayons du ménisque ( $r_1$  et  $r_2$ ) (Fig. 3.7(c)), l'expression de la force de capillarité s'écrit [Lambert04]:

$$F(D) = \frac{\pi\gamma}{D}(r_1^2\cos\theta_1 + r_2^2\cos\theta_2) \quad (3.42)$$

Dans le cas de surfaces de matériaux identiques ( $\theta = \theta_1 = \theta_2$ ), cette expression (3.42) devient :

$$F(D) = \frac{2\pi\gamma}{D}r_1^2\cos\theta \quad (3.43)$$

### 3.3.1 CONDENSATION CAPILLAIRE

Les conditions d'humidité relative commandent le phénomène de condensation capillaire. Il apparaît ainsi une condensation spontanée de la vapeur dans les interstices, fissures et rugosité des surfaces. A l'équilibre, le rayon de courbure du ménisque dépend de l'humidité relative ( $p/p_{sat}$ ) selon l'équation de Kelvin :

$$\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_e}\right)^{-1} = r_k = \frac{\gamma V}{RT\ln\left(\frac{p}{p_s}\right)} \quad (3.44)$$

avec  $r_k$  le rayon de Kelvin,  $V$  le volume molaire,  $T$  la température,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $\gamma$  la tension de surface du liquide (pour l'eau à 20°C,  $\gamma V/RT$  vaut 0.54nm). Pour différentes conditions d'humidité relative, soit pour 10%, 40% et 90%, le rayon de Kelvin correspond à 0.25nm, 0.6nm et 5nm respectivement.

### 3.3.2 INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ

Le comportement d'un ménisque dépend fortement de la qualité de la surface solide et notamment de sa rugosité. Des matériaux dits super-hydrophobes sont conçus en modifiant la texture de la surface. Des surfaces munies de textures de type fractale ont notamment permis d'obtenir des angles de contact de 174° [Shibuichi96].

Une surface rugueuse présente une surface réelle ( $S_{SL}$ ) beaucoup plus importante que la surface apparente ( $S_{apparent}$ ). On peut alors définir le paramètre  $\delta_{Ra}$  comme le rapport de ces deux surfaces :

$$\delta_{Ra} = \frac{S_{SL}}{S_{apparent}} \quad (3.45)$$

Une surface lisse induira  $\delta_{Ra} = 1$  et pour toute rugosité l'expression (3.45) conduira donc à  $\delta_{Ra} > 1$ . Le lien entre les angles de contact d'une surface rugueuse ( $\theta_{Ra}$ ) et d'une surface lisse ( $\theta$ ) peut être exprimé par la relation de Wenzel [Wenzel36] :

$$\cos \theta_{Ra} = \delta_{Ra} \cos \theta \quad (3.46)$$

Ainsi une surface hydrophile ( $\theta < 90^\circ$ ) sera d'autant plus hydrophile ( $\theta_{Ra} < \theta$ ) avec l'augmentation de la rugosité, alors que pour un angle  $\theta > 90^\circ$  l'effet hydrophobe sera renforcé ( $\theta_{Ra} > \theta$ ). La rugosité a donc comme propriété de renforcer autant l'effet hydrophile qu'hydrophobe.

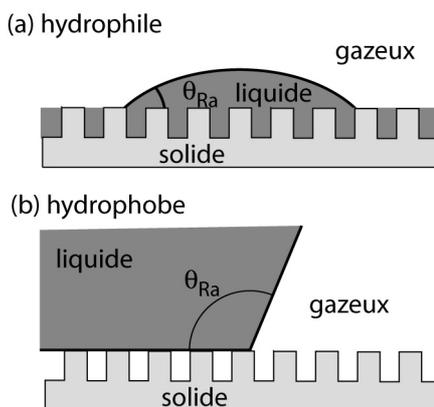
Dans le cas d'impuretés présentes sur une surface ou pour une surface hétérogène contenant deux matériaux, l'angle de contact réel dépendra des angles de contact  $\theta_1$  et  $\theta_2$  des deux matériaux ainsi que des rapports des surfaces  $f_1$  et  $f_2$  sachant que  $f_2 = 1 - f_1$ . L'angle de contact réel correspond à une moyenne pondérée du cosinus des angles de contact  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , et se trouve donc dans l'intervalle  $[\theta_1, \theta_2]$  :

$$\cos \theta_c = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad (3.47)$$

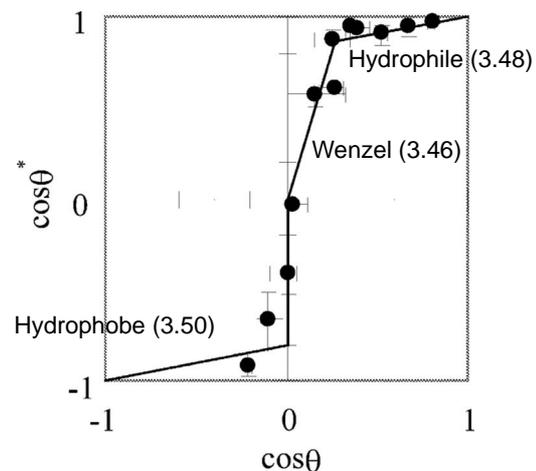
Le modèle de Wenzel donne une bonne indication de l'influence de la rugosité sur la mouillabilité, mais il n'est en réalité pas possible de rendre un matériau totalement hydrophobe ou hydrophile par ce biais-là. Une démarche plus complète a été proposée par [Bico02] qui différencie le cas des matériaux hydrophiles et hydrophobes. Dans le cas hydrophile, le liquide peut s'introduire dans les pores du substrat et finalement une goutte d'eau se comportera comme si elle se trouvait sur un substrat mouillé (Fig. 3.8(a)). Par la relation (3.47), et en considérant ce substrat mouillé comme une surface hétérogène composée de phases solides et liquides, l'angle de contact réel s'exprime par :

$$\cos \theta_{Ra} = 1 - f_s + f_s \cos \theta \quad (3.48)$$

avec  $f_s$  la proportion de solide émergé (phase solide) par opposition à la surface immergée (phase liquide) de la zone rugueuse ( $= 1 - f_s$ ).



**Figure 3.8 :** (a) Surface hydrophile rugueuse : le liquide s'infiltre dans les pores, la goutte repose alors sur un film liquide. (b) Surface hydrophobe rugueuse : le gaz reste piégé dans les pores.



**Figure 3.9 :** Angle de contact d'une surface rugueuse ( $\theta^*$ ) par rapport à celui d'une surface lisse du même matériau ( $\theta$ ) [Bico02, Shibuichi96] : la variation de l'angle est obtenue par l'utilisation de différents liquides (o), modèle théorique (ligne continue).

Cette expression n'est valable que si le liquide imprègne la texture, condition qui se vérifie pour :

$$\cos \theta > \frac{1 - f_s}{\delta_{Ra} - f_s} = \cos \theta_c \quad (3.49)$$

Pour  $\theta > \theta_c$  la relation de Wenzel (3.46) reste valable.

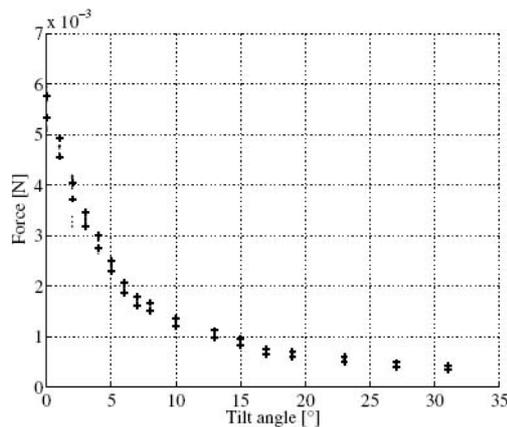
Dans le cas de matériaux hydrophobes rugueux, la goutte de liquide ne s'imprègne pas nécessairement dans les pores de la rugosité et de l'air peut y rester piégé (Fig. 3.8(b)). La surface est à nouveau considérée comme hétérogène et la relation (3.47) permet d'obtenir l'angle de contact réel :

$$\cos \theta_{Ra} = -1 + f_s (\cos \theta + 1) \quad (3.50)$$

Ces expressions sont représentées à la Fig. 3.8 qui relate les relations entre le cosinus de l'angle de contact d'une surface rugueuse et celui d'une surface lisse du même matériau. Les résultats expérimentaux présentés par [Shibuichi96] sont basés sur l'utilisation d'une cire (*alkylketen dimer AKD*) formant spontanément une structure fractale en surface lors de sa solidification.

### 3.3.3 ORIENTATION DES SURFACES

La force de capillarité décroît très rapidement avec un défaut de parallélisme entre deux surfaces planes. Un angle de  $10^\circ$  permet de diminuer la force d'un facteur 5 [Lambert04] (Fig. 3.10). Le comportement est ainsi similaire à celui des forces de Van der Waals (Fig. 3.5) dans la même situation.



**Figure 3.10 :** Influence de l'orientation de deux surfaces planes sur la force de capillarité, mesurée par [Lambert04] pour un cylindre normal à un objet plan en acier.

### 3.3.4 RÉSUMÉ

Les expressions de la force de capillarité décrites ici sont valables pour de petits ménisques en comparaison de la taille des objets. Elles permettent en l'occurrence de décrire le comportement des effets d'adhésion en présence d'une couche d'eau adsorbée sur les surfaces selon l'humidité relative. De même que les effets de Van der Waals, la force de capillarité est dépendante de la géométrie des surfaces en contact. Dans le cas de la rugosité par contre, l'effet n'est pas unilatérale, mais renforce autant les caractéristiques hydrophobes qu'hydrophiles. Suivant les matériaux en présence, la rugosité pourra donc induire ou une diminution ou un accroissement de la force de capillarité.

### 3.4 LES FORCES ÉLECTROSTATIQUES

Les forces électrostatiques apparaissent dans diverses situations entre des particules chargées, ou après le transfert ou la génération de charges lors d'un contact. A l'échelle microscopique, la connaissance des charges présentes et surtout leur répartition dans les micro-objets ne sont pas prédictibles d'autant que les phénomènes d'électrification de contact ne peuvent plus être négligés : les matériaux isolants peuvent ainsi présenter des variations de charges très importantes en surface, alors que les matériaux conducteurs sont souvent couverts d'une couche d'oxyde natif. Ainsi, bien que les effets électrostatiques peuvent être minimisés par des traitements de surface tels des dépôts conducteurs et par une mise à terre, il n'est pas possible d'assurer qu'une surface soit électriquement neutre en tout temps.

Les forces électrostatiques, exprimées par les interactions de Coulomb, sont présentées ci-dessous pour certaines configurations générales. Quelques éléments de triboélectrification sont ensuite exposés.

#### 3.4.1 INTERACTIONS DE COULOMB

Les forces électrostatiques sont le résultat de l'interaction entre des particules chargées et s'expriment suivant la loi de Coulomb, selon laquelle la force  $\vec{F}_{12}$  générée par une charge  $q_1$  sur une charge  $q_2$  est :

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (3.51)$$

avec  $r_{12}$  la distance entre les charges,  $\vec{e}_{12}$  le vecteur unitaire dans la direction de  $q_1$  vers  $q_2$  et  $\epsilon_0$  la perméabilité du vide ( $8.8542 \times 10^{-12} \text{As/Vm}$ ).

Par opposition au champ gravitationnel, nous pouvons alors introduire la notion de champ électrique  $\vec{E}$  et ainsi exprimer la force sous la forme  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Dans le cas d'une charge ponctuelle, le champ électrique est de la forme :

$$\vec{E}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_{12}^2} \vec{e}_{12} \quad (3.52)$$

Les forces résultant de différentes configurations d'interaction sont explicitées ci-dessous.

##### 3.4.1.1 Interaction entre deux corps chargés

De même qu'entre deux particules, la force d'interaction<sup>4</sup> entre deux corps de charges  $Q_1$  et  $Q_2$  s'exprime par :

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d^2} \quad (3.53)$$

avec  $d$  la distance de séparation,  $\epsilon$  la constante diélectrique du milieu et  $\epsilon_0$  la perméabilité du vide. Dans le cas de corps sphériques pourvus d'une densité de charge homogène, le théorème de Gauss permet de considérer la charge comme concentrée au centre de la sphère et  $d$  représente alors la distance entre le centre des sphères et non plus entre leurs surfaces.

##### 3.4.1.2 Interaction entre une particule chargée et une surface chargée

Une surface plane chargée de manière homogène présente une densité de charge  $\sigma$  (= charge / surface) et engendre un champ électrique  $E$  :

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (3.54)$$

4. On considère à nouveau par convention qu'une force négative dénote d'une interaction attractive. Dans le cas de charges de signe identique, l'effet est répulsif et donc la force positive.

En interaction avec une particule chargée, la loi de Coulomb s'applique à nouveau et la force d'interaction devient :

$$F = QE = \frac{Q\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (3.55)$$

### 3.4.1.3 Interaction entre deux surfaces chargées

L'interaction entre deux surfaces planes de densités de charges homogènes valant respectivement  $\sigma$  et  $-\sigma$  induit une pression électrostatique  $P$  :

$$P = \sigma E = \frac{\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (3.56)$$

Il est intéressant de noter que dans le cas d'une surface plane chargée de manière homogène, la force électrostatique est indépendante de la distance de séparation. Cette dernière intervient par contre dans le cas où la répartition des charges n'est pas uniforme.

### 3.4.1.4 Interaction entre une particule chargée et une surface non chargée

La force d'interaction entre une particule chargée ( $q$ ) et une surface non chargée s'obtient par la méthode de la particule image : on considère que la particule ressent une force similaire à celle engendrée par une particule de charge  $-q(\epsilon_s - \epsilon)/(\epsilon_s + \epsilon)$  située de l'autre côté de la surface non chargée mais à distance égale. La force électrostatique s'exprime alors par :

$$F = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon\epsilon_0 d^2} \left( \frac{\epsilon_s - \epsilon}{\epsilon_s + \epsilon} \right) \quad (3.57)$$

où  $\epsilon$  est la constante diélectrique du milieu et  $\epsilon_s$  celle de la surface non chargée. L'effet est donc attractif pour  $\epsilon_s > \epsilon$  et répulsif pour  $\epsilon_s < \epsilon$ . Si  $\epsilon_s \gg \epsilon$ , la force électrostatique devient :

$$F = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon\epsilon_0 d^2} \quad (3.58)$$

## 3.4.2 TRIBOÉLECTRIFICATION

Selon le potentiel et la nature des corps en présence, un transfert de charges ou une génération de charges électriques peut avoir lieu lors du contact. On parle alors d'électrification au contact ou de triboélectrification. Dans le cas notamment où la surface est conductrice, un transfert de charge se produit au contact afin d'égaliser le potentiel électrique. Ce phénomène tend à diminuer l'effet d'adhésion. Les éléments de triboélectrification présentés ci-dessous sont tirés de [Lowell80].

### 3.4.2.1 Contact conducteur - conducteur

Dans le cas du contact de deux matériaux conducteurs, un transfert d'électrons se produit visant à égaliser les potentiels électriques et électrochimiques de chaque matériau. Le potentiel de contact  $V_C$  s'exprime par :

$$V_C = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e} \quad (3.59)$$

où  $\phi_1, \phi_2$  sont les fonctions de travail, soit l'énergie nécessaire à extraire un électron libre de chaque matériau, exprimées en [eV] et où  $e$  est la charge élémentaire ( $1.6022 \times 10^{-19}$  C). La charge de chaque matériau après séparation peut ensuite être approchée par :

$$Q = C_0 V_C = \frac{\epsilon_0 S}{d_0} V_C \quad (3.60)$$

avec  $C_0$  la capacité à la distance  $d_0$ ,  $S$  la surface de contact,  $d_0$  la distance de séparation à partir de laquelle il n'y a plus de transfert de charge. Pour des surfaces parfaitement lisses,  $d_0$  vaut 1nm. Une

meilleure estimation correspond à la moyenne des rugosités des deux surfaces. La charge  $Q$  est généralement de l'ordre de  $Q \approx 10^{-13} C$ .

Dans le cas où l'un des corps présente une charge préalable ( $Q_0$ ), la charge finale après séparation correspond à la somme de la charge initiale et de la charge transférée. De plus, la charge initiale intervient dans l'évaluation de la fonction de travail  $\phi_i$ , et donc de la charge transférée, sous la forme :

$$\phi_i(Q_0) = \phi_i + e \cdot V_S \text{ avec } V_S \text{ le potentiel de surface}^5 \text{ généré par la charge } Q_0. \quad (3.61)$$

### 3.4.2.2 Contact conducteur - isolant

Il s'agit là aussi d'un transfert d'électrons, mais l'évaluation de la charge acquise diffère du fait que, au niveau de l'isolant, la charge se concentre sur une zone d'accumulation contrairement aux matériaux conducteurs où toute la surface est concernée. La densité surfacique de charges peut être évaluée en fonction des densités de sites accepteurs et donneurs et du potentiel de contact  $V_C$  :

$$\begin{cases} \sigma = -(2\varepsilon\varepsilon_0 n_A e V_C)^{1/2} & V_C \geq 0 \\ \sigma = -(2\varepsilon\varepsilon_0 (n_D - n_A) e V_C)^{1/2} & V_C \leq 0 \end{cases} \quad (3.62)$$

Les densités de sites accepteurs  $n_A$  et donneurs  $n_D$  dépendent du nombre d'électrons occupant les niveaux d'énergie d'ionisation et d'affinité électronique rapportés au volume du matériau. Le potentiel de contact s'obtient par l'expression (3.59) avec  $\phi_1 = \phi_{conducteur}$  et  $\phi_2 = \phi_{isolant}$ .

La charge acquise par chaque surface correspond à  $Q = \sigma \cdot S$  avec  $S$  la surface de contact. La densité de charge surfacique  $\sigma$  est généralement comprise entre  $10^{-5} \text{ Cm}^{-2}$  et  $10^{-3} \text{ Cm}^{-2}$ .

### 3.4.2.3 Contact isolant - isolant

Au contact de deux matériaux isolants apparaît un transfert non pas d'électrons, mais d'ions. La densité surfacique de charge  $\sigma$  peut être évaluée par l'expression suivante :

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \Delta U}{ed} \quad (3.63)$$

où  $\Delta U = U_2 - U_1$  représente la différence des énergies potentielles des ions de chaque surface. Elle est déterminée en fonction des densités de ions  $n_1$  et  $n_2$  données pour chaque surface selon :

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(\frac{-\Delta U}{k_B T}\right) \quad (3.64)$$

avec  $k_B$  la constante de Boltzmann ( $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) et  $T$  la température.  $\Delta U$  est généralement très proche de 1eV. Finalement, cette interaction induit une densité de charge de l'ordre de  $10^{-5}$  à  $10^{-3} \text{ C/m}^2$ .

## 3.4.3 RÉSUMÉ

La prise en compte des effets électrostatiques lors d'opérations de micromanipulation est confrontée à la difficulté de prédire la présence, l'amplitude et la localisation des charges sur les surfaces concernées. Le comportement des charges, et des forces générées, est par contre très différent selon les propriétés électriques des matériaux en présence.

En admettant une charge de  $10^{-13} \text{ C}$  générée par le contact de deux sphères conductrices de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  puis distancées de 100nm, la force électrostatique suivant l'expression (3.53) vaut  $\sim 35 \text{ nN}$ . Dans le cas de deux sphères isolantes de densité de charges de  $10^{-3} \text{ C/m}^2$  dans la même situation et en admettant un rayon au contact de  $0.7 \mu\text{m}$  (§ 3.5.2), la force est de  $\sim 2 \mu\text{N}$ .

5. Pour un corps sphérique, la charge  $Q_0$  est au centre de la sphère et le potentiel de surface s'exprime par  $V_S = E \cdot R = Q_0 / (4\pi\varepsilon_{mat}\varepsilon_0 R)$

Les différents modèles exposés ci-dessus permettent de motiver la préférence de l'utilisation de matériaux conducteurs. Les charges  $y$  sont réparties de manière homogène, ce qui permet d'assimiler leur distribution à une concentration au centre de l'objet. La distance de séparation entre les charges est alors augmentée du rayon de l'objet, diminuant ainsi explicitement la force de Coulomb. D'autre part, au contact, le transfert d'électrons a pour but d'égaliser les potentiels de chaque surface et diminue ainsi la force d'adhésion. Il est donc préférable d'utiliser des matériaux conducteurs ou du moins d'appliquer des couches conductrices sur les surfaces de contact et d'installer une mise à terre de ces éléments afin d'évacuer les charges.

La présence de matériaux isolants, voire d'une couche d'oxyde en surface, présente le gros inconvénient de l'accumulation des charges aux points de contact. La distribution des charges en surface n'est donc plus du tout homogène et de grandes variations des effets électrostatiques apparaissent. Les effets de triboélectrification sont de plus suffisamment importants à cette échelle pour induire des forces électrostatiques supérieures à la gravité, voire même de l'ordre des autres forces d'adhésion.

### 3.5 FORCE ET DÉFORMATION AU CONTACT

En réalité, les objets ne sont pas infiniment rigides et de ce fait, au contact, se déforment localement sous l'effet d'une charge externe, mais aussi sous l'action des forces d'adhésion. Différents modèles permettent de décrire la déformation au contact entre une sphère de rayon  $R$  et une surface plane. Ils expriment notamment le rayon de l'aire de contact  $a$  et la profondeur de l'écrasement  $\delta$ . Les caractéristiques de cette interface vont permettre d'exprimer la force nécessaire à séparer les deux objets en contact, appelée *force de pull-off*. Ces modèles sont décrits ci-dessous.

#### 3.5.1 THÉORIE DE HERTZ

Le modèle de Hertz considère un contact élastique sans effet d'adhésion. La distribution de pression est nulle en dehors de l'aire de contact et la pression a une valeur finie en tout point de l'interface. Le rayon  $a$  de la déformation entre une sphère de rayon  $R$  et une surface plane sous l'effet d'une force normale  $F$  est donné par :

$$a^3 = \frac{RF}{K} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (3.65)$$

avec  $K$  le module d'élasticité effectif pour le couple de matériaux,  $\nu_1$  et  $\nu_2$  les coefficients de Poisson,  $E_1$  et  $E_2$  les modules d'élasticité caractérisant respectivement la sphère et la surface plane. La profondeur de l'écrasement  $\delta$  vaut :

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (3.66)$$

La force normale nécessaire à un tel écrasement s'exprime donc par :  $F = KR^{1/2}\delta^{3/2}$ . On peut alors déterminer la rigidité normale  $k_N$  du contact :

$$k_N = \frac{\partial F}{\partial \delta} = \frac{3}{2}K \cdot a \quad (3.67)$$

Ce modèle convient pour des matériaux très rigides où les déformations élastiques sont donc faibles. Il est aussi valable dans le cas de charges beaucoup plus importantes que l'adhésion.

#### 3.5.2 THÉORIE JKR

Le modèle développé par Johnson, Kendall et Roberts (JKR) [Johnson71] prend en compte les effets d'adhésion à l'intérieur de l'aire de contact. Le rayon  $a$  de la déformation est alors plus important que dans le modèle de Hertz. Les paramètres de l'interface s'écrivent :

$$a^3 = \frac{R}{K} \left[ F + 3\pi RW + \sqrt{6\pi RWF + (3\pi RW)^2} \right] \quad (3.68)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi W a}{3K}} \quad (3.69)$$

avec  $F$  la force normale externe,  $R$  le rayon de la sphère,  $K$  le module d'élasticité effectif et  $W$  l'énergie d'adhésion. Pour une adhésion nulle, on retrouve bien la formulation du modèle de Hertz. A charge nulle ( $F = 0$ ), on obtient par contre une déformation qui dépend seulement de l'adhésion :

$$a_0^3 = \frac{6\pi R^2 W}{K} \quad (3.70)$$

La séparation des deux objets nécessite donc l'application d'une certaine force, appelée force de pull-off  $F^P$  :

$$F^P = \frac{3}{2}\pi R W \quad (3.71)$$

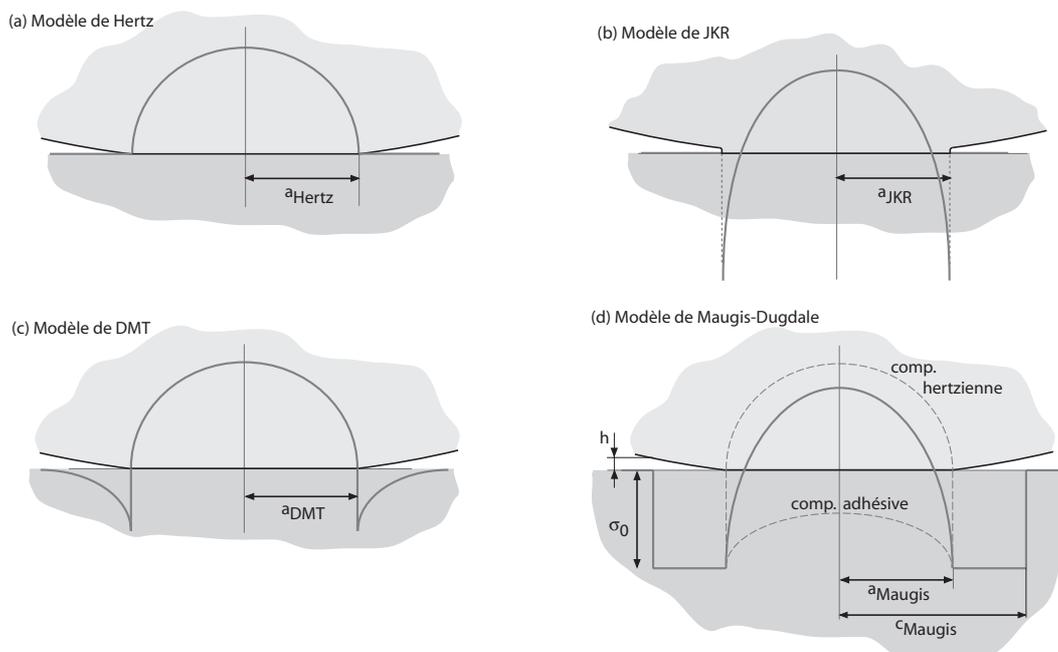
Il est intéressant de noter que cette force dépend de l'énergie d'adhésion  $W$  et du rayon  $R$  de la sphère, mais est indépendante du module d'élasticité  $E$  des surfaces en contact.

Au moment de la séparation, donc lorsque l'on applique la force de pull-off, la déformation, et de même la profondeur d'écrasement, ne sont pas nulles mais valent :

$$a_s = \left( \frac{3\pi R^2 W}{2K} \right)^{1/3} = 0.63a_0 \quad (3.72)$$

$$\delta_s = -\frac{a_s^2}{3R} = -\left( \frac{\pi^2 R W^2}{12K^2} \right)^{1/3} \quad (3.73)$$

Ce modèle s'applique bien pour les fortes énergies d'adhésion, pour les matériaux souples, ainsi que pour les grands rayons de courbure. Les faibles rayons de courbure sont très sensibles aux forces d'adhésion agissant en dehors de l'aire de contact, alors que cet effet est négligé dans la théorie de JKR. Ce modèle sous-estime par contre la charge à l'intérieur de la surface de contact et propose une contrainte infinie au bord du contact, ce qui est physiquement inacceptable.



**Figure 3.11** : représentation des distributions de pression au contact selon les modèles de Hertz, JKR, DMT et Maugis-Dugdale.

### 3.5.3 THÉORIE DMT

Derjaguin, Muller et Toporov [Derjaguin75] ont alors proposé un modèle qui suppose un profil hertzien de la déformation, mais qui prend en compte les forces d'adhésion dans et hors de la zone de contact. Le rayon au contact s'exprime alors par :

$$a^3 = \frac{R}{K}(F + 2\pi RW) \quad (3.74)$$

A charge nulle ( $F = 0$ ), le rayon au contact devient :

$$a_0^3 = \frac{2\pi R^2 W}{K} \quad (3.75)$$

Ce modèle prévoit aussi une force de pull-off<sup>6</sup> :

$$F^P = 2\pi RW \quad (3.76)$$

Contrairement au modèle de JKR, la sphère quitte la surface au moment où la déformation s'annule. La profondeur d'écrasement s'exprime donc bien comme un profil hertzien :

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{(F + 2\pi RW)^{2/3}}{R^{1/3} K^{2/3}} \quad (3.77)$$

Et il en va de même pour la rigidité au contact :  $k_N = (3/2)K \cdot a$

Ces expressions conviennent surtout dans le cas de faibles forces d'adhésion ainsi que pour de faibles rayons de courbure. Ce modèle sous-estime par contre la valeur du rayon de contact en supposant que l'adhésion ne peut modifier la géométrie du contact.

### 3.5.4 MODÉLISATION DE MAUGIS-DUGDALE

[Maugis92] a étudié analytiquement la transition entre les modèles DMT et JKR qui représentent en fait des cas limites. Son modèle considère que la force de capillarité est la force attractive majeure aux conditions ambiantes. Cette force attractive, calculée par l'approximation de Dugdale, s'étend sur une zone supérieure à la zone de contact et de manière constante (Fig. 3.11(d)). Il en découle que la distribution de pression est constituée par une composante hertzienne et une composante adhésive.

L'utilisation des modèles DMT, JKR ou Maugis-Dugdale est déterminée par le paramètre d'élasticité ou paramètre de transition  $\lambda$  :

$$\lambda = 2\sigma_0 \left( \frac{R}{\pi WK^2} \right)^{1/3} \quad \text{avec } \sigma_0 = \frac{W}{h_0} \quad \text{et } h_0 \approx 0.165 \text{ nm} \quad (3.78)$$

avec  $\sigma_0$  le seuil de contrainte qui correspond à la valeur minimum du potentiel de Lennard-Jones à la distance de séparation d'équilibre, et est considéré comme la composante adhésive dans l'approximation de Dugdale.

Pour  $\lambda > 5$ , le modèle de JKR s'applique, alors que pour  $\lambda < 0.1$  c'est le modèle de DMT qu'il convient d'utiliser. Dans la zone de transition, l'interface est modélisée par la théorie de Maugis-Dugdale. Ainsi la force de pull-off se trouve bornée selon :

$$\frac{3}{2}\pi WR \leq F^P \leq 2\pi WR \quad (3.79)$$

La représentation de Maugis est basée sur la résolution d'un système de trois équations à trois inconnues. Elle donne une solution analytique, mais elle est peu pratique à utiliser du fait de la complexité de la résolution<sup>7</sup>. Carpick, Ogletree et Salmeron [Carpick99] proposent une formulation généralisée don-

6. On retrouve ici l'expression découlant de l'approximation de Derjaguin pour le cas d'une sphère rigide sur un plan (3.27).

nant une calcul analytique de la surface de contact et de la force de pull-off sur la base d'équations empiriques. La force de pull-off et le rayon de l'aire de contact correspondent alors à :

$$F^P = -\frac{1}{4} \left( 7 - \left( \frac{4.04\lambda^{1/4} - 1}{4.04\lambda^{1/4} + 1} \right) \right) \pi WR \quad (3.80)$$

$$\frac{a}{a_0} = \left( \frac{\alpha + \sqrt{1 + F/F^P}}{1 + \alpha} \right)^{2/3} \quad (3.81)$$

$$\text{avec } a_0 = \left( 1.54 + 0.279 \frac{2.28\lambda^{1/3} - 1}{2.28\lambda^{1/3} + 1} \right) \left( \frac{\pi WR^2}{K} \right)^{1/3} \quad \text{et } \lambda = -0.924 \ln(1 - 1.02\alpha) \quad (3.82)$$

où  $a_0$  est le rayon de contact sous charge nulle.  $\alpha$  est un paramètre d'ajustement sans dimension, tel que  $\alpha = 0$  correspond au modèle DMT et  $\alpha = 1$  au modèle JKR, et qui s'obtient par les relations (3.78) et (3.82).

## 3.6 COMPORTEMENT SOUS UN EFFORT LATÉRAL

### 3.6.1 RÉSISTANCE AU GLISSEMENT

Dans le domaine macroscopique, la force de frottement  $F_f$  s'opposant au glissement s'exprime indépendamment de la surface de contact par :

$$F_f = \mu F_N \quad (3.83)$$

avec  $\mu$  le coefficient de frottement et  $F_N$  la charge normale appliquée.

A l'échelle microscopique il convient de considérer deux configurations, soit les contacts mono-aspérité et multi-aspérités. Le contact mono-aspérité considère que les surfaces en contact sont lisses et ainsi qu'une charge croissante induit le grossissement du contact existant et non pas la formation de nouveaux contacts à l'intérieur de la surface apparente. Dans ce cas, la force de frottement est proportionnelle à la surface (de rayon  $a$ ) et à la contrainte de cisaillement  $\tau$  de telle sorte que :

$$F_f = \tau \pi a^2 \quad (3.84)$$

Dans le cas de déformations élastiques, donc sous l'application de faibles charges, le rayon de l'aire de contact s'exprime alors par les modèles JKR, DMT ou de Maugis :

$$F_f = \tau \pi \left( \frac{R}{K} \right)^{2/3} \left( \sqrt{F_{adh} + F_N} + \sqrt{F_{adh}} \right)^{4/3} : \text{ pour le modèle JKR} \quad (3.85)$$

$$F_f = \tau \pi \left( \frac{R}{K} (F_N + F_{adh}) \right)^{2/3} : \text{ pour le modèle DMT} \quad (3.86)$$

La force de frottement évolue alors selon une loi de puissance 2/3 de la force appliquée à l'interface. Cette relation a effectivement été observée, notamment par [Riedo04], dans le contexte de mesures de friction par AFM pour lesquelles de faibles charges (~15nN) étaient appliquées sur des pointes de petit rayon (~25nm) pouvant être assimilées à un contact mono-aspérité. Cependant, d'autres mesures du même type, mais sous des charges plus importantes, ont fait état d'une relation linéaire entre la force de frottement et la charge appliquée. Celle-ci peut être expliquée par un régime plastique de la déformation ou d'une contrainte de cisaillement variant avec la pression de contact [Pietrement00].

7. Ces équations ne sont pas représentées ici, le lecteur pourra se référer à [Maugis92], ou à [Pietrement00] qui propose en outre une résolution numérique de la profondeur d'écrasement.

Considérant un contact multi-aspérités, la force de frottement s'exprime par l'approche macroscopique. On assimile alors les forces d'adhésion à des forces extérieures agissant à l'interface et s'ajoutant à la charge normale. La force de frottement s'exprime alors par :

$$F_f = \mu(F_N + F_{adh}) \quad (3.87)$$

A charge nulle, la force de frottement ne dépend donc plus que de l'adhésion.

Les phénomènes d'adhésion et notamment de capillarité augmentent dans une certaine mesure avec le temps. Dans le cas de la prédominance des forces de capillarité, la force de frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse jusqu'au moment où le temps de contact est trop court pour permettre la création des capillaires et donc pour obtenir une force de capillarité significative. Le temps moyen de nucléation capillaire ( $t_n$ ) augmente exponentiellement selon une loi d'Arrhenius [Szozkiewicz05] :

$$t_n = t_0 \exp[\Delta\Omega^\ddagger / (k_B T)] \quad \text{avec} \quad \begin{cases} 1/t_0 & \text{la fréquence d'activation} \\ \Delta\Omega^\ddagger & \text{le seuil d'énergie de nucléation} \\ k_B & \text{la constante de Boltzmann} \\ T & \text{la température} \end{cases} \quad (3.88)$$

Le seuil d'énergie de nucléation diminue quand l'humidité relative augmente. Ainsi le temps de nucléation décroît considérablement avec l'augmentation de l'humidité ainsi que de la température.

La vitesse limite à partir de laquelle les ménisques ne peuvent plus se former est considérée comme le rapport du diamètre de l'aire de contact par le temps de nucléation capillaire. Par la mesure des forces de frottement en fonction de la vitesse entre une pointe AFM en silicium et des substrats en verre, des temps moyens de nucléation variant de 0.7 à 4.2ms pour des températures décroissant de 332 à 299K à 37%±2% d'humidité relative ont été obtenus par [Szozkiewicz05]. En se basant sur ces valeurs et pour le cas d'une bille en verre de 50µm de diamètre sur un substrat en verre ( $a = 0.45\mu\text{m}$ ), la vitesse critique (à 299K) peut être estimée à :

$$v_c(299K) = \frac{2a}{\tau} = \frac{2 \cdot 0.45\mu\text{m}}{4.2\text{ms}} = 214\mu\text{m/s} \quad \text{et} \quad v_c(332K) = 1286\mu\text{m/s} \quad (3.89)$$

En résumé, pour les matériaux hydrophiles, la force de frottement diminue tant que la vitesse augmente jusqu'à la valeur seuil  $v_c$ , elle augmente par contre avec l'humidité relative et la charge. Pour les matériaux hydrophobes, ainsi qu'à des vitesses supérieures à  $v_c$  pour les matériaux hydrophiles, la force de frottement augmente avec la vitesse. Ce phénomène est dû aux effets de stick-slip, puis à la viscosité du film liquide ou du revêtement hydrophobe [Tao07].

### 3.6.2 RÉSISTANCE AU ROULEMENT

Le roulement est aussi conditionné par un coefficient de résistance qui définit un moment seuil à partir duquel un cylindre ou une bille roulent. Ce moment est défini comme  $M = \mu_R F_N$ , avec  $F_N$  la force normale appliquée à l'objet et  $\mu_R$  le coefficient de résistance au roulement qui s'exprime en unité de longueur [Butt03]. Cette résistance est due à la déformation locale qui apparaît au contact entre deux objets solides et à l'énergie dissipée durant le cycle de compression-décompression de la zone de contact. La résistance au roulement s'exprime en fonction d'un paramètre de pertes par hystérèses  $\Psi$  et correspond à [Stolarski90] :

$$\mu_R = \Psi \frac{2a}{3\pi} \quad \text{pour un cylindre et} \quad \mu_R = \Psi \frac{3a}{16} \quad \text{pour une sphère.} \quad (3.90)$$

Dans le cas où les effets d'adhésion sont importants, la résistance au roulement résulte de la rupture de la jonction adhésive. Cette séparation est similaire au comportement d'une fissure où un effort minimum

est nécessaire à sa propagation [Stolarski89]. L'interface n'est donc pas soumise aux efforts de cisaillement comme dans le cas du frottement, mais à la traction provoquée par le mouvement de roulement. Le moment résistant au roulement dépend alors de l'aire de contact et de la force d'adhésion quasi-statique. [Saito01] définit le moment résistant maximal comme :

$$M_{max} = c_r a W \quad (3.91)$$

avec  $c_r$  un paramètre dépendant des matériaux, évalué expérimentalement et valant entre  $10^{-5}$ - $10^{-4}$ m,  $a$  le rayon de l'aire de contact et  $W$  l'énergie de surface. La relation entre les deux expressions (3.90) et (3.91) peut être interprétée en considérant l'adhésion à l'interface comme :

$$M_{max} \approx \mu_R F_N \approx \mu_R \cdot \frac{3}{2} \pi R W \approx C \cdot \psi a \cdot \pi R W \approx c_r \cdot a W \quad (3.92)$$

### 3.6.3 INFLUENCE SUR LA FORCE D'ADHÉSION

Le fait de glisser ou de rouler un objet sur une surface permet de diminuer l'adhésion à l'interface. Dans le cas de la force de capillarité, la création des ménisques peut être empêchée ou diminuée suivant la vitesse relative des surfaces en contact.

Johnson [Johnson97] propose un modèle relatant le rayon effectif de l'aire de contact sur lequel agit le frottement pour un contact mono-aspérité. Il stipule que la friction a pour effet de diminuer le travail d'adhésion de  $W^*$  à  $W$ . D'après les modèles de propagation de fissures, et en se basant sur les théories de Maugis concernant la mécanique du contact et de Savkoor [Savkoor92] au niveau de la déformation élastique du contact sous l'effet d'une force latérale, il introduit un paramètre  $X$  relatant l'influence de la friction sur l'adhésion dans la formulation de l'aire de contact :

$$X = \frac{W}{W^*} = \sqrt{(1+g)^2 - 2\alpha g} - g \quad (3.93)$$

avec  $\alpha$  un facteur d'interaction ( $\alpha = 0$  correspond à une friction nulle) et

$$\begin{cases} g = \frac{\tau_0 \bar{s}}{\sigma_0 h_0} & \text{pour } \bar{s} < \bar{s}_0 \\ g = g_0 = \frac{\tau_0 \bar{s}_0}{\sigma_0 h_0} & \text{pour } \bar{s} \geq \bar{s}_0 \end{cases} \quad (3.94)$$

où  $s$  est le glissement à l'intérieur de l'aire de contact ( $s = 0$  sans effort latéral, exprimé en [m]) et où  $s_0$  est le déplacement critique à partir duquel il y a glissement total.

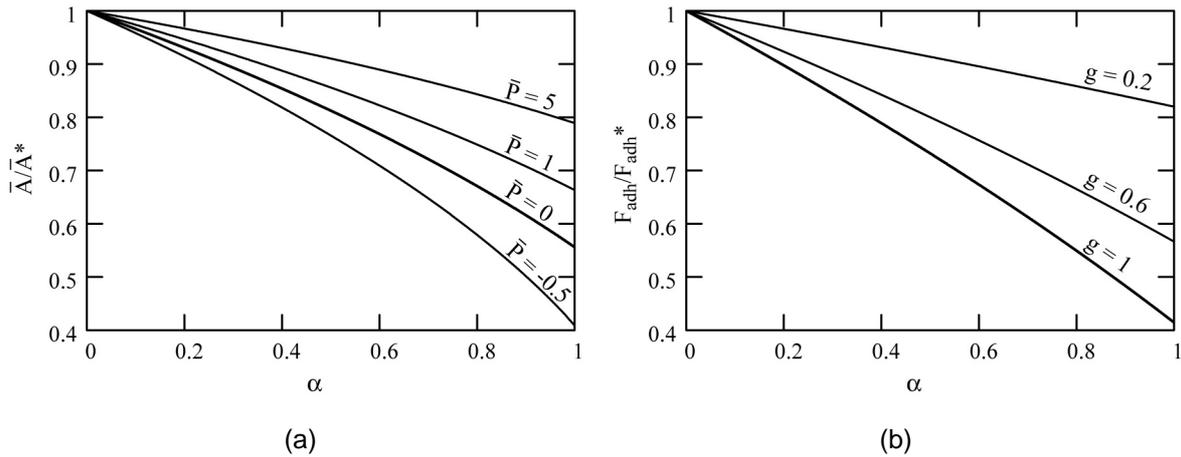
Pour le modèle JKR, le rayon au contact<sup>8</sup> s'exprime alors par :

$$\bar{P} = \bar{a}^3 - \sqrt{6X \bar{a}^3} = \left(\frac{\bar{A}}{\pi}\right)^{3/2} - \sqrt{6X \left(\frac{\bar{A}}{\pi}\right)^{3/2}} \quad \text{avec} \begin{cases} \bar{P} : \text{la charge normalisée} \\ \bar{a} : \text{le rayon de contact normalisé} \\ \bar{A} : \text{l'aire de contact normalisée} \end{cases} \quad (3.95)$$

L'aire de contact, qui augmente avec la charge, diminue lorsqu'il y a glissement. Cet effet est notamment très important dans le cas de charges faibles, voire négatives. Pour des charges plus importantes, la variation du rayon de contact sans et avec friction tend à s'équilibrer (Fig. 3.12 (a)).

En situation de roulement, l'interface est aussi soumise à des forces latérales, inférieures au frottement, mais induisant une diminution de la surface de contact et donc de la force d'adhésion. Cette situation correspond aux valeurs intermédiaires de  $g$  ( $g < g_0$ ) dans le modèle de Johnson (Fig. 3.12 (b)).

8.  $\bar{P} = \frac{P}{\pi W R}$  et  $\bar{a} = a \left(\frac{K}{\pi W R^2}\right)^{1/3}$



**Figure 3.12 :** (a) variation du rapport de l'aire de contact normalisée avec ( $A$ ) et sans ( $A^*$ ) glissement pour différentes charges  $P$  ( $g = g_0 = 1$ ); (b) variation du rapport de la force adhésive normalisée avec ( $F_{adh}$ ) et sans ( $F_{adh}^*$ ) friction en fonction du facteur d'interaction  $\alpha$  dénotant l'importance de la friction pour différentes valeurs de  $g$ .

### 3.7 PLASTICITÉ DU CONTACT

Les modèles de déformation JKR, DMT et Maugis-Dugdale sont valables pour des déformations dans le domaine élastique. Dans ces circonstances, les forces appliquées sont suffisamment faibles pour ne pas engendrer une déformation irréversible.

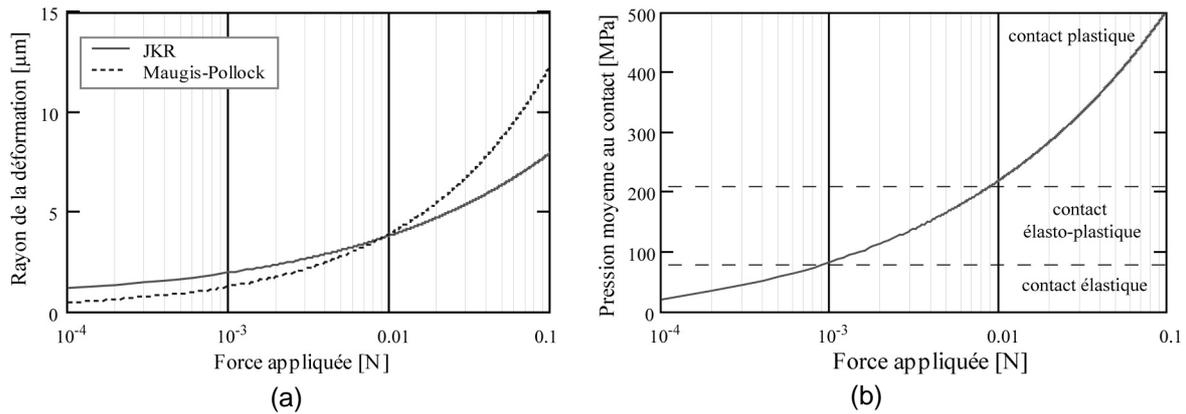
La déformation plastique est initiée dès que la pression moyenne au contact dépasse 1.1 fois la limite élastique  $R_e$  du matériau le plus mou. Dans ce domaine de transition, appelé élasto-plastique, les déformations ne changent pas drastiquement de l'état élastique et peuvent donc être approximées par les modèles élastiques [Pietrement00].

Lorsque la zone de plasticité atteint toute la surface de contact, la pression moyenne devient constante et la déformation est irréversible. Ce domaine, dit plastique, est atteint lorsque la pression moyenne vaut la dureté  $H$  ou  $3 \cdot R_e$ . Le modèle de Maugis-Pollock modélise la déformation plastique entre deux solides en tenant compte des effets d'adhésion [Maugis84]:

$$a = \sqrt{\frac{F + 2\pi WR}{\pi H}} \quad (3.96)$$

Pour une charge beaucoup plus importante que l'effet d'adhésion ( $F \gg 2\pi WR$ ), la surface ne dépend plus que de la charge et de la dureté des matériaux ( $Surface = Force / Dureté$ ), soit la géométrie du contact et les modules élastiques. Il faut malgré tout noter que les limites d'élasticité sont des valeurs macroscopiques qui peuvent grandement varier à l'échelle microscopique.

Les modèles JKR et Maugis-Pollock sont représentés à la Fig. 3.13 (a) en fonction de la charge appliquée dans le cas d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  sur une surface en silicium. Le domaine élasto-plastique correspond ainsi à des forces de 0.9mN à 9mN (Fig. 3.13 (b)). Au-dessus de 9mN, la déformation est irréversible et évolue selon le modèle de Maugis-Pollock.



**Figure 3.13 :** (a) Variation de la déformation au contact selon la charge appliquée pour les modèles JKR (déformation élastique) et Maugis-Pollock (déformation plastique) pour une sphère de polystyrène ( $\varnothing 50\mu\text{m}$ ,  $\gamma_0 = 0.033\text{J/m}^2$ ,  $E = 3.4\text{GPa}$ ,  $R_e = 70\text{MPa}$ ) sur du silicium ( $\gamma_S = 1.4\text{J/m}^2$ ,  $E = 140\text{GPa}$ ); (b) variation de la pression moyenne au contact pour le modèle JKR selon la charge appliquée.

### 3.8 CONTRIBUTION DES FORCES SURFACIQUES À L'ADHÉSION

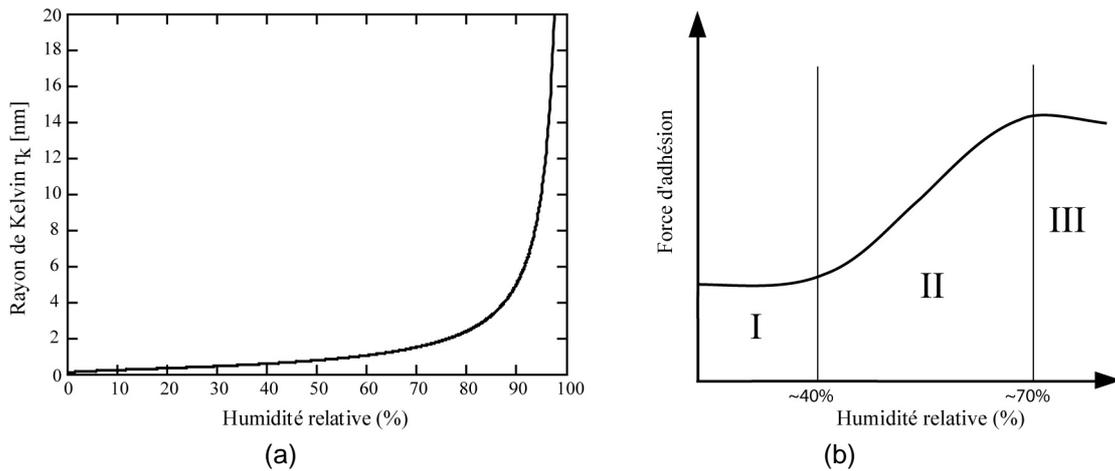
Les forces surfaciques contribuent à l'adhésion entre les micro-objets. Elles dépendent des matériaux en présence à l'interface ainsi que du milieu dans lequel a lieu l'interaction. L'influence de ce milieu sur les effets d'adhésion permet d'évaluer les conditions optimales pour assurer prise et dépose ou au contraire néfastes au succès des opérations de manipulations. En particulier, l'humidité relative représente un élément très influent puisque définissant la présence d'eau adsorbée en surface et dictant ainsi l'action des forces de capillarité.

La force de capillarité a été présentée, éq. (3.40), comme dépendant de la taille de l'objet, de la tension de surface du liquide et de l'angle de contact. Elle s'exprime donc de manière indépendante de l'humidité relative puisqu'elle n'est pas directement reliée à la taille du ménisque. En réalité, l'épaisseur du film d'eau adsorbé en surface influence considérablement la contribution des forces surfaciques à l'interface. Effectivement, il existe une épaisseur critique à partir de laquelle la force de capillarité est prépondérante.

Le film adsorbé est caractérisé par le rayon de Kelvin (3.44) qui évolue en fonction de la pression de vapeur relative ( $p/p_s$ ) (ou humidité relative pour l'eau) (Fig. 3.14(a)). Mais selon les vapeurs, le seuil de pression de vapeur relative à partir duquel l'expression (3.40) ( $F = 4\pi R\gamma\cos\theta$ ) est valide diffère. Dans le cas de vapeurs telles que du cyclohexane et du benzène, une pression de vapeur relative de 0.1-0.2, correspondant à un rayon de  $\sim 0.5\text{nm}$ , soit la taille des molécules, est déjà suffisant pour atteindre cette force maximale. Dans le cas de l'eau, il est par contre nécessaire d'atteindre un rayon de  $\sim 2\text{nm}$  [Israelachvili97].

Ainsi, les forces se combinent suivant trois phases en fonction de l'humidité relative (Fig. 3.14(b)). Durant la phase I, soit à basse humidité relative, seules les forces de van der Waals sont influentes<sup>9</sup>. On considère donc l'adhésion au contact comme la force de pull-off. La phase II correspond à l'apparition d'un film d'eau suffisant pour accroître les effets de capillarité au fur et à mesure que l'épaisseur augmente. Simultanément, les forces de van der Waals diminuent graduellement dû au fait que le contact entre les deux surfaces se fait partiellement au travers d'un liquide. La constante de Hamaker entre deux solides interagissant dans le vide (ou un gaz) peut valoir 5 à 10 fois celle d'une interaction en milieu aqueux. Enfin, la phase III marque la prédominance des effets de capillarité. Les expressions (3.39)-(3.43) sont alors valides. De manière très générale, la transition entre les phases I et II se situe vers 40% d'humidité relative, alors que la phase III est atteinte vers 70%.

9. Les forces électrostatiques sont négligées dans cette discussion.

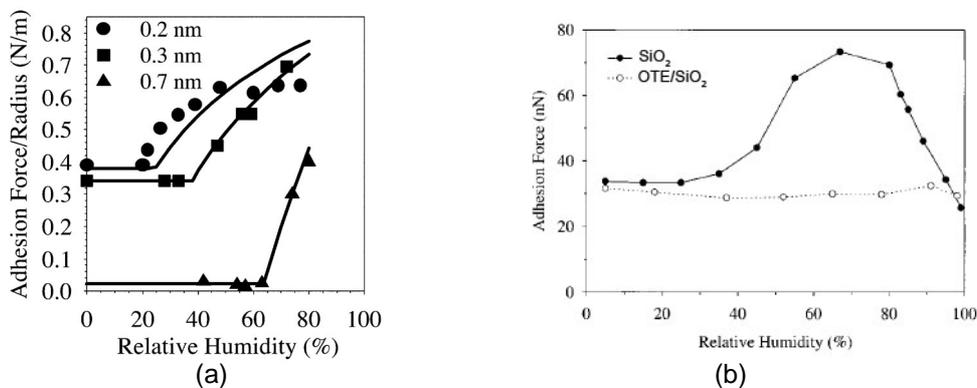


**Figure 3.14 :** (a) Rayon de Kelvin en fonction de l'humidité relative; (b) Schéma de l'évolution de la force d'adhésion selon l'humidité relative : Phase I: force de van der Waals, Phase II: forces de van der Waals et de capillarité, Phase III: prédominance de la force de capillarité.

Dans le cas de matériaux hydrophobes, il n'y a pas condensation d'un film continu même pour une humidité relative très élevée. La force d'adhésion est donc indépendante de l'humidité relative et reste ainsi constante (Fig. 3.15(b)). L'adhésion est alors caractérisée par la force de pull-off et reste donc à un bas niveau.

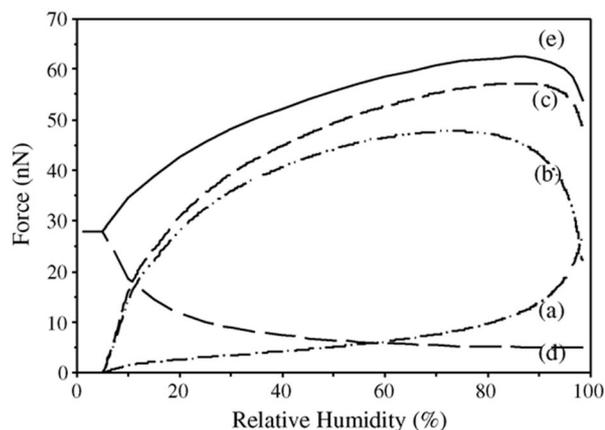
[Rabinovich02] a montré l'influence de la nanorugosité sur les valeurs seuils d'humidité relative. Ainsi, plus la rugosité est importante, plus le seuil est élevé (Fig. 3.15(a)). La force de capillarité devient ensuite maximale dès que la couche adsorbée dépasse la valeur moyenne des aspérités [Clever04].

Dans le cas d'un contact de type multi-aspérités, [Jones02] note que non seulement la force de pull-off mesurée est réduite comparée à celle obtenue par le modèle JKR, mais que la force de capillarité a également considérablement diminuée. Lorsque la rugosité est supérieure au rayon du ménisque, un contact unique et continu ne peut se créer à l'interface, donnant lieu à la formation de plusieurs ménisques de faibles tailles. La force de capillarité étant proportionnelle au rayon au carré du ménisque selon l'éq. (3.37), on s'attend ainsi à une plus faible adhésion pour des ménisques de faible surface. En outre, dans le cas de surfaces non-homogènes chimiquement ou du moins pas parfaitement homogènes, comprenant des zones de rugosité variable ou encore difficile à nettoyer, les mesures de forces d'adhésion font état d'une grande dispersion. Enfin, les forces d'adhésion durant l'accroissement de l'humidité relative sont généralement inférieures à celles mesurées lorsque l'humidité décroît. La tendance de l'eau à créer des ménisques (adsorption) est plus importante que celle à s'évaporer (désorption).



**Figure 3.15 :** Force d'adhésion en fonction de l'humidité relative : (a) pour différentes nanorugosités (valeurs RMS) (surfaces d'oxyde de silicium et billes en verre ( $R = 20-40\mu\text{m}$ )). [Rabinovich02]; (b) mesure AFM (pointe en nitrure de silicium) sur une surface hydrophile (SiO<sub>2</sub>) et traitée hydrophobe (OTE/SiO<sub>2</sub>) [Xiao00].

Les contributions des différentes forces d'adhésion selon l'humidité relative sont représentées à la Fig. 3.16. La force de capillarité étant prépondérante en phase III, une valeur constante d'adhésion est attendue. Pourtant, certaines mesures font état d'une force décroissante à humidité relative maximale. Différentes causes ont été proposées, notamment la mobilité du film ou l'apparition d'un terme de liaison chimique répulsif [Cleave04]. La forme de l'objet (typiquement de la pointe AFM) ainsi qu'un ménisque relativement grand en comparaison du rayon de courbure pourraient être à l'origine de la décroissance de la force de capillarité comme l'a montré [Xiao00]. Ce phénomène est donc propre aux petits objets. Pour des objets macroscopiques, l'angle d'immersion est toujours proche de zéro. La force de capillarité est alors constante à haute humidité.



**Figure 3.16 :** Contributions à la force d'adhésion selon l'humidité relative : (a) tension de surface, (b) pression de surface (Laplace), (c) force de capillarité totale, (d) force de van der Waals, (e) force d'adhésion totale [Xiao00].

### 3.9 MANIPULATION EN MILIEU LIQUIDE

Jusqu'ici, il n'a été question que de manipulations dans un environnement gazeux avec une atmosphère plus ou moins humide. Néanmoins, certaines applications peuvent supporter (et parfois nécessiter) une manipulation immergée, c'est-à-dire permettre que les composants soient plongés dans un bain d'eau ou d'huile notamment. Ce changement de milieu a les effets suivants sur les forces d'adhésion :

#### 3.9.1 FORCE DE VAN DER WAALS

La modification du milieu influence la constante de Hamaker ( $A^H$ ) ainsi que l'énergie d'adhésion ( $W$ ). Ces paramètres peuvent être évalués d'après les règles de combinaison (3.21) et (3.4). En comparant les valeurs de la constante de Hamaker de quelques matériaux interagissant dans l'air et dans l'eau (tableau (3.2)), on remarque que la force de Van der Waals peut subir une réduction importante, pouvant atteindre un facteur 10.

MATÉRIAU	CONSTANTE DE HAMAKER $A^H$ [ $\times 10^{-20}$ J]	
	DANS L'AIR	DANS L'EAU
Alumine	14	4.2 - 5.3
Mica	10	1.3 - 2.2
Polystyrène	6.5 - 7.9	1.4
PTFE	3.8	0.29 - 0.33

**Tableau 3.2 :** Constantes de Hamaker pour deux matériaux identiques interagissant dans l'air et dans l'eau.

### 3.9.2 FORCE DE CAPILLARITÉ

La force de capillarité est due à la présence d'un petit ménisque à l'interface entre deux objets. Dans un environnement d'air humide ce ménisque se forme par l'intermédiaire de la couche d'eau adsorbée en surface. Lorsque le milieu dans lequel s'effectue la manipulation est liquide, ces ménisques disparaissent et la force de capillarité s'annule. On retrouve par contre une force de capillarité lors de l'introduction des objets et des outils de manipulation dans le liquide.

### 3.9.3 FORCE ÉLECTROSTATIQUE

La force électrostatique ( $q\sigma/2\epsilon\epsilon_o$ ) est inversement proportionnelle à la constante diélectrique du milieu. Dans l'eau ces effets sont donc considérablement diminués du fait que  $\epsilon_{eau} = 80.4 \gg \epsilon_{air} \approx 1$ . D'autre part, en micromanipulation, les effets électrostatiques sont souvent causés par triboélectrification. La densité de charges en surface  $\sigma$  dépend alors des phénomènes de triboélectrification et de la conductivité électrique du milieu : un milieu de haute conductivité permet de décharger les surfaces et donc de diminuer les effets électrostatiques.

### 3.9.4 EFFET HYDRODYNAMIQUE

La loi de Stokes définit la force qui s'applique à un objet dans un flux laminaire comme :

$$F = -kR\eta v \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} k = 6\pi : \text{le coefficient de forme (pour une sphère)} \\ \eta : \text{la viscosité du milieu} \\ v : \text{la vitesse du flux} \\ R : \text{le rayon maximal} \end{array} \right. \quad (3.97)$$

Cette expression est valable pour un nombre de Reynolds ( $Re$ ) inférieur à 1, mais représente une évaluation correcte de la force pour  $Re < 10$ . Ainsi, dans l'eau, un effet hydrodynamique important apparaît du fait de la viscosité plus élevée que dans l'air ( $\eta_{eau} = 10^{-3} Pa \cdot s > \eta_{air} = 1.8 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ). Les micro-objets, ayant de très faibles inerties, atteignent rapidement de hautes vitesses. Dans l'air on assiste alors à des «sauts» inopinés, par exemple sous l'influence de charges électrostatiques. Ces mouvements, souvent non contrôlés, sont ainsi grandement réduits en milieu immergé, limitant notamment les pertes d'objets [Gauthier06].

La manipulation dans un milieu liquide a donc comme grand avantage la réduction importante des effets d'adhésion. Notamment et bien qu'en général non prédictibles, les forces électrostatiques peuvent par ce biais être efficacement limitées. Il faut néanmoins noter que toutes les opérations de micromanipulation ne peuvent se faire en milieu liquide : certains microsystèmes, ou certains de leurs composants, ne peuvent tolérer la présence de liquide qui agit alors comme une contamination des surfaces, ce qui est notamment le cas pour certains composants optiques. D'autre part, une fois les composants manipulés ou assemblés, il est généralement nécessaire de les extraire de ce milieu liquide. Il peut alors subsister des traces de liquide qui peuvent induire des effets de capillarité. Des problèmes similaires apparaissent d'ailleurs dans la fabrication de microsystèmes après une gravure humide par exemple.

## 3.10 CONCLUSION

Les effets d'adhésion présentés dans ce chapitre supposent dans leur modèle des caractéristiques quasi idéales ou du moins parfaitement définies autant au niveau des surfaces que des conditions ambiantes. Les valeurs des paramètres des matériaux sont en général définis par expérimentations, mais ces mesures correspondent à des conditions très spécifiques qui ne sont en général plus respectées lors d'une manipulation. Il peut s'agir autant des procédés de nettoyage que subissent les surfaces de tests, que

de conditions ambiantes très strictes, telles que le vide par exemple, où ont lieu les mesures. On notera par ailleurs que ces caractéristiques mesurées sont données avec des marges d'erreur pouvant atteindre 20%, notamment pour la constante de Hamaker.

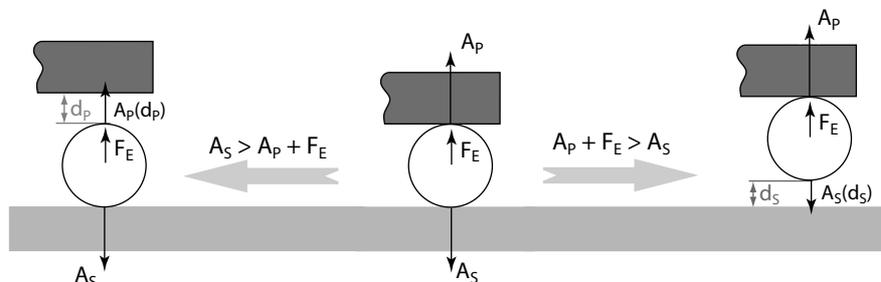
Il a en outre été démontré que les effets d'adhésion sont très sensibles aux profils des surfaces ainsi qu'à l'alignement des composants au contact. Une rugosité de 100nm provoque une diminution des effets de van der Waals de deux ordres de grandeur. Une erreur de parallélisme de  $0.5^\circ$ , pour une surface plane de  $20\mu\text{m}$  de côté, induit une diminution de la force de van der Waals d'un facteur  $2 \times 10^3$ . Le profil de rugosité des surfaces peut être mesuré, bien qu'il sera considérablement simplifié pour être pris en compte. Il n'est par contre pas réaliste de vouloir mesurer l'alignement de micro-objets avec une résolution inférieure à  $0.1^\circ$ , et même à  $1^\circ$ , pour des objets micro-métriques.

Il est dès lors présomptueux de vouloir définir avec exactitude la valeur des forces d'adhésion qui s'appliquent à chaque contact lors d'une opération complexe de manipulation. Ces modèles sont par contre utilisés afin d'explicitier les différents principes de préhension qui sont présentés au chapitre 4 : "Principes de Manipulation". Ils y sont intégrés en termes comparatifs afin de définir les caractéristiques optimales des outils de préhension, des conditions ambiantes ou encore d'une stratégie liée au mouvement du préhenseur ou du manipulateur pour assurer les opérations de prise et de dépose.

## PRINCIPES DE MANIPULATION

Le chapitre 3 a montré l'importance des effets d'adhésion dans l'interaction entre solides de taille caractéristique inférieure au millimètre. La manipulation de microcomposants est donc toujours conditionnée par ces effets : la réussite de la prise ou de la dépose dépend du déséquilibre des forces agissant aux interfaces «préhenseur - objet» et «objet - substrat» (Fig. 4.1). La fiabilité des procédés de manipulation implique ainsi de gérer les effets d'adhésion présents à ces deux interfaces en combinaison avec les efforts externes provenant du préhenseur.

En regard de la Fig. 4.1 et en ne considérant que les effets d'adhésion aux interfaces, il est possible de prendre un objet pour autant que l'adhésion au préhenseur soit plus élevée que celle au substrat<sup>1</sup>. La dépose nécessite au contraire les conditions opposées : l'adhésion doit être supérieure au niveau du substrat. Il n'est donc a priori pas possible de prendre et déposer un micro-objet en conservant des conditions identiques au préhenseur et au substrat pour les deux opérations. En outre, lorsque la différence d'adhésion n'est pas très importante, le transfert de l'objet d'une surface à l'autre ne se fait pas d'office, rendant la manipulation peu fiable. Il est alors nécessaire d'atteindre une situation plus favorable en jouant par exemple sur l'orientation du mouvement de retrait ou de la position du contact afin de rompre l'interface d'adhésion et d'effectuer le transfert.



**Figure 4.1 :** Schéma du déséquilibre des forces d'adhésion ( $A_S$ ,  $A_P$ ) et d'une force externe ( $F_E$ ) aux interfaces «préhenseur - objet» et «objet - substrat» provoquant une prise ou une dépose réussie (indices  $S$  : substrat,  $P$  : préhenseur).

1. Le terme *substrat* est utilisé dans cette étude de manière générale pour définir invariablement la surface de prise et celle de dépose. Pour une opération de manipulation, ces deux surfaces ne sont en général pas identiques : par exemple la surface d'une palette de stockage (en prise) et la surface réceptrice d'un assemblage en dépose.

L'étude des opérations basées uniquement sur les effets d'adhésion permet de discuter par la suite d'autres principes de manipulation. Notamment, la dépose à l'aide de micropinces revient à une situation particulière d'une manipulation par adhésion pour laquelle le préhenseur est incliné de  $90^\circ$  par rapport au substrat. L'utilisation d'autres forces au cours des opérations de prise et de dépose peut être représentée soit comme une modification des effets adhésifs à l'une des interfaces (présence d'un ménisque ou d'une différence de pression par exemple), soit comme permettant de supplanter l'adhésion à l'interface et donc d'induire la rupture. Dans ce dernier cas seulement, l'interaction des deux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat» n'est pas nécessaire : cette situation apparaît notamment sous l'effet d'une force d'inertie suffisamment importante pour «détacher» les microcomposants.

Ce chapitre a pour but d'analyser les opérations de prise et de dépose en termes de fiabilité et de positionnement. Nous nous intéressons aux moyens de rompre l'une des interfaces avec le minimum de perturbation au niveau de l'autre zone de contact. Cette étude se base sur le rapport des effets d'adhésion entre les deux interfaces (§ 4.1.1) et selon la disposition de ces dernières. Par l'interaction entre le mouvement de retrait effectué par le manipulateur et une force externe appliquée à l'objet, la qualité des opérations de prise et de dépose peut alors être évaluée.

La manipulation basée uniquement sur les effets d'adhésion est tout d'abord abordée dans ce chapitre. Les aspects liés au rapport d'adhésion, à l'orientation des interfaces et au mouvement de retrait sont étudiés dans le cas géométriquement simple du transfert d'une bille entre deux surfaces planes. Les opérations basées sur l'utilisation de micropinces sont ensuite discutées ainsi que quelques configurations plus spécifiques au référencement mécanique. Les principes de micromanipulation intégrant les effets de capillarité et de différence de pression (vacuum) à l'interface sont ensuite développés et les effets d'une vibration à l'interface sont discutés. L'application de hautes accélérations au niveau de l'objet, développant une force d'inertie suffisante à la rupture de l'interface «objet - préhenseur», est finalement présentée.

Les opérations de micromanipulation réalisées feront ensuite intervenir des combinaisons de ces principes pour assurer les opérations de prise et de dépose. Les outils correspondants, qui ont été conçus dans le cadre de cette recherche, sont présentés au chapitre 7 : "Conception et Réalisation des Outils".

## 4.1 ASPECTS DE FIABILITÉ ET DE POSITIONNEMENT

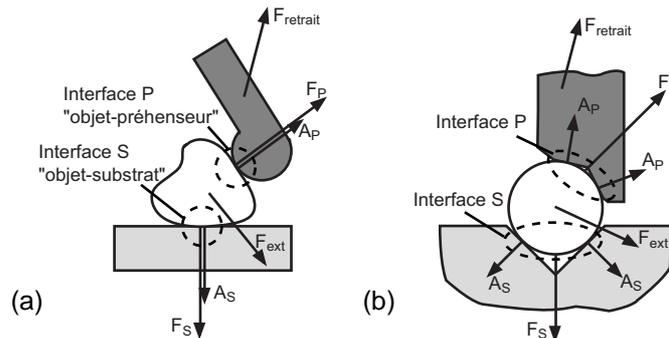
La fiabilité des opérations de prise ou de dépose est dépendante des moyens permettant de rompre l'une des interfaces avec l'objet afin d'effectuer le transfert du composant d'une surface à l'autre. Nous nous intéressons donc aux forces générées par le préhenseur soit au niveau des interfaces, soit au niveau du composant.

Les performances de positionnement dépendent par contre des perturbations occasionnées au moment du transfert au niveau de l'interface avec l'élément récepteur (le préhenseur en prise, mais surtout le substrat lors de la dépose). La direction du retrait ainsi que l'orientation des interfaces y ont une influence prépondérante. Il importe aussi d'utiliser une méthode de référencement adaptée au composant, par exemple par une référence géométrique, ainsi qu'à sa fonctionnalité (§ 4.1.2).

Nous proposons dès lors d'examiner les opérations de micromanipulation selon les quatre paramètres suivants :

1. **Les forces aux interfaces** : soit les forces d'adhésion, mais aussi tous les moyens pour accroître ou diminuer l'effet d'adhésion au contact. On peut par ailleurs inclure dans ce paramètre toute force agissant au point de contact, c'est-à-dire aussi une force de succion par exemple. Le rapport d'adhésion  $\Gamma$  aux interfaces permet de prendre en compte tous ces aspects de manière généralisée (§ 4.1.1). L'amplitude des forces d'adhésion étant liée à la géométrie du contact, la force aux interfaces est clairement dépendante de la nature des contacts.

2. **La nature des contacts**, c'est-à-dire leur géométrie et leur disposition sur le microcomposant. Cet aspect reflète aussi le type de référencement mécanique utilisé et est étroitement lié à la stratégie de positionnement choisie (§ 4.1.2).
3. **Le mouvement relatif préhenseur/substrat** (mouvement au retrait) conditionne la rupture de l'une ou l'autre interface par le biais des effets de glissement ou de roulement et selon les orientations respectives des contacts avec le micro-objet.
4. **Les forces externes** appliquées à l'objet : par exemples une force d'inertie, un serrage, un champ magnétique, un flux ou encore une onde acoustique qui peuvent être utilisés comme principe de manipulation. Ces forces agissent sur l'objet, et non pas à l'endroit du contact uniquement, et ne peuvent pas être pris en compte au travers du rapport des forces aux interfaces.



**Figure 4.2 :** Schéma des interfaces S et P pour deux géométries différentes. Illustration de la force de retrait ( $F_{retrait}$ ), de la force externe ( $F_{ext}$ ) et des forces aux interfaces ( $F_S$  et  $F_P$ ) : (a) situation générale de deux interfaces monocontacts; (b) situation multicontact typique d'un référencement mécanique.

#### 4.1.1 RAPPORT D'ADHÉSION AUX INTERFACES

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, les forces d'adhésion dépendent de nombreux paramètres liés aux matériaux, à la qualité des surfaces, ainsi qu'aux conditions ambiantes. Leur évaluation est possible dans des cas de géométrie simple et la prise en compte des rugosités engendre déjà des modèles relativement complexes. Ces forces devraient donc être mesurées en situation réelle pour être vraiment représentatives. Néanmoins, durant une opération de micromanipulation, c'est la différence des forces aux interfaces plus que leur amplitude qui détermine le résultat des opérations. L'utilisation d'un *rapport d'adhésion aux interfaces* (noté  $\Gamma$ ) permet dès lors de quantifier les configurations. Nous proposons de ce fait d'étudier les différents principes de micromanipulation sur la base de ce rapport et de discuter les moyens permettant de le modifier.

Nous introduisons dans ce but un paramètre adimensionnel  $\Gamma$  qui représente le carré du rapport des forces ( $A_P$  et  $A_S$ ) aux deux interfaces<sup>2</sup> :

$$\Gamma \equiv \left( \frac{A_P}{A_S} \right)^2 \quad (4.1)$$

Dans le cas de deux géométries de contact identiques de part et d'autre de l'objet et en ne considérant que les effets d'adhésion (forces de pull-off),  $\Gamma$  peut s'exprimer indépendamment de l'objet manipulé par le rapport des énergies de surface ( $\gamma_P$  et  $\gamma_S$ ), soit par :

$$\sqrt{\Gamma} \equiv \frac{A_P}{A_S} = \frac{W_P}{W_S} = \frac{2\sqrt{\gamma_O\gamma_P}}{2\sqrt{\gamma_O\gamma_S}} = \sqrt{\frac{\gamma_P}{\gamma_S}} \quad (4.2)$$

A priori, en accord avec l'expression (4.1), la dépose est favorisée pour  $\Gamma < 1$  alors que la prise correspond aux configurations  $\Gamma > 1$ . Nous verrons par la suite que d'autres paramètres influencent les opé-

2. Indices S pour l'interface «objet - substrat» et P pour l'interface «objet - préhenseur».

rations, mais sur cette base, il semble évident que la modification de  $\Gamma$  durant la manipulation favorisera le passage de la prise à la dépose.

Les effets d'adhésion sont sensibles à la géométrie du contact et aux matériaux constituant l'interface ainsi qu'aux conditions ambiantes et plus particulièrement à l'humidité relative. Le rapport  $\Gamma$  est donc dépendant de ces mêmes paramètres. Plusieurs méthodes peuvent dès lors être développées, notamment :

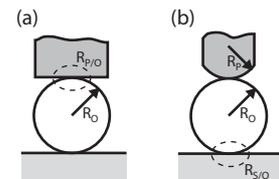
- **Matériaux aux interfaces** : comme exprimé dans (4.2), le choix des matériaux en surface du préhenseur et du substrat permet de définir un rapport  $\Gamma$  indépendamment des caractéristiques de l'objet lorsque les deux interfaces sont géométriquement similaires (on suppose aussi que la rugosité est équivalente). Cette configuration est réaliste à basse humidité relative, lorsque les effets de capillarité ne sont pas prépondérants (jusqu'à ~40% voire (§ 3.8)). Pour une humidité relative plus importante, les effets d'adhésion dépendront de la mouillabilité des matériaux. Dans le cas de matériaux à tendance hydrophile, le rapport  $\Gamma$  dépendra du cosinus des angles de contact uniquement. L'utilisation de coatings hydrophiles ou hydrophobes, ou encore de dépôts adhésifs permet de modifier localement les surfaces, notamment les zones de préhension.
- **Rugosité** : les effets d'adhésion sont maximaux pour des surfaces parfaitement lisses, et se réduisent de manière importante avec la rugosité, sauf en présence d'un ménisque sur une surface hydrophile. Il peut donc être utile d'amener le microcomposant d'une surface lisse à une surface rugueuse pour favoriser son transfert, par exemple en l'y glissant ou l'y roulant.
- **Surface de contact** : que ce soit les forces de capillarité ou celles de Van der Waals, le contact entre surfaces planes provoque des effets d'adhésion plus importants que les contacts entre sphères. La modification de la géométrie du préhenseur entre les phases de prise et de dépose, ou encore la réduction de l'aire de contact permettent de modifier mécaniquement les effets d'adhésion. Par exemple, dans le cas du transfert d'une sphère de rayon  $R_O$  entre deux surfaces planes, le rapport  $\Gamma$  correspond à l'expression (4.2), alors que pour un substrat plan et un préhenseur à extrémité sphérique de rayon  $R_P$  l'expression de  $\Gamma$ , tenant compte des rayons équivalents  $R_{S/O}$  à l'interface S et  $R_{P/O}$  à l'interface P, devient :

$$\sqrt{\Gamma} = \frac{A_P}{A_S} \approx \frac{R_{P/O} W_P}{R_{S/O} W_S} = \sqrt{\frac{\gamma_P}{\gamma_S}} \frac{R_P}{R_P + R_O} \quad \text{avec } R_{S/O} = R_O \quad \text{et} \quad R_{P/O} = \frac{R_P R_O}{R_P + R_O} \quad (4.3)$$

- **Présence d'un ménisque à l'interface** : la force d'adhésion due à la présence d'un ménisque au contact constitue généralement la force de surface la plus élevée. L'utilisation d'un liquide uniquement sur l'une des interfaces augmente ainsi l'adhésion à cette interface uniquement.
- **Effet électrostatique** : de manière similaire à la force de capillarité, une force électrostatique peut être développée à l'une des interfaces sous l'effet d'une différence de tension entre les surfaces ou par l'utilisation d'électrodes structurées (effet capacitif).
- **Effet de succion** : une différence de pression entre la zone de contact et la pression atmosphérique induit un effet de succion. On retrouve ici à nouveau un moyen de déséquilibrer les forces entre les deux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat».
- **Effet de soufflage** : une surpression, au contraire de l'effet de succion, permet de diminuer la force à l'interface jusqu'à provoquer un effet répulsif.

$\Gamma$  peut alors être exprimé de manière générale comme :  $\sqrt{\Gamma} \equiv \frac{A_P + F_P}{A_S + F_S}$  (4.4)

avec  $A_P$  et  $A_S$  les forces d'adhésion aux interfaces  $P$  et  $S$  et  $F_P$  et  $F_S$  les forces de préhension actives à ces mêmes interfaces mais contrôlées par le préhenseur ou le substrat.  $\Gamma$  dépend donc de multiples paramètres, prenant en compte les caractéristiques du micro-objet, du préhenseur, du substrat et de



**Figure 4.3 :** Géométries aux contacts : (a) transfert plan/plan, (b) transfert sphère/plan.

l'environnement ainsi que de toutes forces supplémentaires intervenant au cours des opérations au niveau des interfaces :

$$\Gamma = \Gamma(\text{objet, préhenseur, substrat, environnement, ...}) \quad (4.5)$$

Notons par ailleurs que l'efficacité d'un préhenseur sera liée à sa capacité de passer d'une configuration de prise à une configuration de dépose. L'efficacité peut donc être qualifiée par la variation de  $\Gamma$  entre ces deux opérations.

#### 4.1.2 STRATÉGIES DE POSITIONNEMENT

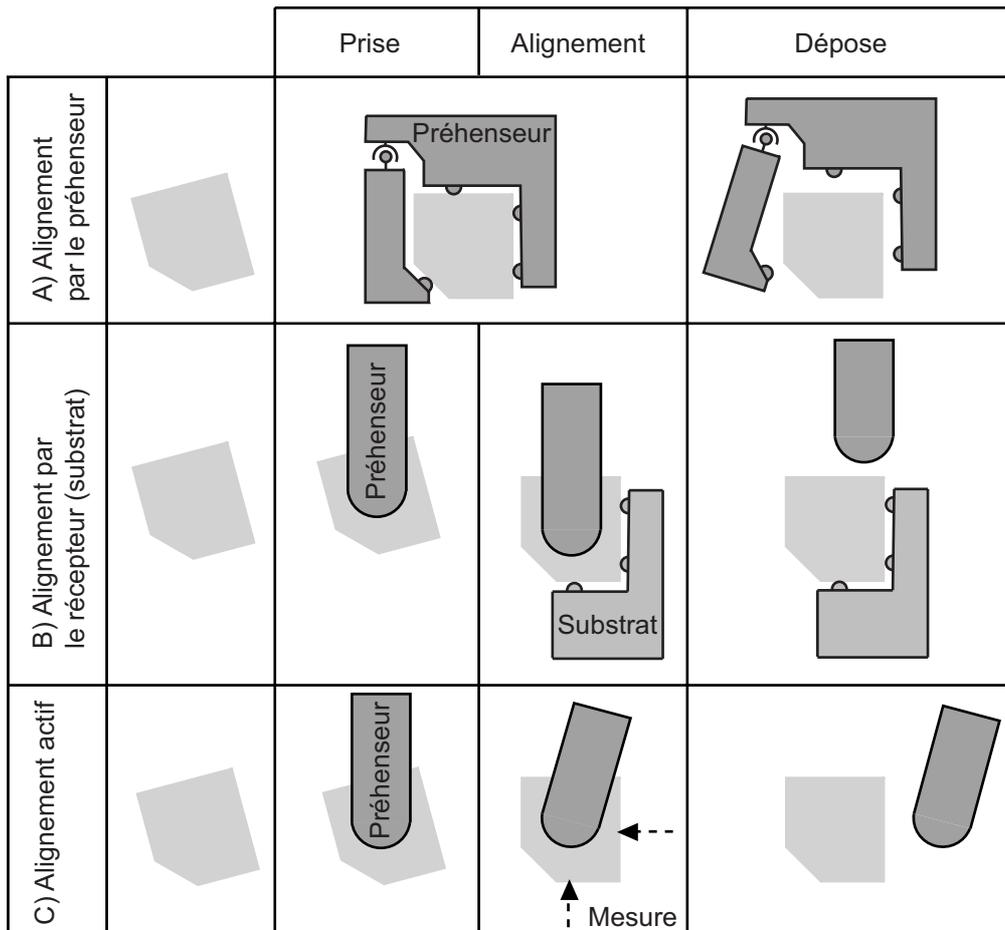
L'analyse du positionnement fait intervenir plusieurs facteurs dont la présence et la qualité des éléments de référencement mécanique, les moyens de mesure ainsi que les caractéristiques du manipulateur (degrés de liberté et répétabilité) puis la stratégie de positionnement appliquée. Dans tous les cas, assurer la répétabilité de positionnement d'un composant nécessite un transfert de l'objet induisant un minimum de perturbation au niveau de l'interface finale (en dépose : le substrat). C'est pourquoi il est intéressant de se pencher sur les conditions permettant une dépose de qualité, même pour des configurations très simples, où le composant est simplement déposé sur le substrat sans autre moyen de maintien que les effets d'adhésion.

De manière générale, l'alignement d'un composant peut être assuré selon trois stratégies principales qui concernent la configuration du préhenseur et/ou du substrat ainsi que les moyens métrologiques et robotiques à disposition (Fig. 4.4) :

- A) Alignement par le préhenseur :** par l'intégration d'éléments de référencement mécanique au niveau de l'interface «objet - préhenseur», l'orientation et la position du composant sont définies par le préhenseur. La dépose peut avoir lieu à une position prédéfinie et le substrat doit infliger le minimum de contraintes au composant.
- B) Alignement par le substrat :** les éléments de référencement mécanique sont intégrés au substrat. Le préhenseur assure les opérations de prise et de dépose sans contraindre le composant en position. Lors de la dépose, le préhenseur doit permettre la mise en contact du composant et des éléments de référencement tout en laissant l'objet «libre» de mouvement à l'interface «objet - préhenseur». D'une certaine manière, le préhenseur se charge de prendre et de déposer le composant tel qu'il se présente et sans en changer l'orientation.
- C) Alignement actif :** au contraire des stratégies A et B, l'orientation et la position de l'objet ne sont pas définies mécaniquement, mais au moyen d'une mesure soit de position (relativement au substrat par exemple), soit de manière à optimiser une fonctionnalité. Ceci est typiquement le cas lors de l'alignement de composants optiques où l'on mesure par exemple le maximum d'intensité lumineuse pour définir la position finale. L'orientation et la position finale dépendent du nombre de degrés de liberté mesurés puis contrôlés par le manipulateur et de la résolution et de la répétabilité des mouvements et des mesures. Le préhenseur et le substrat ne devraient pas contraindre l'orientation du composant.

Ces trois stratégies sont généralement combinées. Notamment les éléments de référencement mécaniques peuvent être répartis entre le préhenseur et le substrat. L'application dicte dans ce cas la répartition selon les fonctionnalités ou les besoins de l'assemblage. En outre, l'alignement actif peut correspondre à un positionnement au moyen d'un système de vision qui permet de contrôler activement par exemple le positionnement dans le plan alors que l'orientation du composant est donnée par le préhenseur et/ou le substrat.

L'intégration d'éléments de référencement mécanique à l'une ou l'autre des interfaces a pour but de définir la position et l'orientation du composant. La répétabilité du positionnement dépendra de la qualité des contacts ainsi que de la qualité du maintien. Pour que l'efficacité de ce genre de stratégie soit optimale,



**Figure 4.4 :** Stratégies de positionnement d'un composant avec éléments de référencement mécanique au préhenseur (A), au substrat (B) et par mesure et correction active (C).

Il est nécessaire de s'assurer que le composant soit réellement en contact avec ces éléments et donc d'appliquer un effort induisant ce contact. Par exemple : lorsque la force de gravité est prépondérante, une bille viendra automatiquement se loger au fond d'un cône; alors que lorsque la gravité devient négligeable, la bille pourra tout à fait adhérer à l'entrée du cône. Son référencement ne sera pas assuré. Il est donc nécessaire d'amener l'objet à la position de référence.

Finalement, suivant la complexité des éléments de référencement mécanique, l'interface est composée de plusieurs zones de contact. Chaque zone occasionne un effet d'adhésion donc une perturbation supplémentaire lors du transfert de l'objet. L'étude de l'influence de certaines configurations de référencement mécanique placées au niveau du préhenseur ou du substrat permet de qualifier les stratégies de positionnement (§ 4.3.2).

## 4.2 MICROMANIPULATION PAR ADHÉSION

Nous appelons *micromanipulation par adhésion* toute opération de transfert d'un composant entre deux surfaces, soit le préhenseur et un substrat, engendrée simplement et uniquement par les mouvements de mise en contact mécanique puis de retrait. Les opérations de micromanipulation par adhésion sont donc conditionnées

- par les caractéristiques des interfaces et de leur environnement, qui définissent les forces d'adhésion,
- par la disposition des contacts mécaniques et le mouvement au retrait, qui déterminent les efforts exercés aux interfaces (force et moment).

Pour qu'il y ait dépose, autrement dit pour que l'objet reste sur le substrat lors du retrait du préhenseur, il faut logiquement que la force qui l'y retient soit supérieure à celle le liant au préhenseur. La dépose est alors possible à condition que l'adhésion à l'interface «objet - préhenseur» soit inférieure à celle active à l'interface «objet - substrat» et inversement pour la prise. La condition limitant le transfert du préhenseur au substrat (dépose) et inversement du substrat au préhenseur (prise) est tout d'abord présentée sur la base de la force de détachement à l'interface. Des forces de frottement sont induites durant le retrait. Une condition de glissement est établie et permet de spécifier à quelle interface le glissement est engendré en premier. Les efforts aux interfaces sont finalement explicités afin de déterminer le comportement du composant durant les opérations de transfert.

### 4.2.1 LIMITE DE PRISE/DÉPOSE

L'équilibre des forces entre les deux interfaces permet d'exprimer la condition de prise/dépose par adhésion. En se reportant à la Fig. 4.5 qui décrit la configuration utilisée pour exprimer les forces actives aux interfaces ainsi que les orientations respectives du préhenseur et du mouvement de retrait, la force de détachement à l'interface «objet-préhenseur» est conditionnée par :

$$F > A_p \sin(\alpha + \phi) + G_p |\cos(\alpha + \phi)| \tag{4.6}$$

où  $G_p$  correspond à la force de frottement :  $G_p = \mu_p(A_p - F \sin(\alpha + \phi))$  et  $\mu_p$  le coefficient de frottement à l'interface «objet-préhenseur». La force minimale de séparation  $\Sigma_p$  devient :

$$F > A_p \frac{\sin(\alpha + \phi) + \mu_p |\cos(\alpha + \phi)|}{1 + \mu_p \sin(\alpha + \phi) |\cos(\alpha + \phi)|} \equiv \Sigma_p \tag{4.7}$$

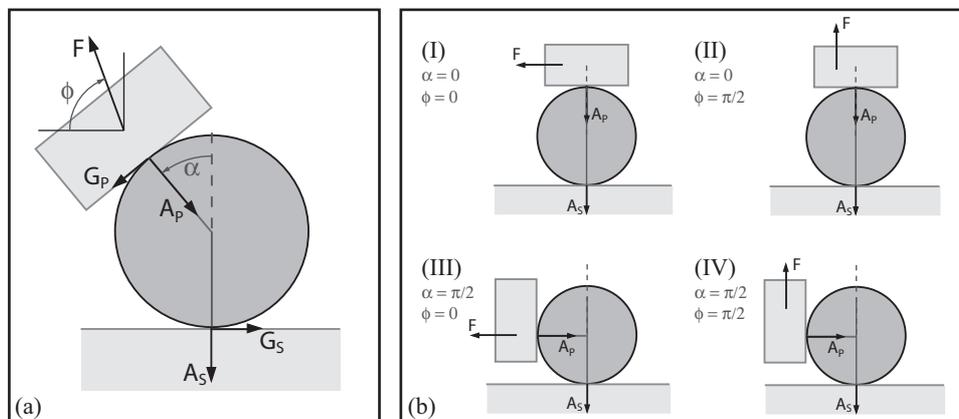
Il en va de même pour le détachement à l'interface «objet-substrat», soit :

$$F > A_s \frac{\sin \phi + \mu_s |\cos \phi|}{1 + \mu_s \sin \phi |\cos \phi|} \equiv \Sigma_s \tag{4.8}$$

La dépose est conditionnée par  $\Sigma_p < \Sigma_s$  et inversement pour la prise. Nous définissons ainsi la limite de prise/dépose comme une condition sur le rapport d'adhésion  $\Gamma = (A_p/A_s)^2$  en fonction du mouvement de retrait et des coefficients de frottement. La condition de détachement s'exprime ainsi par :

$$\Gamma_{Detachment} = \left( \frac{\sin \phi + \mu_s |\cos \phi|}{\sin(\alpha + \phi) + \mu_p |\cos(\alpha + \phi)|} \cdot \frac{1 + \mu_p \sin(\alpha + \phi) |\cos(\alpha + \phi)|}{1 + \mu_s \sin \phi |\cos \phi|} \right)^2 \tag{4.9}$$

Pour une situation donnée des angles  $\alpha$  et  $\phi$ , il y a :

$$\begin{cases} \text{Prise si : } \Gamma > \Gamma_{Detachment} \\ \text{Dépose si : } \Gamma < \Gamma_{Detachment} \end{cases}$$


**Figure 4.5 :** (a) Schéma des forces actives aux interfaces durant une opération de prise ou de dépose (indice S : substrat, P : préhenseur); (b) Orientations typiques.

La modification de l'orientation peut permettre de passer d'une situation de prise à une situation de dépose pour un rapport d'adhésion donné. D'autre part, les valeurs des coefficients de frottement ont logiquement un effet plus significatif lorsque l'effort est tangent à l'interface. Un faible coefficient de frottement au niveau du préhenseur induira un accroissement de la condition de détachement, d'où une meilleure propension à la dépose. Il en va de même concernant le substrat dans le cas de la prise.

#### 4.2.2 LIMITE DE GLISSEMENT AUX INTERFACES

Le décollement à l'interface est généré par une force supérieure aux effets d'adhésion et de frottement. Néanmoins un déplacement peut être induit par un effort inférieur, contrecarrant le frottement, mais insuffisant à provoquer le détachement. Ce déplacement provoque alors rupture de l'interface bien qu'il y ait toujours un effet d'adhésion entre les deux surfaces [Saito01]. Le transfert de l'objet est facilité, voire initié, ce qui peut être expliqué par la diminution des forces d'adhésion en présence d'un effort latéral (§ 3.6.3). Suivant la configuration du préhenseur, l'objet peut être glissé jusqu'à atteindre le bout du préhenseur, l'interface étant ainsi éliminée physiquement. Ces stratégies de transfert sont notamment présentées par [Dionnet05, Driesen05].

En adoptant à nouveau la configuration de la Fig. 4.5, selon laquelle les angles  $\alpha$  et  $\phi$  représentent l'orientation relative «préhenseur - substrat» et la direction du retrait, la condition de glissement à l'interface «objet-préhenseur» s'écrit :

$$F|\cos(\alpha + \phi)| > G_p \text{ avec } G_p = \mu_p(A_p - F \sin(\alpha + \phi)) \quad (4.10)$$

La force nécessaire à provoquer le glissement à l'interface s'exprime donc par :

$$F > \frac{\mu_p A_p}{|\cos(\alpha + \phi)| + \mu_p \sin(\alpha + \phi)} \quad (4.11)$$

Il en va de même à l'interface «objet - substrat», en posant  $\alpha = 0$  dans l'expression (4.11). La force minimale détermine l'interface qui glisse la première. De la même manière que pour la condition de détachement, une condition de glissement peut être élaborée selon la valeur du rapport d'adhésion  $\Gamma$  :

$$\Gamma_{Glissement} = \left( \frac{\mu_S}{\mu_P} \frac{|\cos(\alpha + \phi)| + \mu_P \sin(\alpha + \phi)}{|\cos \phi| + \mu_S \sin \phi} \right)^2 \quad (4.12)$$

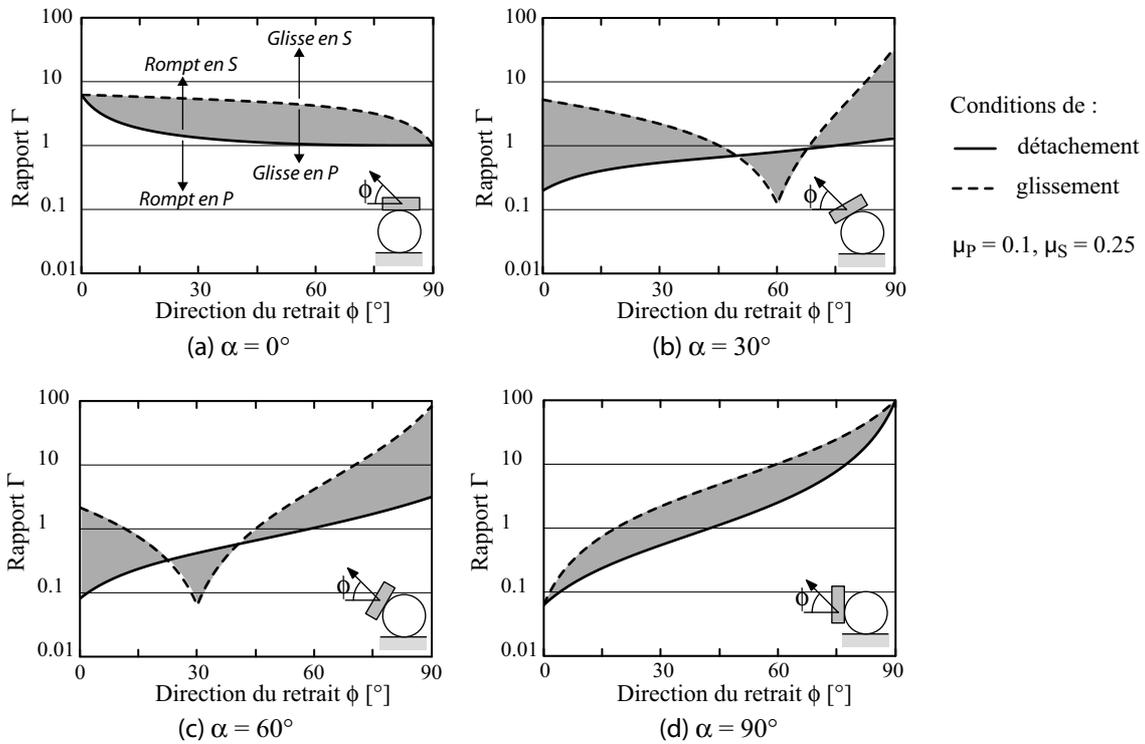
Pour une situation donnée des angles  $\alpha$  et  $\phi$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Glissement à l'interface objet-substrat : } \Gamma > \Gamma_{Glissement} \\ \text{Glissement à l'interface objet-préhenseur : } \Gamma < \Gamma_{Glissement} \end{array} \right.$$

Un faible coefficient de frottement au niveau de l'interface objet-préhenseur ( $\mu_p$ ) augmente la condition limite et tend donc à favoriser la dépose. Le coefficient de frottement à l'interface objet-substrat ( $\mu_s$ ) a l'effet inverse et facilite ainsi logiquement plutôt la prise. Leur effet est donc bien similaire à celui des énergies d'adhésion aux interfaces. En comparaison de la condition de détachement, où l'influence du frottement est marquée surtout lors d'efforts tangents à l'interface, la variation des coefficients de frottement influence la condition de glissement quelle que soit l'orientation.

En comparant les conditions de détachement et de glissement selon les orientations du préhenseur et la direction du retrait (Fig. 4.6), il apparaît des zones où glissement et détachement ne se produisent pas sur la même interface simultanément. La disposition de ces zones varie en fonction des coefficients de frottement aux interfaces. En règle générale, une différence très marquée entre les forces aux interfaces, soit un rapport  $\Gamma$  proche de 100 (respectivement de 0.01), permet de maintenir les opérations clairement en état de prise (respectivement de dépose). En réalité, il n'est pas aisé d'obtenir de telles conditions. Il est donc important de déterminer le plus précisément possible les conditions limitant ces zones dites d'incertitude.

Cet effet incite donc à une réflexion sur la fiabilité des opérations dans ces zones, puis, en analysant le comportement de l'objet, sur le positionnement attendu lors du transfert. Par la suite, les seuils des forces à chaque interface sont étudiés dans le but de déterminer plus finement les configurations permettant un transfert fiable ainsi que celles permettant a priori d'atteindre les meilleures performances en positionnement.



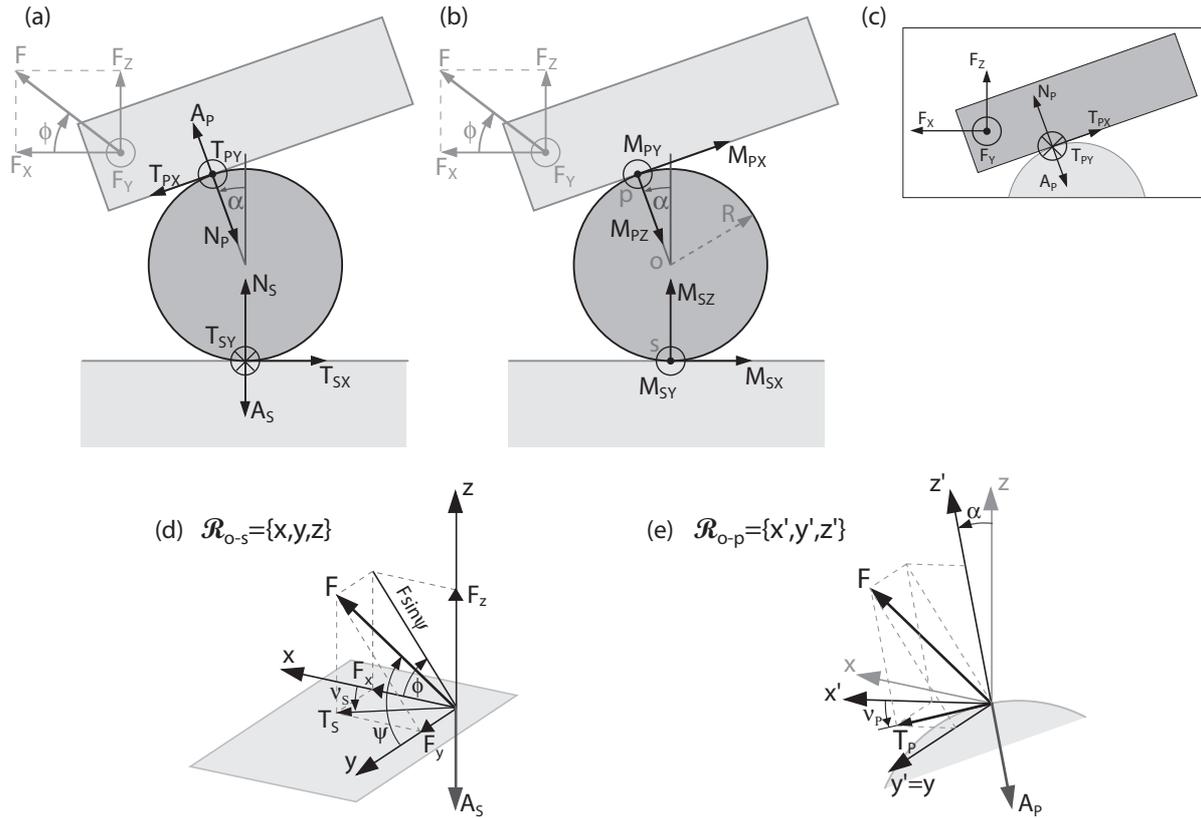
**Figure 4.6 :** Comparaison de l'évolution des conditions de détachement et de glissement selon la direction du retrait pour un préhenseur orienté de (a)  $0^\circ$  (horizontal), (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$  (vertical).

### 4.2.3 EXPRESSIONS GÉNÉRALES DES EFFORTS AUX INTERFACES

Les conditions générales limitant les opérations de prise et de dépose ont été présentées précédemment. Nous nous intéressons dès lors à savoir comment se comporte l'objet (supposé sphérique) sous l'effet des mouvements du préhenseur et donc des forces externes induites. La situation optimale en terme de positionnement lors de la dépose voudrait que le mouvement du préhenseur induise uniquement le glissement au contact de l'objet sans engendrer de roulement ou de glissement au substrat.

L'inclinaison, voulue ou non, des points de contact par rapport au mouvement peut néanmoins perturber le positionnement bien qu'elle puisse aussi rendre plus aisée l'une ou l'autre des opérations. Il est donc intéressant de se pencher sur l'influence de l'alignement entre les plans du substrat, du préhenseur et les axes du manipulateur, ainsi que sur les combinaisons optimales des efforts externes. Les conditions de détachement, de glissement et de roulement aux interfaces sont tout d'abord explicitées, puis le comportement de l'objet sera analysé selon les configurations.

Pour la situation schématisée en Fig. 4.7, on cherche à savoir comment se comportera une bille sous l'action d'une force externe  $F$  typiquement exercée par le manipulateur lors du retrait. Suivant la combinaison de cette force  $F$  et des forces d'adhésion  $A_S$  et  $A_P$  la bille peut se trouver en situation de glissement à chacune des interfaces ou de roulement, voire de pivotement, avant de se détacher de l'une des interfaces. Les forces  $T_{SX}$ ,  $T_{SY}$  ( $T_{PX}$ ,  $T_{PY}$ ) et  $N_S$  ( $N_P$ ) sont les réactions tangentielles et normales agissant à l'interface «substrat-objet» (respectivement «préhenseur-objet»). Enfin, les moments  $M_{SX}$ ,  $M_{SY}$  et  $M_{SZ}$  ( $M_{PX}$ ,  $M_{PY}$  et  $M_{PZ}$  respectivement) sont générés par les efforts tangents aux interfaces et peuvent induire le roulement et le pivotement à chacune des interfaces.



**Figure 4.7 :** Disposition **(a)** des forces ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $N$ ) et **(b)** des moments ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ), agissant sur l'objet à chaque interface lors du transfert, sous l'effet de la force  $F=(F_x, F_y, F_z)$  appliquée lors de la manipulation et des forces d'adhésion  $A_p$  et  $A_s$ . **(c)** Sous-ensemble préhenseur. **(d)** Référentiel  $\mathfrak{R}_{o-s}$  lié au substrat. **(e)** Référentiel  $\mathfrak{R}_{o-p}$  incliné d'un angle  $\alpha$  et lié au contact objet-préhenseur.

Le référentiel  $\mathfrak{R}_{o-s}$  étant défini par le plan du substrat, la force  $F$  agissant lors du retrait du préhenseur s'écrit :

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} \sin \psi \cos \phi \\ \cos \psi \\ \sin \psi \sin \phi \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

En situation statique, les forces agissant sur l'objet selon la Fig. 4.7 permettent d'établir les équations à l'équilibre suivantes :

$$\begin{cases} 0 = T_{SX} - A_p \sin \alpha + N_p \sin \alpha - T_{PX} \cos \alpha \\ 0 = T_{SY} - T_{PY} \\ 0 = N_s - A_s - N_p \cos \alpha + A_p \cos \alpha - T_{PX} \sin \alpha \end{cases} \quad (4.14)$$

En considérant le sous-ensemble préhenseur-objet (Fig. 4.7 (c)), les réactions normales et tangentielles s'expriment en fonction des forces externes par :

$$\begin{cases} T_{PX} = F_x \cos \alpha - F_z \sin \alpha = F \sin \psi \cos(\alpha + \phi) \\ T_{PY} = F_y = F \cos \psi \\ N_p = A_p - F_x \sin \alpha - F_z \cos \alpha = A_p - F \sin \psi \sin(\alpha + \phi) \end{cases} \quad (4.15)$$

permettant ainsi d'expliciter les réactions au substrat :

$$\begin{cases} T_{SX} = F_x = F \sin \psi \cos \phi \\ T_{SY} = F_y = F \cos \psi \\ N_s = A_s - F_z = A_s - F \sin \psi \sin \phi \end{cases} \quad (4.16)$$

### 4.2.3.1 Seuil de détachement

La force minimale provoquant le détachement de l'objet de la surface du préhenseur ou du substrat s'obtient par la projection des forces d'adhésion et de frottement sur la force  $F$ . Ainsi le seuil de détachement à l'interface  $P$  s'écrit :

$$F > A_P \sin \psi \sin(\alpha + \phi) + \mu_P N_P |\cos v_P \sin \psi \cos(\alpha + \phi) + \sin v_P \cos \psi| \quad (4.17)$$

avec  $N_P = A_P - F \sin \psi \sin(\alpha + \phi)$ . La force de frottement s'oppose directement aux réactions tangentielles dues à  $F$  et définissant un angle  $v_P$  dans le plan tangent à l'interface (Fig. 4.7(e)) :

$$\tan v_P = \frac{\cos \psi}{\sin \psi \cos(\alpha + \phi)} \quad (4.18)$$

On obtient ainsi la seuil de détachement suivant :

$$F > \frac{A_P (\sin \psi \sin(\alpha + \phi) + \mu_P |\cos v_P \sin \psi \cos(\alpha + \phi) + \sin v_P \cos \psi|)}{1 + \mu_P \sin \psi \sin(\alpha + \phi) \cdot |\cos v_P \sin \psi \cos(\alpha + \phi) + \sin v_P \cos \psi|} \quad (4.19)$$

Pour l'interface  $S$ , l'expression du seuil de détachement s'obtient de la même manière et correspond à la situation où  $\alpha = 0$  :

$$F > \frac{A_S (\sin \psi \sin \phi + \mu_S |\cos v_S \sin \psi \cos \phi + \sin v_S \cos \psi|)}{1 + \mu_S \sin \psi \sin \phi \cdot |\cos v_S \sin \psi \cos \phi + \sin v_S \cos \psi|} \quad \text{avec } \tan v_S = \frac{\cos \psi}{\sin \psi \cos \phi} \quad (4.20)$$

### 4.2.3.2 Seuil de glissement

Comme mentionné précédemment (§ 3.6.1), la force de frottement dépend du coefficient de frottement  $\mu$  de manière similaire à l'échelle macroscopique, en tenant compte d'une augmentation de la charge normale due à l'adhésion. Les seuils de glissement aux interfaces  $S$  et  $P$  s'expriment ainsi par :

$$|T_S| > \mu_S N_S \quad \text{et} \quad |T_P| > \mu_P N_P \quad (4.21)$$

En considérant les inégalités (4.21) et les expressions (4.15) et (4.16), les limites de glissement sont définies comme :

$$|T_S| = \sqrt{T_{SX}^2 + T_{SY}^2} = F \sqrt{(\sin \psi \cos \phi)^2 + (\cos \psi)^2} > \mu_S (A_S - F \sin \psi \sin \phi) \quad (4.22)$$

$$|T_P| = F \sqrt{(\sin \psi \cos(\alpha + \phi))^2 + (\cos \psi)^2} > \mu_P (A_P - F \sin \psi \sin(\alpha + \phi)) \quad (4.23)$$

Les forces minimales provoquant le glissement deviennent ainsi :

$$\text{à l'interface } S : F > \frac{\mu_S A_S}{\sqrt{(\sin \psi \cos \phi)^2 + (\cos \psi)^2} + \mu_S \sin \psi \sin \phi} \quad (4.24)$$

$$\text{à l'interface } P : F > \frac{\mu_P A_P}{\sqrt{(\sin \psi \cos(\alpha + \phi))^2 + (\cos \psi)^2} + \mu_P \sin \psi \sin(\alpha + \phi)} \quad (4.25)$$

Lorsque le seuil de glissement est atteint à l'une des interfaces, les réactions à cette interface peuvent dès lors s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} T_X = \mu N \cos v \\ T_Y = \mu N \sin v \\ N = A - F \sin \psi \sin(\alpha_0 + \phi) \end{cases} \quad \text{avec } \tan v = \frac{\cos \psi}{\sin \psi \cos(\alpha_0 + \phi)} \quad (4.26)$$

où  $\alpha_0 = \alpha$  si le glissement a d'abord lieu à l'interface préhenseur et  $\alpha_0 = 0$  dans le cas de l'interface substrat. Les réactions au niveau de l'interface opposée peuvent être établies par (4.14) et (4.26) et permettent d'y définir le seuil de glissement correspondant.

### 4.2.3.3 Seuils de roulement et de pivotement

Le roulement et le pivotement de l'objet sont possibles sous condition que les moments générés à chaque contact soient supérieurs aux moments résistants maximums de l'interface (§ 3.6.2). Par conséquent, la condition de roulement s'exprime par :

$$|M^R| > M^{Rmax} \text{ avec } M^{Rmax} = c_r a W \quad (4.27)$$

avec  $c_r$  le coefficient de résistance au roulement,  $a$  le rayon de l'aire de contact et  $W$  le travail d'adhésion à l'interface.

La condition de pivotement dépend par contre du coefficient de frottement à l'interface concernée et s'écrit :

$$|M^P| > M^{Pmax} \text{ avec } M^{Pmax} = 2a\mu N \quad (4.28)$$

avec  $\mu$  le coefficient de frottement et  $N$  la force normale à l'interface.

Les moments de roulement et de pivotement peuvent s'exprimer par les composantes tangentielles et normales à chaque interface et décrites à la Fig. 4.7(b). Les moments induisant le roulement correspondent alors aux composantes tangentielles et s'expriment en conséquence par  $M_P^R = \sqrt{M_{PX}^2 + M_{PY}^2}$  et  $M_S^R = \sqrt{M_{SX}^2 + M_{SY}^2}$ . Les composantes normales aux interfaces interviennent par contre uniquement dans le pivotement, d'où :  $M_P^P = M_{PZ}$  et  $M_S^P = M_{SZ}$ .

Toujours en régime statique, la somme des moments agissant sur l'objet, de rayon  $R$ , résulte des forces tangentes à chaque interface, de telle sorte que :

$$\sum \vec{M} = \vec{op} \wedge \vec{T}_P + \vec{os} \wedge \vec{T}_S = \begin{pmatrix} R \sin \alpha \\ 0 \\ R \cos \alpha \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} T_{PX} \cos \alpha \\ T_{PY} \\ -T_{PX} \sin \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -T_{SX} \\ -T_{SY} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

On en déduit les expressions suivantes :

$$\begin{cases} R \cdot (T_{SY} + T_{PY} \cos \alpha) = M_{SX} + M_{PX} \cos \alpha + M_{PZ} \sin \alpha \\ R \cdot (T_{SX} + T_{PX}) = M_{SY} + M_{PY} \\ R \cdot T_{PY} \sin \alpha = M_{SZ} + M_{PX} \sin \alpha - M_{PZ} \cos \alpha \end{cases} \quad (4.30)$$

Les moments résistants maximums étant proportionnels aux rayons des contacts ( $a_P$  et  $a_S$ ), on suppose que les moments générés le sont aussi [Saito01]. En respectant les expressions (4.30), les moments à chaque interface peuvent dès lors s'exprimer sous la forme suivante :

$$\begin{cases} M_{PX} = \frac{a_P}{a_S + a_P} R \cdot (T_{PY} + T_{SY} \cos \alpha) \\ M_{PY} = \frac{a_P}{a_S + a_P} R \cdot (T_{SX} + T_{PX}) \\ M_{PZ} = \frac{a_P}{a_S + a_P} R \cdot T_{SY} \sin \alpha \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} M_{SX} = \frac{a_S}{a_S + a_P} R \cdot (T_{PY} \cos \alpha + T_{SY}) \\ M_{SY} = \frac{a_S}{a_S + a_P} R \cdot (T_{SX} + T_{PX}) \\ M_{SZ} = \frac{a_S}{a_S + a_P} R \cdot T_{PY} \sin \alpha \end{cases} \quad (4.31)$$

En introduisant ces expressions dans la condition (4.27) et avec les expressions des réactions (4.15) et (4.16), les seuils de roulement sans glissement aux interfaces préhenseur et substrat deviennent :

$$\frac{a_P}{a_P + a_S} R \cdot F \sqrt{(\cos \psi (1 + \cos \alpha))^2 + (\sin \psi (\cos(\alpha + \phi) + \cos \phi))^2} > a_P c_{rP} W_P \quad (4.32)$$

$$\frac{a_S}{a_P + a_S} R \cdot F \sqrt{(\cos \psi (1 + \cos \alpha))^2 + (\sin \psi (\cos(\alpha + \phi) + \cos \phi))^2} > a_S c_{rS} W_S \quad (4.33)$$

Ces deux conditions doivent être valides simultanément pour permettre le roulement de l'objet. Ainsi la relation conditionnant la force  $F$  induisant le **roulement sans glissement** de l'objet devient :

$$F \sqrt{(\cos \psi (1 + \cos \alpha))^2 + (\sin \psi (\cos(\alpha + \phi) + \cos \phi))^2} > \frac{a_P + a_S}{R} \max(c_{rS} W_S, c_{rP} W_P) \quad (4.34)$$

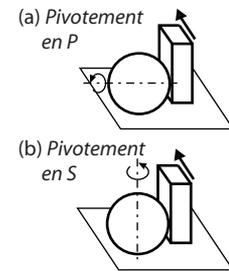
D'autre part, le glissement généré à l'une des interfaces peut être accompagné d'un mouvement de roulement du micro-objet. La force minimale induisant le glissement sur l'une des surfaces et le roulement de l'objet est exprimée par l'introduction des expressions (4.14) et (4.26) dans (4.31). Ce seuil permet de déterminer le type de mouvement de l'objet durant le glissement à l'une des interfaces.

Les expressions de la force nécessaire au **pivotement** sont issues de (4.28) et (4.31) et s'écrivent

$$\text{à l'interface «objet - substrat» : } |T_{PY} \sin \alpha| > \frac{a_S + a_P}{R} 2 \mu_S N_S \quad (4.35)$$

$$\text{à l'interface «objet - préhenseur» : } |T_{SY} \sin \alpha| > \frac{a_S + a_P}{R} 2 \mu_P N_P \quad (4.36)$$

Le pivotement du micro-objet à l'une des interfaces s'accompagne obligatoirement d'un mouvement de roulement ou de glissement sur l'autre interface. L'objet peut alors pivoter au niveau du préhenseur et rouler sur le substrat (Fig. 4.8(a)), d'où la combinaison des expressions (4.33) et (4.36) pour définir le seuil de pivotement au préhenseur. De manière similaire l'objet peut pivoter au niveau du substrat et rouler sur la surface du préhenseur (Fig. 4.8(b)), définissant le seuil de pivotement au substrat par les expressions (4.32) et (4.35). En cas de glissement, les expressions (4.14) et (4.26) permettent de définir l'effort tangentiel à introduire dans les expressions (4.35) et (4.36) et d'exprimer ainsi le seuil de pivotement correspondant.



**Figure 4.8 :** Types de pivotement

#### 4.2.4 COMPORTEMENT DU MICRO-OBJET

Afin d'illustrer le comportement d'un micro-objet sphérique durant un transfert par adhésion, les configurations exposées aux tableaux (4.1) et (4.2) sont utilisées par la suite. Les forces d'adhésion  $A_S$  et  $A_P$  sont calculées par les expressions des forces de pull-off actives aux deux interfaces S et P. Ces forces et les aires de contact correspondantes sont déterminées par les modèles de JKR, DMT ou Maugis-Dugdale exposés précédemment (§ 3.5).

L'étude porte sur le comportement d'une sphère de polystyrène de 50 $\mu$ m de diamètre tout en faisant varier les matériaux aux interfaces, donc en modifiant le paramètre  $\Gamma$ . Les matériaux choisis permettent d'atteindre des valeurs de  $\Gamma$  entre 0.01 et 100. L'influence de la taille et des caractéristiques de l'objet sera ensuite explicitée.

	SILICIUM	VERRE	AVEC COUCHE HYDROPHOBE	POLYSTYRÈNE
Module d'élasticité $E$ [GPa]	140	68	68	3.4
Coef. de Poisson $\nu$	0.17	0.19	0.19	0.39
Masse volumique $\rho$ [ $10^3$ kg/m <sup>3</sup> ]	2.34	2.32	2.32	1.05
Energie de surface $\gamma$ [J/m <sup>2</sup> ]	1.4	0.17	0.015	0.033

**Tableau 4.1 :** Paramètres des matériaux utilisés dans l'analyse des comportements de roulement-glissement.

OBJET	SURFACE	FORCE DE PULL-OFF [ $\mu\text{N}$ ]	RAYON AU CONTACT ( $a(F=0)$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	COEFFICIENT DE FROTTEMENT ( $\mu$ )	RÉSISTANCE AU ROULEMENT ( $c_r$ ) [m]
Polystyrène $\varnothing 50\mu\text{m}$	Silicium	50.64	0.99	0.25	$10^{-4}$
	Verre	17.65	0.70	0.25	$10^{-4}$
	avec couche hydrophobe	5.24	0.47	0.1	$10^{-4}$

Tableau 4.2 : Configurations types utilisées dans cette étude.

#### 4.2.4.1 Zones de prise/dépose et zones d'incertitude

Sur la base de l'évaluation de ces seuils de force, les zones de prise/dépose avec ou sans roulement sont extraites. Cette démarche met aussi en évidence des zones d'incertitude. Elles correspondent aux situations où le retrait induit le glissement aux deux interfaces successivement avant d'atteindre un seuil de détachement. Le résultat de l'opération est dès lors incertain. Une fois l'objet glissant aux deux interfaces, son positionnement n'est par ailleurs plus du tout contrôlé.

La Fig. 4.9(a) illustre la situation d'un préhenseur incliné de  $\alpha = 40^\circ$ . Selon la direction  $\phi$  du retrait, quatre zones de prise ou de dépose apparaissent. Entre chacune d'elles, le glissement est induit successivement aux deux interfaces. La stratégie de transfert varie de l'une à l'autre zone :

- Les deux zones extrêmes (1 et 4) représentent un transfert par cisaillement de l'interface. Le mouvement est tangent à l'interface à rompre. Dans ce cas le transfert ne sera effectif que lorsque toute la surface (du préhenseur ou du substrat) aura glissé sur l'objet : il s'agit donc «d'éliminer» physiquement l'interface. L'une des interfaces est en phase de rupture alors que le contact est assuré, sinon forcé, à l'autre interface.

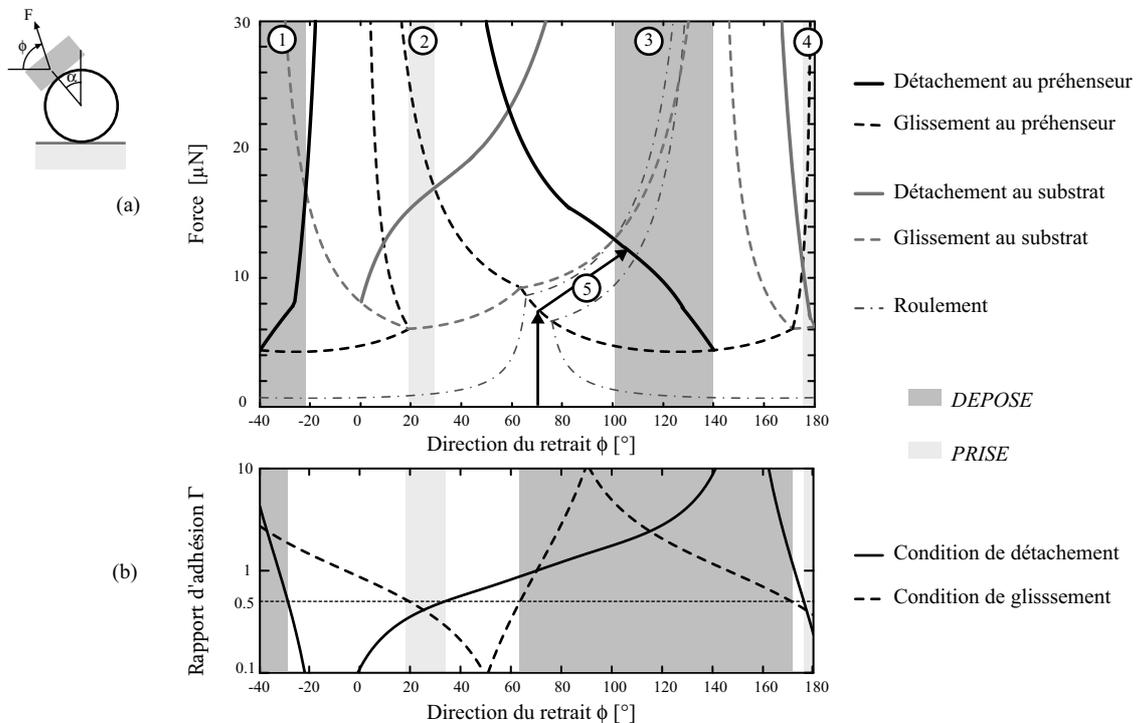


Figure 4.9 : (a) Comportement, et mise en évidence des zones de prise et de dépose à perturbation minimale, d'une bille de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  entre deux surfaces planes pour  $\Gamma = 0.5$ ,  $\mu_P = \mu_S = 0.25$  et une orientation du préhenseur de  $\alpha = 40^\circ$  selon la direction  $\phi$  du retrait ( $\psi = 90^\circ$ ); (b) conditions de détachement (4.9) et de glissement (4.12) pour la même orientation ( $\alpha = 40^\circ$ ).

- Les zones 2 et 3 sont par contre caractérisées par la rupture d'une interface (ou détachement) qui intervient en opposition à l'adhésion à l'autre interface et qui permet d'induire effectivement le transfert.

Toutes ces zones induisent par contre le roulement de l'objet. Pour autant que l'on puisse mesurer et contrôler précisément la force au retrait, une prise sans roulement pourrait être obtenue en se restreignant au chemin 5. Cette stratégie nécessiterait de contrôler l'amplitude de la force et l'orientation du retrait.

Par rapport aux conditions de détachement (4.9) et de glissement (4.12) introduites au début de cette discussion, les zones obtenues en étudiant les efforts aux interfaces et surtout en tenant compte des effets de glissement successifs restreignent les zones de prise et de dépose. La Fig. 4.9 (a) et (b) permet de comparer ces zones selon les deux modèles.

### Influence de $\Gamma$

L'influence du rapport d'adhésion  $\Gamma$  est illustrée à la Fig. 4.10. Comme mentionné précédemment, une grande différence d'adhésion entre les deux interfaces permet d'optimiser les opérations ainsi que le positionnement. La sensibilité aux efforts résiduels ou à la direction du retrait diminue d'autant plus que cette différence d'adhésion est marquée (Fig. 4.10(f)).

L'intérêt d'une configuration où les énergies d'adhésion sont plus proches peut résider dans le fait qu'elles permettent d'effectuer les deux opérations, soit la prise et la dépose, en modifiant l'inclinaison de l'outil et/ou la direction du retrait (Fig. 4.10(b)). Les performances en positionnement sont bien sûr affectées, mais en choisissant judicieusement ces paramètres, l'une au moins des opérations peut être optimisée.

La configuration de la Fig. 4.10 correspond à un retrait toujours perpendiculaire au préhenseur. La force au retrait s'oppose donc toujours à l'entier de la force d'adhésion à l'interface P alors que le glissement peut intervenir à l'interface S. Les opérations de prise y sont donc favorisées. Cette représentation permet, outre de spécifier les orientations et l'influence de  $\Gamma$ , de déterminer la tolérance au niveau de l'alignement du substrat. Ainsi pour  $\Gamma = 0.01$  et un retrait vertical ( $\phi = 90^\circ$ ), une erreur d'alignement de près de  $30^\circ$  est admise au niveau du substrat sans induire le roulement de l'objet, alors que pour  $\Gamma = 0.09$ , elle se réduit à  $7^\circ$  (Fig. 4.10(b-c)).

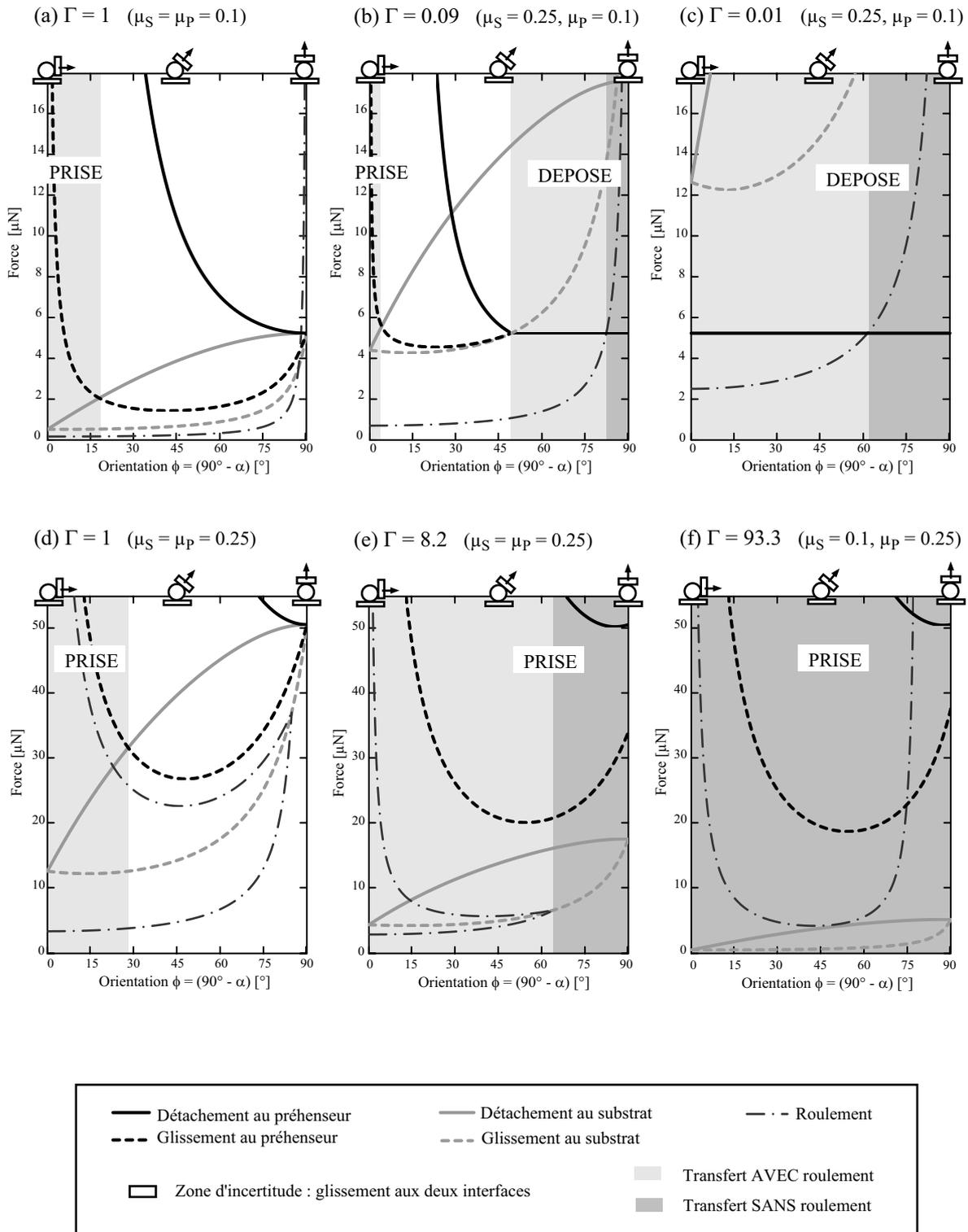
La situation d'un retrait toujours perpendiculaire au substrat correspond exactement à inverser les deux interfaces de la situation précédente. Cette configuration favorise alors la dépose. Les graphiques correspondants sont reportés à l'annexe B, ainsi que les cas intermédiaires des valeurs de  $\Gamma$  possibles pour les diverses combinaisons de matériaux du tableau (4.2).

### Effort tangentiel - effet de pivotement

Un effort tangentiel ( $\psi < 90^\circ$ ) lors du retrait engendre l'abaissement des seuils de glissement aux interfaces et l'apparition du pivotement de l'objet au niveau du préhenseur ou du substrat. Pour une faible inclinaison du préhenseur, le comportement de l'objet est similaire lors de retraits latéraux ( $\phi = 0^\circ$ ) ou tangentiels ( $\psi = 0^\circ$ ) en ce qui concerne les possibilités de transfert. Le roulement s'accompagne par contre du pivotement de l'objet en présence d'une composante tangentielle au retrait. Les inclinaisons plus importantes du préhenseur sont discutées dans la section des micropinces (§ 4.3).

### Influence des caractéristiques de l'objet

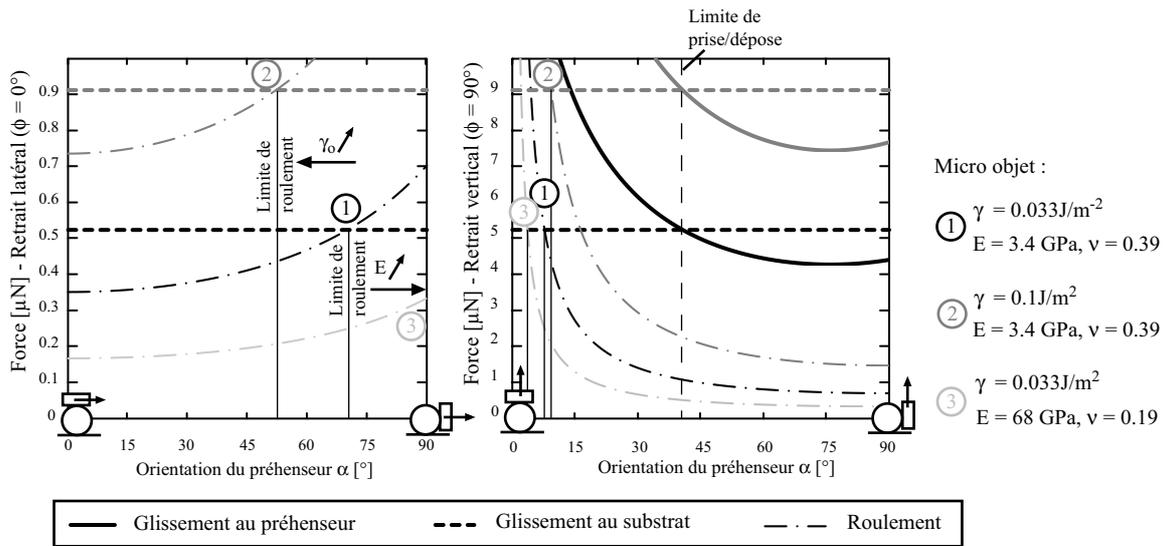
Sous l'hypothèse de configurations identiques aux deux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat», les caractéristiques de l'objet manipulé n'ont pas été prises en considération dans l'évaluation des conditions limites, si ce n'est au travers des coefficients de frottement. Les forces nécessaires à rompre l'interface d'adhésion sont par contre influencées par l'objet, mais leur rapport ( $\Gamma$ ) reste identique.



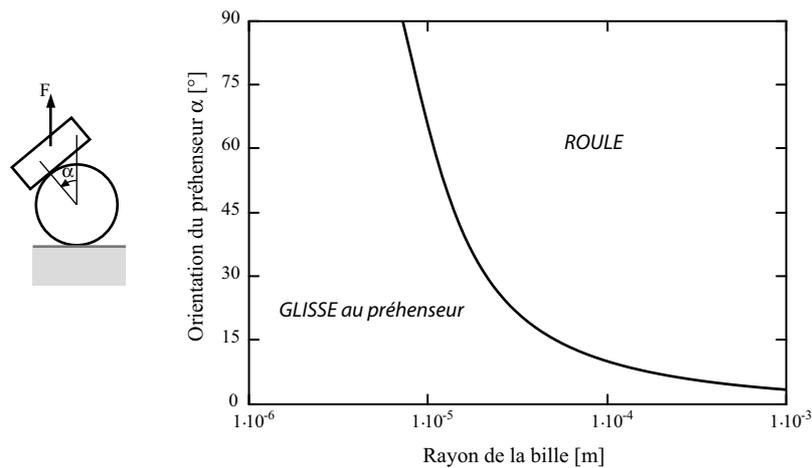
**Figure 4.10 :** Comportement d'une bille de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  lors d'un retrait perpendiculaire à l'interface P (soit pour  $\phi = 90^\circ - \alpha$ ) pour différents couples de matériaux aux interfaces.

L'augmentation de l'énergie d'adhésion de l'objet ( $\gamma_o$ ) provoque l'accroissement des seuils de glissement sans modifier les limites de prise/dépose (Fig. 4.11). La faisabilité des opérations n'est alors pas modifiée. Au niveau du positionnement, l'augmentation de l'énergie d'adhésion ( $\gamma_o$ ) favorise un transfert sans roulement. Au contraire, l'utilisation d'un objet plus rigide réduit les déformations au contact, diminuant ainsi le seuil de roulement, ce qui favorise les transferts avec roulement au détriment des zones de glissement pur.

Les seuils de glissement dépendent directement de l'adhésion à l'interface et varient donc linéairement avec le rayon de l'objet. Les seuils de roulement et pivotement dépendent par contre du rayon selon sa racine cubique<sup>3</sup>. Par conséquent, lorsque la taille de l'objet manipulé diminue, les seuils de glissement varient plus rapidement que les seuils de roulement. Les zones de glissement deviennent donc plus importantes (Fig. 4.12). Ainsi, plus leur rayon est faible, moins les objets auront tendance à rouler.



**Figure 4.11 :** Influence des caractéristiques du micro-objet sur les seuils de glissement et roulement pour une bille de 50 $\mu\text{m}$  de diamètre : variation de l'énergie d'adhésion ( $\gamma$ ) et de la rigidité de l'objet ( $E$  et  $\nu$ ) ( $\Gamma = 11.3 : \gamma_P = 0.17\text{J/m}^2, \gamma_S = 0.015\text{J/m}^2; \mu_P = 0.25, \mu_S = 0.1$ ).



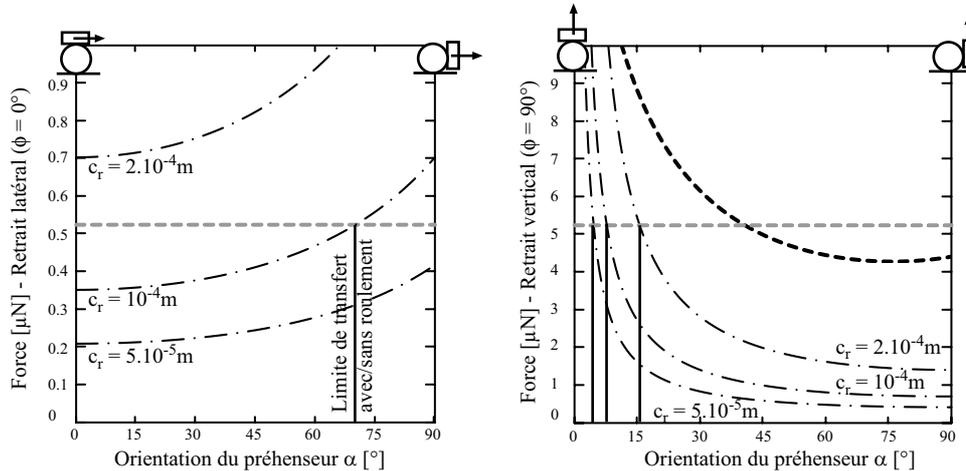
**Figure 4.12 :** Influence du rayon du micro-objet sur les seuils de glissement et roulement pour un retrait normal au substrat ( $\phi = 90^\circ$ ) selon l'orientation  $\alpha$  du préhenseur : avec l'augmentation de la taille, les objets auront de plus en plus tendance à rouler ( $\Gamma = 0.12 : \gamma_P = 0.17\text{J/m}^2; \gamma_S = 1.4\text{J/m}^2, \mu_P = \mu_S = 0.25$ ).

3. En se basant sur le modèle de [Stolarski90], la résistance au roulement est proportionnelle au produit du rayon de l'objet et d'un facteur énergétique. Dans cette étude, on considère l'évaluation faite par [Saito02] pour déterminer l'ordre de grandeur de la résistance au roulement tout en conservant l'évolution de sa valeur avec le rayon de l'objet. Ainsi d'après l'expression (4.34), la relation entre le seuil de roulement et le rayon devient :  $F \propto \frac{a}{R} c_{r(R_0)} \frac{R}{R_0} \propto R^{1/3}$

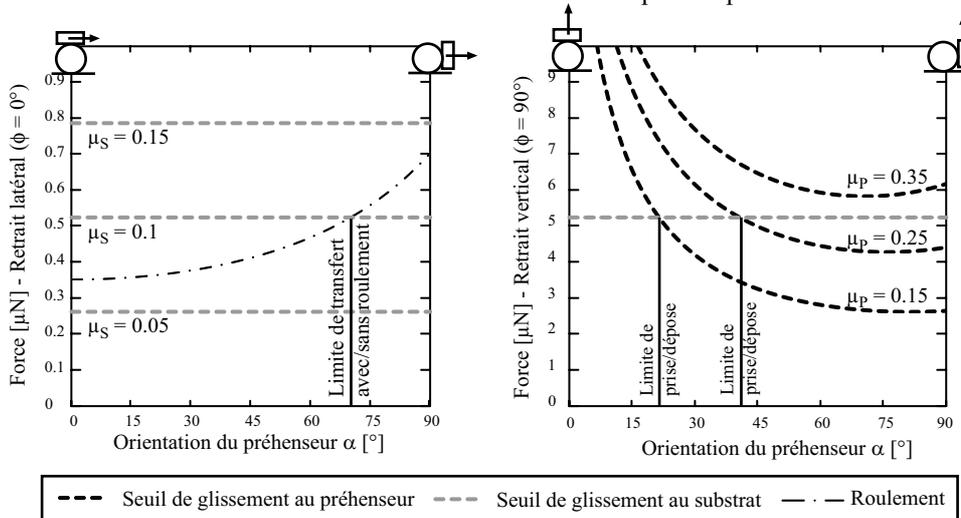
### Influence des résistances au frottement et au roulement

La sensibilité des seuils aux valeurs des paramètres de frottement et de roulement est décrite à la Fig. 4.13. La variation des coefficients de frottement provoque un changement de régime dans les possibilités de transfert de l'objet, ainsi qu'une modification des plages de transfert avec ou sans roulement. L'augmentation de la résistance au roulement  $c_r$  accroît le seuil de roulement. Les zones de prise/dépose n'en sont pas affectées, mais les plages de transfert sans roulement s'élargissent.

(a) Influence de la résistance au roulement  $c_r$  sur les limites de transferts avec/sans roulement



(b) Influence des coefficients de frottement  $\mu_S$  et  $\mu_P$  sur les limites de transferts avec/sans roulement et de prise/dépose



**Figure 4.13 :** Influence des valeurs (a) de résistance au roulement  $c_r$ , et (b) des coefficients de frottement  $\mu_S$  et  $\mu_P$  sur le comportement du micro-objet pour des retraits latéraux et verticaux ( $\Gamma = 11.3$  ;  $\gamma_P = 0.17J/m^2$ ,  $\gamma_S = 0.015J/m^2$ ).

### Géométrie des interfaces

Les configurations présentées concernent toutes une bille transférée entre deux surfaces planes. En pratique il est nécessaire d'utiliser une surface de contact la plus réduite possible au niveau du préhenseur de manière à ne pas interférer avec les objets alentours. L'utilisation d'un préhenseur à embout sphérique permet, en plus d'une meilleure accessibilité, de modifier l'orientation du point de contact par contrôle de la position et donc sans autre actionneur. Par contre, les effets d'adhésion décroissent à l'interface préhenseur avec la diminution du rayon équivalent au contact, induisant de même une diminution du rapport  $\Gamma$  (voire l'expression (4.3)).

#### 4.2.4.2 Actions sur $\Gamma$ et donc sur les zones de prise/dépose

La manipulation par adhésion, pour être fiable, nécessite donc un rapport des forces d'adhésion  $\Gamma$  aux interfaces le plus grand possible pour la prise et le plus petit possible pour la dépose. Plusieurs éléments peuvent modifier  $\Gamma$  dont :

- les matériaux utilisés aux interfaces, ainsi que les diverses couches déposées, dont notamment celles aux propriétés hydrophobes;
- la géométrie de la surface de contact : la diminution du rayon au niveau du préhenseur décroît la force d'adhésion;
- la présence d'une couche liquide sur l'une (ou les) surface va augmenter l'adhésion du fait de la force de capillarité;
- les imperfections des surfaces, que ce soit la rugosité, la présence d'une impureté, une surface abîmée ou fissurée, ou encore des phénomènes d'oxydation, modifient parfois de manière très importante les effets d'adhésion.

Une autre alternative consiste à optimiser une seule des opérations d'adhésion puis à intégrer au préhenseur un autre principe de manipulation tel que par exemple une prise par serrage, l'attraction d'un champ électrique ou magnétique, une différence de pression, l'effet d'une vibration, de l'inertie, ...

#### 4.2.5 CARACTÉRISTIQUES D'UNE PRÉHENSION PAR ADHÉSION

La manipulation par adhésion nécessite les caractéristiques suivantes afin de permettre des opérations fiables et répétables :

- une différence maximale des forces d'adhésion entre les deux interfaces, mais un rapport qui s'inverse entre les opérations de prise et de dépose;
- un préhenseur présentant une surface de contact maximale pour augmenter l'adhésion tout en garantissant un encombrement minimal afin de ne pas perturber les éléments entourant l'objet à manipuler (optimisation de la prise);
- un contrôle de l'orientation du contact afin d'utiliser la stratégie de retrait la plus efficace ou de corriger l'inclinaison pour atteindre les zones de transfert sans roulement;
- L'application d'une force trop importante peut provoquer, en plus d'un mouvement non désiré, une déformation plastique aux contacts. Une mesure des forces exercées au niveau du micro-objet permet d'induire des perturbations minimales. Pour limiter la déformation et le mouvement, le capteur devrait présenter une résolution inférieure à  $0.1\mu\text{N}$ . Un système passif de limitation des forces peut aussi être utilisé.

### 4.3 DE L'UTILISATION DE PINCES EN MICROMANIPULATION

Principe couramment utilisé pour des objets macroscopiques, les pinces sont aussi largement représentées en micromanipulation. Bien qu'intuitivement facile à appréhender, notamment du fait que quotidiennement expérimenté par les mains de chacun d'entre nous, cet outil est rapidement perturbé en micromanipulation du fait de l'intrusion des effets d'adhésion. Il est question ici de définir les caractéristiques permettant l'utilisation de pinces en micromanipulation en évaluant le comportement d'un objet lors de la dépose. C'est effectivement cette opération qui, devenant un cas spécifique de la manipulation par adhésion, est la plus sensible. La prise est brièvement discutée afin notamment de spécifier les niveaux de force nécessaires.

#### 4.3.1 PRISE PAR SERRAGE

Un des avantages de l'utilisation de pinces réside dans leur capacité de fournir une force importante lors de la prise. Cette caractéristique est nécessaire par exemple pour l'extraction de l'objet d'un logement

ou la cassure d'une liaison pour libérer le composant. Il s'agit par contre d'exercer une force minimale au composant de manière à n'induire qu'une déformation élastique des zones de contact. L'aspect de la plasticité du contact a été abordé au chapitre précédent (§ 3.7). Nous en déduisons, à titre d'ordre de grandeur des forces impliquées, que dans le cas d'une bille de polystyrène de 50 $\mu\text{m}$  de diamètre le domaine élasto-plastique est atteint dès 0.9mN, la déformation devenant plastique à partir de 9mN. Dans le cas d'une bille de 5 $\mu\text{m}$  de diamètre, une force de 150 $\mu\text{N}$  suffit à engendrer une déformation plastique.

Dans le cas d'une pince à deux doigts, la force minimale de serrage est définie par l'adhésion aux interfaces et correspond ainsi à :

$$F = \frac{A_S}{2\mu_P} - \frac{A_P + A_{PM}}{2} \quad (4.37)$$

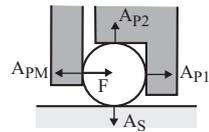
avec  $A_S$  la force d'adhésion au substrat,  $A_P$  et  $A_{PM}$  les forces d'adhésion à chaque doigt du préhenseur (indice  $M$  pour le doigt mobile ou de serrage) et  $\mu_P$  le coefficient de frottement au préhenseur (on suppose  $\mu_P$  identique à chaque contact).

Dans le cas d'une bille de polystyrène de 50 $\mu\text{m}$  de diamètre et d'un préhenseur aux embouts hydrophobes ( $\gamma_P = 0.015\text{J/m}^2$ ) par exemple, la force minimale de serrage (4.37) passe de 20 $\mu\text{N}$  pour un substrat de basse adhésion ( $\gamma_S = 0.015\text{J/m}^2$ ) à 250 $\mu\text{N}$  dans le cas d'un substrat plus adhésif ( $\gamma_S = 1.4\text{J/m}^2$ ).

L'utilisation de pince munie d'éléments de référencement va engendrer plusieurs points de contact au niveau du préhenseur et donc réduire la force de serrage nécessaire à la prise. Deux situations typiques sont d'une part un référencement vertical et d'autre part une rainure de positionnement. En considérant une force d'adhésion présente à chaque zone de contact, la force de serrage s'exprime alors par :

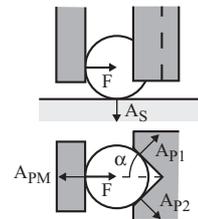
Référencement vertical :

$$F = \frac{A_S - A_{P2}}{2\mu_P} - \frac{A_{P1} + A_{PM}}{2} \quad (4.38)$$



Rainure de positionnement :

$$F = \frac{(A_S/\mu_P) - (A_{P1} + A_{P2} + A_{PM})}{1 + 1/\sin \alpha} \quad (4.39)$$



Dans les expressions ci-dessus, nous n'avons pas considéré d'autres forces que l'adhésion au niveau du substrat. En fonction des applications, les composants peuvent y être retenus par différents moyens de fixations qu'il faut bien sûr considérer.

En fonction de l'adhésion au préhenseur, la force minimale de serrage peut être annulée. Cette situation est assez facilement atteinte dans le cas d'un référencement vertical qui peut fort bien s'apparenter à une prise par adhésion seule si l'adhésion au préhenseur ( $A_{P2}$ ) est aussi importante que celle au substrat. En ce qui concerne la rainure de positionnement, la force de serrage nécessaire diminue avec l'angle d'ouverture  $\alpha$ .

### 4.3.2 DÉPOSE

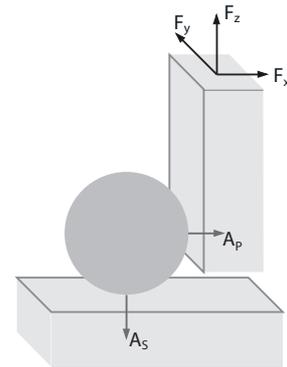
Etant donné les phénomènes d'adhésion, à l'ouverture de la pince, l'objet va simplement adhérer à l'un des doigts. Il s'agit alors d'assurer un contact effectif entre l'objet et le substrat visé en le pressant contre

ce dernier puis à effectuer le retrait du préhenseur. Cette situation devient donc un cas particulier de la manipulation par adhésion qui, en se référant à la Fig. 4.7, correspond à un angle  $\alpha$  de  $90^\circ$ .

L'analyse du comportement d'un micro-objet lors de la dépose se base sur le mode opératoire suivant :

1. centrage de l'objet sur la position désirée,
2. mise en contact avec le substrat,
3. ouverture de la pince,
4. retrait.

Ces mouvements vont induire différents comportements de glissement ou de roulement de l'objet aux interfaces «substrat-objet» et «préhenseur-objet», permettant ou non la dépose. Ils sont conditionnés par les matériaux présents aux interfaces ainsi que par les forces appliquées par le préhenseur. Ces différentes situations sont analysées ci-dessous. Il faut encore remarquer que ces comportements apparaissent indépendamment de l'ordre des opérations, notamment si la mise en contact est effectuée après l'ouverture de la pince.



**Figure 4.14 :** Dépose d'une bille: forces d'adhésion aux interfaces  $A_G$  et  $A_S$ , direction du retrait.

Les mouvements issus du manipulateur sont orientés selon les trois directions XYZ, et il en va donc de même pour les forces exercées par le préhenseur sur l'objet (Fig. 4.14). Pour assurer le contact, un déplacement en Z est donc initié puis l'opération de retrait est effectuée de manière identique à une manipulation par adhésion.

#### 4.3.2.1 Ouverture de la pince - Remarques concernant la conception

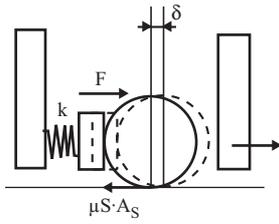
Dans un souci de répétabilité des opérations, l'objet devrait toujours adhérer du même côté de la pince lors de son ouverture. A priori, il devrait se retrouver toujours du côté le plus adhérent. Il serait donc utile de concevoir la pince de telle façon que ses deux doigts n'aient pas les mêmes caractéristiques d'adhésion et que la partie servant de référence mécanique soit aussi la plus adhésive. Néanmoins, une fois au contact du substrat, cette étape est facilitée par l'effet de frottement au substrat. Lors de l'ouverture, l'objet adhérerait au doigt mobile à la condition que :

$$A_{PM} > \mu_S A_S + A_P \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A_P & \text{l'adhésion au doigt fixe} \\ A_{PM} & \text{l'adhésion au doigt mobile} \\ \mu_S A_S & \text{le frottement au substrat} \end{cases} \quad (4.40)$$

Pour des configurations de doigts avec des éléments de référencement, donc plusieurs zones de contact, les effets d'adhésion au niveau du doigt fixe<sup>4</sup> sont évidemment plus importants. En outre, dans le cas d'un référencement vertical, une force d'appui verticale permet d'augmenter la résistance au frottement au substrat et au préhenseur. L'objet sera donc plus aisément conservé au niveau du doigt fixe.

Dans le cas où les deux doigts de la pince sont mobiles, seules une ouverture exactement simultanée et une adhérence identique des deux côtés peuvent garantir que l'objet reste en place. Si tel n'est pas le cas, l'expression (4.40) reste valable dans un premier temps, puis l'objet subit l'équivalent d'un retrait latéral identique à la situation 3 de la Fig. 4.18. Pour les applications recherchant de grandes performances de positionnement, cette configuration n'est donc pas optimale, puisque l'ouverture de la pince va déjà perturber sa position. On pourrait bien sûr ouvrir la pince avant le contact au substrat tout en ayant une asymétrie au niveau de l'adhésion aux doigts du préhenseur. Le composant devrait donc adhérer toujours au même côté, mais le mouvement des doigts induit néanmoins certainement des pertes de référencement de positionnement.

4. Le doigt fixe est toujours considéré comme celui définissant le référencement du composant.



**Figure 4.15 :** *Mouvement de rappel à l'ouverture.*

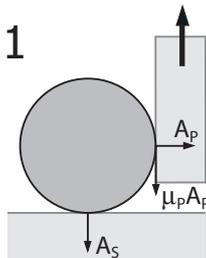
Enfin, il peut aussi arriver que le doigt dit fixe serve en réalité de capteur de force ou encore qu'il soit de faible rigidité. Dans ces circonstances, lors de l'ouverture a lieu un petit déplacement dû à la force de rappel de l'élément élastique qui correspond en fait à la force de serrage. Si cette force est supérieure au frottement au substrat, une erreur de position ( $\delta_{erreur}$ ) sera alors induite à l'objet :

$$\delta_{erreur} = \frac{F - \mu_S A_S}{k} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} F & \text{la force de serrage} \\ k & \text{la rigidité du doigt ou du capteur} \end{cases} \quad (4.41)$$

Dans toutes ces situations, ainsi que dans le cas où l'objet se trouverait adhérer au doigt mobile, une étape de recentrage peut alors être nécessaire. **De manière optimale, il est donc préférable d'utiliser une pince munie d'une référence mécanique rigide et d'un seul doigt mobile.**

### 4.3.2.2 Conditions de réussite de la dépose

Les conditions spécifiant la réussite de la dépose sont établies sur la base de l'expression (4.9). En première évaluation des différents types de retrait, on considère que les erreurs d'alignement et d'orientation sont nulles. L'angle  $\alpha$  vaut alors  $90^\circ$ . Pour les trois configurations principales suivantes, la limite de prise/dépose peut s'écrire en fonction du paramètre  $\Gamma$ , présenté par l'expression (4.2).



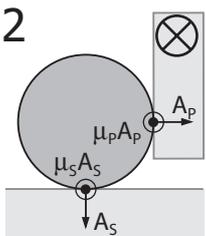
**Figure 4.16 :** *Retrait vertical*

Pour la situation 1, la condition d'une dépose réussie s'exprime par :

$$\mu_P A_P < A_S \quad (4.42)$$

Ce qui correspond pour  $\alpha = 90^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$  à la condition suivante :

$$\Gamma = \frac{\gamma_P}{\gamma_S} < \frac{1}{\mu_P^2} \quad (4.43)$$



**Figure 4.17 :** *Retrait tangent*

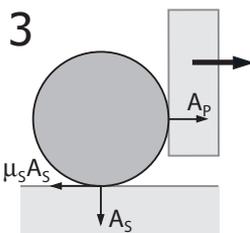
La réussite de la dépose suivant la situation 2 est conditionnée par :

$$\mu_P A_P < \mu_S A_S \quad (4.44)$$

Soit finalement :

$$\Gamma < \frac{\mu_S^2}{\mu_P^2} \quad (4.45)$$

Cette situation n'est pas directement décrite par l'expression (4.9) mais correspond bien au cas où le retrait est tangent aux deux interfaces ( $\alpha = \phi = 0^\circ$ ).



**Figure 4.18 :** *Retrait latéral*

Enfin, la dépose suivant la situation 3 s'exprime par

$$A_P < \mu_S A_S \quad (4.46)$$

et détermine la condition selon les énergies aux interfaces ( $\alpha = 90^\circ$  et  $\phi = 0^\circ$ ) :

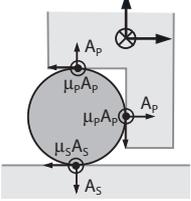
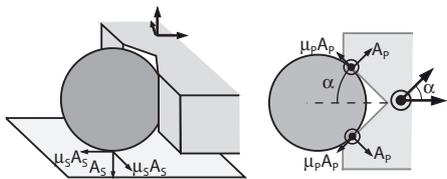
$$\Gamma < \mu_S^2 \quad (4.47)$$

Idéalement, la configuration permettant au mieux les déposes devraient donc présenter un rapport des énergies de surfaces du préhenseur et du substrat ( $\Gamma$ ) le plus petit possible. Le coefficient de frottement au niveau du préhenseur devrait lui-aussi être faible alors qu'un frottement important au substrat tend à favoriser la dépose.

Les coefficients de frottement étant généralement inférieurs à 1, notamment lors de manipulation dans l'air, la situation n°3 (retrait latéral) représente la configuration la plus restrictive concernant le choix des matériaux puisque le ratio  $\Gamma$  devra être inférieur à 1. La situation n°1 (retrait vertical) permet par contre une grande liberté dans les matériaux puisque  $\Gamma$  peut devenir nettement supérieur à 1. La situation n°2 (retrait tangent) ne semble pas trop restrictive en terme de rapport d'adhésion. Elle peut par contre provoquer facilement le pivotement de l'objet et semble donc a priori moins appropriée pour le contrôle du positionnement.

En exemple, imaginons à nouveau la manipulation d'une bille de polystyrène et les matériaux décrits au tableau (4.1), la situation n°3 restreint la manipulation à l'utilisation d'un dépôt hydrophobe au préhenseur et d'un substrat silicium. Cet appariement fournit  $\Gamma = 0.01$ , ce qui permet un coefficient de frottement d'au moins 0.1 au niveau du substrat.

La géométrie du préhenseur va bien sûr aussi influencer les opérations de dépose. De même que pour la configuration simple de préhenseur discutée ci-dessus, la condition de réussite spécifiant le rapport d'adhésion admissible peut s'exprimer en fonction des éléments de référencement mécaniques et du type de retrait. Les cas d'une référence verticale et d'une rainure de positionnement sont exprimés au tableau (4.3).

		
RETRAIT VERTICAL	$A_p + \mu_p A_p < A_s \quad (4.48)$ $\Gamma < \frac{1}{(1 + \mu_p)^2} \quad (4.49)$	$2\mu_p A_p < A_s \quad (4.50)$ $\Gamma < \frac{1}{4\mu_p^2} \quad (4.51)$
RETRAIT TANGENT <sup>A</sup>	$2\mu_p A_p < \mu_s A_s \quad (4.52)$ $\Gamma < \frac{\mu_s^2}{4\mu_p^2} \quad (4.53)$	$A_p(\mu_p + \sin(2\alpha) + \mu_p  \cos(2\alpha) ) < \mu_s A_s \quad (4.53)$ $\Gamma < \frac{\mu_s^2}{(\mu_p(1 +  \cos(2\alpha) ) + \sin(2\alpha))^2} \quad (4.54)$
RETRAIT LATÉRAL	$A_p + \mu_p A_p < \mu_s A_s \quad (4.55)$ $\Gamma < \frac{\mu_s^2}{(1 + \mu_p)^2} \quad (4.56)$	$2A_p(\sin \alpha + \mu_p \cos \alpha) < \mu_s A_s \quad (4.57)$ $\Gamma < \frac{\mu_s^2}{4(\sin \alpha + \mu_p \cos \alpha)^2} \quad (4.58)$

**Tableau 4.3 :** Rapport d'adhésion favorable à la dépose selon la direction du retrait et pour le cas d'une référence verticale et d'une rainure de positionnement.

A. Dans le cas d'une rainure, la condition est donnée pour un retrait exactement tangent à l'une des faces de la rainure.

Un retrait vertical semble donc optimal pour toutes les configurations présentées, mais la présence d'une référence verticale réduit déjà considérablement les rapports d'adhésion admissibles, qui deviennent absolument inférieurs à 1. Notons aussi que pour un angle d'ouverture de  $45^\circ$  de la rainure, les expressions (4.54) et (4.56) sont équivalentes. En réalité le comportement peut être très différent, notamment en présence d'une force d'appui verticale. En présence d'un référencement vertical, le frottement au préhenseur et au substrat sera accru. Pour une rainure, cette force va éventuellement provoquer le glissement au préhenseur, ce qui est plutôt bénéfique à la relâche puisque la contrainte produite aura tendance à faciliter la rupture de l'interface «objet - préhenseur».

Les conditions de réussite de la dépose permettent un premier choix de configuration selon les possibilités de retrait que l'application pourrait dicter. Une seconde restriction peut provenir des performances de positionnement visées lors de la dépose. Pour ceci, nous nous intéressons au comportement de l'objet lors du retrait en définissant les seuils de glissement et de roulement de manière analogue à l'étude de la manipulation par adhésion. Pour que l'objet reste au mieux à la position voulue, la configuration doit permettre le glissement du préhenseur sur l'objet. Une étape de roulement ou de pivotement rend l'opération incertaine notamment quant à la longueur de roulement nécessaire à la dépose et ainsi détériore le positionnement.

#### 4.3.2.3 Comportement de l'objet durant la phase de retrait

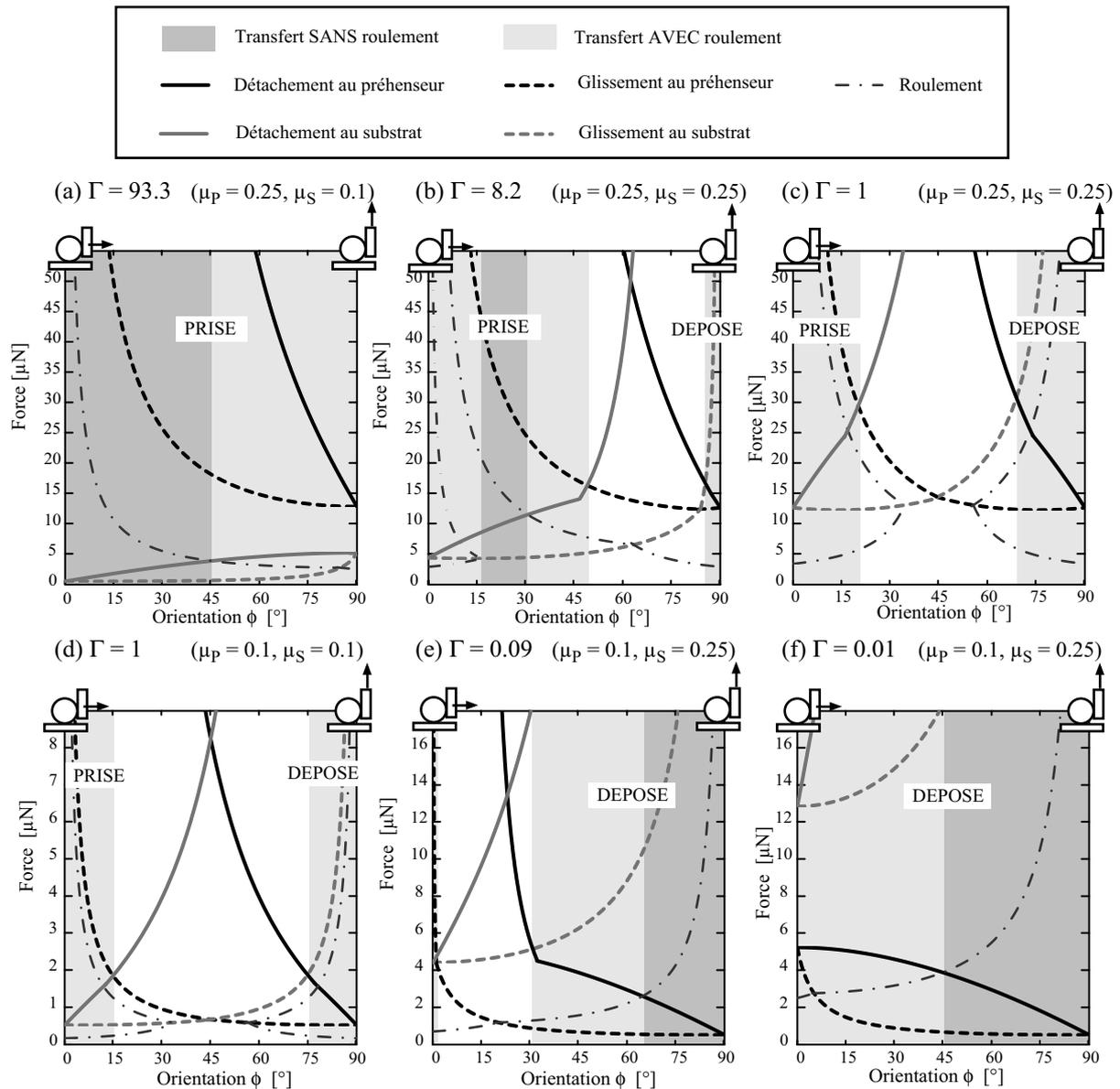
Le comportement de l'objet durant le retrait est évalué selon les seuils présentés au § 4.2.3. Les directions de retrait font référence à la même représentation (Fig. 4.7). On dénote ainsi un retrait latéral par une orientation  $\phi = 0^\circ$  et vertical par  $\phi = 90^\circ$ . La composante tangentielle du retrait s'exprime par l'angle  $\psi$  ( $\psi = 90^\circ$  impliquant une composante nulle). Les différents comportements d'une bille sont illustrés à la Fig. 4.19.

Le retrait vertical permet la dépose pour le plus large intervalle des rapports d'adhésion. Selon (4.43), la condition limite se situe à  $\Gamma = 16$  pour un coefficient de frottement au préhenseur  $\mu_P = 0.25$ , alors que le retrait latéral est limité à  $\Gamma = 0.06$  selon (4.47). Il permet aussi d'atteindre plus rapidement les zones de dépose sans roulement et donc perturbant le moins la position du composant.

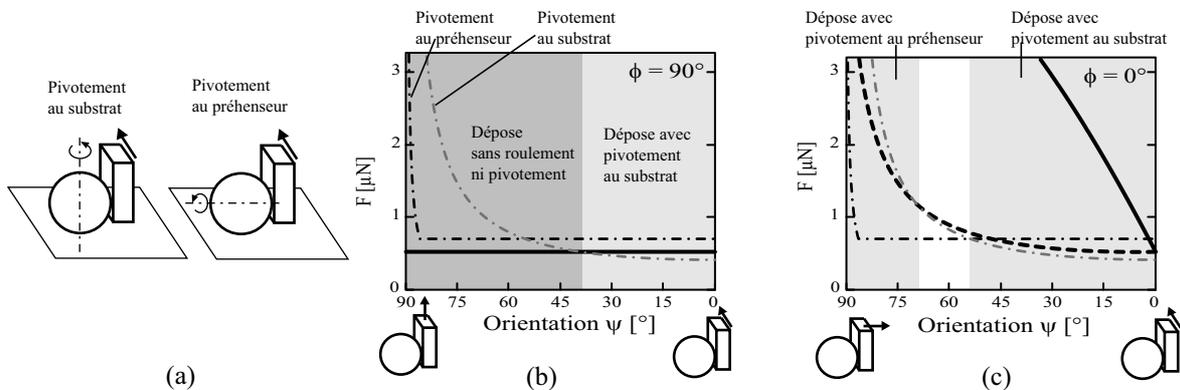
L'application d'un mouvement tangentiel peut induire le pivotement de l'objet, soit au niveau du préhenseur, soit au niveau du substrat (Fig. 4.20 (a)). Le pivotement au substrat est préférable en terme de positionnement en supposant que l'objet pivote effectivement autour de son axe sans autre effet de glissement. Le retrait tangentiel limite la dépose à  $\Gamma = 1$  pour des résistances au frottement identiques aux deux interfaces et à  $\Gamma = 6.25$  dans le cas représenté à la Fig. 4.20 ( $\mu_P = 0.1$  et  $\mu_S = 0.25$ ). Tout comme le roulement, le pivotement n'est pas forcément engendré lors de la dépose. Une forte adhésion au substrat ( $\Gamma$  très faible) va dès lors permettre un retrait latéral sans pivotement ni roulement. Il est intéressant de noter que pour  $\Gamma = 0.01$ , la dépose par un retrait latéral s'accompagne du roulement de l'objet, alors qu'un retrait tangentiel n'induit que le glissement à l'interface sans provoquer le mouvement de l'objet.

Les erreurs de perpendicularité ou d'alignements entre le préhenseur et le substrat ne modifient pas le comportement de l'objet lors de la dépose, mais en perturbent le positionnement. Notamment, le retrait vertical est peu sensible à l'angle  $\alpha$  pour autant que celui-ci soit inférieur à  $90^\circ$ . Dans l'autre cas ( $\alpha > 90^\circ$ ), lors du retrait, un effort latéral est engendré et provoque rapidement le glissement ou roulement sur le substrat. Ainsi, bien qu'étant la direction de retrait la plus efficace, cette stratégie est aussi certainement la plus sensible à l'orientation du contact «objet-préhenseur». Géométriquement, on peut estimer qu'une erreur de position de  $0.22\mu\text{m}$  est obtenue pour une erreur d'alignement de  $1^\circ$  en considérant que le chemin de glissement correspond au demi rayon de l'objet (soit dans notre cas  $12.5\mu\text{m}$ ). Dans le cas d'un retrait tangentiel, l'erreur d'alignement a tendance à induire un pivotement plutôt au substrat ( $\alpha < 90^\circ$ ) ou au préhenseur ( $\alpha > 90^\circ$ ).

Pour un rapport d'adhésion respectant les conditions de réussite ((4.43), (4.45) ou (4.47)), la faisabilité de la dépose n'est pas remise en cause par la taille de l'objet manipulé. Par contre, les objets de petites



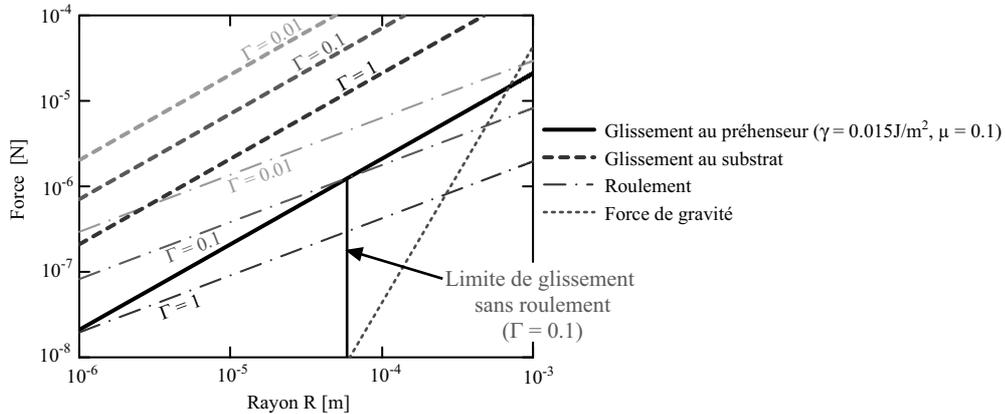
**Figure 4.19 :** Comportement lors du transfert pour différents rapport d'adhésion  $\Gamma$  selon la direction ( $\phi$ ) du retrait ( $\psi = 90^\circ$ ). Le retrait latéral limite la dépose à  $\Gamma = 0.06$  selon (4.47) alors que le retrait vertical induit  $\Gamma = 16$  pour  $\mu_P = 0.25$  et  $\Gamma = 100$  pour  $\mu_P = 0.1$  et d'après (4.43).



**Figure 4.20 :** (a) Description des pivotements au substrat et au préhenseur. Apparition des effets de pivotement selon la direction du retrait ( $\psi$ ) à partir (b) d'un retrait vertical ( $\phi = 90^\circ$ ) et (c) d'un retrait latéral ( $\phi = 0^\circ$ ). La dépose par un retrait tangent limite  $\Gamma$  à 1 pour  $\mu_P = \mu_S$  et à  $\Gamma = 6.25$  pour  $\mu_P = 0.1$  et  $\mu_S = 0.25$ . (Configuration représentée :  $\Gamma = 0.09, \mu_P = 0.1, \mu_S = 0.25$ )

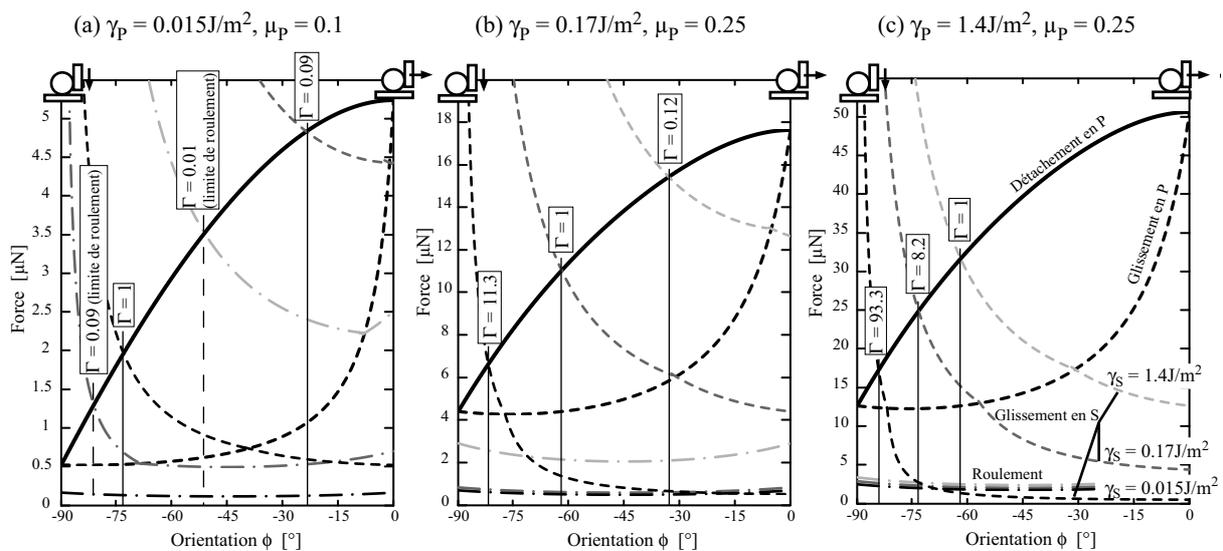
tailles ayant moins tendance à rouler qu'à glisser, leur positionnement en devient mieux contrôlé (Fig. 4.21).

La Fig. 4.21 permet aussi de comparer l'intensité des seuils de glissement avec le poids du composant manipulé lors d'un retrait vertical. La tenue au préhenseur, due simplement au contact et au frottement, est nettement supérieure au poids et ce quasiment jusqu'à des objets de taille millimétrique. L'adhésion au substrat l'est de manière encore plus importante, dénotant qu'effectivement, la gravité peut être négligée à cette échelle et qu'il faut donc absolument assurer le contact au substrat pour provoquer la dépose d'un microcomposant.

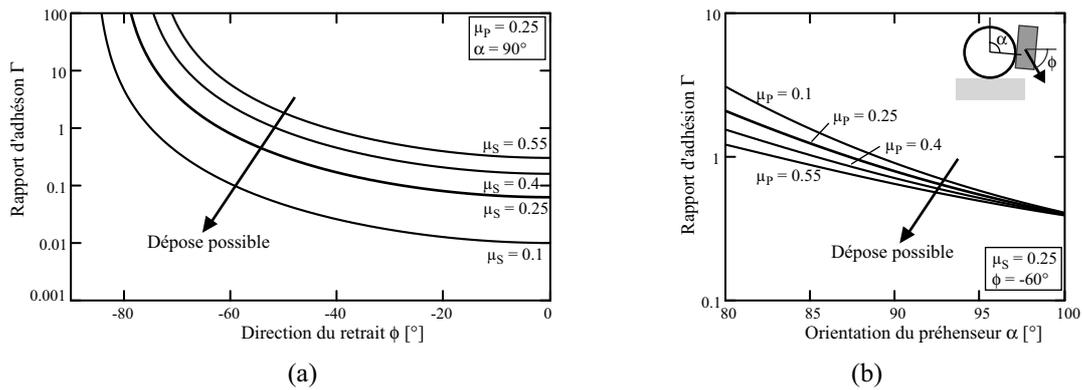


**Figure 4.21 :** Seuils de glissement et roulement selon le rapport d'adhésion  $\Gamma$  pour un retrait vertical ( $\mu_P = 0.1$ ) et selon le rayon de l'objet. La taille de l'objet n'influence pas la réussite de l'opération, mais ses performances en positionnement.

Les situations de retrait discutées jusqu'ici opposaient toujours les deux interfaces au niveau de l'adhésion uniquement. En effectuant un mouvement dirigé vers le substrat jusqu'à être tangent à l'interface «objet - préhenseur» ( $\phi < 0^\circ$ ), le contact «objet - substrat» est assuré, voire forcé, et la dépose peut être effectuée (Fig. 4.22). La direction de ce mouvement est alors bornée par l'orientation du doigt du préhenseur et par la limite de glissement au substrat. Même avec un rapport d'adhésion peu propice à la dépose, ( $\Gamma \gg 1$ ), il subsiste une zone permettant la rupture de l'interface «objet-préhenseur» pour un retrait proche de  $\phi = -90^\circ$ . Pour des rapports d'adhésion suffisamment faibles, ainsi qu'une faible résistance au frottement au préhenseur, cette stratégie permet une dépose sans roulement.



**Figure 4.22 :** Comportement du micro-objet sous l'effet d'un mouvement dirigé vers le substrat avec différents matériaux au préhenseur. Proche de  $\phi = -90^\circ$ , il subsiste une zone de rupture de l'interface «objet-préhenseur» même pour un rapport  $\Gamma$  élevé. Pour de faibles rapports  $\Gamma$ , cette rupture n'induit pas de roulement de l'objet.



**Figure 4.23 :** Rapport d'adhésion limite permettant la dépose **(a)** selon l'orientation  $\phi$  du retrait pour différentes valeurs de résistance au frottement au substrat ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\mu_p = 0.25$ ) et **(b)** selon l'orientation  $\alpha$  du préhenseur et la résistance au frottement au préhenseur ( $\phi = -60^\circ$ ,  $\mu_s = 0.25$ ).

L'angle de retrait (ou le rapport d'adhésion limite correspondant) est très influencé par la résistance au frottement au niveau du substrat (Fig. 4.23). Comme pour toutes les autres stratégies, il est dès lors primordial de favoriser adhésion et frottement à cette interface. La résistance au frottement et l'erreur d'alignement du préhenseur agissent comme un décalage de l'angle maximal de retrait.

De ces différentes directions de retrait, l'utilisation d'un mouvement dirigé vers le substrat est la stratégie la plus permissive du fait qu'elle induit simultanément le contact au substrat et la rupture de l'interface au niveau du préhenseur. Le choix d'une stratégie repose aussi sur la géométrie des interfaces et notamment sur la présence d'éléments de référencement mécanique (voire tableau (4.3)). Tous les mouvements de retrait ne sont bien sûr pas tolérés par la géométrie du préhenseur et/ou du substrat.

### 4.3.3 CARACTÉRISTIQUES D'UNE MICROPINCE

Dans un souci de fiabilité des opérations et de positionnement, l'utilisation de pince en micromanipulation est soumise aux quelques règles et caractéristiques suivantes :

- **Force de serrage** : elle doit bien entendu permettre la prise, c'est-à-dire combattre l'adhésion au substrat ou le mécanisme qui retient le composant, mais son importante limitation provient du fait qu'à cette échelle les pressions de contact deviennent rapidement importantes. La force doit donc être limitée de manière à ne pas engendrer de déformation plastique, et donc à ne pas endommager les surfaces du composant.
- **Taille des doigts** : d'un point de vue pratique, la taille des doigts devrait être comparable ou inférieure à celle des objets manipulés pour faciliter l'accès et ne pas perturber les autres éléments présents sur le substrat (il y a d'ailleurs toujours possibilité de les embarquer accidentellement par adhésion). D'autre part l'épaisseur des doigts ne devrait pas dépasser celle des objets, dans le cas d'une détection optique, afin de limiter les effets d'ombre qui rendent la détection des bords moins précise.
- **Structure de la pince** : en terme de positionnement, mais aussi de fiabilité du procédé, l'utilisation d'une référence mécanique rigide, en l'occurrence un des doigts, permet le positionnement le mieux contrôlé à la dépose.
- **Matériaux** : un rapport d'adhésion  $\Gamma$  le plus faible possible diminue la sensibilité à la direction du retrait. Un faible coefficient de frottement au préhenseur améliore en outre le positionnement, de même qu'une résistance au frottement élevée au niveau du substrat.
- **Retrait et orientation** : le retrait normal au substrat (vertical) est le plus permissif selon la valeur de  $\Gamma$  et ainsi le plus fiable. Concernant le positionnement, celui-ci devrait même permettre des performances optimales, pour autant que l'orientation du contact ne dépasse pas  $90^\circ$ . La précision dépend ensuite de cette orientation et du chemin de glissement sur le préhenseur. La réus-

site d'un retrait latéral est très restrictive ( $\Gamma$  très faible, de l'ordre de 0.01). Cela consolide le fait que l'utilisation de pince à ouverture simultanée des deux doigts n'est pas optimale en terme de positionnement. Enfin dans le cas de rapports d'adhésion très élevés ( $\Gamma \gg 1$ ), la dépose peut être effectuée seulement par un mouvement dirigé vers le substrat ce qui engendre le cisaillement de l'interface «objet - préhenseur».

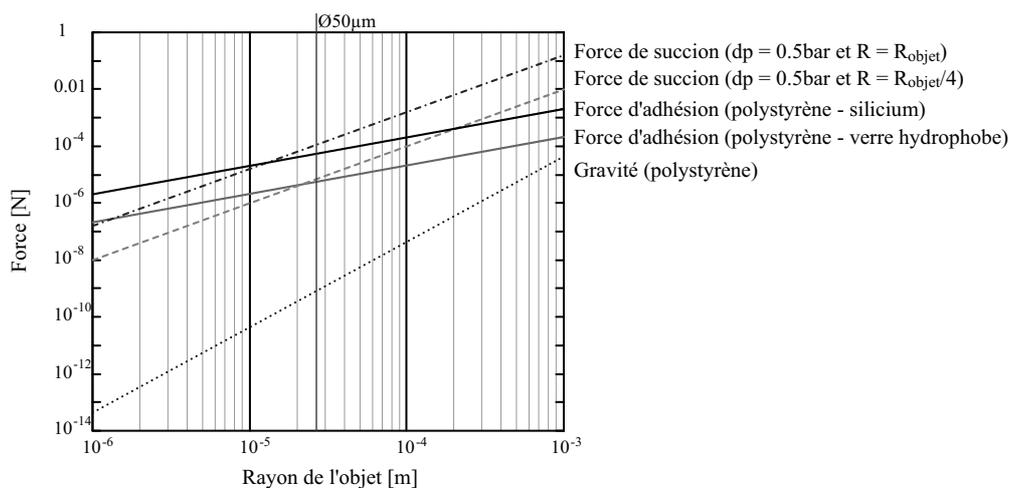
#### 4.4 MICROMANIPULATION VACUUM

L'utilisation du vide, ou succion, est largement exploitée dans la manipulation de composants, alliant faible encombrement et rapidité. Ce principe s'adapte de plus aisément autant à des composants de quelques millimètres qu'à des éléments de très grande taille en modifiant la surface de la zone de prise ou le nombre d'éléments de succion. Pour de petits composants, la surface de prise devient très restreinte. Ceci limite d'une part la force déployable pour la prise d'un composant et d'autre part la possibilité d'obtenir des liaisons de faibles tailles répondant aux contraintes de dimension, forme et connectique.

En réduisant la taille des composants, la succion devient bien supérieure à l'effet de la gravité, mais au delà d'une certaine taille, les effets d'adhésion supplantent aussi ce principe. La Fig. 4.24 représente les différentes amplitudes des forces d'adhésion, de succion et de gravité en fonction du rayon d'une bille de polystyrène. Comme déjà mentionné, la force de gravité est nettement inférieure aux effets d'adhésion pour des objets dont le rayon mesure entre  $1\mu\text{m}$  et  $1\text{mm}$ . La force de succion dépend de la section à laquelle est appliquée la sous-pression.

En considérant un préhenseur dont le rayon de succion représente le quart du rayon de la bille, on remarque qu'une bille de polystyrène de  $20\mu\text{m}$  de rayon ne pourra pas être détachée d'un substrat même peu adhérent sous l'action unique d'une sous-pression de 0.5bar. Pour un substrat plus adhésif, la taille limite dans les mêmes conditions revient à un rayon de  $200\mu\text{m}$ . Ce principe est donc limité à des objets d'au minimum quelques dizaines de microns de rayon. Il faut encore noter que les forces de succion représentées à la Fig. 4.24 ne tiennent pas compte de l'adhésion «objet - préhenseur». Ainsi pour de petits rayons, l'adhésion à cette interface devient plus importante que l'effet de la succion lui-même. Les règles de la manipulation par adhésion sont alors applicables.

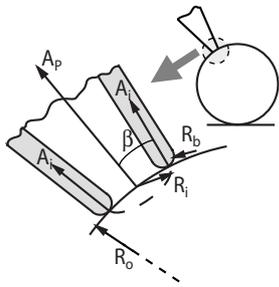
Cette étude comporte trois parties. La première consiste en la modélisation de l'adhésion au préhenseur, qui ne dépend cette fois plus d'un contact unique sphère contre plan. Puis les deux phases de la manipulation, soit la prise et la dépose, sont décrites.



**Figure 4.24** : Comparaison des forces d'adhésion, de gravité et de succion selon le rayon d'une bille de polystyrène : la force d'adhésion (force de pull-off) est représentée pour deux substrats très différents en terme d'adhésion ( $\gamma = 0.015$  et  $1.4 \text{ Jm}^{-2}$ ); la force de succion est donnée pour deux sections différentes, soit l'équivalent de la section maximale de l'objet et le  $16^{\text{ème}}$  de cette section, ce qui correspond mieux à une utilisation réelle (l'adhésion entre objet et préhenseur n'est pas prise en compte).

### 4.4.1 ADHÉSION AU PRÉHENSEUR

Jusqu'ici les contacts aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat» ont été considérés comme étant géométriquement identiques, en admettant toutefois une variation du rayon au contact. Dans le cas de l'utilisation de vacuum, la buse doit logiquement être munie d'un orifice. Le contact avec l'objet est donc a priori de forme linéique. Afin de représenter la force d'adhésion à cette interface sous forme analytique, nous proposons d'exprimer le contact comme celui d'un cylindre sur un plan. D'après l'expression (3.16), cette force correspond à :



$$A_P^{cylindre} = \frac{A^H L}{8\sqrt{2}D^{5/2}} \left( \frac{R_b R_o}{R_b + R_o} \right)^{1/2} \cos \beta \quad (4.59)$$

avec

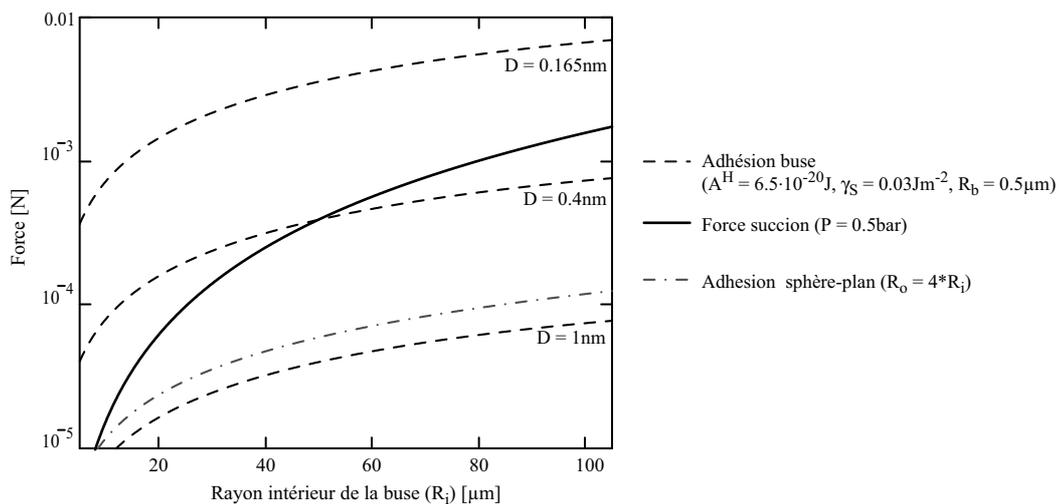
$R_b$ le rayon au préhenseur	$D$ la distance objet-préhenseur
$R_o$ le rayon de l'objet	$A^H$ la constante de Hamaker
$L$ la longueur du contact = $2\pi R_i$	$\sin \beta = R_i / R_o$

**Figure 4.25 :** Géométrie du contact objet - buse.

Au contact, la distance objet - préhenseur ( $D$ ) devrait valoir 0.165nm (§ 3.2.2). Cela suppose que le contact est effectif sur tout le diamètre de la buse. En réalité, le contact avec l'objet est effectif en trois points sur le diamètre de la buse, le reste de la ligne se trouvant proche de l'objet, sans pour autant être en contact. Ainsi la force d'adhésion peut être exprimée comme :

$$A_P = A_P^{cylindre} \Big|_D + 3 \cdot A^{sphere} \Big|_{R_b, R_o} \cos \beta \quad (4.60)$$

où  $D$  peut être ajusté en fonction de la qualité de la surface au contact et  $A^{sphere}$  est la force de pull-off<sup>5</sup> entre deux sphères. La force d'adhésion pour un contact linéique parfait est nettement supérieure à celle du cas sphère sur plan, ainsi qu'à la force engendrée par un vide relatif comme le montre la Fig. 4.26. Mais selon la valeur de  $D$ , l'adhésion peut être du même ordre de grandeur, voire même inférieure si l'on considère trois contacts sphériques nettement distincts du pourtour de la buse<sup>6</sup>.



**Figure 4.26 :** Comparaison de la force de succion en fonction du rayon de la buse ( $R_i$ ) avec la force d'adhésion au préhenseur (buse) selon l'expression (4.60) pour différentes valeurs de  $D$  (0.165 - 0.4 - 1 nm) et dans le cas d'un contact sphère - plan en considérant que l'objet est 4x plus grand que la buse.

5. avec le rayon équivalent  $R = (R_b R_o) / (R_b + R_o)$  au contact.
6. Ce modèle analytique ne tient pas compte des effets de rugosité, hormis si l'on considère pouvoir corriger la force effective par la distance  $D$ . Le but ici est à nouveau de pouvoir représenter les opérations selon un rapport des forces d'adhésion aux interfaces et non d'évaluer avec exactitude l'amplitude des effets d'adhésion.

Cette géométrie pourrait d'ailleurs être créée si on imagine par exemple un enfoncement d'une pointe pyramidale à base triangulaire au niveau de l'orifice de la buse. Le contact serait alors de la forme de trois contacts «sphère sur plan».

#### 4.4.2 SOUS-PRESSION MINIMALE DE PRISE

Deux situations sont à considérer pour la prise selon que le préhenseur soit ou non en contact avec l'objet lors de la rupture de l'interface au substrat. Une aspiration suffisante peut permettre d'attirer l'objet contre le préhenseur, ce qui simplifie grandement la phase d'approche et de positionnement avant la prise du fait que le contact effectif «préhenseur - objet» n'a pas à être assuré. Mais selon la nature du contact au substrat et la taille de l'objet, la force développée par l'aspiration peut ne pas être suffisante. L'ajout de la force d'adhésion à la force d'aspiration peut s'avérer alors indispensable à la prise.

La force  $F_P$  nécessaire pour une prise sans contact préalable avec le préhenseur s'exprime par :

$$F_P > A_S \frac{\cos \alpha + \mu_S |\sin \alpha|}{1 + \mu_S |\sin \alpha| \cos \alpha} \quad (4.61)$$

avec  $\alpha$  l'inclinaison de la buse (ou préhenseur vacuum), qui représente donc la direction de l'aspiration,  $A_S$  la force d'adhésion au substrat et  $\mu_S$  son coefficient de frottement. La sous-pression  $p$  nécessaire à la prise correspond au rapport de la force nécessaire  $F_P$  et de la surface de la buse, décrite par son rayon intérieure  $R_i$ , telle que :

$$p = \frac{F_P}{\pi R_i^2} \quad (4.62)$$

Lorsque le contact «objet - buse» est établi, la sous-pression minimale à exercer est diminuée du fait de l'adhésion à l'interface outil ( $A_P$ ). Selon la direction du retrait décrit par l'angle  $\phi$ , la force  $F_P$  nécessaire à la prise devient alors :

$$F_P > A_S \frac{\cos \phi + \mu_S |\sin \phi|}{\cos(\alpha + \phi) + \mu_P |\sin(\alpha + \phi)|} \frac{1 + \mu_P |\sin(\alpha + \phi)| \cos(\alpha + \phi)}{1 + \mu_S |\sin \phi| \cos \phi} - A_P \quad (4.63)$$

Cette expression correspond à la condition de détachement (4.9) exposée lors de la manipulation par adhésion. La Fig. 4.28 représente l'évolution de la force nécessaire à la prise selon les orientations respectives de la buse ( $\alpha$ ) et du mouvement de retrait ( $\phi$ ). La comparaison avec la sous-pression permettant effectivement la prise dénote de l'apparition de zones où l'adhésion suffit à la prise ( $p < 0$ ) et celle où même un vide parfait ne suffirait pas ( $p > 1 \text{ bar}$ ). Quelle que soit la direction du retrait ( $\phi$ ), la pression minimale de prise correspond à la situation où l'axe de la buse est dans la direction du retrait ( $\alpha = \phi$ ). Etant généralement plus aisé de faire glisser l'objet sur le substrat que de l'en détacher, le pression minimale correspond bien à un retrait parallèle au plan du substrat ( $\phi = 90^\circ$ ) quelle que soit d'ailleurs l'orientation du préhenseur.

Comme on l'a vu ci-dessus, la manipulation par vacuum devient difficile voire impossible lorsque la taille des objets diminue. Il faut alors accroître la taille de la buse pour rendre possible la manipulation et utiliser les orientations optimales de la buse et du retrait pour permettre la prise (Fig. 4.29).

Un des intérêts importants de la manipulation vacuum est de permettre la prise par aspiration simple. Le fait de ne pas avoir à assurer un contact effectif entre le microcomposant et le préhenseur permet surtout de s'affranchir du risque d'induire une force trop importante au micro-objet, risquant alors de l'endommager. Une légère pression étant généralement nécessaire à l'établissement du contact, sa détection à cette échelle n'est possible que par l'utilisation d'un capteur de force. La vision ne nous donnant pas l'information sur toute la surface de contact, il est alors souvent nécessaire d'appliquer de petits mouvements latéraux pour s'assurer du contact ou de limiter la force passivement. Cette opportunité permet

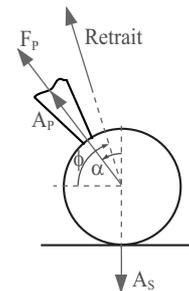
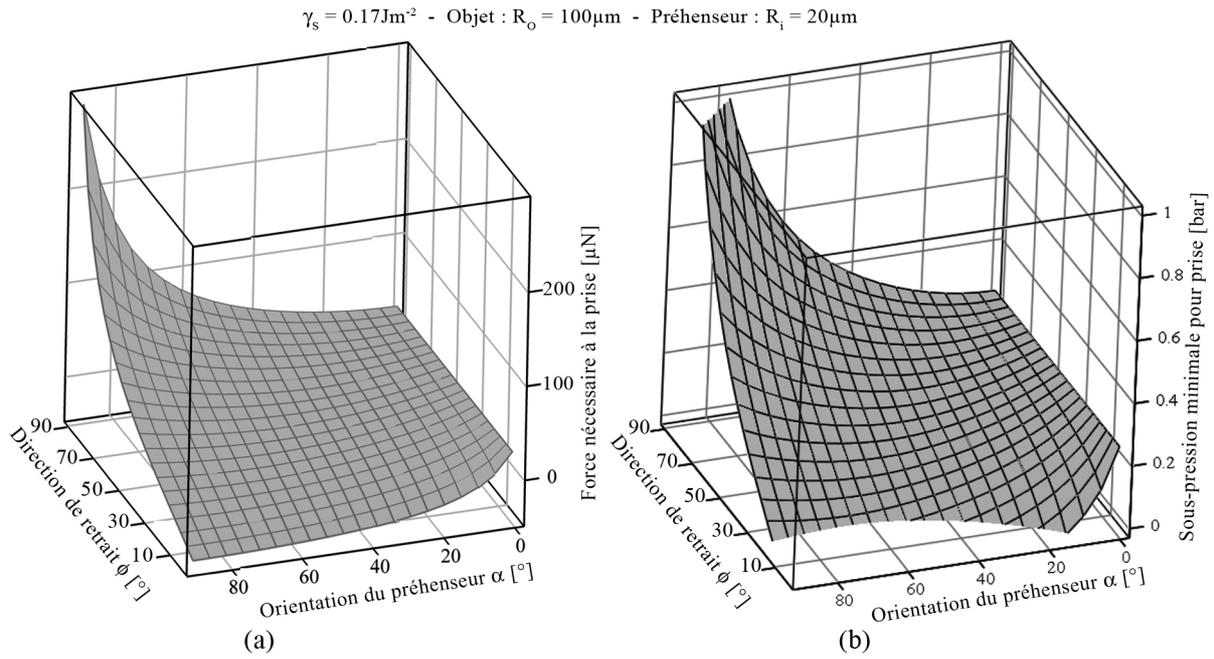
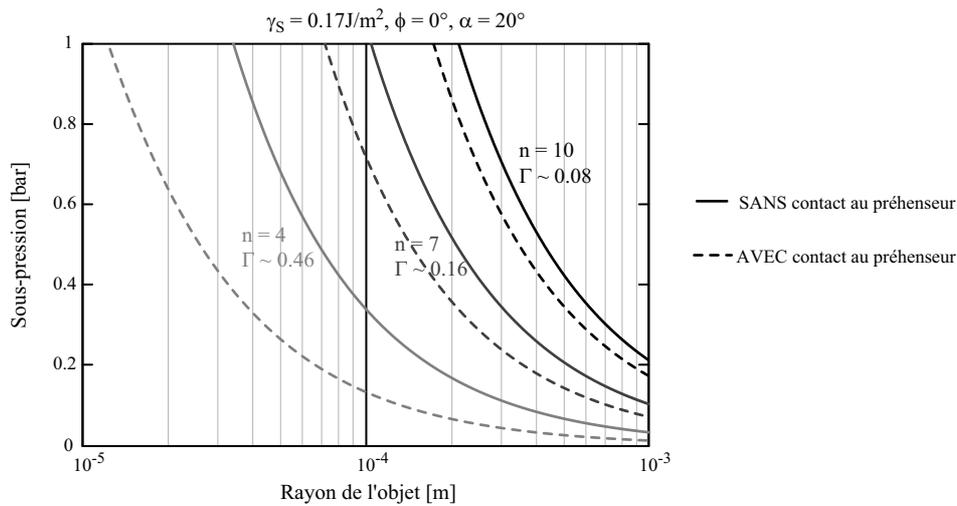


Figure 4.27 : Schéma des forces et orientations.



**Figure 4.28 :** (a) Force nécessaire à la prise selon la direction  $\phi$  du retrait et l'orientation  $\alpha$  du préhenseur; (b) sous-pression équivalente pour permettre la prise.

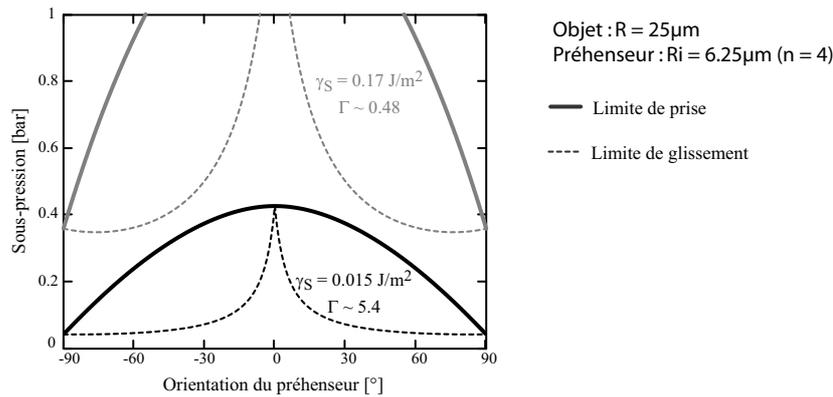


**Figure 4.29 :** Sous-pression permettant la prise selon la taille de l'objet et de la buse (pour  $\alpha = 20^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$ );  $n$  représente le rapport entre les rayons de l'objet et de la buse ( $n = R_{objet} / R_{buse}$ ).

alors de s'approcher sans établir de contact et donc sans risque de dommage. Avec la diminution de la taille de l'objet et donc aussi de la buse, la prise «sans contact» n'est plus utilisable. Il est par contre parfois encore possible de faire glisser l'objet sur le substrat par simple aspiration ce qui peut aussi permettre une mise en contact «douce» (Fig. 4.30). Dans ce cas, la force nécessaire à provoquer le glissement à l'interface «objet - substrat» s'obtient sur la base de « $T > \mu N$ » et vaut donc :

$$F_p > \frac{\mu_s A_s}{|\sin \alpha| + \mu_s \cos \alpha} \tag{4.64}$$

Finalement, un effet de basculement du composant peut se produire lorsqu'une partie seulement de l'orifice de la buse est en contact avec l'objet. Le composant pourra alors pivoter autour de ce point de contact par l'effet de levier dû à la succion, provoquant ainsi la rupture de l'interface d'adhésion «objet -

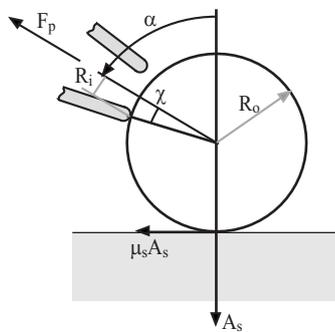


**Figure 4.30 :** Sous-pression minimale permettant la prise d'un objet par aspiration ou son glissement sur le substrat selon l'orientation du préhenseur et l'adhésion au substrat, et ce sans contact effectif (donc adhésion) au niveau du préhenseur.

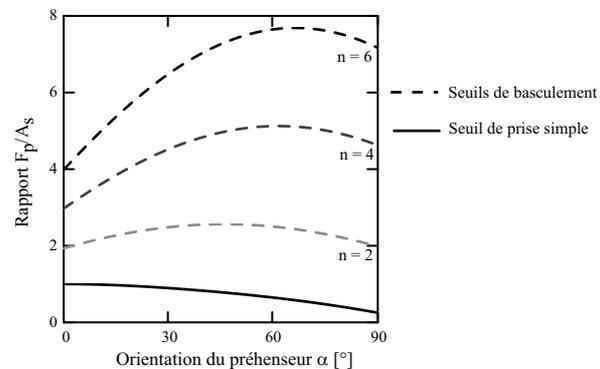
substrat». Ce cas de contact partiel est décrit à la Fig. 4.31. En considérant que la force de succion agit au centre de l'orifice et en négligeant la résistance au roulement, la condition de basculement s'exprime par :

$$F_P > A_S \frac{R_o}{R_i} \left[ \sin(\alpha + \chi) + \mu_S (1 + \cos(\alpha + \chi)) \right] \quad \text{avec} \quad \sin \chi = \frac{R_i}{R_o} = \frac{1}{n} \quad (4.65)$$

Cette situation peut couramment provenir d'une erreur d'alignement ou d'une géométrie particulière de l'orifice (défaut de fabrication ou d'orientation). Mais comme le montre la Fig. 4.32, la pression nécessaire au basculement est toujours supérieure à celle d'une prise simple. L'opération de prise est ainsi en fait peu sensible aux défauts de la buse.



**Figure 4.31 :** Schéma d'une situation de basculement.



**Figure 4.32 :** Seuils de basculement et de prise par succion sans contact, selon l'orientation du préhenseur, exprimés sous la forme du rapport des forces  $F_P$  à l'interface  $P$  et de l'adhésion  $A_S$  au substrat.

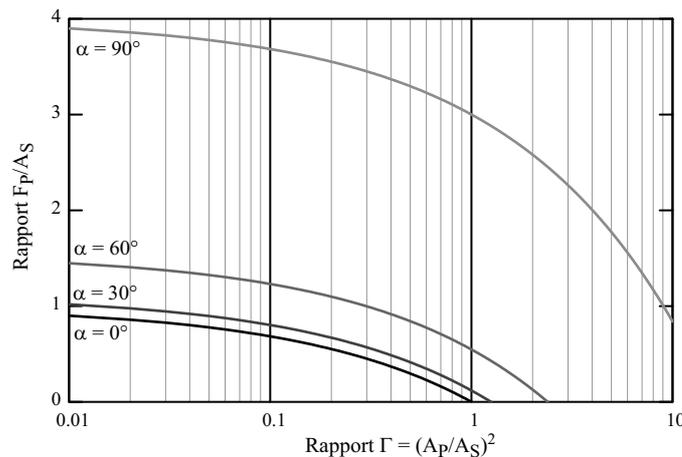
La force nécessaire à la prise étant étroitement liée aux énergies d'adhésion, le choix des matériaux, que ce soit au niveau de l'objet ou du substrat, peut engendrer de grandes différences dans la sous-pression nécessaire à la prise. Les géométries au contact sont différentes de part et d'autre de l'objet. Le rapport d'adhésion ne peut dès lors plus s'exprimer indépendamment des caractéristiques de l'objet. Le rapport d'adhésion aux interfaces  $\Gamma$  dépend dans ce cas des différentes grandeurs géométriques et des énergies d'adhésion du substrat, du préhenseur et de l'objet. Dans les cas illustrés et selon la géométrie des contacts choisie, il varie toujours de manière inversement proportionnelle à l'énergie d'adhésion du substrat et est peu influencé par la taille de l'objet.

### 4.4.3 GÉNÉRALISATION

La manipulation par succion peut être généralisée à la présence d'une force quelconque mais connue agissant en complément aux effets d'adhésion à l'une des interfaces. Cette généralisation permet de déterminer, en fonction du rapport d'adhésion  $\Gamma$  aux interfaces, la force nécessaire à la prise selon l'orientation du préhenseur et la direction du retrait. Ainsi, sur la base de l'expression (4.63), on obtient :

$$\frac{F_P}{A_S} > \frac{\cos \phi + \mu_S |\sin \phi|}{\cos(\alpha - \phi) + \mu_P |\sin(\alpha - \phi)|} \frac{1 + \mu_P |\sin(\alpha - \phi)| \cos(\alpha - \phi)}{1 + \mu_S |\sin \phi| \cos \phi} - \sqrt{\Gamma} \quad (4.66)$$

Cette relation est représentée à la Fig. 4.33. Nous pourrions tout aussi bien représenter le rapport des forces à l'interface «objet - préhenseur» :  $F_P/A_P$ . Il s'agit effectivement de compenser un manque d'adhésion au préhenseur pour permettre l'opération de prise.



**Figure 4.33 :** Relation entre la force à l'interface  $F_P$  permettant la prise et le rapport des effets d'adhésion aux deux interfaces pour différentes orientations du préhenseur (retrait vertical  $\phi = 90^\circ$ ).

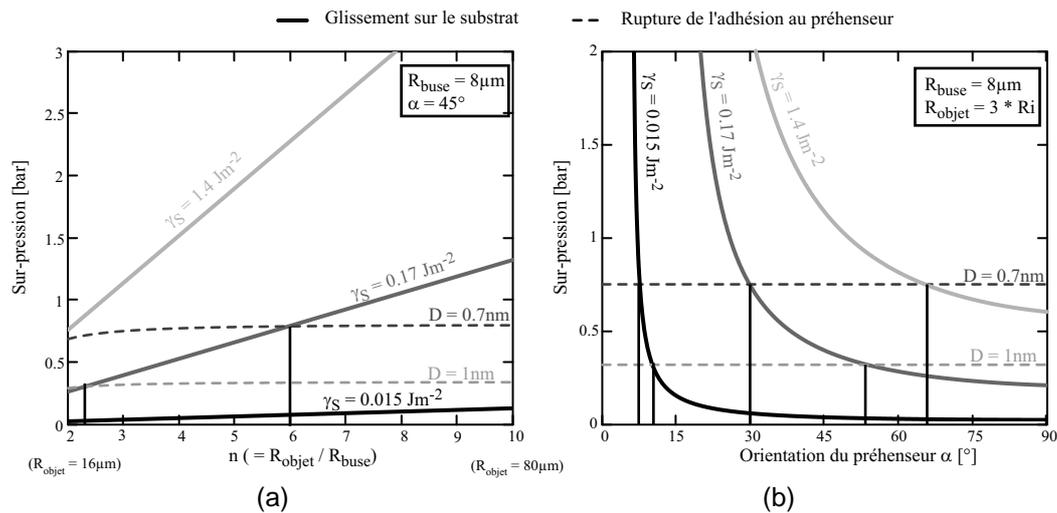
### 4.4.4 OPÉRATION DE DÉPOSE

En rétablissant la pression atmosphérique à l'intérieur de la buse, la dépose revient alors à une opération répondant aux critères d'adhésion aux deux interfaces et donc à rompre le contact «objet - préhenseur» comme discuté au § 4.2. Etant donné la géométrie au contact, il peut par contre être difficile d'induire le glissement à l'interface outil sans obtenir de mouvement au niveau du substrat.

La force d'adhésion peut aussi être contrée par une surpression. Ainsi en théorie la dépose est possible en compensant la force d'adhésion au préhenseur. La limitation de cette surpression provient alors de la faculté du substrat à retenir le micro-objet. Il faut néanmoins émettre certaines réserves à cette méthode, notamment de par la difficulté de contrôler le réel établissement du contact au niveau du substrat. Si celui-ci n'est pas établi, non seulement la dépose manque de précision, mais le risque de perdre l'objet, donc de l'éjecter, est important. La surpression  $p$  de dépose est alors conditionnée par l'expression suivante, soit la compensation de l'adhésion à l'interface «objet - préhenseur» et le seuil de glissement au substrat :

$$\frac{A_P}{\pi R_i^2} < p < \frac{\mu_S A_S}{|\sin \theta| - \mu_S \cos \theta} \frac{1}{\pi R_i^2} \quad (4.67)$$

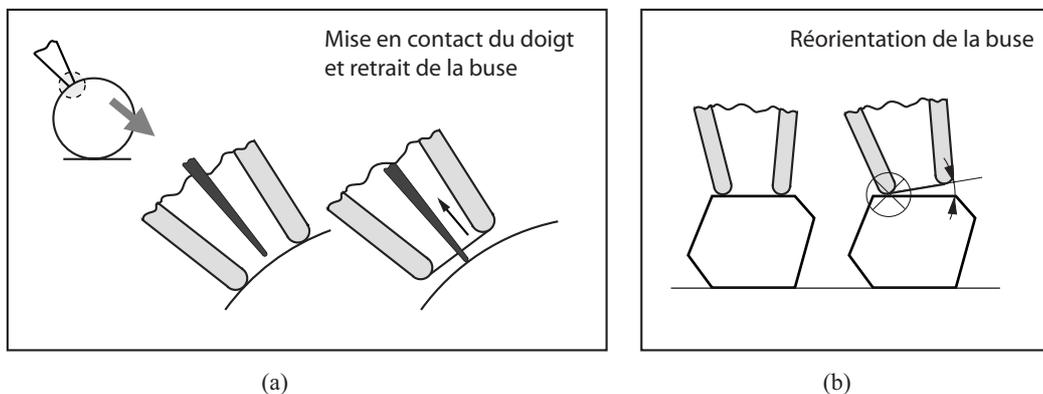
La Fig. 4.34 expose les niveaux de surpression limitant d'une part la rupture de l'interface «objet - préhenseur», donc permettant la dépose, et d'autre part le glissement au substrat selon l'orientation et la taille de la buse, ainsi que les caractéristiques d'adhésion. Le glissement au substrat subodore bien entendu que le contact ait été établi avec le substrat. Dans le cas contraire, l'éjection de l'objet ne peut être évitée a priori. Alors qu'il est intéressant d'incliner la buse et d'en maximiser la taille pour faciliter la



**Figure 4.34 :** Niveau de surpression nécessaire à la dépose (a) selon la taille de l'objet, exprimée comme  $n$  fois le rayon de la buse, et (b) selon l'orientation de la buse, en fonction de l'adhésion au substrat ( $\gamma_S$ ) et au préhenseur (variation de la distance au contact  $D$ ).

prise d'un micro-objet, la dépose, et notamment le positionnement, sont favorisés par une faible adhésion à l'outil, une inclinaison minimale et une forte adhésion au substrat.

Une autre solution qui se prête bien à la configuration d'une buse vacuum consiste à modifier la géométrie de l'interface «objet - préhenseur» lors de la dépose par l'utilisation par exemple d'un doigt mobile à l'intérieur de la buse. Ainsi lors de la dépose, le doigt maintient l'objet en position alors que la buse se rétracte (Fig. 4.35(a)). L'interface d'adhésion peut ainsi être grandement diminuée et la rupture de cette interface est alors plus aisée à amorcer. Dans le cas d'un objet prismatique notamment, la diminution de l'adhésion peut aussi être engendrée en réorientant la buse. Mais cela suppose que l'axe de rotation de l'outil soit dans le plan de l'interface «objet - préhenseur» (Fig. 4.35(b)).



**Figure 4.35 :** Modification de la géométrie du contact (a) par l'utilisation d'un doigt rétractable ou (b) par la réorientation de la buse.

#### 4.4.5 CARACTÉRISTIQUES D'UN PRÉHENSEUR VACUUM

L'utilisation d'un préhenseur vacuum présente l'avantage de ne pas avoir besoin d'assurer le contact avec le composant pour permettre la prise, ou de faciliter la mise en contact par le glissement du composant sur le substrat.

Un encombrement réduit au niveau du préhenseur (de l'interface en elle-même) permet d'optimiser l'accessibilité aux composants et de minimiser les perturbations au niveau du substrat. Concernant la taille fonctionnelle de la buse, le diamètre de l'orifice limite les opérations. Le rapport entre ce diamètre

et la taille de l'objet peut devenir très contraignant notamment pour les composants de quelques dizaines de micromètres de diamètre, qui sont par ailleurs à la limite des composants manipulables par vacuum. Dans tous les cas, une taille trop faible de l'orifice limite la prise alors que la dépose est d'autant plus difficile que l'orifice est important et ce pour des raisons d'adhésion. Si la stratégie de dépose repose sur l'adhésion au substrat, la géométrie de la buse doit être la plus simple et compacte possible et surtout offrir une faible surface de contact effective au composant afin d'y limiter l'adhésion, au contraire du lieu de dépose (au substrat).

La présence d'une force agissant au contact «objet - préhenseur» permet donc d'induire une force contrôlable activement aux composants durant les opérations. Néanmoins, la problématique de l'adhésion reste entière et peut être très perturbatrice. Il faudrait donc veiller à optimiser l'interface préhenseur pour l'opération de dépose en tenant compte des effets d'adhésion aux deux interfaces, et de pouvoir induire une force au contact qui viennent «renverser» le rapport  $\Gamma$  des forces aux interfaces pour permettre la prise.

## 4.5 UTILISATION DES EFFETS DE CAPILLARITÉ

Les effets de capillarité représentent les forces d'adhésion les plus importantes en terme d'amplitude. Elles peuvent donc perturber aisément toute opération de micromanipulation, mais aussi de fabrication de micro-objets, notamment lorsque le taux d'humidité relative devient important (voire § 3.8). Leur utilisation en tant que principe de manipulation semble ainsi tout à fait appropriée si tant est que l'on puisse admettre la présence d'un liquide (au moins momentanément) en surface des composants. D'ailleurs tout un chacun a déjà fait l'expérience d'imbiber le bout d'un doigt pour tourner une page ou attraper un petit objet plus aisément. Il en va ainsi de même en micromanipulation.

Les modèles des ménisques, dont est issue la force de capillarité, sont élaborés en fonction de la géométrie des éléments en contact, du volume de liquide et de des caractéristiques de mouillabilité, soit les angles de contact  $\theta$  et la tension de surface  $\gamma$  du liquide [Lambert04, Chau07, Sirghi06] (§ 3.3). L'évaluation des effets de capillarité est brièvement rappelée ici et les paramètres influents sont discutés. Notre apport dans le cadre de cette étude est de comparer les performances attendues par un tel principe, ainsi que de proposer des solutions d'intégration.

### 4.5.1 LES FORCES DE CAPILLARITÉ COMME PRINCIPE DE MICROMANIPULATION

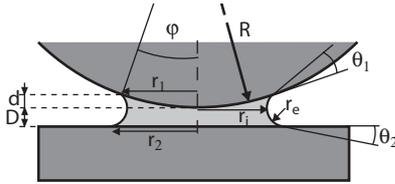
La force de capillarité est nettement plus importante que la force de gravité à l'interface d'un micro-objet, rendant cette dernière négligeable. Il en va de même au niveau de l'influence de la gravité sur un ménisque. Sa taille limite peut être déterminée en comparant la pression hydrostatique ( $\rho g L$ ) et la pression de Laplace ( $\gamma/L$ ). La longueur critique  $L_C$  décrit ainsi cette limite par :

$$L_C = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (4.68)$$

L'effet de la gravité sur un ménisque peut alors être négligé si sa taille, et plus précisément sa hauteur, est nettement inférieure à la longueur critique  $L_C$ . Dans le cas de l'eau,  $L_C$  vaut 2.7mm.

La force de capillarité à l'interface de deux surfaces fait intervenir deux contributions : la force de Laplace et la force de tension. La pression de Laplace correspond à la différence de pression à l'interface liquide/vapeur du ménisque et s'exprime par :

$$\Delta p = \gamma \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_e} \right) = 2\gamma H \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} (r_i, r_e) \text{ les rayons du ménisque} \\ \gamma \text{ la tension de surface du liquide} \\ H \text{ la courbure moyenne du ménisque} \end{array} \quad (4.69)$$



**Figure 4.36 :** Schéma d'un ménisque et de ces paramètres.

La force de Laplace résulte de cette différence de pression sur l'aire de l'interface objet/liquide ( $F_L = \Delta p S = 2\gamma H\pi r^2$ ). La force de tension provient par contre directement de la tension de surface du liquide agissant sur la ligne triple (ou intersection des milieux liquide, solide, gazeux). Elle s'exprime par :

$$F_T = 2\pi r\gamma \sin(\theta + \varphi) \quad (4.70)$$

avec  $2\pi r$  la longueur de la ligne triple et  $\gamma \sin(\theta + \varphi)$  la projection de la tension de surface sur l'axe du ménisque (avec  $\theta$  l'angle de contact et  $\varphi$  décrivant la hauteur du ménisque). Il s'agit ainsi d'une composante purement attractive alors que le signe de la force de Laplace dépend de la courbure du ménisque. Pour de petits volumes de liquides, la force de Laplace est supérieure à la force de tension, mais l'augmentation du volume réduit l'effet de Laplace alors que la force de tension s'en voit accrue. L'augmentation de la distance à l'interface ( $D$ ) produit le même effet.

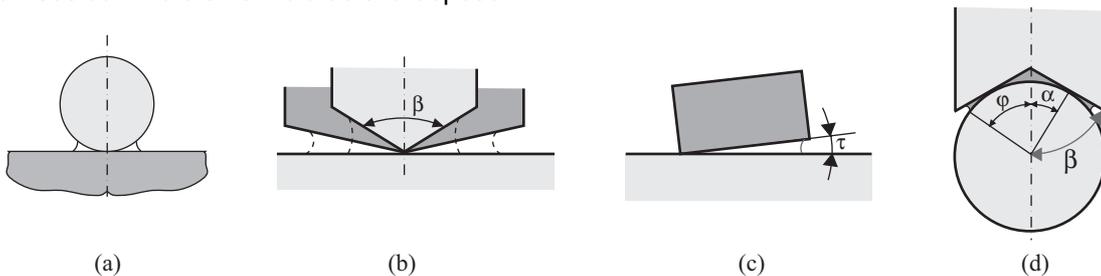
Une formulation énergétique permet aussi de représenter la force de capillarité. Elle s'obtient alors par dérivation de l'énergie aux trois interfaces selon la direction observée :

$$F = \frac{dW}{dz} = \frac{d}{dz}(\sum \gamma_{ij} S_{ij}) \quad (4.71)$$

où les indices  $i, j$  représentent alternativement les milieux solide, liquide et gazeux.

De manière générale, la force de capillarité est plus élevée pour des liquides présentant une grande tension de surface et pour de faibles angles de contact  $\theta$ . Il s'agit alors de trouver un bon compromis puisqu'un liquide mouillant facilement les surfaces, donc permettant de faibles angles de contact, est généralement de basse énergie, et réciproquement.

La force de capillarité augmente lorsque la distance entre les surfaces diminue et est donc maximale lorsque les deux surfaces sont en contact. Proportionnelle au rayon de l'objet lors d'un contact plan-sphère, la force est donc aussi maximale pour un contact «plan-plan». On retrouve la même relation pour une géométrie cône-plan : la diminution de l'ouverture angulaire ( $\beta$ ) induit la décroissance de la force de capillarité (Fig. 4.37 (b)). L'orientation des deux surfaces, que ce soit pour une géométrie plan-plan ou cône-plan, permet de plus de modifier de manière considérable la force de capillarité à l'interface (voire Fig. 3.10 et Fig. 4.37 (c)). Ces aspects de modification de la géométrie ou de l'orientation pourraient donc être utilisés comme élément d'aide à la dépose.



**Figure 4.37 :** Influence de la géométrie du contact sur la force de capillarité : (a) contact sphère-plan; (b) contact cône-plan d'ouverture angulaire  $\beta$ ; (c) orientation de deux surfaces planes; (d) cas d'une sphère dans un cône (angle d'ouverture  $\beta$ ).

L'influence du volume de liquide au contact n'est pas très marquée dans le cas d'un contact plan-sphère. Pour autant, l'interaction la plus forte pour cette géométrie se situe lors de petits ménisques, soit lorsque la hauteur d'immersion est beaucoup plus petite que le rayon de la sphère, la force de capillarité vaut alors  $F_{cap} = 4\pi R\gamma \cos\theta$ . Pour les configurations avec des surfaces planes, l'effet de capillarité augmente avec le volume de ménisque. Il convient néanmoins de noter que plus un ménisque est important, plus la distance de rupture sera élevée. Et de même durant la phase d'approche, le ménisque engendre une force dès que le contact avec le composant est établi, la distance d'interaction dépend donc directement du volume de liquide ou plutôt de la hauteur du ménisque.

Dans le cas d'une bille prise dans un cône, la force de capillarité dépend bien sûr des caractéristiques de mouillabilité du liquide sur les surfaces ( $\gamma$ ,  $\theta_1$  au contact de la bille et  $\theta_2$  au contact du cône), mais aussi de l'angle d'ouverture du cône ( $\beta = 90^\circ - \alpha$ ) et de l'angle de remplissage du ménisque ( $\varphi$ ) (Fig. 4.37 (d)). Au contact, l'expression des forces de Laplace et de tension s'écrit [Lambert06] :

$$F = \pi R \gamma (\sin \varphi)^2 \left( \frac{\sin(\varphi + \theta_1)}{\sin \varphi} + \frac{\cos \theta_2 + \cos(\theta_1 + \varphi - \alpha)}{1 - \cos(\varphi - \alpha)} \right) + 2 \pi R \gamma \sin \varphi \sin(\varphi + \theta_1) \quad (4.72)$$

La contribution de la force de Laplace induit une valeur non déterminée lorsque le ménisque atteint exactement la ligne de contact entre la bille et le cône. La différence de pression au ménisque est alors théoriquement infinie par l'expression de Laplace. En réalité, la différence de pression maximale ne peut dépasser la pression atmosphérique à l'extérieur du ménisque. En tenant compte des phénomènes de cavitation, cette valeur devrait même être réduite de la valeur de la pression de vapeur. Ainsi la force de Laplace est limitée par  $F = S \cdot (p_{atm} - p_{vapeur})$  [Lambert06]. La Fig. 4.38 montre les différentes contributions à la force de capillarité agissant sur une bille dans un cône selon l'angle de remplissage  $\varphi$  du ménisque. La force maximale n'apparaît plus lorsque le ménisque atteint la ligne de contact (en  $\varphi = \alpha = 90^\circ - \beta$ ), mais pour un angle de remplissage  $\varphi$  plus élevé étant donnée la différence de pression admissible. Le ménisque doit dépasser la ligne de contact ( $\varphi > \alpha$ ) pour développer une force maximale.

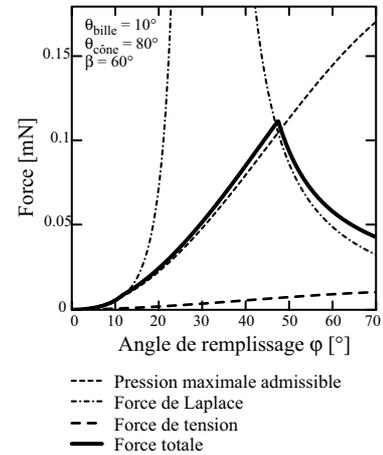


Figure 4.38 : Contributions à la force de capillarité.

L'influence de l'ouverture du cône sur la force de capillarité est représentée à la Fig. 4.39. Plus le cône est ouvert, moins la force de capillarité engendrée sera importante et tend finalement vers le cas du contact d'une sphère sur un plan. Il en va de même pour un grand angle de remplissage  $\varphi$ , donc un grand volume de liquide. Pour un faible volume de liquide ( $\varphi < \alpha$ ), la force est plus importante lorsque l'ouverture du cône est large. Il faut néanmoins noter que, pour de petits ménisques, plus la taille de la bille est faible, moins l'ouverture a d'importance. Pour une bille de  $25\mu\text{m}$  de rayon et  $\varphi < 20^\circ$ , la force est identique pour des cônes entre  $60^\circ$  et  $90^\circ$ , ce qui n'est déjà plus le cas avec une bille de  $100\mu\text{m}$  de rayon. La force est donc grandement limitée par la pression admissible. Reste qu'à ces dimensions, les phénomènes de condensation capillaire apparaissent aux interstices.

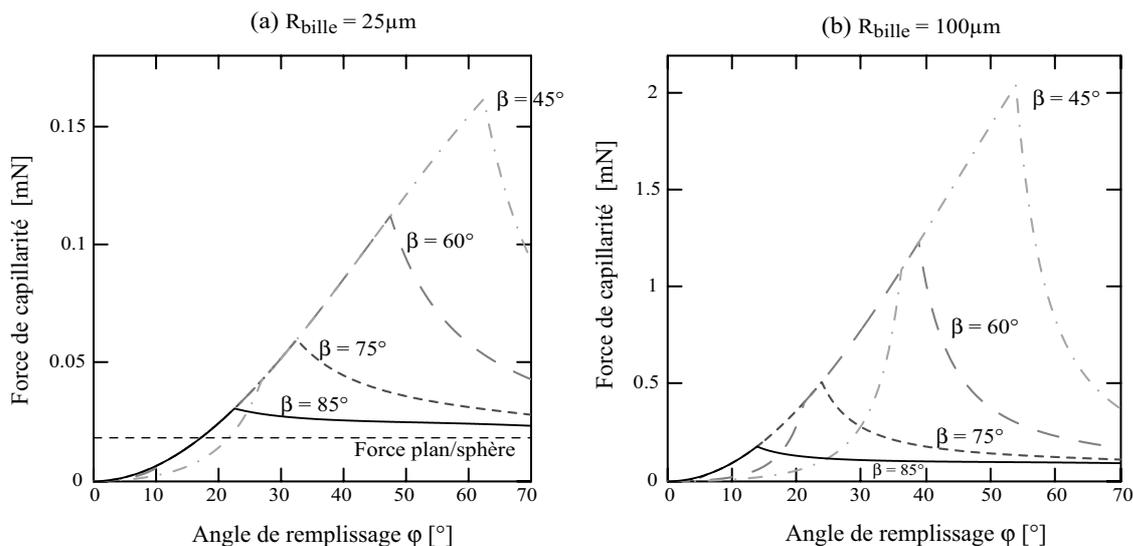


Figure 4.39 : Force de capillarité dans le cas d'une bille dans un cône en fonction de l'angle de remplissage  $\varphi$  du liquide et pour différente ouverture du cône  $\beta$  ( $\theta_{bille} = 10^\circ$ ,  $\theta_{cône} = 50^\circ$ ,  $\gamma_{eau} = 72\text{mN/m}$ ), pour une bille de (a)  $25\mu\text{m}$  de rayon et de (b)  $100\mu\text{m}$  de rayon.

La condensation capillaire, soit la formation spontanée d'un ménisque à l'interface de deux solides sous l'effet des conditions d'humidité relative et de température, est décrite par l'équation de Kelvin (3.3). Pour une pointe effilée (de l'ordre de 50nm) et une surface plane, la formation d'un ménisque stable requiert environ une milliseconde [Sirghi06]. Dans le cas d'un rayon plus important au contact, la stabilité du ménisque, c'est-à-dire engendrant une force constante et répétable, est assurée après environ une seconde. L'évaporation du liquide est par contre un processus plus lent, soit de quelques secondes (l'évaporation d'une goutte de 1nL, soit une demi-sphère de  $\sim 80\mu\text{m}$  de rayon, nécessite environ 5s).

Durant une opération de manipulation, l'objet est soumis à une accélération  $a^*$  pouvant atteindre plusieurs fois la gravité  $g$ . La sensibilité du ménisque à cette accélération peut être exprimée, comme pour la gravité, par la longueur critique  $L_C$  (4.68) en remplaçant  $g$  par  $(a^*+g)$ . Avec une accélération cent fois supérieure à la gravité,  $L_C$  vaut  $270\mu\text{m}$ . En tenant compte de la masse de l'objet, l'accélération limite en cours de manipulation revient à considérer l'inertie engendrée. La force étant maximale lorsque les surfaces sont en contact, nous pouvons considérer que pour des objets inférieurs au millimètre, la hauteur du ménisque est nettement inférieur à  $L_C$ . On pourra alors se référer à la Fig. 4.47 pour évaluer l'accélération maximale que peut supporter une liaison par capillarité<sup>7</sup>.

Toujours en admettant que les surfaces sont en contact, la résistance latérale correspond à la résistance au frottement, en considérant néanmoins que la force normale est accrue du fait de la capillarité [Riedo02].

#### 4.5.2 PRÉHENSION PAR CAPILLARITÉ

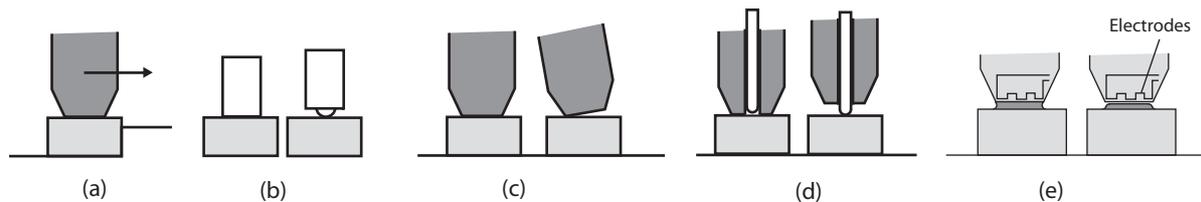
Une tâche de manipulation par capillarité requiert tout d'abord évidemment la formation d'un ménisque entre le préhenseur et l'objet, donc nécessite en quelque sorte une alimentation en liquide. Une fois l'objet pris et positionné, la relâche nécessite l'intervention d'une force externe plus importante que celle exercée par le ménisque ou une fonctionnalité permettant de décroître l'effet de capillarité à l'interface «objet - préhenseur».

L'alimentation du ménisque peut se faire simplement par trempage occasionnel suivant le liquide utilisé. Cette opération supplémentaire peut être remplacée par l'utilisation d'un canal et/ou d'un réservoir intégré au préhenseur et permettant une plus grande autonomie notamment pour un liquide volatile. La présence du canal peut néanmoins perturber le comportement du ménisque et donc diminuer la force de capillarité. La formation du ménisque peut aussi être assurée par condensation naturelle si le taux d'humidité ambiante est assez élevé ou par condensation forcée par modification locale de la température.

Différentes solutions induisant la dépose du micro-objet peuvent être implémentées voire combinées. Certaines de ces solutions sont très générales et pourraient donc aussi convenir à d'autres principes de manipulation, alors que quelques propositions sont propre à l'utilisation d'un ménisque lors de l'opération de prise. On peut ainsi citer :

1. Le cisaillement de l'interface en admettant que l'objet est retenu latéralement par le posage, soit un mouvement de raclage (Fig. 4.40 (a));
2. la modification de la géométrie au contact (Fig. 4.40 (b));
3. la modification de l'orientation du préhenseur plus spécialement pour un préhenseur plan ou du moins à surface de manipulation plane (Fig. 4.40 (c));
4. la substitution par un doigt hydrophobe et/ou de géométrie permettant de réduire la surface de contact (ou de faible rayon) (Fig. 4.40 (d));
5. l'utilisation d'une grande accélération (dépose inertielle);

7. Les courbes de la Fig. 4.47 sont données en fonction de l'énergie d'adhésion au préhenseur ( $\gamma_p$ ) en considérant une force de pull-off de type JKR. A titre comparatif,  $\gamma_p$  peut être remplacé par  $(16(\gamma\cos\theta)^2)/(9\gamma_o)$  pour représenter la force de capillarité en situation similaire, soit  $\gamma_p = 0.28\text{Jm}^{-2}$  pour de l'eau et une surface parfaitement hydrophile.



**Figure 4.40 :** Quelques stratégies de dépose : (a) par cisaillement, (b) modification de la géométrie au contact, (c) réorientation, (d) diminution de la surface, (e) électro-mouillage.

6. l'emploi d'un substrat présentant une adhésion plus importante que la force de capillarité (par le dépôt d'une colle par exemple);
7. la modification de l'angle de contact (par électro-mouillage notamment) (Fig. 4.40 (e));
8. la réduction, voire l'évaporation complète, du volume de liquide, donc la diminution notable de la force de capillarité;
9. au contraire l'augmentation subite du volume de liquide dans le but de transférer l'objet au substrat par le flux engendré;
10. l'évaporation instantanée du ménisque pour bénéficier d'un effet d'explosion ou d'éjection.

Le choix du principe va dépendre des contraintes données par l'application. La première étant bien entendu qu'un objet à tendance hydrophobe sera difficile voire impossible à manipuler par capillarité. D'autre part, les propositions 1, 6 et 9 contraignent surtout certaines caractéristiques du substrat : soit du fait que le positionnement final est donné uniquement par le substrat (1), soit de par le choix d'un matériau à tendance hydrophile (9) ou adhésif (6). Les solutions 2 et 3 limitent plutôt la géométrie du micro-objet manipulable et impliquent surtout l'intégration d'un degré de liberté supplémentaire au niveau du préhenseur, de même que la substitution (4) et la dépose inertielle (5). Les aspects de contamination peuvent aussi être prépondérants. Les composants manipulés seront évidemment en contact avec le liquide, mais le substrat y sera plus (6 et 9) ou moins (8) exposé. Enfin, la combinaison de certaines de ces solutions permet d'optimiser le processus, notamment l'utilisation d'une dépose inertielle devrait être plus efficace après diminution du volume du ménisque.

#### 4.5.2.1 Condensation/évaporation d'un ménisque à partir de la vapeur ambiante

Différents liquides peuvent être utilisés pour une préhension par capillarité, mais leur utilisation dans des conditions standards de laboratoire nécessite dans tous les cas une alimentation, sauf si leur condensation peut être provoquée sur la surface du préhenseur. Le réservoir devient ainsi infiniment grand, un avantage pour l'autonomie du préhenseur. La modification de la température ou de la pression induit le changement de phase d'une substance. En travaillant à pression constante, il est ainsi possible de provoquer localement la condensation et l'évaporation de l'eau en modifiant localement la température, celle du préhenseur notamment.

L'équation de Clapeyron décrit la pente des limites de phases (solide, liquide, gaz) pour tout équilibre de phase de toute substance pure [Atkins00] :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_{trs}S}{\Delta_{trs}V} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} p \text{ la pression} & \Delta_{trs}S \text{ l'entropie de transition de phase} \\ T \text{ la température} & \Delta_{trs}V \text{ le volume molaire de transition} \end{cases} \quad (4.73)$$

A la transition liquide-gaz, l'entropie de vaporisation à la température  $T$  s'exprime par  $\Delta_{vap}H/T$ , avec  $\Delta_{vap}H$  l'enthalpie de vaporisation<sup>8</sup>. Le volume molaire du gaz étant beaucoup plus important que celui du liquide et en considérant un gaz parfait, l'équation de Clapeyron devient :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta_{vap}H}{T(RT/p)} \quad \text{avec} \quad R : \text{ la constante des gaz parfaits.} \quad (4.74)$$

8.  $\Delta_{vap}H = m_M \cdot L_v$  avec  $m_M$  la masse molaire (0.018kg/mol) et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation (2.26·10<sup>6</sup>J/kg) pour l'eau.

Enfin, en intégrant cette expression et en admettant que l'enthalpie de vaporisation est indépendante de la température, la pression de saturation à température  $T$  s'exprime par :

$$p_s(T) = p_s(T_0)e^{-\chi} \text{ avec } \chi = \frac{\Delta_{vap}H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4.75)$$

où  $p_s(T_0)$  est la pression de saturation à la température  $T_0$  et  $R$  la constante des gaz parfaits. Le taux d'humidité relative  $RH$  correspond au rapport de la pression ambiante et de la pression de saturation à la température  $T$  ( $RH = p/p_s(T)$ ). En modifiant localement la température et en considérant que la pression  $p$  reste uniforme dans tout le volume (l'enceinte de manipulation par exemple), l'humidité relative locale peut s'exprimer par :

$$RH_{local} = \frac{p}{p_s(T_{local})} = \frac{RH \cdot p_s(T_0)}{p_s(T_{local})} = RH \cdot e^{\chi} \quad (4.76)$$

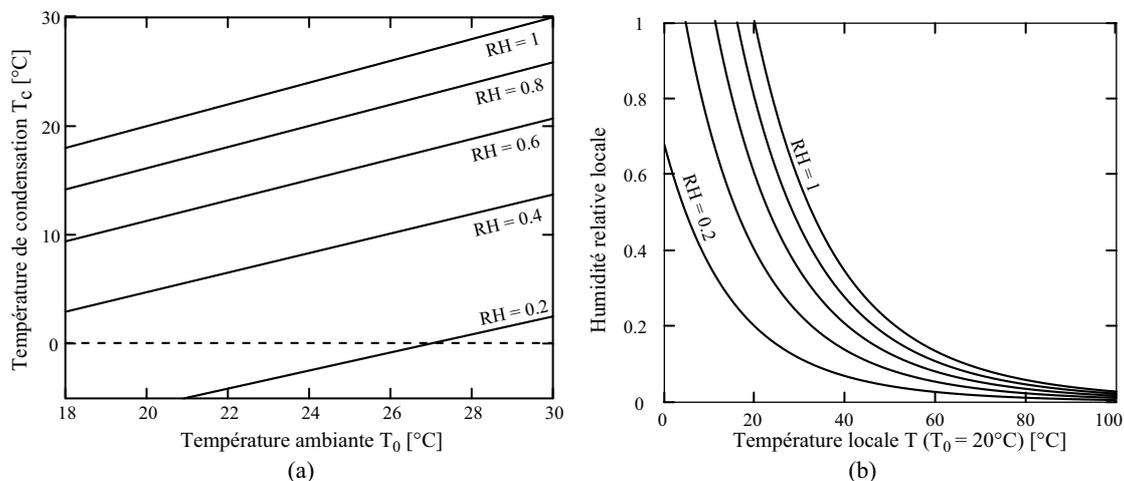
Lorsque l'humidité relative atteint 100%, le rayon de Kelvin devient infini. Autrement dit, on peut déterminer la température de condensation locale  $T_c$ , soit pour  $RH_{local} = 1$ , comme :

$$T_c = \frac{T_0 \cdot \Delta_{vap}H}{\Delta_{vap}H - \ln(RH) \cdot R \cdot T_0} \quad (4.77)$$

L'expression (4.75) est basée sur l'hypothèse des gaz parfaits. En considérant la condensation de l'humidité ambiante, donc la vapeur d'eau, cette hypothèse ne se vérifie pas. La comparaison avec l'expression de Magnus-Tetens couramment utilisée pour définir le point de rosée et basée sur des données expérimentales montre que les valeurs de pression de saturation obtenues sous l'hypothèse d'un gaz parfait s'avèrent sous-estimées pour une température  $T < T_0$ . Il en résulte un abaissement des températures de condensation (mais pour une différence inférieure à 1°C). Cette tendance s'accroît lorsque l'humidité relative ambiante diminue.

Les expressions données ici permettent d'évaluer les températures de condensation pour l'eau ainsi que pour d'autres liquides. Dans une chambre hermétique, les opérations pourraient avoir lieu dans un gaz porteur d'autres molécules que de la vapeur d'eau si nécessaire. La Fig. 4.41 relate l'évolution de la température de condensation selon la température et l'humidité relative ambiante, ainsi que le taux local d'humidité relative selon la température locale et les conditions ambiantes pour l'eau sous l'hypothèse des gaz parfaits.

La condensation est favorisée par un taux d'humidité relative ou une température ambiantes élevées : à 20°C, un taux de 20% ne permet pas la condensation de l'eau en surface, alors qu'à  $T_0 = 30^\circ\text{C}$  ou  $RH = 40\%$  cela devient possible (Fig. 4.41). En augmentant la température localement ( $T > T_0$ ), le taux d'humidité local s'abaisse mais sa variation est plus lente. Néanmoins, il n'est ainsi pas nécessaire



**Figure 4.41 :** (a) Température de condensation selon la température et l'humidité relative ambiantes (4.77); (b) évolution de l'humidité relative locale selon la température locale et l'humidité relative ambiante à  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  (4.76).

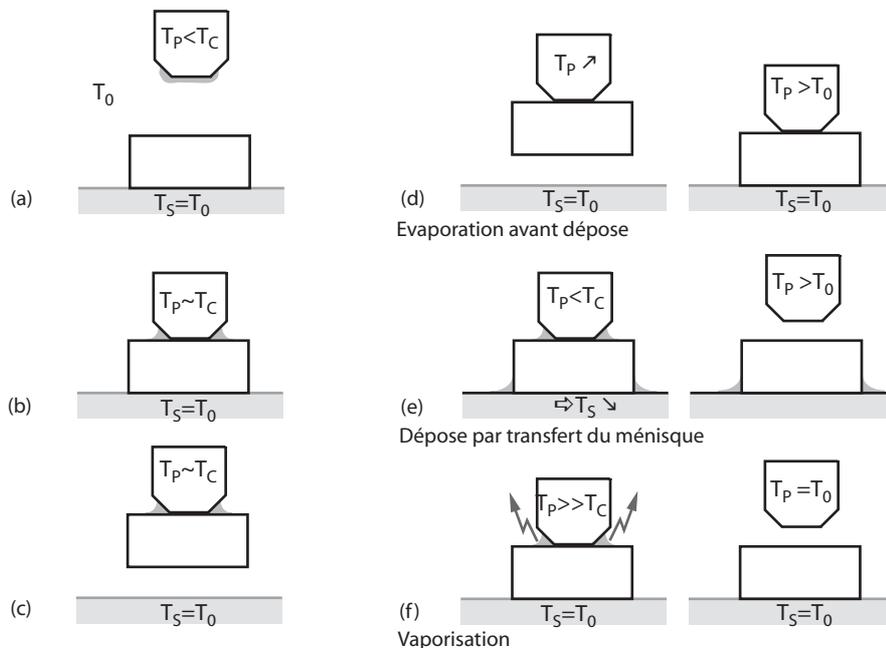
d'atteindre 100°C pour diminuer le volume du ménisque. Une humidité relative inférieure à 20% permet de diminuer considérablement l'effet de capillarité.

#### 4.5.2.2 Stratégie de manipulation par condensation/évaporation

L'abaissement de la température au préhenseur induit ainsi la formation d'un ménisque permettant la prise d'un composant (Fig. 4.42 (a-c)). Cette étape de condensation peut a priori s'effectuer avant l'approche, ce qui permet d'ailleurs de ne pas perturber thermiquement le substrat et donc de limiter la condensation au préhenseur seulement. Il faut néanmoins considérer que le volume d'eau s'évapore et qu'il est donc nécessaire de maintenir une température suffisamment basse durant l'approche et la prise. Pour une humidité relative élevée, les effets de capillarité sont déjà prépondérants à température ambiante, il n'est donc pas nécessaire d'abaisser la température pour effectuer la prise d'un micro-objet. La dépose peut par contre bénéficier d'une diminution locale de l'humidité relative.

Pour la dépose, une stratégie consiste à augmenter la température au préhenseur afin de diminuer le volume de ménisque par son évaporation (Fig. 4.42 (d)). Cette méthode est notamment intéressante dans le cas d'un contact plan-prisme, puisque la force de capillarité diminue effectivement avec le volume, la géométrie de contact sphère-plan est par contre peu sensible au volume du ménisque. On aimerait bien entendu éliminer complètement le ménisque de l'interface, mais comme le montre la Fig. 4.41, même proche de 100°C le taux local ne s'annule pas complètement et toutes les applications ne permettent pas d'atteindre une telle température. Par contre, si l'humidité ambiante est élevée et que le substrat est hydrophile, cette stratégie permet d'induire suffisamment de différence entre les deux interfaces pour permettre une dépose par adhésion : donc atteindre un rapport d'adhésion  $\Gamma$  propice à la dépose.

La dépose peut aussi se faire «par transfert du ménisque», c'est-à-dire en instaurant aussi un ménisque au niveau du substrat avant d'évaporer celui liant l'objet au préhenseur (Fig. 4.42 (e)). Il s'agit d'utiliser un profil de température adéquat suivant le composant à manipuler. Une partie du processus utilise aussi le fait que le liquide présent à l'interface «objet - préhenseur» aura tendance à se recondenser dans un premier temps au niveau du substrat lors de l'augmentation de température du préhenseur.



**Figure 4.42 :** Manipulation par condensation/évaporation locale : (a-c) prise après condensation au préhenseur; trois stratégies de dépose : (d) évaporation du ménisque par l'augmentation de la température au préhenseur avant d'amorcer la dépose; (e) la température est élevée seulement après positionnement sur la substrat de manière à transférer le ménisque; (f) augmentation subite de la température pour engendrer une vaporisation explosive lors du retrait.

### 4.5.2.3 Vaporisation explosive

La formation d'une bulle à l'interface peut être induite par une augmentation rapide de la température, dans un principe identique à celui utilisé par les imprimantes à jet d'encre ou certaines valves en microfluidique [Schlund07, Zhao00, Hong04]. L'échauffement du liquide y est alors souvent généré par un microchauffage résistif. A l'interface entre deux objets, la vaporisation du liquide induit l'expansion du volume de la bulle jusqu'à rééquilibrer la pression. La distance entre les deux surfaces augmente alors, ce qui a pour effet de décroître la force de capillarité. La génération d'une bulle par évaporation à l'intérieur d'un liquide, par nucléation homogène, nécessite une augmentation de température de  $6 \cdot 10^6$  K/s et s'opère à une température d'environ  $270^\circ\text{C}$  [Deng03].

La puissance nécessaire à cette opération dépend donc de l'énergie permettant d'amener le volume de la bulle de la température ambiante à  $270^\circ\text{C}$  et de l'intervalle de temps permettant la nucléation homogène, soit :

$$t_{\Delta T} = \frac{\Delta T}{dT/dt} \approx \frac{(270 - 22)K}{6 \times 10^6 K/s} = 41 \mu s \quad (4.78)$$

L'énergie nécessaire pour augmenter la température de  $\Delta T$  s'exprime par :

$$Q_{\Delta T} = (c_p \cdot \Delta T + L_v)m_{bulle} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c_p = 4.1 \cdot 10^3 Jkg^{-1}K^{-1} \text{ la chaleur spécifique de l'eau} \\ L_v = 2.26 \cdot 10^6 Jkg^{-1} \text{ la chaleur latente de vaporisation} \end{cases} \quad (4.79)$$

Admettons que pour induire une dépose optimale, et rompre complètement le ménisque, le volume de la bulle doit en atteindre les bords, soit que  $V_{bulle} \approx V_{menisque}$ . La masse de la bulle peut alors être évaluée avec la loi des gaz parfaits en considérant qu'à son extension maximale la température est de  $75^\circ\text{C}$  et la pression de 1bar ( $p_{bulle}$ ) :

$$m_{bulle} = m_M \frac{p_{bulle} \cdot V_{bulle}}{R \cdot T_{75^\circ C}} \quad (4.80)$$

avec  $m_M$  la masse molaire et  $R$  la constante des gaz parfaits. La puissance nécessaire s'obtient par :

$$P = \frac{Q_{\Delta T}}{t_{\Delta T}} \quad (4.81)$$

Considérons la préhension d'un cylindre de  $50\mu\text{m}$  de diamètre retenu par un ménisque de la même taille et d'une épaisseur de  $2\mu\text{m}$ , donc un volume de  $\sim 4\text{pL}$ . La puissance nécessaire à la nucléation est de  $0.2\text{mW}$ .

A cela il faut bien sûr ajouter les pertes, notamment dû au fait que la puissance n'est transmise que partiellement à la bulle et donc dissipée dans le liquide et les surfaces alentours. Hong et al. [Hong04] ont évalué que seulement 6% de la puissance était effectivement transmise à la bulle. Enfin, suivant le principe utilisé, la chaleur est transmise par conduction et une partie sera donc absorbée par la structure du préhenseur. Avec  $\eta_1$  et  $\eta_2$  les facteurs de pertes, la puissance nécessaire devient donc :

$$P = \frac{P_{bulle}}{\eta_1 \cdot \eta_2} \approx \frac{0.2 \cdot 10^{-3} W}{0.06 \cdot 0.33} = 0.01 W \quad (4.82)$$

### 4.5.3 CARACTÉRISTIQUES D'UNE PRÉHENSION PAR CAPILLARITÉ

La manipulation par capillarité offre comme avantage d'induire un amortissement lors du contact dû à la présence de liquide entre les surfaces. La force d'attraction développée par le ménisque facilite aussi les opérations de prise, et notamment l'approche du composant, puisque le contact effectif n'a pas besoin d'être produit et contrôlé par le manipulateur.

La manipulation par capillarité n'est pas limitée aux ménisques aqueux. L'utilisation d'un autre liquide, notamment une huile ou un liquide plus volatile tel l'isopropanol, engendre des effets similaires. Les

caractéristiques de mouillabilité des surfaces sont par contre dépendantes du liquide considéré et la force de capillarité en dépend donc aussi. Le choix du liquide dépendra bien sûr de la force développée, mais aussi de la compatibilité du liquide avec l'application.

L'intégration d'un système induisant une condensation locale au préhenseur permet de bénéficier d'une alimentation quasi infinie de liquide. Son utilisation dépend par contre des conditions de l'environnement de manipulation et un taux minimum d'humidité relative est indispensable pour permettre la condensation. Différentes stratégies de dépose peuvent être envisagées. Il faut néanmoins considérer là aussi la compatibilité (ou non) du substrat à la présence d'un liquide.

Les stratégies d'utilisations des effets de capillarité peuvent aussi être intégrées au niveau du substrat, et notamment en y provoquant la condensation pour induire la dépose ou en structurant la surface par des zones hydrophobes et hydrophiles afin par exemple de délimiter des zones de prise (donc à faible adhésion) et de dépose.

## 4.6 EFFET D'UNE VIBRATION À L'INTERFACE

La rupture de l'interface d'adhésion doit être amorcée pour permettre le transfert d'un objet d'une surface à l'autre. Amener l'interface en état de glissement est une solution. Il est également intéressant d'étudier ce qui se produit sous l'effet d'une force latérale inférieure à la force de frottement, mais induisant une contrainte de cisaillement à l'interface. On retrouve cet état lors de mesures AFM par modulation de force latérale qui permettent notamment l'étude de la friction et de l'élasticité des nanocontacts.

L'influence d'une force latérale sur l'aire de contact ainsi que sur la force d'adhésion a été exposée au chapitre 3 (§ 3.6.3). Les théories de Johnson et de Savkoor se basent sur les modèles de propagation de fissures pour exprimer l'effet de la friction sur l'interface d'adhésion. Ils montrent qu'une diminution allant jusqu'à 60% de la force d'adhésion peut être atteinte en cas de glissement total à l'interface et du fait de la diminution de la surface de contact. Un état de contrainte inférieure aux conditions de glissement induit aussi la diminution de l'aire de contact et donc de la force d'adhésion.

L'étude du comportement au contact avant glissement total a notamment été menée par Mindlin [Mindlin49, Mindlin52] puis Savkoor [Savkoor92] et s'articule comme suit. Une force latérale inférieure à la force de frottement induit un déplacement  $\Delta$  dans la zone de contact. En admettant qu'il y a un effet de glissement local à l'intérieur de la surface de contact sur un anneau de rayon  $b$  inférieur au rayon de contact  $a$  (Fig. 4.43), cette force latérale  $F_L$  s'exprime comme :

$$F_L = \mu F_N \left( 1 - \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{8G^* a \Delta}{\mu F_N} \right)^{3/2} \right) \quad (4.83)$$

avec  $F_N$  la force normale à l'interface,  $\mu$  le coefficient de frottement et  $G^*$  le module de cisaillement équivalent à l'interface qui s'exprime par :

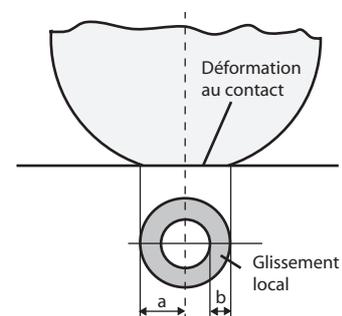
$$G^* = \left( \frac{2 - \nu_1}{G_1} + \frac{2 - \nu_2}{G_2} \right)^{-1} \quad \text{avec} \quad G_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \quad (4.84)$$

Lorsque la force latérale croît, la zone de glissement augmente jusqu'à atteindre toute la surface de contact, soit  $b = a$ , amenant ainsi l'objet en glissement total. La force latérale  $F_L$  vaut alors la force de frottement ( $F_L = \mu F_N$ ). Au moment du glissement, on en tire le déplacement  $\Delta$  limite :

$$\Delta = \frac{3\mu F_N}{16G^* a} \quad (4.85)$$

Pour de très faibles déplacements  $\Delta$ , la force latérale devient par contre :

$$F_L = 8G^* a \Delta \quad (4.86)$$



**Figure 4.43 :** Schéma de la déformation au contact et de la zone de glissement local : lorsque  $b = a$  le glissement est total.

et ainsi la rigidité latérale du contact s'exprime par :

$$k_L = \left. \frac{\partial F_L}{\partial \Delta} \right|_{\Delta \rightarrow 0} = 8G^*a \quad (4.87)$$

Cette représentation est valable quel que soit le modèle au contact utilisé (DMT, JKR ou MD), mais pour le cas d'un contact mono-aspérité, soit une rugosité nulle, uniquement. Elles supposent que l'aire de contact n'est pas modifiée par l'action d'une force latérale, comme elle l'est par une force normale, d'où sa validité quelle que soit la représentation du contact utilisée.

Le fait d'un déplacement local, même faible, devrait ainsi permettre une diminution notable de l'adhésion à l'interface et pourrait donc être utilisé comme précurseur à la rupture de l'interface lors du transfert d'un micro-objet d'une surface à une autre. En considérant une bille de polystyrène de 50µm de diamètre sur une surface en verre avec une force normale nulle, le déplacement limite  $\Delta$  avant glissement selon l'expression (4.85) vaut 1.6nm pour une force latérale équivalente au frottement de 4.4µN et un rayon au contact  $a$  de 0.7µm. Cet effet peut ainsi être produit par une faible vibration à l'interface «objet - préhenseur» alors que l'objet se trouve déjà en contact avec le substrat. L'effet de cisaillement obtenu dépend dès lors de l'orientation du contact «objet-préhenseur» et de l'effet d'adhésion au substrat. Il faut en outre noter qu'il s'agit ici de modèles mono-aspérité, donc ne tenant pas compte de la rugosité des surfaces au contact. Ils ne permettent donc pas de déterminer l'amplitude du mouvement  $\Delta$  induisant un effet de cisaillement sans glissement total selon une configuration donnée, mais de donner une explication plausible à l'effet positif d'une faible vibration à l'interface.

L'utilisation d'une vibration de faible amplitude plutôt que d'une contrainte unidirectionnelle permet d'effectuer la dépose en s'affranchissant d'une mesure de l'effort latéral pour se concentrer sur la mise en contact et le positionnement. La vibration peut alors être appliquée de manière continue durant l'opération de dépose et ne provoquer la rupture de l'interface que lorsque le contact avec le substrat est établi, sans opération supplémentaire.

#### 4.6.1 REMARQUES POUR L'UTILISATION D'UNE VIBRATION

L'orientation de la vibration peut perturber le positionnement du microcomposant. Il faut donc prendre garde de choisir une orientation qui permette de cisailer l'une des interfaces en affectant le moins possible l'autre interface. L'amplitude nécessaire étant très faible, l'utilisation de matériaux piézoélectriques notamment permet une intégration aisée au niveau du préhenseur et sans même nécessiter une quelconque amplification du signal.

Le cisaillement de l'interface agit contre les forces de frottement. Une vibration normale à l'interface s'oppose par contre directement aux effets d'adhésion. La distance d'interaction, notamment pour les forces de van der Waals, est d'environ 100nm, mais l'amplitude décroît très rapidement déjà au-delà de quelques nanomètres. L'effet d'une telle vibration dépendra beaucoup de la tenue du composant sur l'autre interface. Il est donc plus aisé de rompre l'interface par cisaillement qu'en traction-compression.

### 4.7 DÉPOSE INERTIELLE

La manipulation par adhésion a montré ses limitations pour effectuer les deux opérations de prise et de dépose dans un environnement identique. Nous proposons ici une solution d'aide à la dépose ou principe de dépose qui consiste à contrer les effets d'adhésion à l'interface avec le préhenseur par une accélération très élevée et donc en utilisant la force inertielle ainsi développée. Il a déjà été démontré que l'effet de la gravité est négligeable à cette échelle. Les accélérations que nous mentionnons ici sont donc de plusieurs ordres de grandeur supérieures à celle-ci. Ce principe a été proposé de manière spécifique à la manipulation de micro-objets par une équipe de recherche de l'*Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR)* de l'Université Pierre et Marie Curie [Haliyo03]. Nous étudions ici les accélérations

nécessaires en continuité des modèles force/retrait proposés dans ce chapitre, puis proposons une intégration différente basée sur l'excitation en mode sinusoïdal d'un actionneur piézoélectrique (§ 7.3).

Le principe repose sur l'utilisation d'une force externe, au contraire des forces situées au niveau des interfaces du composant (§ 4.1). D'autres forces que celle due à l'inertie peuvent être envisagées, telle par exemple celles induites par un champ magnétique ou par des ondes acoustiques. Une généralisation est proposée en vue d'évaluer les forces nécessaires aux opérations indépendamment de leur nature.

#### 4.7.1 VERS UN POSITIONNEMENT CONTRÔLÉ

Dans le but de contrôler le positionnement, l'utilisation directe de l'actionneur (dans notre cas un actionneur piézoélectrique), sans déformation d'un élément intermédiaire ou d'amplification, permet de déterminer la direction de dépôt. Le principe est schématisé à la Fig. 4.44. L'accélération doit alors être fournie directement par l'actionneur. Ce dernier point représente une limitation de la taille des objets déposables par ce principe : la masse diminuant plus rapidement que l'adhésion avec la taille de l'objet, il faut donc fournir une accélération de plus en plus élevée pour déposer de petits objets.

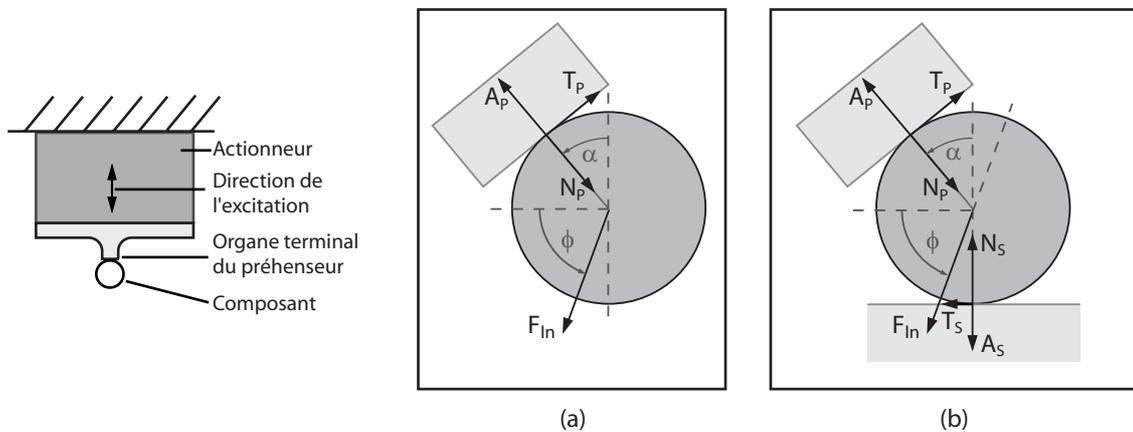


Figure 4.44 : Schéma de principe d'un préhenseur inertiel.

Figure 4.45 : Schéma des forces pour la dépose inertielle (a) simple et (b) avec contact au substrat.

La force nécessaire à la relâche du micro-objet va dépendre de la présence ou non d'un contact adhésif au niveau du substrat, ainsi que de l'orientation des contacts par rapport à la direction de la force d'inertie. La force nécessaire à rompre l'interface « objet - préhenseur », avec les notations et orientations décrites à la Fig. 4.45, s'exprime par :

$$F_{In} > A_p \sin(\phi - \alpha) + T_p |\cos(\phi - \alpha)| \quad (4.88)$$

où  $A_p$  est l'adhésion au préhenseur,  $F_{In}$  la force d'inertie et  $\alpha$  l'orientation de l'interface « objet - préhenseur » et  $\phi$  la direction de la force inertielle selon la Fig. 4.45.  $T_p$  correspond à la résistance au glissement et s'exprime par :

$$T_p = \mu_p N_p = \mu_p (A_p - F_{In} \sin(\phi - \alpha)) \quad (4.89)$$

La force minimale permettant la dépose devient alors :

$$F_{In} > \frac{A_p (\sin(\phi - \alpha) + \mu_p |\cos(\phi - \alpha)|)}{1 + \mu_p \sin(\phi - \alpha) |\cos(\phi - \alpha)|} \quad (4.90)$$

Dans le cas où l'objet est au préalable aussi en contact avec le substrat, l'effet d'adhésion au substrat viendra renforcer l'effet inertiel de telle sorte que la force s'exprime par :

$$F_{In} > A_p \sin(\phi - \alpha) + T_p |\cos(\phi - \alpha)| - A_s \sin \phi - T_s |\cos \phi| \quad (4.91)$$

avec  $A_S$  l'adhésion au substrat.  $T_S$  correspond à la résistance au glissement à l'interface «objet-substrat» et s'exprime selon :

$$T_S = \mu_S N_S = \mu_S (A_S + F_{In} \sin \phi) \quad (4.92)$$

La condition de dépose par inertie devient alors :

$$F_{In} > \frac{A_P (\sin(\phi - \alpha) + \mu_P |\cos(\phi - \alpha)|) - A_S (\sin \phi + \mu_S |\cos \phi|)}{1 + \mu_P \sin(\phi - \alpha) |\cos(\phi - \alpha)| + \mu_S \sin \phi \cos \phi} \quad (4.93)$$

L'accélération limite de dépose  $a^*$ , selon qu'il y ait ou non un contact au substrat, s'exprime finalement par :

$$a^* = \frac{F_{In}}{m_{objet}} \quad (4.94)$$

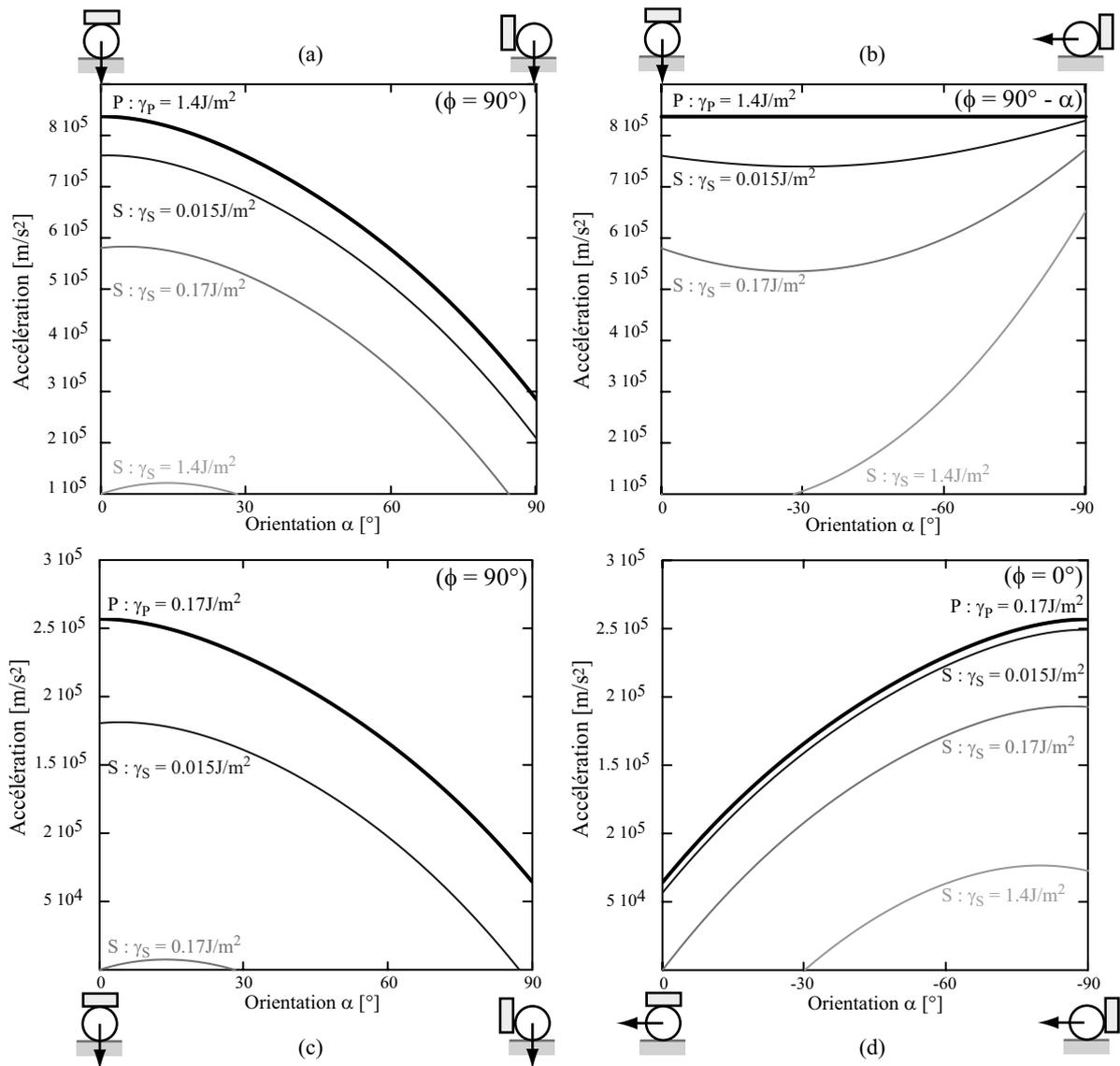
Dans le cas d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  et d'une surface d'énergie d'adhésion  $\gamma_P$  de  $1.4 \text{ J/m}^2$  au niveau du préhenseur, l'accélération limite vaut  $7.4 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$  ( $\alpha = 0^\circ$  et  $\phi = 90^\circ$ ). Si l'objet est en contact avec un substrat d'énergie d'adhésion de  $0.17 \text{ J/m}^2$  et avec les mêmes orientations, l'accélération devient  $4.8 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$  (Fig. 4.46). L'ordre de grandeur élevé de l'accélération est dû à la faible masse de l'objet. Ainsi la taille de l'objet a une influence plus marquée ( $a^* \propto 1/R^2$ ) que les caractéristiques d'adhésion aux interfaces ( $a^* \propto \sqrt{\gamma}$ ), sur l'accélération limite de dépose (Fig. 4.47 (c)).

En inclinant le préhenseur, l'accélération limite est modifiée d'un facteur allant de 1 à  $\mu_P$  en fonction de l'angle  $\alpha$ . L'accélération minimale permettant la dépose est ainsi celle permettant de simplement faire glisser l'objet à l'interface P ( $\alpha = \phi$ ), alors qu'inversement l'influence la plus bénéfique du substrat correspond à l'alignement de son adhésion à la direction de la force d'inertie ( $\phi = 90^\circ$ ) (Fig. 4.46). La nécessité d'une force externe de dépose est explicitée par le rapport des forces d'adhésion aux deux interfaces, ainsi que par leur orientation et coefficient de frottement respectifs, soit :

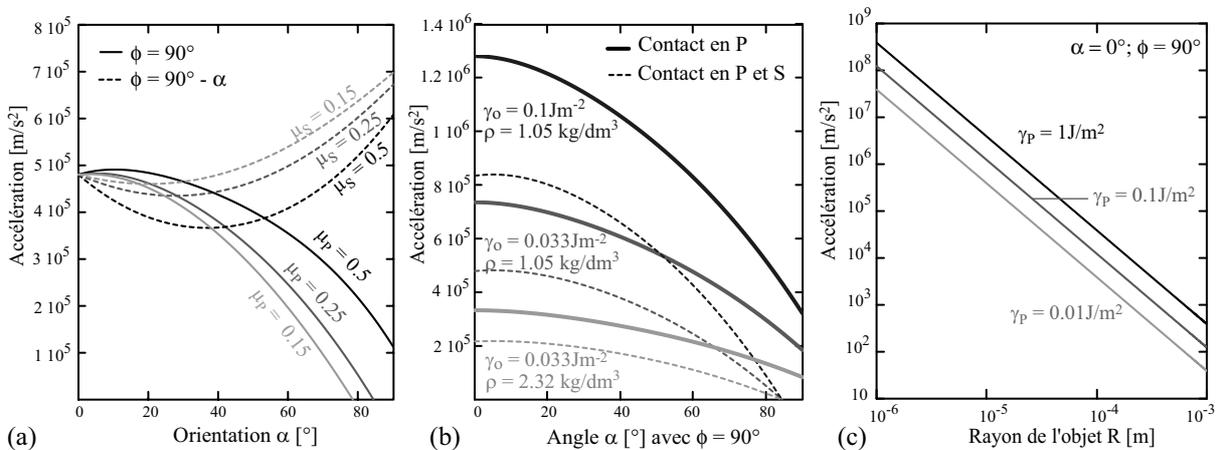
$$\sqrt{\Gamma} = \frac{A_P}{A_S} > \frac{\sin \phi + \mu_S |\cos \phi|}{\sin(\phi - \alpha) + \mu_P |\cos(\phi - \alpha)|} \quad (4.95)$$

Les effets des caractéristiques de l'objet et des interfaces sont illustrés à la Fig. 4.47 ((a) et (b)). L'accélération de dépose est moins sensible à la variation des coefficients de frottement lorsque la force d'inertie s'exerce perpendiculairement au préhenseur et au substrat. Les caractéristiques de l'objet influencent l'amplitude de l'accélération, mais ne modifie pas l'orientation limite à partir de laquelle une force externe est nécessaire ou non à la dépose (Fig. 4.47 (b) et expression (4.95)).

Le fait d'avoir un contact préalable au substrat diminue donc l'accélération nécessaire à la dépose, mais il est souvent difficile de s'assurer du contact aux deux interfaces simultanément. Ainsi il est probable que, même proche du contact, il faille appliquer une accélération maximale pour engendrer la dépose de l'objet. L'utilisation d'un signal sinusoïdal plutôt qu'une impulsion unique de type Dirac simplifie notamment l'électronique de commande et permet surtout un meilleur contrôle de l'accélération produite. Un tel signal induit par contre un mouvement dans les deux sens. Pour des interfaces parallèles et une force normale, un effet de traction/compression est induit à l'objet. Bien que l'amplitude du mouvement puisse être très faible (quelques dizaines de nanomètres typiquement avec un actionneur piézoélectrique) cet effet va induire des contraintes (indésirables) à l'objet ou se répercuter au niveau du substrat.



**Figure 4.46 :** Evolution de l'accélération limite de dépose d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  pour (a et b)  $\gamma_P = 1.4\text{J/m}^2$  et (c et d)  $\gamma_P = 0.17\text{J/m}^2$  avec et sans contact au substrat. L'influence de l'orientation du préhenseur ( $\alpha$ ) est illustrée aux figures (a) et (c) et celle du substrat en (b). Les figures (c) et (d) se différencient par une force inertielle normale et tangente au substrat respectivement.



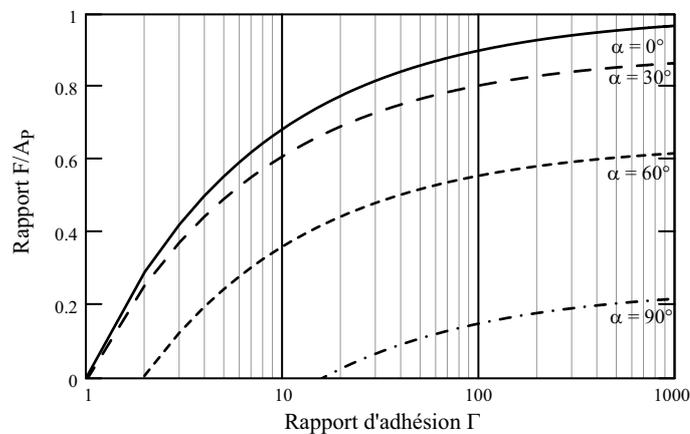
**Figure 4.47 :** (a) Influence des coefficients de frottement ( $\mu_P$  et  $\mu_S$ ) sur l'accélération limite de dépose; (b) Influence de la nature de l'objet manipulé ( $\gamma_P = 1.4\text{J/m}^2$ ,  $\gamma_S = 0.17\text{J/m}^2$ ,  $\mu_P = \mu_S = 0.25$ ). (c) Evolution de l'accélération limite selon le rayon de l'objet et pour différentes conditions d'adhésion ( $\gamma_P$ ).

### 4.7.2 GÉNÉRALISATION

La condition de dépose par inertie (4.93) peut être généralisée à une condition de dépose sous l'action d'une force externe quelconque mais connue. Sa relation au rapport d'adhésion aux interfaces  $\Gamma$  est obtenue par l'expression :

$$\frac{F}{A_P} > \frac{(\sin(\phi - \alpha) + \mu_P |\cos(\phi - \alpha)|) - \frac{1}{\sqrt{\Gamma}} (\sin \phi + \mu_S \cos \phi)}{1 + \mu_P \sin(\phi - \alpha) |\cos(\phi - \alpha)| + \mu_S \sin \phi |\cos \phi|} \quad (4.96)$$

Cette expression permet d'évaluer la force utile à appliquer pour provoquer la dépose, selon les orientations spécifiques du préhenseur et du substrat et selon leur rapport d'adhésion  $\Gamma$  (Fig. 4.48). Il s'agit donc d'un seuil de dépose, soit la rupture de l'interface « objet - préhenseur », d'où le rapport à la force d'adhésion de cette interface P. Le comportement selon les orientations uniquement (pour un rapport  $\Gamma$  donné) est identique à la Fig. 4.46.



**Figure 4.48** : Relation entre la force externe permettant la dépose et le rapport d'adhésion aux interfaces selon l'orientation du préhenseur et du substrat ( $\mu_P = \mu_S = 0.25$ ,  $\phi = 90^\circ$ ).

### 4.7.3 CONCLUSION

L'avantage de l'utilisation des forces d'inertie en micromanipulation provient de la possibilité de pouvoir déposer un microcomposant sans pour autant devoir assurer un contact avec le substrat. De plus, l'utilisation de matériaux piézoélectriques notamment permet de miniaturiser le système et surtout de générer de telles accélérations pour de très faibles déplacements. Les accélérations étant très élevées (de l'ordre de  $10^4 g$ ), elles ne pourront pas être induites par le manipulateur uniquement. Il est cependant imaginable de générer des chocs donc de fortes décélérations par le biais du manipulateur pour induire la dépose sans autre actionneur au niveau du préhenseur.

Il s'agit par contre d'un principe unidirectionnel, l'autre opération (de prise) se basant typiquement sur l'utilisation des effets d'adhésion ou d'un autre principe intégrée en combinaison au préhenseur.

## 4.8 CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'identifier les configurations permettant la prise et la dépose de microcomposants selon les effets d'adhésion aux interfaces en gardant à l'esprit la volonté de maîtriser la faisabilité des opérations de prise et de dépose et de conserver le positionnement des microcomposants au cours du transfert d'une surface à l'autre.

Nous nous sommes intéressés aux opérations de prise et de dépose et non à l'assemblage de microcomposants qui nécessite notamment l'insertion ou la fixation du composant à sa surface réceptrice. Un effort supplémentaire est donc appliqué au composant lors de la dépose. La relâche peut ainsi être facilitée par le maintien, dû à une force externe, du composant en position sur le substrat, mais ces effets peuvent aussi perturber le positionnement.

Les principes de micromanipulation étudiés dans ce chapitre ont concernés :

- la *manipulation par adhésion* dont l'étude a mis en évidence l'importance du choix de la direction de retrait pour permettre un transfert fiable selon la disposition des interfaces «objet-préhenseur» et «objet-substrat» et selon leur rapport d'adhésion  $\Gamma$ . Les zones de transfert fiable sont nettement restreintes par les effets de glissement simultané aux deux interfaces.
- l'*utilisation de pinces* dont l'élément essentiel est l'importance d'intégrer une référence mécanique rigide et un seul doigt mobile ce qui permet de minimiser les perturbations lors de la dépose et donc d'optimiser le positionnement. L'opération de dépose est dès lors un cas spécifique de la manipulation par adhésion.
- les *manipulations vacuum* et par *capillarité* ont illustré la présence d'une force supplémentaire à l'interface «objet - préhenseur». L'utilisation d'une sous-pression limite l'utilisation de ce principe à des composants de taille supérieure à  $\sim 20\mu\text{m}$ . L'utilisation d'un liquide à l'interface du préhenseur permet aussi d'optimiser les opérations de prise. Ces deux principes ont comme avantage d'engendrer une force attractive à distance, ce qui facilite la phase d'approche puis de prise tout en limitant passivement la force appliquée au composant. Les forces étant appliquées au niveau du préhenseur, les opérations de prise sont optimisées. Plusieurs stratégies de dépose ont été discutés.
- la *dépose inertielle* : l'utilisation d'une force externe aux interfaces a été étudiée par l'intermédiaire des forces inertielles. Ce principe, qui doit être combiné à une autre stratégie pour assurer la prise, permet avant tout de s'affranchir de l'influence du substrat.
- l'influence d'une *vibration à l'interface* a été discutée. Son effet a été observé expérimentalement (voire chapitre 8). Une piste de réflexion sur les causes possibles de cet effet bénéfique est proposée sur la base des modèles de propagation de fissure et du comportement au contact avant glissement élaborés par Savkor et Mindlin.

Les modèles des tâches de prise et de dépose des principes de micromanipulation permettent tout d'abord d'évaluer la faisabilité des opérations dans un cadre déterminé. Ils font ainsi office d'éléments d'aide à la conception de micropréhenseurs. Ils interviennent au niveau du choix du principe de micromanipulation tel que présenté par la méthodologie de développement de micropréhenseurs au chapitre 5. Les préhenseurs conçus durant cette recherche et basés sur les principes exposés dans ce chapitre sont présentés au chapitre 7. Les résultats des opérations de micromanipulation les utilisant font l'objet du chapitre 8.



# MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

---

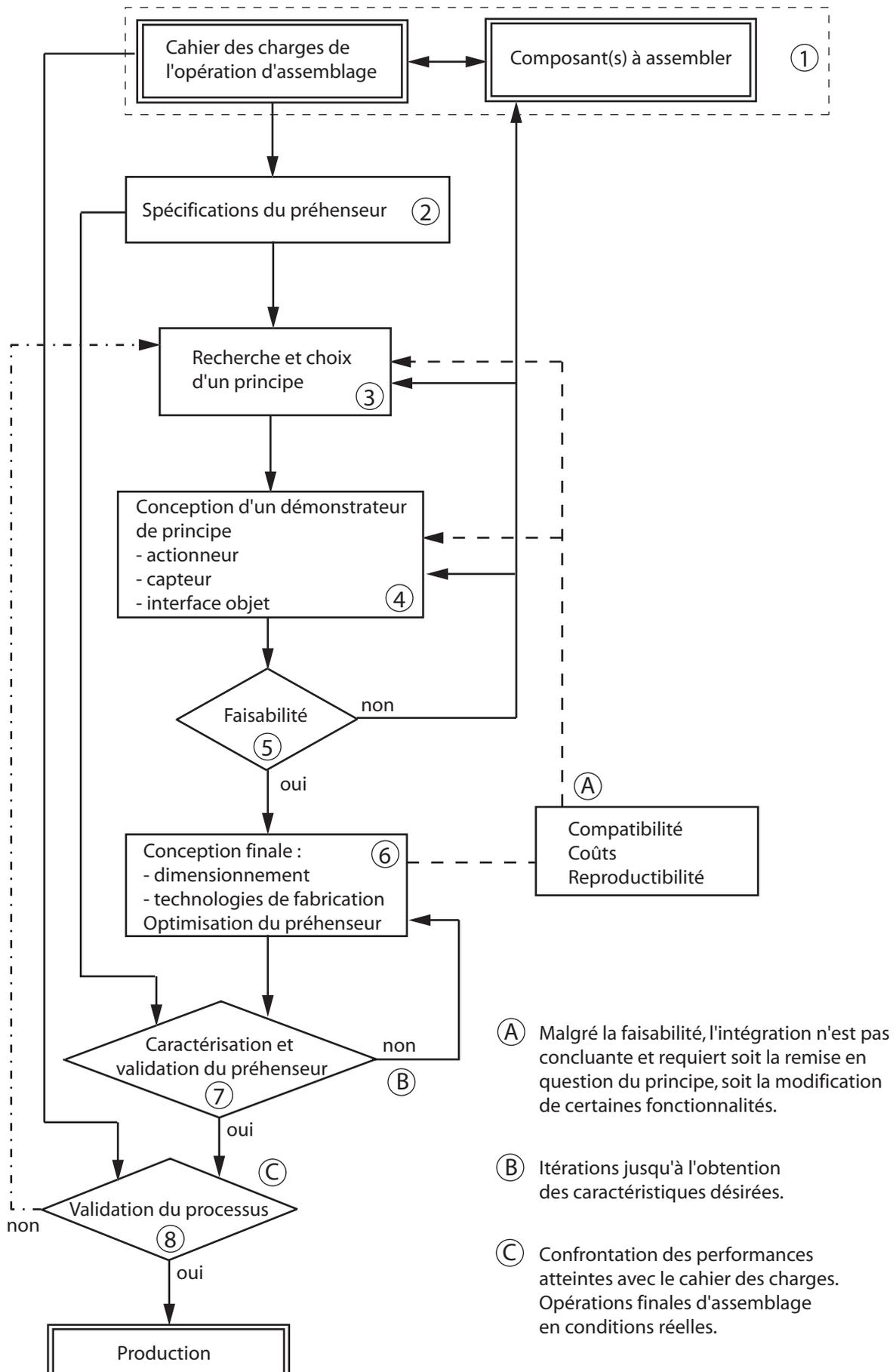
La méthodologie exposée dans ce chapitre consiste en une démarche visant la conception de micropréhenseurs. Ceux-ci se veulent reproductibles, permettant des manipulations fiables et répétables intégrant la problématique des forces d'adhésion. L'intérêt de cette méthodologie est de stimuler l'utilisation de principes divers de prise et de dépose pour des microcomposants, d'identifier les principales tendances par modélisation, et d'établir au plus tôt une faisabilité expérimentale avant d'aborder les problématiques d'intégration.

Les caractéristiques d'un micropréhenseur dépendent d'interactions étroites non seulement avec la tâche d'assemblage à effectuer, mais aussi avec la conception du composant lui-même. Les développements du micropréhenseur et des microcomposants devraient être effectués de concert. En dépit de cette recommandation, le développement des composants devrait au moins être abordé non seulement par rapport à leurs fonctionnalités propres, mais également dans l'objectif de leur assemblage. Ceci permet d'appréhender au mieux les exigences de positionnement, tout en offrant un choix optimal des surfaces de contact en manipulation.

Comme nous l'avons discuté au chapitre 3, il existe de nombreuses incertitudes liées aux paramètres décrivant les interfaces entre objet et préhenseur durant les opérations de manipulation et d'assemblage. De la difficulté de maîtriser ces paramètres découle celle de l'évaluation fiable des effets d'adhésion. Pour les mêmes raisons, les modèles des principes de manipulation exposés au chapitre 4 sont basés sur des hypothèses simplificatrices au niveau des interactions aux interfaces. Il s'avère dès lors important de valider la faisabilité des opérations avant de concevoir le préhenseur final. Il nous a paru alors essentiel d'introduire tôt dans le processus de développement d'une tâche de micromanipulation une étape de validation du ou des principes de prise et de dépose projetés. Cette méthodologie intègre donc une étape de conception d'un démonstrateur de principe. Cet aspect prend tout son sens au vu du coût et des délais contraignants de certains procédés de fabrication, d'ailleurs peu adaptés aux étapes itératives.

La méthodologie de conception comprend ainsi les phases suivantes :

1. Etablissement du cahier des charges de la tâche d'assemblage en interaction avec les spécifications du microcomposant et du récepteur;
2. Etablissement des spécifications du préhenseur;



**Figure 5.1 :** Principales étapes de développement d'un outil de micromanipulation.

3. Choix d'un principe de manipulation;
4. Conception d'un ou plusieurs démonstrateur(s) de principe;
5. Tests de faisabilité sur la base du démonstrateur;
6. Conception finale, intégration et optimisation;
7. Validation du préhenseur;
8. Validation du processus.

La Fig. 5.1 illustre la méthodologie de développement impliquant les étapes susmentionnées<sup>1</sup> ainsi que leurs interactions. Ainsi, l'étape de tests de faisabilité peut impliquer un retour aux phases déterminant le choix d'un principe de préhension ou la conception du démonstrateur (3 et 4), voire la modification du composant à assembler. Outre la faisabilité du principe, des questions de compatibilité, de fabrication ou de coût peuvent requérir un retour aux étapes précédentes. Les phases finales de conception et de validation (6 et 7) peuvent susciter quelques itérations dans le but, par exemple, d'optimiser le préhenseur.

## 5.1 CAHIER DES CHARGES DE L'APPLICATION

Avant d'aborder les spécifications propres au préhenseur, les opérations de prise et de dépose doivent être analysées. Il est nécessaire d'établir un mode opératoire de l'assemblage et d'en caractériser chaque élément c'est-à-dire le(s) composant(s), le support de stockage et d'alimentation, le récepteur et l'installation d'assemblage.

Le cahier des charges de l'application définit aussi les caractéristiques souhaitées en termes de cadence d'assemblage, de précision et/ou de répétabilité de positionnement. Il décrit également l'environnement de manipulation, soit la température, l'humidité relative et la classe de propreté ambiantes, imposé ou supposé par la tâche. Il peut être utile de clarifier les moyens nécessaires au contrôle des opérations, que ce soit en cours de processus (par exemple la mesure de position ou de la force exercée sur le microcomposant) ou effectuées après l'assemblage (contrôle de position, qualité de l'assemblage).

Les caractéristiques des microcomposants et les fonctionnalités du système final vont suggérer les spécifications de l'assemblage et bien sûr celles du préhenseur. Notamment, les matériaux et les qualités des surfaces vont jouer un rôle majeur dans l'étendue des effets d'adhésion. Il est aussi nécessaire de définir la stratégie de positionnement et de fixation ainsi que le rôle du préhenseur et du récepteur durant ces opérations. Nous ne pouvons bien sûr aborder tous les aspects liés à l'application elle-même. En effet, chaque situation requiert des besoins particuliers qu'il appartient d'étudier au cas par cas. Nous nous limitons ici à discuter les aspects de positionnement et de référencement, ainsi qu'à énumérer quelques remarques importantes concernant les interfaces avec le composant.

Concernant le composant, il s'agit de spécifier sa taille, sa géométrie, son référentiel, ainsi que les zones spécifiques à sa manipulation et à sa fixation sur le récepteur. Les matériaux et qualités de surface de ces zones revêtent une importance considérable dans l'évaluation des effets d'adhésion aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - récepteur». On peut aussi noter, de manière non exhaustive, les paramètres suivants :

- la sensibilité des composants, par exemple à la présence de liquide ou de contaminants, qui pourrait limiter le choix d'un principe de manipulation;
- les contraintes maximales autorisées;
- les efforts nécessaires soit à la prise, soit à la dépose (lors d'une insertion par exemple);
- la variabilité de la taille et de la qualité des surfaces.

---

1. La numérotation des sous-chapitres correspond au numéro du chapitre suivi par la numérotation des différentes étapes de la méthodologie (soit 5.étape).

Les caractéristiques du récepteur sont aussi importantes que celles du composant. Elles permettront de déterminer le rapport d'adhésion aux interfaces (§ 4.1.1) et d'évaluer les opérations. Il en va de même pour le support d'amenée des composants. Enfin, sur la base de la stratégie de positionnement adoptée, le concept de référencement pourra être intégré au niveau du composant, du préhenseur et du récepteur.

### 5.1.1 ASPECTS DE POSITIONNEMENT ET DE RÉFÉRENCEMENT

Différentes stratégies de positionnement ou de référencement peuvent être utilisées (§ 4.1.2). Elles varient en fonction :

- de la complexité des composants, du récepteur ou encore de l'organe terminal du préhenseur,
- des moyens de mesure de position ou d'une autre information permettant de quantifier l'alignement du composant,
- de l'accessibilité (physique et/ou optique) au composant.

Le positionnement relatif entre composant et récepteur peut être obtenu par l'intégration d'éléments de référencement mécanique au niveau de la liaison «récepteur - composant». Dans ce cas, le préhenseur n'a a priori pas besoin d'intégrer d'élément d'orientation, ou peut opérer une pré-orientation avant assemblage. La répétabilité de positionnement est alors déterminée par la qualité des éléments de référencement ainsi que par la qualité du maintien (stabilité, rigidité, précision et jeu).

Dans le cas où l'assemblage nécessite une position relative à un élément externe, ce qu'on pourrait appeler un positionnement fonctionnel, ou lorsqu'il n'y a pas d'élément de référencement au niveau du récepteur, l'alignement se fait par une mesure. Il peut s'agir d'une mesure de position, entre une cible et le microcomposant, ou d'une mesure de fonctionnalité, comme dans le cas de l'alignement d'éléments optiques où le maximum d'intensité indique la position optimale. La précision du positionnement est alors déterminée par la précision de la mesure, de la résolution et de la répétabilité du manipulateur, ainsi que de la répétabilité de l'opération de dépose.

Enfin, le composant peut être complètement référencé au niveau du préhenseur, puis déposé à une position prédéfinie sur le récepteur. L'orientation du microcomposant est donc définie uniquement par la liaison «objet - préhenseur». La répétabilité du positionnement dépend alors de celle du manipulateur et de la répétabilité des opérations de prise et de dépose assurées par le préhenseur.

On peut en outre noter que ces stratégies peuvent être combinées afin d'obtenir une orientation passive selon certaines directions, par le biais du préhenseur ou du récepteur, et un alignement sur la base d'une mesure pour les degrés de liberté non contraints mécaniquement.

Les moyens de fixation n'ont pas été évoqués ici. Il convient pourtant de noter que ceux-ci occasionnent des contraintes sur les composants et sont donc à l'origine de perturbation de l'alignement. L'optimisation du positionnement final nécessite donc d'étudier la répétabilité du processus de fixation et les moyens pour le contrôler. Cette optimisation sort du cadre de cette étude, mais de telles considérations ont notamment été étudiées et implémentées dans l'assemblage de composants optiques TRIMO [Scussat00].

## 5.2 SPÉCIFICATIONS DU PRÉHENSEUR

Sur la base du cahier des charges de l'application et des caractéristiques du composant, les fonctionnalités du préhenseur peuvent être spécifiées. Elles concernent notamment les forces nécessaires à la prise, au maintien et à la dépose du composant ou encore le besoin d'intégration d'un système de mesure. Le concept de l'interface «objet - préhenseur» peut être déterminé sur la base de l'espace disponible autour du composant (son accessibilité) durant les opérations de prise et de dépose, couplé aux éléments de référencement mécanique nécessaires.

D'autres paramètres dépendent quant à eux de l'installation de manipulation. Notamment, l'encombrement à disposition du préhenseur et les éventuelles contraintes concernant la connexion mécanique au manipulateur ainsi que les aspects d'alimentation énergétique. Enfin, la cohabitation avec des systèmes de mesures doit être évoquée, du simple fait des problèmes d'accessibilité apparaissant immanquablement à cette échelle.

Il peut en outre être nécessaire d'établir les besoins en adaptabilité ou en modularité. Ces aspects sont généralement liés à la cadence d'assemblage désirée et au nombre de composants différents qui devront être assemblés. Au lieu de changer l'outil complet, on peut préférer changer seulement l'organe terminal du préhenseur. Celui-ci s'adapte alors par exemple à la taille ou à la géométrie des composants, alors que le principe de prise et de dépose reste identique. D'autres situations pourraient requérir un préhenseur capable de manipuler un certain nombre de composants différents.

### 5.3 PRINCIPES DE MANIPULATION

Sur la base des deux étapes précédentes, une recherche des principes de prise et de dépose exploitables doit ensuite être effectuée. En vue du choix final<sup>2</sup>, les principes peuvent être comparés selon les critères non exhaustifs suivants :

- Fiabilité :
  - **faisabilité** : est-ce que le principe peut permettre la prise et/ou la dépose fiable de ce type de composant. On prendra en compte ici notamment les matériaux du composant. Par exemple, un composant à tendance hydrophobe sera peu, voire pas du tout compatible avec une manipulation par capillarité.
  - au niveau du **positionnement** : est-il possible d'intégrer les éléments de référencement mécanique au niveau de l'embout du préhenseur et/ou d'utiliser la stratégie de positionnement nécessaire à l'application ?
  - **effort de prise et de maintien** du composant : la force déployable par ce principe doit être suffisante pour permettre la prise et parfois l'extraction du composant de son support. Le maintien du composant doit ensuite être suffisant pour supporter les accélérations du manipulateur, puis les efforts durant le positionnement et éventuellement la fixation du composant à son récepteur.
  - **sensibilité** : l'environnement de la manipulation, notamment le taux d'humidité relative, influence considérablement les effets d'adhésion. Il est donc nécessaire d'évaluer les principes de prise et de dépose suivant les conditions finales ainsi que leur sensibilité à une variation de ces conditions.
- Accessibilité et encombrement :
  - **au niveau des micro-objets** : suivant le type de stockage des micro-objets (typiquement : en vrac, palettisés pré-orientés ou non, arrimés sur un *blue-tape* à partir d'un wafer ou encore attachés au wafer) ainsi que la forme du récepteur lui-même, l'espace à disposition du préhenseur autour et sur le micro-objet peut être très restreint ou au contraire peu contraignant. L'utilisation d'une pince par exemple nécessite un certain espace autour du micro-objet, contrairement à une prise par capillarité qui peut s'effectuer par le dessus.
  - **au niveau du préhenseur dans l'installation** : il s'agit ici de constater l'adéquation des besoins du préhenseur avec les possibilités existantes ou potentielles de l'installation. On peut citer notamment les mobilités de l'installation, la connectique vers le préhenseur, l'encombrement à disposition.

---

2. Le micropréhenseur peut être le résultat de l'intégration d'un seul principe ou d'une combinaison de principes pour effectuer la prise et la dépose.

- **au niveau des moyens de mesure** : en fonction des opérations d'assemblage, l'interaction avec un capteur externe ou l'intégration d'un élément de mesure, comme un capteur de force par exemple, peut être bénéfique ou indispensable. Le suivi des opérations par vision notamment nécessite une certaine «accessibilité optique».
- Les temps de prise et de dépose en vue d'atteindre une cadence spécifiée.
- Télémanipulation ou automatisation :
  - l'aspect intuitif de son utilisation et la simplicité de son emploi sont des critères importants notamment en cas de télémanipulation de composants relativement variés ou si différents opérateurs devront intervenir.
  - en vue de l'automatisation des tâches, les possibilités de mesure en temps réel sont à prendre en considération.
  - la reproductibilité des préhenseurs, en termes de fabrication et de fonctionnement, permet de limiter les étapes de calibration et de mise au point des opérations nécessaires après chaque changement d'outil.
  - l'automatisation des tâches engendre normalement des opérations plus répétables que lors de télémanipulations en minimisant l'influence de l'opérateur, mais dépend bien entendu de la sensibilité et de la fiabilité du préhenseur. La complexité des opérations doit aussi être considérée. Un contrôle fonctionnel avec correction automatique peut être prévu.
- Adaptabilité :
  - la possibilité de manipuler des composants qui varient selon leur taille, leur géométrie ou leur matériau.
  - la modularité du préhenseur, c'est-à-dire la possibilité d'interchanger un sous-élément pour l'adapter à différents micro-objets.
- La compréhension du principe :
  - de la finesse du modèle va aussi dépendre le temps de développement. En déterminant au moins les tendances, au mieux le comportement exact du préhenseur selon les circonstances, le nombre d'itérations au niveau de la faisabilité puis de l'optimisation peut être minimisé.

## 5.4 DÉMONSTRATEUR DE PRINCIPE

Le développement d'un démonstrateur de principe a pour but de valider la faisabilité des principes choisis pour les opérations de prise et de dépose. Cette étape permet aussi de tester et d'affiner les modèles. Du fait des simplifications effectuées au niveau des forces d'adhésion aux interfaces et de la difficulté de représenter avec exactitude l'environnement, il est important d'effectuer une première étape de faisabilité du principe avant d'aborder l'intégration de tous les éléments. Il est aussi encore possible d'évaluer différentes stratégies, voire différents principes.

Les technologies de fabrication peuvent être très coûteuses autant financièrement que temporellement. La conception d'un démonstrateur de principe devrait alors être adaptée aux techniques de prototypage. Il est en outre possible de développer séparément certains éléments, voire d'expérimenter divers procédés. Ceci peut être avantageux notamment concernant le développement d'un nouvel actionneur ou d'un système de mesure qui sera ensuite éventuellement intégré au préhenseur.

En effectuant cette étape soit tôt dans le développement du procédé global, soit en cours de développement des composants, il devient possible d'anticiper certaines modifications au niveau des liaisons «objet - préhenseur» et «objet - récepteur» et notamment d'optimiser les éléments de référencement<sup>3</sup>.

3. Ceci sera particulièrement relevé au chapitre 9 traitant de l'assemblage de composants MEMS.

## 5.5 FAISABILITÉ

Cette première étape de test consiste à valider la faisabilité du ou des principes de prise et de dépose pour l'application donnée en utilisant le ou les démonstrateurs de principe. Il s'agit donc de démontrer des performances prometteuses en terme de fiabilité des opérations, de positionnement, de cadence, etc, selon le cahier des charges. Les étapes d'optimisation des opérations et des outils viendront par la suite.

Les spécifications du préhenseur seront donc explorées. Le comportement du préhenseur, et notamment sa sensibilité, devrait être caractérisé, permettant ainsi de définir le champ des opérations possibles et au contraire les limitations d'un tel préhenseur. Il est aussi nécessaire de s'assurer que les conditions de l'environnement indispensables au fonctionnement du préhenseur soient compatibles avec le reste de l'installation.

## 5.6 CONCEPTION FINALE

Une fois la faisabilité des principes établie, la conception finale consiste en l'intégration des divers éléments du préhenseur. Il faut en outre considérer un certain niveau de reproductibilité. En effet, cet outil devra être reproduit par la suite pour d'autres installations ou applications.

L'optimisation des opérations et l'intégration des divers éléments sont cette fois-ci visées. L'interfaçage avec l'installation de manipulation, soit les connexions mécaniques, énergétiques et informatives entre le préhenseur et le manipulateur, doit être réalisé. Les problématiques d'encombrement et d'alimentation sont alors abordées.

Il peut néanmoins survenir que, malgré la validation des principes, l'intégration ne soit pas concluante en terme de coût, de reproductibilité ou de compatibilité au niveau de l'installation, mais encore au niveau des éléments de mesure et de contrôle ou au niveau des procédés de réalisation par exemple. L'interfaçage mécanique et la connectique peuvent aussi engendrer des contraintes trop lourdes à la viabilité du processus final. Des problématiques de packaging, de fragilité, de sensibilité trop importante aux conditions réelles de l'installation peuvent de même provoquer la remise en question des principes abordés, ou simplement du développement de l'un des éléments.

## 5.7 VALIDATION DU PRÉHENSEUR

Il convient bien entendu ensuite de mesurer les performances de chaque élément, puis de valider les opérations de prise et dépose. Quelques itérations entre la conception finale et la phase de validation peuvent donc être nécessaires, ceci afin d'adapter/améliorer un procédé de fabrication, retravailler une étape d'assemblage ou de connectique, optimiser les performances d'un actionneur ou d'un capteur ou encore dans le but d'améliorer la géométrie et la qualité de l'interface «micro-objet - préhenseur».

A l'issue de l'étape de validation du préhenseur, les différents éléments respectent les spécifications demandées et les opérations de prise et dépose sont concluantes en opérations manuelles.

## 5.8 VALIDATION DU PROCESSUS

Cette étape représente la mise en situation réelle du préhenseur. Il s'agit d'effectuer l'optimisation des stratégies de prise et dépose sur l'installation, d'élaborer l'automatisation du processus de manipulation et d'atteindre les cadences désirées. On s'intéresse ici plus particulièrement à l'interaction des divers éléments de l'installation qu'au préhenseur. Cette étape correspond donc au réglage final de l'installation, et prend en compte tous les aspects relatifs à l'amenée des composants, à leur transfert et assem-

blage, ainsi qu'aux étapes de contrôle simultané ou post-opérateur. La sensibilité du processus aux paramètres de l'environnement et de l'installation de manipulation devra être validée et les stratégies de gestion des erreurs mises en place.

Sauf quelques modifications de connectiques ou de géométries, l'échec de cette étape entraîne la remise en question du développement du préhenseur et donc l'intégration de principes différents; le succès de la validation ouvre la voie à la production.

## **5.9 CONCLUSION**

La méthodologie proposée consiste en une logique itérative permettant de valider d'abord la faisabilité des opérations et des spécifications demandées, puis l'optimisation du préhenseur et enfin de l'installation, tout en conservant un lien étroit avec le composant à manipuler et son récepteur. Cette approche est nécessaire étant donné les incertitudes et imprévus liés aux effets d'adhésion. L'expérience devrait néanmoins diminuer le nombre d'itérations par l'amélioration de la connaissance des interactions avec le composant.

Le développement de différents préhenseurs, du type des démonstrateurs de principes discutés ici, est relaté au chapitre 7. Le chapitre 8 présente ensuite les résultats des opérations effectuées avec ces préhenseurs. Enfin, une application type d'assemblage de microcomposants MEMS est présentée au chapitre 9. Cette application illustre notamment l'intérêt d'une conception simultanée des composants et du préhenseur afin d'optimiser les aspects de référencement mécanique.

# 6

## INSTALLATION DE MICROMANIPULATION

---

Ce chapitre traite du développement de l'installation de micromanipulation nécessaire pour caractériser les principes de prise et de dépose de microcomposants déterminés au chapitre 4. Les besoins, en terme de fonctionnalités, sont d'abord analysés avant de présenter la conception et le développement de la station.

Cette station de manipulation permet d'effectuer des tests comparatifs de préhenseurs basés sur des principes différents et dans des conditions d'expérimentation variables en environnement gazeux. Ces tests comparatifs comprennent les mesures de fiabilité des tâches de prise et de dépose, puis la mesure de répétabilité de positionnement pour des composants de taille de 50 $\mu$ m.

L'installation est ainsi constituée des systèmes suivants :

- un **module de mouvement** comprenant un robot de haute précision, le positionnement du porte-échantillon (aussi appelé substrat de manipulation), l'interfaçage des outils avec le robot ainsi qu'un changeur d'outils;
- un **module environnement** regroupant l'enceinte et les capteurs de température et d'humidité relative permettant un environnement stabilisé et surveillé;
- un **module vision** intégrant les éléments physiques permettant la mesure et le suivi des opérations;
- un **module logiciel** qui assure l'interface utilisateur ainsi que l'acquisition et le traitement des informations provenant des autres modules.

### 6.1 CAHIER DES CHARGES

L'installation doit être adaptée à des objets de 50 $\mu$ m pour les tests comparatifs, mais il est néanmoins intéressant et pratique de pouvoir y utiliser des objets ayant des tailles de 5 à 500 $\mu$ m, dans le cadre d'applications d'assemblage notamment.

Il nous a paru intéressant de développer l'installation selon le concept de MicroFactory, c'est-à-dire de proposer une installation compacte et de taille réduite, laissant au maximum les éléments générateurs de poussières à l'extérieur de l'espace contrôlé. L'installation est ainsi placée dans une ambiance standard de laboratoire et non dans une salle blanche.

### 6.1.1 MODULE DE MOUVEMENT

La caractérisation des outils se fera au maximum de manière indépendante du manipulateur afin de pouvoir ensuite facilement extrapoler nos conclusions à d'autres installations ne présentant pas les mêmes performances. Les spécifications au niveau du manipulateur sont néanmoins les suivantes :

- au moins trois axes de translation,
- faibles résolutions et hautes performances de répétabilité pour permettre un alignement de qualité lors des tâches de prise et de dépose (au moins <math><100\text{nm}</math>),
- bonne accessibilité visuelle à l'espace de travail pour permettre d'intégrer plusieurs systèmes de vision et donc plusieurs angles de vision, disposition de la sortie du robot permettant l'intégration d'autres systèmes mécaniques (changeur d'outils, porte-échantillon)
- pas de génération de poussière (ou faible génération mais localisée de manière à minimiser toute perturbation de l'espace de travail)
- l'espace de travail réel lors des micromanipulations sera limité par les systèmes de mesures (optique), des courses millimétriques sont donc suffisantes au niveau du robot.

L'intérêt d'une telle installation réside notamment dans la possibilité d'utiliser des préhenseurs fonctionnant selon des principes divers. Le développement d'une interface standard est donc nécessaire. Elle devra répondre aux besoins suivants :

- s'adapter à des préhenseurs qui se différencient par :
  - leur besoin en connectique : alimentation électrique et/ou pneumatique par exemple,
  - leur orientation qui peut d'ailleurs varier pour une même famille de préhenseurs (typiquement l'orientation d'une micropince),
  - leur encombrement.
- permettre une fixation simple et répétable :
  - en vue d'un changement d'outils automatique,
  - pour un positionnement automatique de l'organe terminal des préhenseurs dans le champ de vision du microscope sans autre réglage du manipulateur.

Finalement, il s'agit d'amener les micro-objets et leur substrat dans l'espace de travail :

- positionnement dans le plan horizontal :
  - grandes courses pour faciliter le changement du substrat de manipulation,
  - pas de besoin spécifique de précision puisque ce rôle est dévolu au manipulateur;
- positionnement vertical :
  - axe motorisé avec une résolution sub-micrométrique pour amener les microcomposants dans et hors du plan focal du microscope.
  - cet axe peut être remplacé ou complété par une mise au point automatique du microscope.

### 6.1.2 MODULE ENVIRONNEMENT

Les opérations de manipulation ont lieu dans un milieu gazeux dont le taux d'humidité relative doit pouvoir être contrôlé. La taille des objets manipulés étant du même ordre de grandeur que celle des poussières, il est nécessaire de travailler dans un espace propre et confiné afin de se protéger de tout flux inopiné.

Comme déjà mentionné, l'installation est placée dans des conditions standard de laboratoire. Les récents travaux portant sur le concept de la MicroFactory [Verettas06] ont montré qu'un petit volume est rapidement nettoyé au moyen d'un flux d'air filtré sans que celui-ci doive obligatoirement être présent de manière continue. Il est donc intéressant de ne placer que l'espace de travail à proprement parler dans une enceinte en laissant à l'extérieur les éléments susceptibles de générer des poussières ou de chauffer.

### 6.1.3 MODULE VISION

Ce module concerne le moyen de représentation de l'espace de travail, soit des positions relatives entre le préhenseur, l'objet et le substrat. L'utilisation d'un système de vision permettra d'acquérir toutes ces données simultanément. Deux angles de vision au minimum sont nécessaires à la supervision d'une tâche de micromanipulation :

- plan de l'échantillon (plan horizontal) : il concerne principalement les phases d'alignement et doit permettre la mesure des erreurs de positionnement des microcomposants :
  - résolution optique inférieure à  $0.5\mu\text{m}$  pour permettre la détection et la mesure de position de composants de  $50\mu\text{m}$ ,
  - champ de vision d'environ  $500\mu\text{m}$  : permet plusieurs opérations de pick&place de ces mêmes composants sans mouvement des optiques,
  - agrandissement fixe mais adaptable pour visualiser des composants jusqu'à  $5\mu\text{m}$ .
- axe vertical : information des hauteurs relatives et donc de la position du plan de l'échantillon par rapport à l'outil,
- grande distance de travail : permettre l'interaction de plusieurs systèmes de vision ainsi que libérer l'accès au préhenseur
- modularité et compacité : les angles de vision doivent pouvoir être modifiés selon la configuration des préhenseurs et notamment permettre une vue de dessus ou de dessous.

### 6.1.4 MODULE LOGICIEL

L'acquisition des données des différents modules précédemment cités ainsi que leur traitement sont l'objet de ce module. L'interface utilisateur doit :

- rendre l'espace de travail accessible à l'opérateur avec notamment les rendus des caméras ainsi que les positions respectives du manipulateur, de l'échantillon et du micro-objet,
- permettre à l'utilisateur d'interagir avec les différents éléments de l'installation : contrôle du manipulateur, de la position du substrat et bien sûr du préhenseur, localisation et mesure optique.

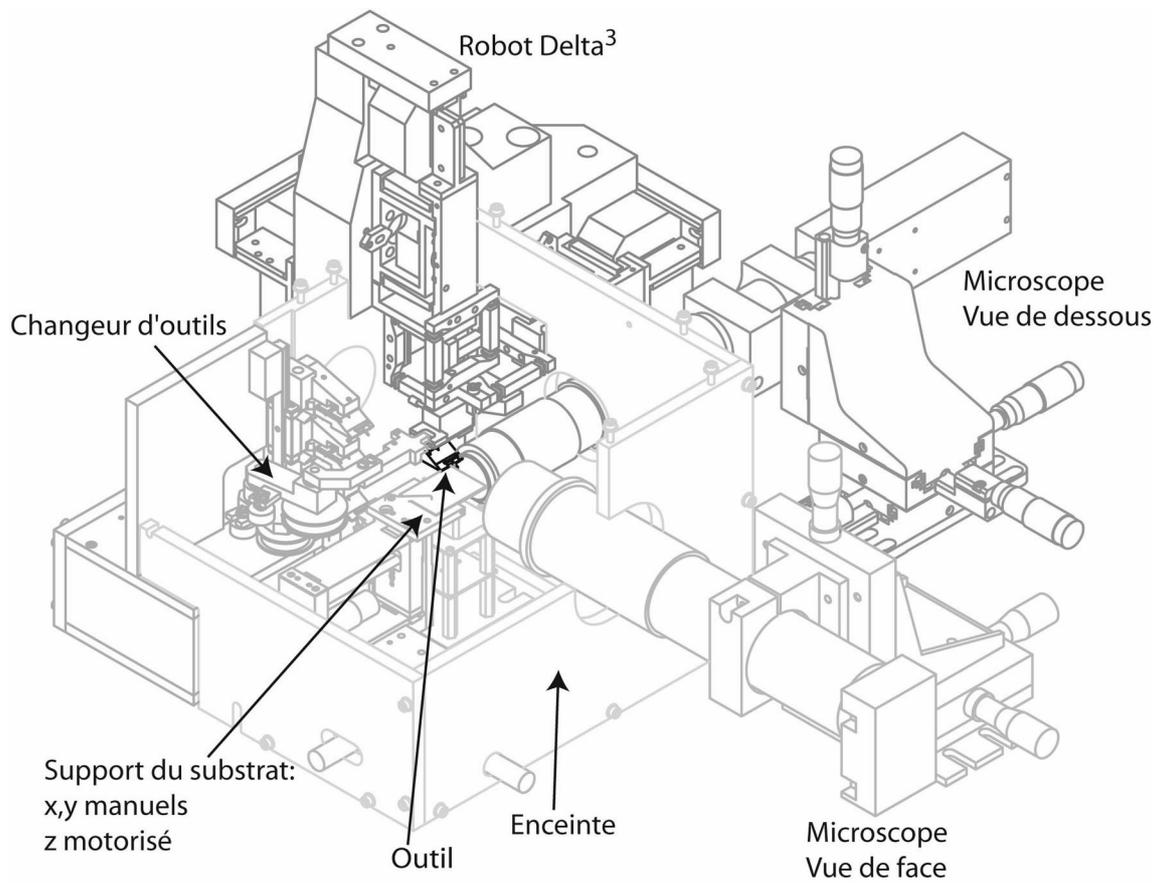
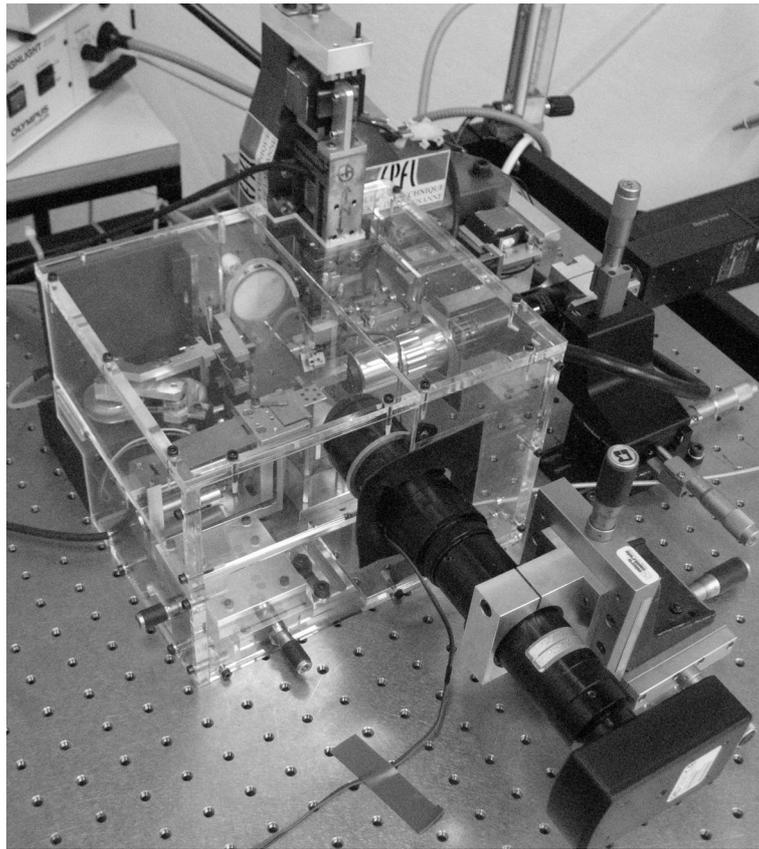
## 6.2 DESCRIPTION DE L'INSTALLATION ACTUELLE

La Fig. 6.1 montre l'installation de micromanipulation conçue puis utilisée pour la caractérisation de préhenseurs. Les divers éléments qui la constituent y sont spécifiés.

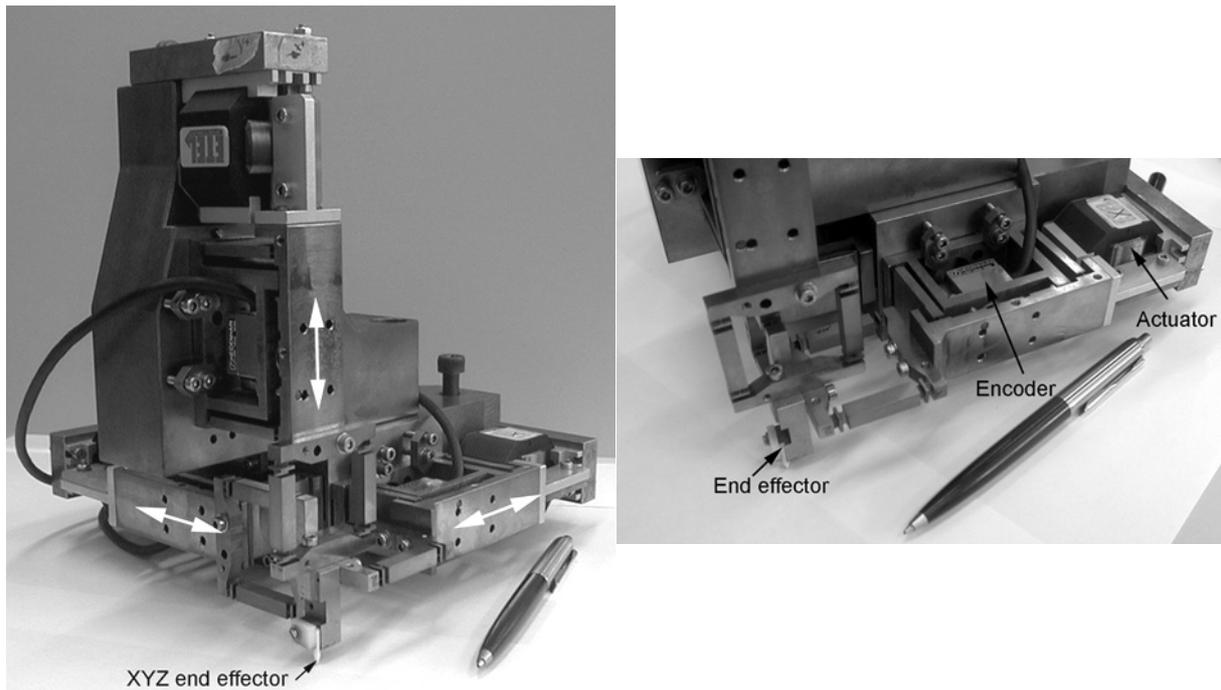
### 6.2.1 MODULE MOUVEMENT

#### 6.2.1.1 Manipulateur

Le robot Delta<sup>3</sup> a été intégré à la station de micromanipulation. Il s'agit d'un robot à cinématique parallèle à trois degrés de liberté construit sur la base d'articulations flexibles (Fig. 6.2). L'utilisation d'actionneurs à aimant mobile et de règles optiques n'engendre aucun frottement dans les boucles de mesure et de force. En conséquence, la résolution de positionnement n'est limitée que par la résolution de mesure du capteur, ainsi que sa répétabilité de positionnement. Avec des courses de  $\pm 2\text{mm}$ , ce manipulateur est dédié au positionnement fin et fut notamment conçu dans le but d'effectuer des micro-usinages par



**Figure 6.1 :** *Vue et schéma de l'installation de micromanipulation*



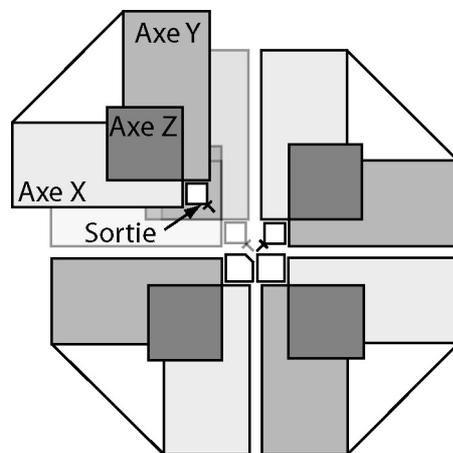
**Figure 6.2 :** Robot Delta<sup>3</sup> à cinématique parallèle à trois degrés de liberté. Ce robot est basé sur des articulations flexibles et des actionneurs et capteurs sans contact.

électro-érosion [Bacher03]. Il atteint une répétabilité de  $\pm 10\text{nm}$ , alors que sa précision absolue est de  $100\text{nm}$  à température stabilisée et après calibration [Fazenda06]. Les mesures lors de manipulations concernant des positions relatives, ces conditions extrêmes de stabilisation de température n'ont pas été nécessaires.

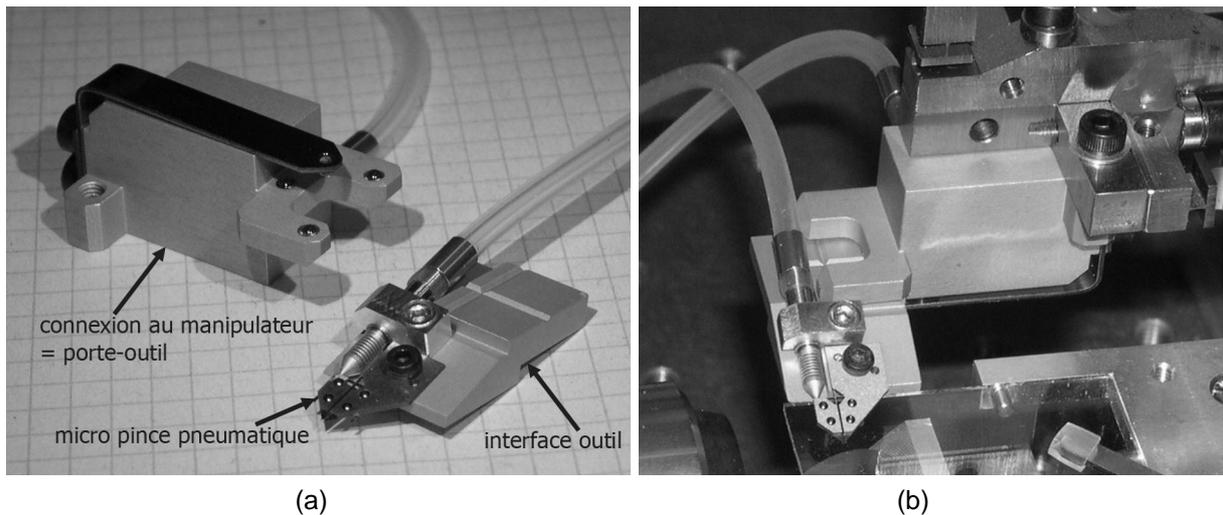
Son architecture présente en outre l'avantage de pouvoir juxtaposer plusieurs robots afin de travailler en collaboration autour d'un même espace de travail (Fig. 6.3). Finalement, il est en adéquation pour une installation compacte de type MicroFactory puisqu'il tient dans un cube de  $210\text{mm}$  de côté.

### 6.2.1.2 Interface outil

Les différents outils sont conçus de manière à pouvoir se fixer au travers d'une interface pneumatique unique au manipulateur et fermée par défaut. Cette interface peut être modifiée à souhait selon l'orientation et l'encombrement spécifiques à l'outil en conservant toutefois une position définie pour la partie active de l'outil. Le système de référencement est basé sur la liaison entre trois rainures en forme de V et trois billes (Fig. 6.4). Une répétabilité de positionnement de  $0.3\mu\text{m}$  a été mesurée. De cette manière, après chaque changement d'outil, la zone d'intérêt se retrouve toujours dans le champ de vision du microscope. L'alimentation, quel qu'en soit le type, relie l'interface directement à une station fixe au moyen d'une liaison flexible. Etant donné les petits mouvements du manipulateur, cette solution simplifie considérablement le changement d'outil puisque seule la liaison mécanique doit alors être assurée. Il est par contre important de fournir suffisamment de longueur à la connexion pour en diminuer la rigidité et ainsi réduire les perturbations au niveau du manipulateur.



**Figure 6.3 :** Disposition de quatre Deltas<sup>3</sup> pour collaborer dans un même espace de travail.



**Figure 6.4 :** Interface standardisée permettant la connexion des différents outils au manipulateur : (a) vue du système de référencement (l'interface est renversée par rapport à l'outil afin de voir la disposition des billes); (b) interface et outil fixés au robot Delta<sup>3</sup>.

### 6.2.1.3 Changeur d'outils

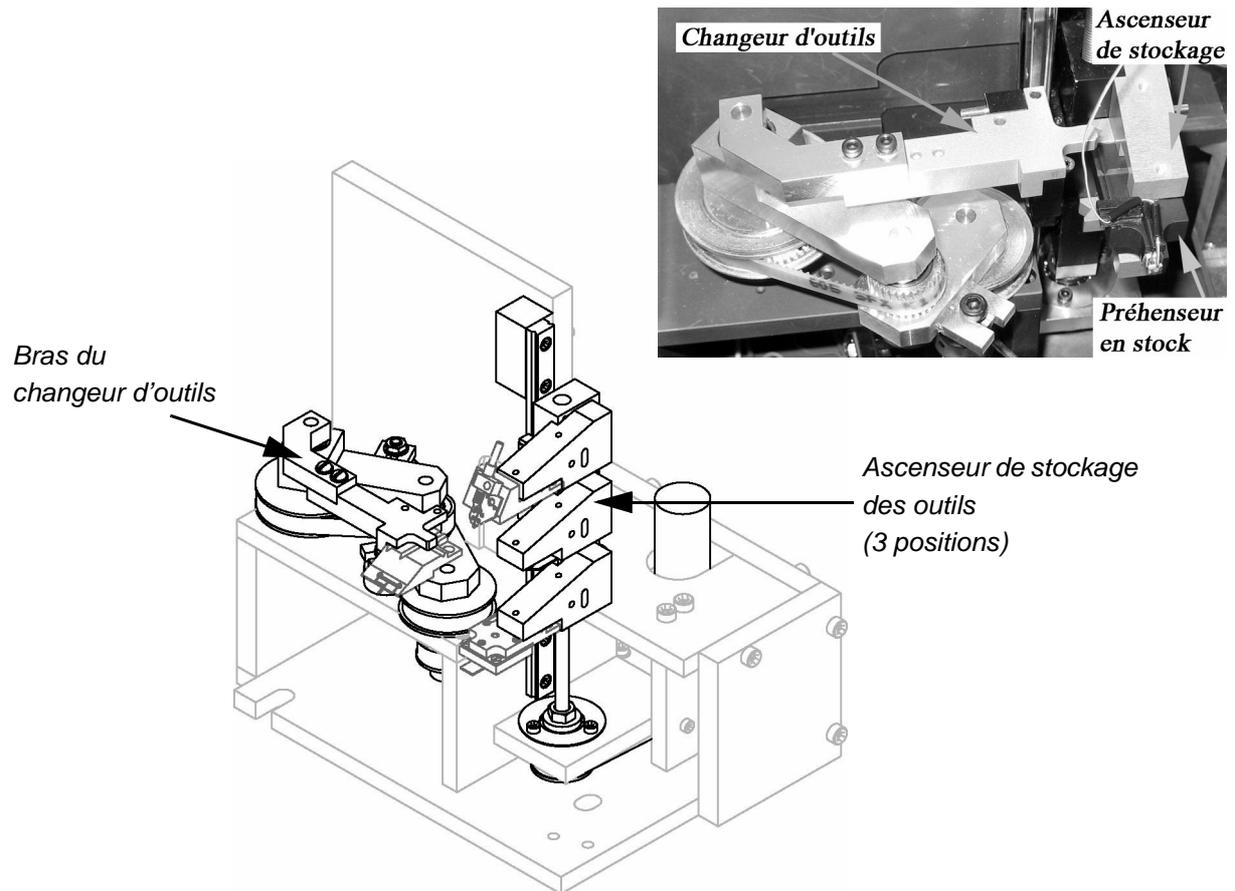
Le changeur d'outils automatisé doit permettre l'utilisation dans des conditions identiques, et donc sans ouvrir l'enceinte, des différents principes ou variantes de préhenseurs. Les conditions sont très contraignantes en terme d'encombrement à l'intérieur de l'enceinte pour un besoin d'au minimum trois positions de stockage. Contrairement au manipulateur, le changeur d'outil doit être pourvu d'axes de grandes courses permettant d'amener les outils de leur position de stockage au robot Delta<sup>3</sup> (Fig. 6.5).

Une trajectoire elliptique a été choisie; elle est basée sur une cinématique hypocycloïde avec un rapport de transmission de 2. Elle allie un faible encombrement pour un minimum de contrainte dans les liaisons flexibles d'alimentation. Un seul actionneur est nécessaire contrairement à une cinématique cartésienne qui nécessiterait deux actionneurs pour une trajectoire identique. La transmission par courroies permet bien sûr le choix du rapport de transmission mais garantit aussi l'orientation de l'outil (Fig. 6.6). La prise des outils et leur fixation de stockage se basent sur le même système de pince pneumatique qu'au niveau du manipulateur. Les stocks d'outils sont montés sur un axe vertical qui permet de stocker jusqu'à trois outils.

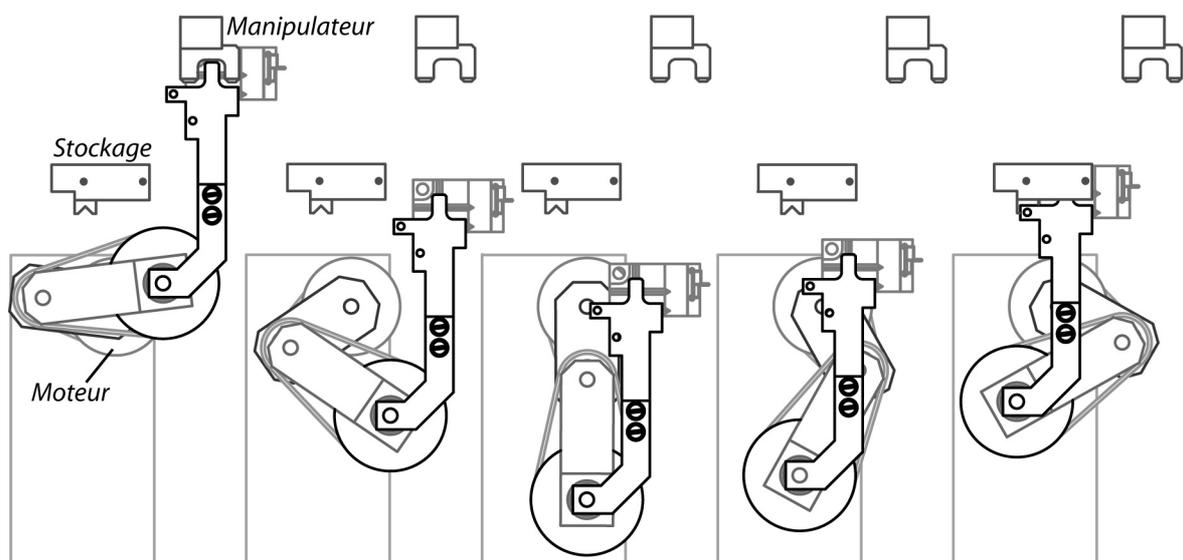
### 6.2.1.4 Positionnement du substrat de manipulation

Les positions respectives de la surface de manipulation et de l'outil sont définies par rapport au champ de vision fixe du microscope pendant la manipulation. L'échantillon et l'outil sont alors déplacés dans et hors du plan focal selon la séquence de manipulation (Fig. 6.7). Le substrat est fixé sur une table x-y afin de positionner de manière grossière les objets dans le champ de vision du microscope et donc dans l'espace de travail du manipulateur. Un axe z motorisé d'une résolution de  $0.1\mu\text{m}$  pour une course de  $300\mu\text{m}$  permet le positionnement des composants dans le plan focal du microscope.

Suivant les opérations, il peut être nécessaire de limiter les forces sur les micro-objets, que ce soit pour mieux contrôler la prise, par exemple par adhésion, ou simplement pour éviter d'induire une charge trop importante qui pourrait déformer plastiquement l'objet. Un (ou plusieurs) capteur de force pourrait être intégré à chaque outil. Une autre solution consiste à limiter la force au niveau du substrat par l'utilisation d'un système compliant. Ainsi la force ne dépend plus du manipulateur, mais de la rigidité au niveau du substrat. Dans ce but, un système compliant passif présentant une rigidité de  $10\mu\text{N}/\mu\text{m}$  est monté sur l'axe motorisé et supporte un substrat de 4mm de côté (Fig. 6.8).



**Figure 6.5 :** Vue et schéma du changeur d'outil avec l'ascenseur de stockage permettant l'utilisation de trois outils (préhenseurs).



**Figure 6.6 :** Trajectoire elliptique du changeur d'outil : (gauche) position de changement sur le Delta<sup>3</sup>; (droite) position de stockage.

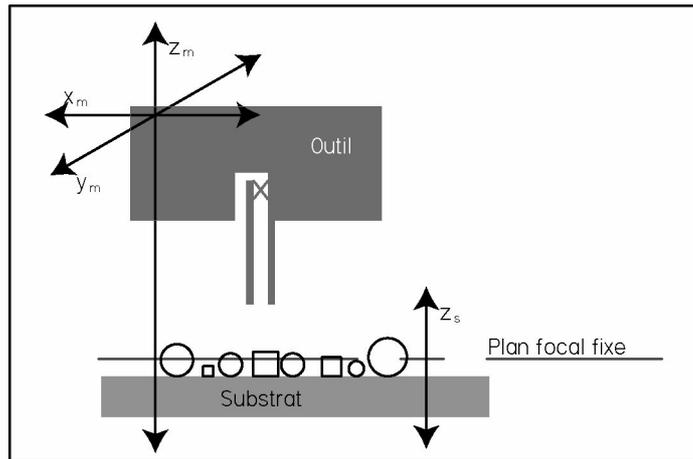


Figure 6.7 : Disposition du plan focal et des mobilités (motorisées) du manipulateur et de l'échantillon.

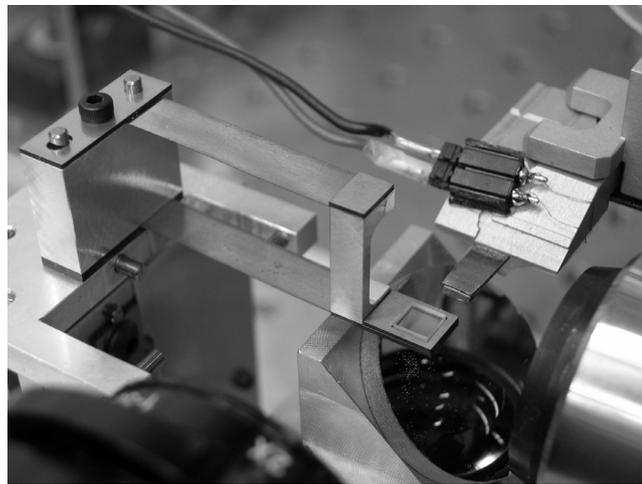


Figure 6.8 : Table compliante pour l'échantillon basé sur un système à deux lames parallèles et présentant une rigidité de  $10\mu\text{N}/\mu\text{m}$ .

## 6.2.2 MODULE ENVIRONNEMENT

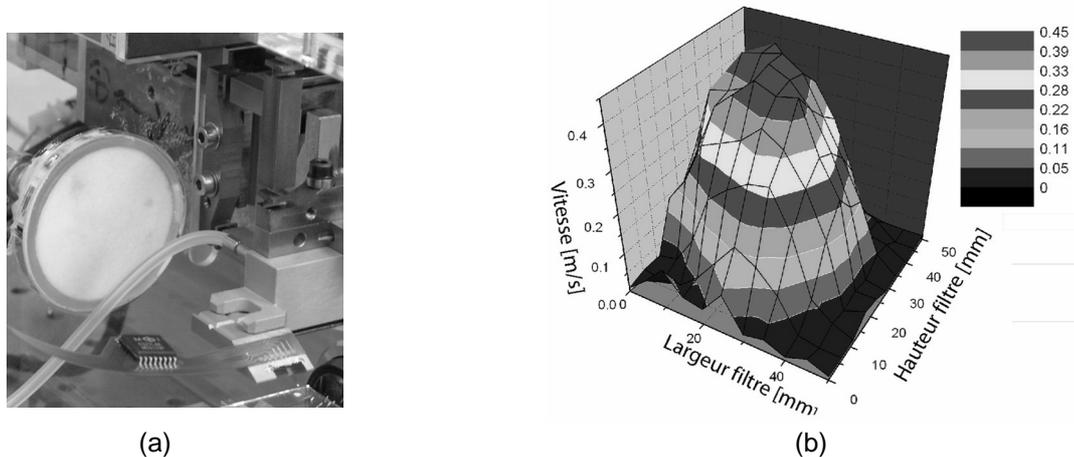
La sortie mobile du robot Delta<sup>3</sup> est située sur un coin de sa cinématique (Fig. 6.2); ceci permet de placer aisément sa sortie dans une enceinte tout en laissant les actionneurs à l'extérieur. Il en va de même pour les microscopes, dont les parties optiques se retrouvent dans l'enceinte alors que les caméras et les supports mobiles restent à l'extérieur, avec un accès facilité pour les différents réglages. L'enceinte mesure  $200 \times 220 \times 160 \text{ mm}^3$  (~7 litres). Ce volume restreint permet des modifications rapides de l'environnement, notamment au niveau de la qualité de l'air. Un gaz, en général de l'azote, y est introduit au travers d'un verre poreux qui joue le rôle de diffuseur. Ce dernier est situé proche de la zone de stockage des outils et de la zone de manipulation. Le type d'écoulement est déterminé par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{D_H \cdot v \cdot \rho}{\eta} = \frac{0.04\text{m} \cdot 0.4\text{m/s} \cdot 1.123\text{kg/m}^3}{1.782 \cdot 10^{-5}\text{Pas}} = 1008 \quad (6.1)$$

avec  $D_H$  le diamètre de la conduite,  $v$  la vitesse du fluide,  $\rho$  sa masse volumique et  $\eta$  son coefficient de viscosité dynamique et les valeurs numériques de l'azote. Le flux est alors laminaire si  $Re < 2000$  et turbulent pour  $Re > 3000$ . Entre ces deux valeurs, l'écoulement dépend de la forme de la conduite et des obstacles présents. Pour de petits volumes, les vitesses d'écoulement permettant un flux laminaire sont nettement plus élevées que dans une salle blanche classique. Dans notre cas, un flux laminaire est créé dans la zone de travail (Fig. 6.9). La disposition du flux est contrainte par celle des autres éléments de

l'installation et notamment par les systèmes de vision. Il n'a ainsi pas été possible de disposer d'un flux vertical ni d'une injection de gaz face au préhenseur ce qui aurait été optimal en terme de minimisation des turbulences au niveau de l'espace de manipulation.

La température et le taux d'humidité relative sont mesurés grâce à un capteur placé à côté de l'échantillon (*HygroPlam3* et sonde *HygroClip SC04* de *Rotronic*). L'injection d'azote permet de varier le taux d'humidité relative de la valeur ambiante à proche de 0%.



**Figure 6.9 :** (a) Injection du gaz dans l'enceinte au travers d'un verre poreux de  $\text{\O}40\text{mm}$  (orifices de  $\text{\O}40\mu\text{m}$  à  $\text{\O}100\mu\text{m}$ ) utilisé comme diffuseur; (b) mesure de la vitesse de l'air en fonction de la position à 75mm du diffuseur et pour une surpression de 0.5bar.

### 6.2.3 MODULE VISION

La supervision des opérations se fait au travers des deux microscopes suivants (Fig. 6.1) :

- un microscope inversé : il permet le rendu du plan de manipulation. Les positionnements respectifs de l'outil et de l'objet sont mesurés;
- une vue de face qui permet le positionnement selon l'axe vertical.

Seule la vue du plan de manipulation est effectivement utilisée pour les mesures de positionnement. Son optique a été dimensionnée et choisie en vue d'obtenir une résolution optique d'au moins  $0.5\mu\text{m}$  pour un champ de vision de  $0.5\text{mm}$  de côté, soit un agrandissement de 10. Le choix de la caméra de mesure (vue de dessous) est fondé sur le besoin de pixels de petite taille et de forme carrée. Il est en outre nécessaire d'avoir des distances de travail de plusieurs millimètres afin de laisser suffisamment d'espace pour l'accès à la zone de manipulation. Enfin, l'utilisation de systèmes optiques compacts (au contraire des microscopes usuels) permet de modifier la disposition des caméras selon les besoins. Les spécifications des optiques et des caméras choisies sont présentées dans le tableau (6.1).

L'illumination est un élément clé dans la qualité des images, et donc des mesures, à cette échelle. Le système Infinitube In-Line Assembly permet une lumière incidente. Le substrat est aussi éclairé par le haut ce qui permet des images en diascopie. La combinaison ou l'alternance de ces deux systèmes permet d'optimiser la qualité de la visualisation selon que l'on veuille détecter les contours ou la surface de l'outil.

		PLAN DE MANIPULATION	VUE LATÉRALE
Optique		<i>Infinitube In-Line Assembly 0.5x Objectif Mitutoyo M Plan Apo 20x</i>	<i>Video zoom lens Marcel Aubert</i>
	Agrandissement	10x (avec possibilité de 20x)	3x - 28x
	Profondeur de champ	3.5µm	
	Distance de travail	20mm	37mm
Caméra		<i>Sony XCD-X710</i>	<i>Philips ToUcam</i>
	Connectique	Firewire	USB
	Pixels	1024x768, 4.65µm, carré	640x480
	Taille du capteur	1/3"	1/3"
Image	Champ de vision	476x357µm <sup>2</sup>	(min) 0.17x0.13mm <sup>2</sup>
	Résolution	0.465µm/pixel	

**Tableau 6.1** : Spécifications des systèmes de vision

#### 6.2.4 MODULE LOGICIEL

Le module logiciel doit coordonner les informations provenant des différents modules et permettre à l'utilisateur d'interagir avec l'installation au travers de l'interface graphique. (Fig. 6.10). Les fonctionnalités à disposition sont les suivantes :

- rendus des caméras
- initialisation des axes motorisés
- commande en position du manipulateur et du porte-échantillon (en mode absolu, relatif et par pas)
- détection de l'objet et de l'outil
- affichage des positions de l'outil et de l'objet
- affichage des informations liées à l'objet (géométriques) et à l'outil
- séquence de prise/dépose automatique et statuts de la manipulation
- élaboration des informations nécessaires à la détection de l'outil et de l'objet
- chargement des données concernant l'outil et la séquence de manipulation
- recherche du plan focal par le porte-échantillon et le manipulateur
- calibration des appareils de mesure
- sauvegarde d'images et de séquences vidéo, réglage des caméras

La commande de toute l'installation, robot inclus, est basée sur un PC Biprocesseur (Fig. 6.11). Un processeur est alloué au contrôleur (*Movelt Automation*) des six axes motorisés avec une couche temps réel *Ardent RTX* sous Windows. Il permet de contrôler le robot Delta<sup>3</sup>, le porte-échantillon ainsi que le changeur d'outils. Les entrées-sorties analogiques sont dédiées aux préhenseurs. La couche application, implémentée en C++, communique avec le contrôleur via une librairie dédiée et traite les informations venant du système de vision. L'utilisation de deux processeurs pour le contrôleur et la couche application crée deux boucles séparées qui n'interfèrent pas au niveau du temps de calcul tout en permettant une communication rapide et facilitée entre les éléments.

En mode manuel, l'utilisateur contrôle toutes les opérations selon le visuel des caméras et peut en tout temps utiliser les fonctions de détection et de mesure de position de l'outil et de l'objet. Le mode automatique se base sur les choix de l'utilisateur concernant le type d'outil et la séquence à appliquer ainsi que la sélection de l'objet à manipuler. Il permet de mener des manipulations et des mesures de manière

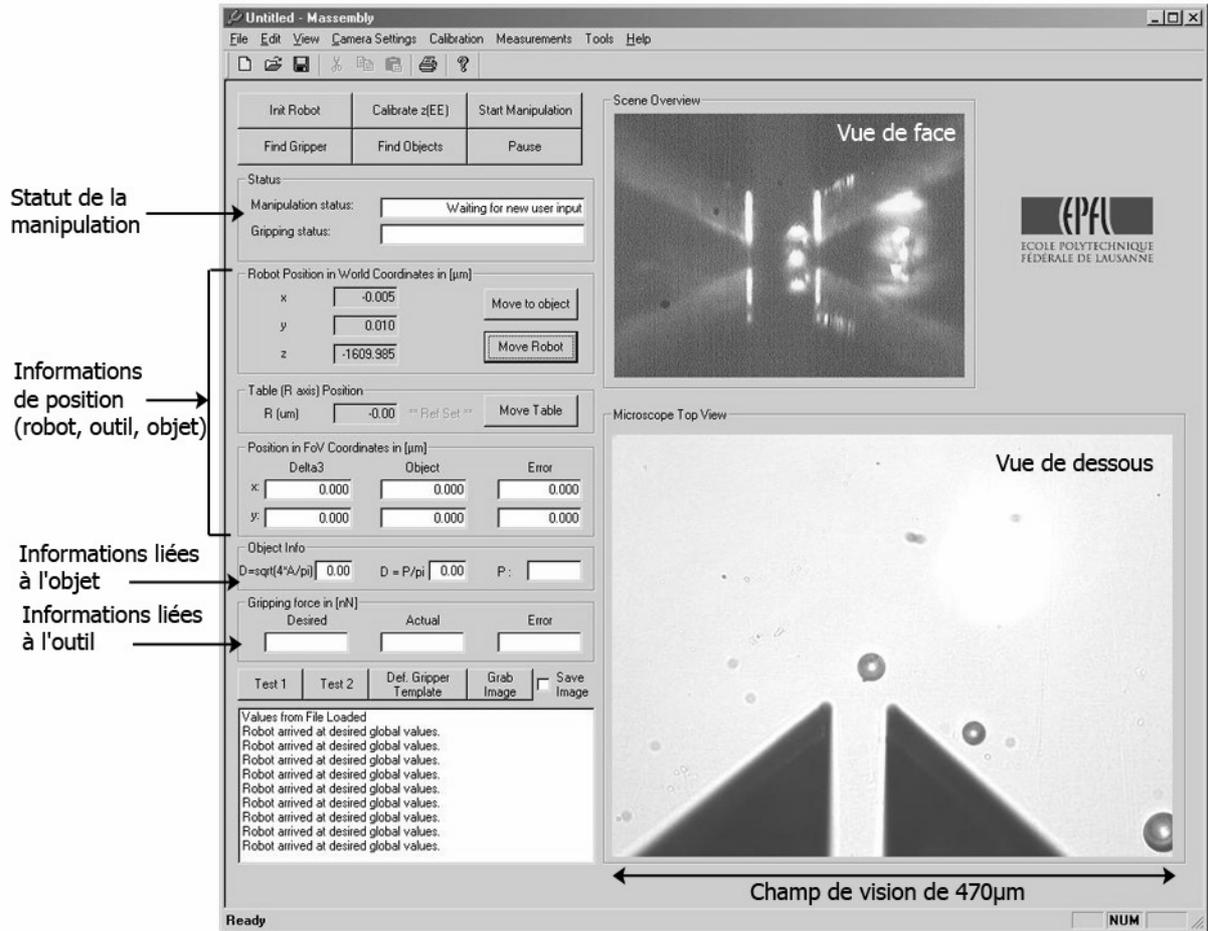


Figure 6.10 : Interface utilisateur graphique

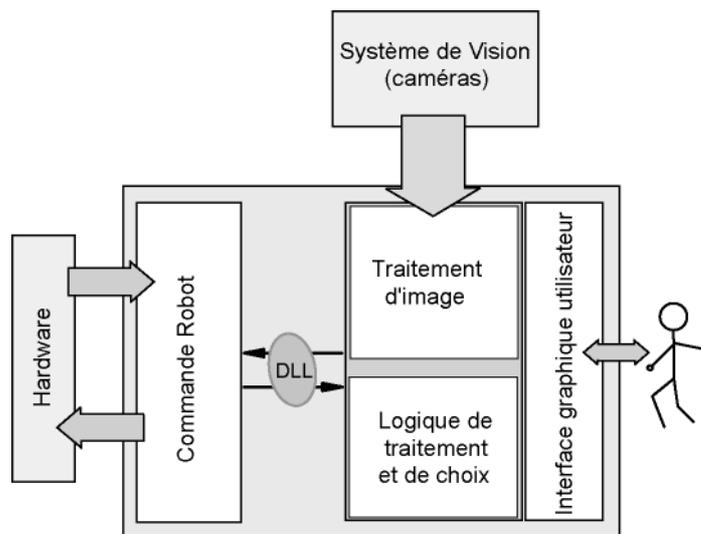


Figure 6.11 : Structure de la couche logique implémentée sur un PC Biprocesseur.

répétable tout en limitant l'influence de l'utilisateur sur les opérations pour un même set de paramètres. Le passage d'un mode à l'autre peut se faire en tout temps ce qui permet une certaine flexibilité dans l'élaboration et l'optimisation des processus.

L'automatisation d'une procédure nécessite au préalable la définition des paramètres et informations concernant l'outil et l'objet. Ceux-ci sont définis directement depuis l'interface graphique. Il s'agit notamment de la création des masques de détection et des offsets nécessaires à l'alignement, puis à leur sauvegarde. Cette procédure permet ensuite de charger les données correspondant à l'outil utilisé et donc d'utiliser différents outils sur la même installation.

#### 6.2.4.1 Traitement d'images

Quatre fonctions majeures sont remplies par le système de traitement d'images : la détection du préhenseur, la détection du microcomposant, la détection du plan focal au niveau du préhenseur et des composants (ou du substrat) et l'alignement des axes du manipulateur et des axes de la caméra [Dafflon04, Dafflon06].

##### Détection du préhenseur

Cette fonction doit pouvoir s'adapter facilement à tout type de préhenseur, c'est pourquoi une méthode de détection par corrélation a été adoptée (*template matching*) : l'image est balayée par un modèle, soit l'image d'un détail du préhenseur, jusqu'à obtenir la position fournissant le maximum de similitude. Cette méthode implique deux actions :

1. Durant le développement du préhenseur : chaque préhenseur doit contenir un élément aisément détectable optiquement et n'apparaissant qu'une seule fois sur l'image, il peut s'agir d'un contour spécifique ou d'un motif sur la surface.
2. A l'utilisation : pour chaque préhenseur, il est nécessaire de créer et sauvegarder un nouveau modèle. Celui-ci s'obtient simplement en définissant à partir de l'image du préhenseur la zone caractéristique.

La qualité de cette méthode de détection correspond typiquement à 0.5 fois la taille du pixel-image. Elle peut être améliorée en réduisant ensuite la zone scannée. Des méthodes d'interpolation permettent de réduire cette résolution jusqu'à 0.1 fois la taille du pixel-image.

##### Détection du composant

Les microcomposants peuvent a priori avoir des tailles et des géométries variables. Il est même tout à fait envisageable que différents composants soient présents dans le champ de vision auquel cas nous aimerions pouvoir tous les détecter, puis laisser l'utilisateur choisir celui qu'il veut manipuler. Dans ces circonstances, la méthode doit pouvoir s'affranchir de toute information concernant le composant, sa géométrie et sa taille. Pour cette raison, une méthode de segmentation par détection de contour est appliquée. Les éléments correspondant aux critères de recherche sont ensuite labélisés selon un critère de taille qui permet notamment de s'affranchir des défauts d'image ou du substrat. Pour chaque élément, la position du centre de gravité ainsi que le rectangle encadrant au mieux l'objet sont ensuite calculés et servent par la suite à la mesure de position et à l'alignement avec le préhenseur. L'utilisateur peut ensuite sélectionner le composant qu'il désire manipuler. Les informations décrivant l'objet serviront de connaissances a priori pour le localiser par la suite. Se basant sur une détection de contour, les composants en contact les uns avec les autres vont par contre être détectés comme un seul élément. Il en va de même lorsque le composant est en contact avec le préhenseur. Dans cette situation, le préhenseur est tout d'abord détecté, puis la stratégie adoptée est de le masquer de l'image pour pouvoir ensuite détecter le composant.

La précision de cette détection dépend de la taille des objets. Pour des composants de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ , une précision de  $\pm 50\text{nm}$  est atteinte, alors qu'elle est de  $\pm 65\text{nm}$  pour des composants de  $15\mu\text{m}$ .

### Détection du plan focal

Dans le but d'obtenir une information sur la position du préhenseur et du substrat selon l'axe vertical et surtout de déterminer la position du plan focal du microscope, un autofocus basé sur la maximisation du contraste de l'image est utilisé. Le critère de Tenengrad, présenté dans [Buerkle01], a été implémenté. Le gradient d'intensité de l'image est tout d'abord calculé en chaque point :

$$\|\nabla I(x, y)\| = \sqrt{I_x(x, y)^2 + I_y(x, y)^2} \quad (6.2)$$

avec  $I_x(x, y)$  et  $I_y(x, y)$  les dérivées spatiales selon les axes  $x$  et  $y$ . Le contraste, en une position  $z$ , est ensuite défini comme la somme de tous les gradients supérieurs au seuil  $T_a$  :

$$C(z) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N G(x, y) \text{ avec } G(x, y) = \begin{cases} \|\nabla I(x, y)\|^2 & \text{si } (\|\nabla I(x, y)\|^2 > T_a) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.3)$$

La position  $z$  maximisant le contraste  $C(z)$  détermine la position du plan focal. Le seuil  $T_a$  est réglé selon les conditions expérimentales de manière à filtrer le bruit. L'avantage de cette méthode est de ne nécessiter aucune connaissance a priori des éléments présents sur l'image. Cette méthode peut donc s'utiliser autant pour positionner les composants que le préhenseur dans le plan focal. Le préhenseur étant parfois incliné par rapport au plan du microscope, il est nécessaire de délimiter une zone d'intérêt sur laquelle la maximisation du contraste sera effectuée. La répétabilité de cette méthode a été mesurée en variant la position  $z$  par pas de 250nm. Sur 20 mesures, une répétabilité ( $1\sigma$ ) de  $\pm 0.52\mu\text{m}$  a été obtenue.

### Alignement des axes du manipulateur et de l'image

Cette fonction permet de définir les orientations des axes du manipulateur par rapport à l'image et donc de pouvoir transférer les positions mesurées ou cibles vers la commande du manipulateur. Les coordonnées  $x_m, y_m$  d'un point dans le référentiel du manipulateur sont exprimées dans les coordonnées de l'image  $x_i, y_i$  par :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

où  $T$  est la matrice de calibration. Elle correspond aux termes de rotation (angle  $\theta$ ) et de translation (coefficient  $a_x$  et  $a_y$ ) du champ de vision dans le plan  $xy$  du manipulateur au travers de la matrice  $A$  (6.5). La relation d'échelle est exprimée par les coefficients  $s_{ix}$  et  $s_{iy}$  de la matrice  $S$ . Ainsi la matrice de calibration  $T$  correspond à :

$$T = S \cdot A \text{ avec } S = \begin{bmatrix} s_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & s_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_x \\ 0 & 1 & a_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.5)$$

L'évaluation de  $T$  se fait expérimentalement par la mesure de la position  $(x_i, y_i)$  d'une cible fixée au robot à différentes positions du champ de vision. Ces positions sont contrôlés par le manipulateur  $(x_m, y_m)$ . Cette méthode suppose que l'axe optique du microscope est parallèle à l'un des axes du manipulateur (l'axe vertical  $z$  dans notre cas). La précision de l'évaluation de  $T$  dépendra donc de l'alignement de l'axe optique et de l'axe  $z$  du manipulateur, de la précision de la méthode de détection utilisée pour la prise des positions et du nombre de points pris en compte.

## 6.2.5 CONCLUSION

L'installation présentée ici est adaptée à la manipulation de composant sub-millimétriques jusqu'à  $\sim 5\mu\text{m}$ . En deçà, leur visualisation n'est plus suffisante. L'installation se base sur un robot de haute précision et un élément standardisé permet d'interfacer des préhenseurs divers au manipulateur. Le volume de tra-

vail est placé dans une enceinte permettant de contrôler et de mesurer les conditions de l'environnement ambiant de manipulation. Un changeur d'outil y est aussi disposé. Il permet la manipulation avec trois préhenseurs différents dans des conditions identiques. Un système de vision basé sur deux vues permet la surveillance et la mesure des opérations. Enfin, l'installation peut être utilisée en mode manuel ou semi-automatisé.

Quelques points pourraient être avantageusement améliorés, et notamment :

- les informations provenant uniquement d'un champ de vision sont utilisées pour la mesure. Il sera intéressant d'intégrer la seconde caméra à ce processus, notamment pour le contrôle de la hauteur (z) durant les opérations. Ces informations sont actuellement disponibles pour l'utilisateur (en visuel simplement), mais il serait nécessaire de pouvoir aussi les intégrer aux mesures afin d'améliorer les phases automatisées;
- la détection du plan focal se fait au niveau du substrat et du manipulateur. Cette stratégie nous semblait intéressante notamment par le fait des faibles masses en mouvement en comparaison du système optique. La position du plan focal du microscope représente aussi un plan de référence fixe. L'intégration d'un autofocus au niveau de la caméra permettrait de simplifier les réglages de l'installation et d'en améliorer encore la flexibilité.
- la connectique entre les préhenseurs et les éléments de puissance et de mesure n'a pas induit de perturbation visible au niveau du manipulateur. Néanmoins, l'utilisation de connexions plus souples faciliterait le changement d'outil et la gestion des câbles pendant le déplacement du préhenseur. Une solution de connecteur standardisé sur le préhenseur lui-même pourrait aussi être avantageuse.
- le support du substrat pourrait être amélioré soit de manière à contrôler les vibrations (très faible rigidité), soit aussi de manière à pouvoir mesurer les forces appliquées aux microcomposants. Cette dernière solution est peut-être plus adaptée que l'intégration d'un système de mesure au niveau des outils, puisque ceux-ci sont tous très différents ce qui engendrerait des problèmes d'intégration, voire de compatibilité.
- l'encombrement des systèmes de vision reste très important et l'accessibilité «optique» n'est pas toujours évidente. La qualité des images en souffre et donc l'utilisateur autant que les mesures. Il serait (parfois) intéressant d'étudier les possibilités d'intégrer une mini-caméra directement sur l'interface outil, notamment pour les micropinces. Dans tous les cas, il est nécessaire de favoriser les systèmes optiques permettant de grande distance de travail. L'illumination intervient aussi de manière considérable dans la qualité des images et devient rapidement problématique en terme d'accessibilité, voire de focalisation.

Malgré les quelques points ci-dessus, cette installation a permis de tester les manipulations et la précision de positionnement des microcomposants dans des conditions garantissant la qualité des résultats. Les résultats concrets sont présentés au chapitre 8. Cette installation a aussi permis l'assemblage d'un système de mesure AFM multisonde présenté au chapitre 9.

# CONCEPTION ET RÉALISATION DES OUTILS

---

Sur la base du chapitre 4, plusieurs familles d'outils ont été conçues et sont présentées ici. Certaines stratégies étant plus propices à la prise qu'à la dépose de micro-objets (ou inversement), les préhenseurs développés dans le cadre de cette étude sont généralement le résultat d'une combinaison de principes. Ce chapitre présente donc la conception et la réalisation de chacun d'eux. Les tests de manipulation sont l'objet du chapitre 8 et concernent les résultats des opérations de prise-dépose et les mesures de positionnement.

## 7.1 FAMILLES DE MICROPRÉHENSEURS

Les outils conçus dans le cadre de cette étude visent avant tout la manipulation de composants de  $50\mu\text{m}$ . Ce choix quelque peu arbitraire est motivé par le fait qu'il existe déjà des applications industrielles destinées à assembler des éléments sub-millimétriques et, manuellement du moins, des composants jusqu'à  $\sim 150\mu\text{m}^1$ . Il nous semblait dès lors plus intéressant et utile de proposer des outils pour des composants de plus petites tailles, mais néanmoins micrométriques, tout en sachant que ces solutions pourront ensuite être extrapolées pour des composants de taille supérieure.

Les familles d'outils de manipulation mises en évidence sont les suivantes :

1. Les micropinces dont plusieurs variations sont présentées selon l'intégration des différents éléments que sont l'actionneur, la structure du guidage ou encore des doigts;
2. Les préhenseurs inertiels, actifs et passifs, basés sur les effets d'adhésion;
3. Les préhenseurs thermodynamiques, soit utilisant l'humidité ambiante pour des manipulations par capillarité;
4. Les préhenseurs vacuums assistés par vibration;
5. Les préhenseurs électrostatiques.

---

1. Il s'agit ici de l'encombrement total et non pas de la taille caractéristique du composant. Des fils de  $50\mu\text{m}$ , mais de plusieurs millimètres de longueur ou encore reliés à leur bobine, sont effectivement manipulés automatiquement.

## 7.2 MICROPINCES

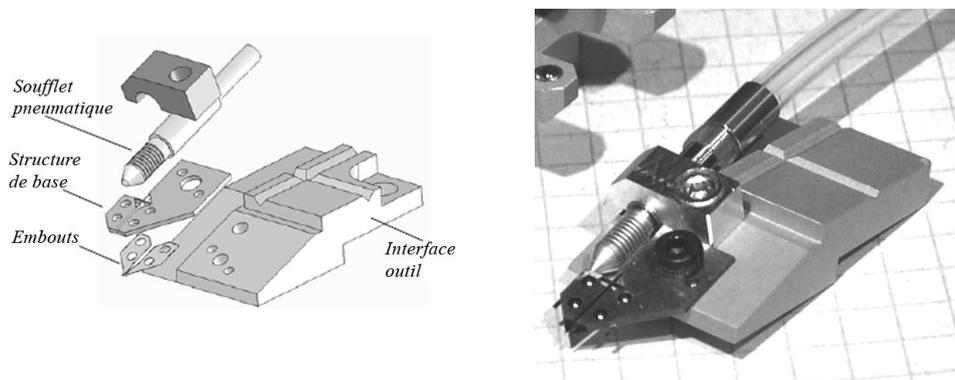
Les développements de nombreuses micropinces sont relatés dans la littérature (§ 2.1). Elles se différencient notamment par le type d'actionneur, par les matériaux et par extension par les procédés de fabrication, par leur configuration et leur(s) mobilité(s), voire par les fonctionnalités supplémentaires qui y ont été intégrées. L'éventail des possibilités est donc extrêmement large. Nous proposons ici trois types de pinces :

1. Préhenseur modulaire : l'assemblage d'éléments discrets permet une grande modularité notamment par le choix d'embouts de tailles, formes et matériaux variés. L'actionnement y est indépendant de la structure de la pince et donc du guidage des doigts. Cette structure peut ainsi constituer un outil à faible coût s'apparentant à un consommable : interchangeable et donc adaptable à chaque composant.
2. Pince monolithique : au contraire du précédent, tout y est intégré (structure, doigts et actionneur). Aucune modularité après fabrication, mais une précision plus élevée.
3. Pince à mobilité augmentée : l'intégration de plusieurs degrés de liberté peut être avantageux notamment pour gérer activement l'alignement des doigts.

Aucune de ces pinces ne présentent d'ouverture simultanée des deux doigts. Comme présenté auparavant (§ 4.3.2), il est préférable au niveau du positionnement de disposer d'un doigt rigide comme référence et d'un doigt mobile, puis d'effectuer successivement le retrait de chaque doigt lors de la dépose.

### 7.2.1 PRÉHENSEUR MODULAIRE : MICROPINCE PNEUMATIQUE

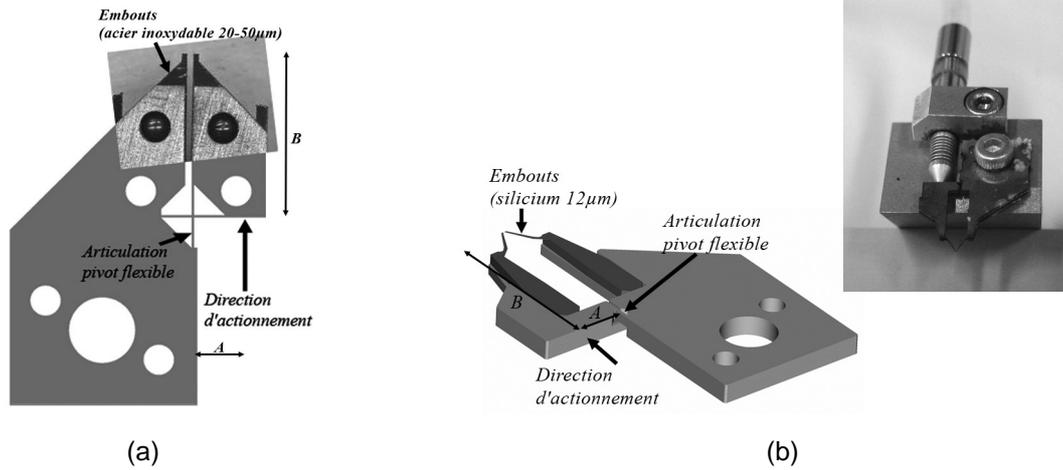
Le développement de cette micropince pneumatique a été motivé par l'attrait d'utiliser des organes terminaux (embouts) de matériaux et formes adaptés aux composants, tout en conservant un même actionneur. Ce préhenseur modulaire est alors constitué d'une structure articulée monolithique, sur laquelle viennent se fixer les embouts, et d'un actionneur pneumatique (Fig. 7.1).



**Figure 7.1** : Micropince pneumatique.

La structure de base consiste en une plaque d'acier inoxydable découpée au laser et dont les parties articulation et fixation des embouts peuvent être modifiées au gré des besoins. Les embouts y sont ensuite collés. Pour garantir leur alignement à l'assemblage, les doigts sont issus d'une même pièce et sont libérés après l'assemblage. Deux types de doigts ont été utilisés. Ils correspondent chacun à une configuration de pince (Fig. 7.2).

L'actionnement pneumatique se fait par un soufflet qui pousse la partie mobile de la pince. Le soufflet est fabriqué en nickel électrodéposé et plaqué or (*Servometer Precision Manufacturing Group LLC*). D'un diamètre extérieur de 2.44mm pour une longueur de 5.9mm, sa rigidité ( $K_S$ ) est de 675N/m.



**Figure 7.2 :** Configuration des micropinces pneumatiques : (a) à pivot simple à lames croisées non séparées muni d'embouts en acier inoxydable de 20 et 50µm d'épaisseur (Acier 1.4310, X 12 CrNi 17 7), fabriqués par micro-électroérosion; (b) à pivot à lames croisées séparées pour des embouts en silicium de 12µm d'épaisseur développés et fabriqués à Femto-ST/AS2M [Heriban05].

La rigidité du pivot de la structure de base est donnée par :

$$K_{\theta} = \frac{8EI}{L} \text{ pour un pivot à deux lames croisées non séparées} \quad (7.1)$$

$$K_{\theta} = \frac{2EI}{L} \text{ pour un pivot à deux lames croisées séparées} \quad (7.2)$$

où  $E$  est le module de Young (195GPa),  $I$  le moment d'inertie ( $I = bh^3/12$ ) et  $b$ ,  $h$  et  $L$  la largeur, l'épaisseur et la longueur du pivot [Henein00]. Le tableau (7.1) regroupe les caractéristiques des pivots utilisés, la force nécessaire à la fermeture ( $F_A$ ) et sa relation force-pression de serrage ( $\Delta F_S$ ). L'actionnement de la structure nécessite une force  $F_A$  telle que :

$$F_A = \frac{\delta_B}{B} \left( K_s \cdot A + \frac{K_{\theta}}{A} \right) \quad (7.3)$$

Les deux configurations de micropinces pneumatiques utilisées sont représentées à la Fig. 7.2, ainsi que les paramètres  $A$  et  $B$  correspondants,  $\delta_B$  étant le déplacement à la fermeture de la micropince. La sensibilité au serrage  $\Delta F_S$ , soit la relation force-pression, dépend directement du rapport des longueurs  $A$  et  $B$  et de la sensibilité de l'actionneur, donc de la résolution de la pression.

	$b$	$h$	$L$	$A$	$B$	$K_{\theta}$	$F_A(\delta_B=50\mu m)$		$\Delta F_S$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mNm/rad]	[N]	[bar]	[mN/mbar]
pince avec embouts acier	1	0.1	2.1	1.7	5.6	62	0.335	0.882	0.115
pince avec embouts silicium	0.4	0.13	0.53	1.7	7	54	0.235	0.617	0.092

**Tableau 7.1 :** Caractéristiques des micropinces pneumatiques.

L'actionnement de la structure nécessite une force importante, de plusieurs centaines de mN. Ce type de micropince permet donc sans autre des forces de serrage élevées, ce qui peut être nécessaire par exemple dans le cas où les composants doivent être détachés de leur support. Il faut néanmoins opérer avec prudence afin de ne pas atteindre la limite du domaine de déformation plastique du composant ou

des doigts rapportés. Ce risque est notamment lié à la détection du contact. Enfin, l'installation pneumatique est pourvue d'un capteur de pression d'une résolution de 0.44mbar. La résolution de la force de serrage est donc de 51 $\mu$ N (respectivement 40 $\mu$ N) pour une micropince munie d'embouts métalliques.

Le choix de l'actionneur pneumatique est motivé par son faible encombrement et la simplicité de son interfaçage avec la structure mobile du préhenseur. En effet, celui-ci vient simplement s'y appuyer sans y être fixé. Le retour en position initiale est assuré par l'élasticité de la structure du préhenseur sans perturbation du soufflet, puisqu'il agit lui-aussi comme un élément ressort. En contre-partie la rigidité du tuyau d'alimentation est plus importante que celle que l'on pourrait obtenir par des connexions électriques et peut donc perturber les opérations nécessitant de grandes déplacements, notamment le changement d'outils. L'intégration d'un autre actionneur, de type bobine ou aimant mobile par exemple, serait envisageable, mais les risques de perturbation électro-magnétique sur les micro-objets sont à prendre en considération étant donné la distance de quelques millimètres seulement qui les sépare.

### 7.2.1.1 Correction de l'alignement des doigts et usinage in-situ par $\mu$ EDM

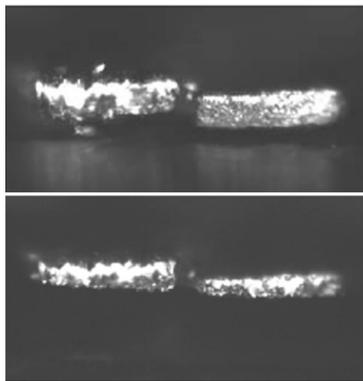
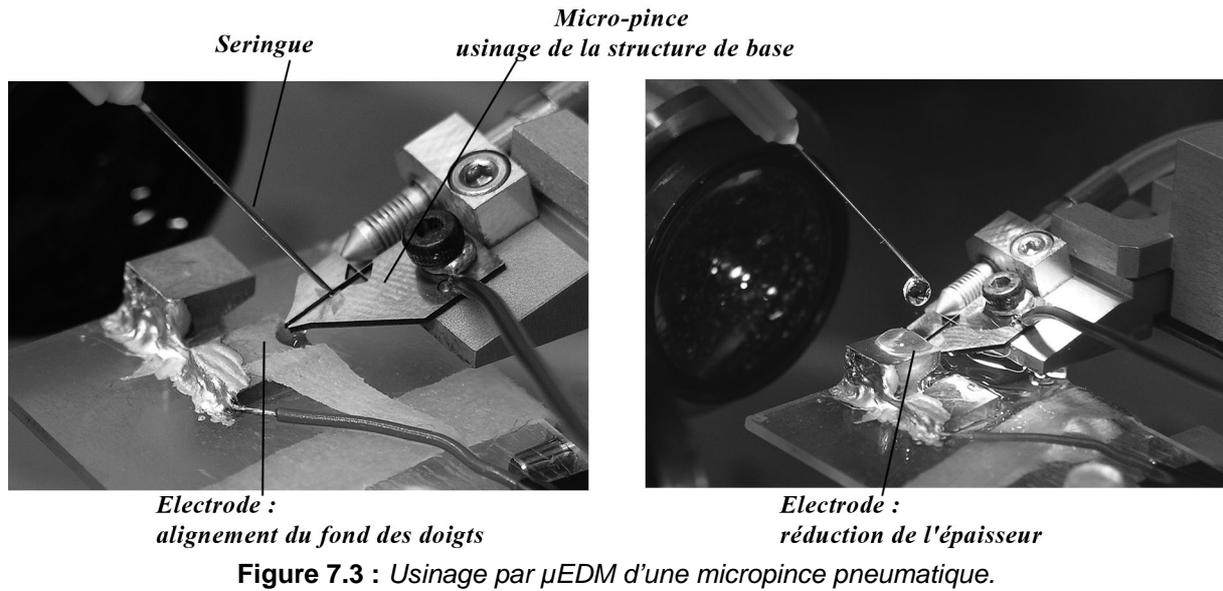
Le grand désavantage des préhenseurs modulaires reste néanmoins les erreurs d'alignement des doigts résultant de l'assemblage ainsi que les contraintes résiduelles à la fabrication. Les éléments doivent bien sûr être optimisés en terme de référencement mécanique, mais une simple différence d'épaisseur de colle peut provoquer un désalignement problématique pour la manipulation. Nous proposons ici une méthode de correction des erreurs d'alignement après assemblage basée sur l'usinage par micro-électro-érosion ( $\mu$ EDM) in situ, c'est-à-dire directement sur l'installation de micromanipulation elle-même. Ce procédé in situ permet ainsi de s'affranchir de toutes les erreurs d'assemblage, que ce soit durant la fixation de l'outil au manipulateur ou sur l'outil lui-même et ainsi d'orienter précisément les parties actives (organes terminaux) de l'outil avec le substrat de manipulation [Lorent06].

Le robot *Delta*<sup>3</sup> utilisé sur l'installation de micromanipulation se prête particulièrement bien à l'usinage par électro-érosion. La qualité et l'efficacité du procédé sont améliorés par ses performances dynamiques [Joseph05]. Des mouvements sinusoïdaux peuvent par exemple être appliqués sur les axes, avec des fréquences allant jusqu'à 100Hz et des amplitudes de 1 à 10 $\mu$ m, permettant ainsi d'améliorer le nettoyage et l'évacuation des particules érodées. Durant l'usinage par  $\mu$ EDM, le contrôleur *AGIE SIT-B* qui inclut le générateur d'étincelles a été utilisé. Il est programmé sur PC au travers d'une interface utilisateur graphique développée sous LabView. Des tensions de 80 à 130 Volts ont été utilisées. Contrairement aux usinages usuels par électro-érosion, le robot contrôle la position de la pièce à usiner, la micropince dans notre cas, et l'électrode est fixée sur le posage. Le diélectrique (eau distillée) est amené par une seringue directement au coeur de l'usinage et évacué par un tissu absorbant. (Fig. 7.3)

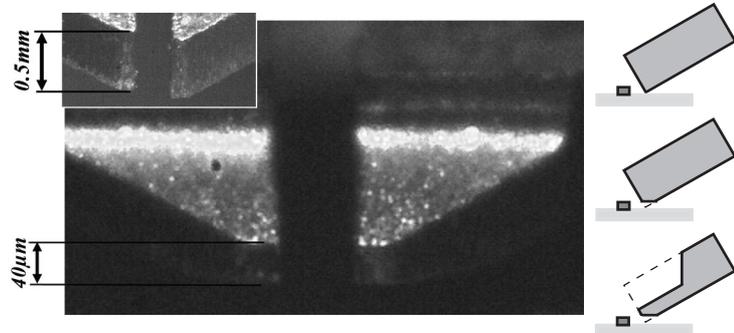
La correction de désalignements de 5 $\mu$ m sur des micropinces munies d'embouts de 20 $\mu$ m d'épaisseur en acier a été effectuée avec succès en réduisant leur épaisseur à 12 $\mu$ m. La Fig. 7.4 montre la situation avant et après correction d'embouts en acier de 50 $\mu$ m d'épaisseur présentant un désalignement de 15 $\mu$ m et dont le parallélisme a été corrigé. L'épaisseur finale au plus fin est de 25 $\mu$ m. L'usinage a duré 2 minutes.

Plutôt que d'y fixer des embouts sur mesure, la structure de base du préhenseur peut être directement usinée par  $\mu$ EDM. Plusieurs opérations sont alors nécessaires : la partie inférieure du préhenseur est tout d'abord usinée pour aligner les deux doigts, puis l'épaisseur de ceux-ci est réduite de manière à atteindre, au plus, la taille des éléments à manipuler. Différentes électrodes sont donc utilisés pour ce procédé. L'épaisseur des doigts a ainsi été amenée de 0.5mm à 40 $\mu$ m pour un temps d'usinage d'environ 10 minutes (Fig. 7.3 et Fig. 7.5).

Différentes formes peuvent bien sûr être usinées, notamment lorsque les doigts nécessitent une géométrie spécifique à l'application. Il peut par exemple être intéressant de munir l'un des doigts d'une rainure pour améliorer le référencement d'un composant. L'usinage d'un microcomposant par  $\mu$ EDM sur la même installation est aussi possible. Dans ce but, il est nécessaire de préparer au préalable le pré-

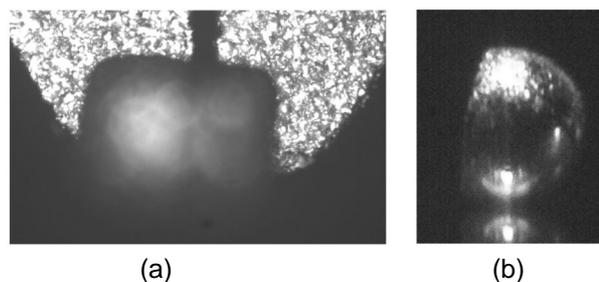


**Figure 7.4 :** Embouts de  $50\mu\text{m}$  d'épaisseur avant et après correction de l'alignement par  $\mu$ EDM.



**Figure 7.5 :** Réduction de l'épaisseur et mise en forme des doigts d'une micropinçe.

henseur. En effet, lors de l'usinage, des forces importantes, résultant de pressions locales, du flux du diélectrique ou encore d'effets électrostatiques, apparaissent entre l'électrode et l'objet usiné. Une force résistive de  $500\text{mN}$  a été mesurée par [Joseph05] durant le perçage d'un microtrou à l'aide d'une électrode de  $149\mu\text{m}$  de diamètre. Ces forces sont généralement négligeables en comparaison du poids des objets dans les procédés standards. Pour des composants de quelques dizaines à centaines de micromètres, ces forces sont suffisamment importantes pour faire glisser les objets dans la pince, voire les éjecter. Il est donc nécessaire de les retenir, par exemple en usinant une rainure dans les doigts du préhenseur. Avec cette technique, un plat a été usiné sur une bille en acier inoxydable de  $200\mu\text{m}$  de diamètre (Fig. 7.6).



**Figure 7.6 :** (a) usinage d'une rainure sur les embouts de la micropinçe; (b) bille de  $\varnothing 200\mu\text{m}$  usinée par  $\mu$ EDM.

Ce procédé permet ainsi de réduire efficacement les erreurs d'alignement et d'orientation entre le préhenseur et le substrat. Il est en outre tout à fait compatible avec le concept de MicroFactory, permettant une fabrication miniaturisée et surtout locale. Dans cette optique, il serait bien sûr nécessaire d'y ajouter une étape de nettoyage permettant non seulement d'évacuer les particules érodées, mais aussi d'éliminer les traces de diélectrique (et/ou de liquide de nettoyage) qui pourraient perturber les manipulations ultérieures.

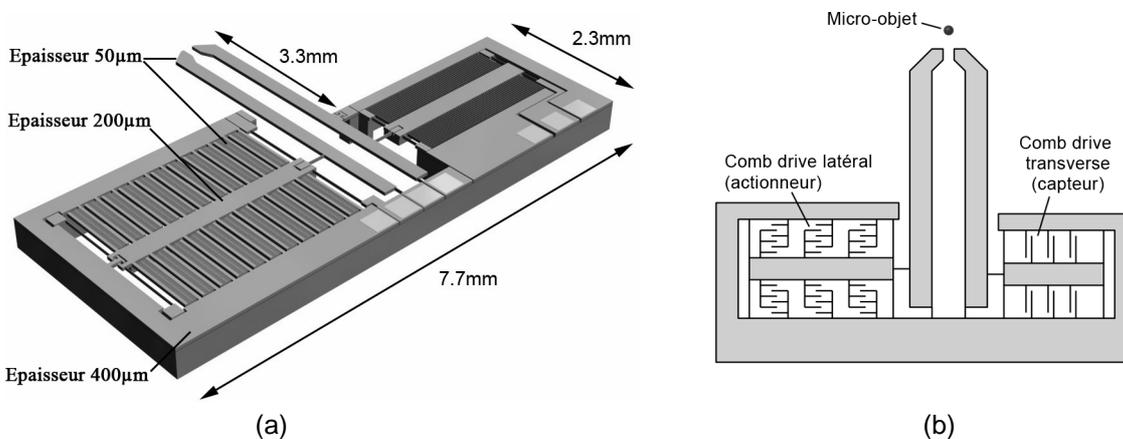
### 7.2.2 MICROPINCE MONOLITHIQUE - PINCE MEMS

L'intégration de tous les éléments est possible notamment via les technologies lithographiques sur silicium. Les performances de fabrication, notamment les résolutions et précisions obtenues, permettent l'élaboration de structures fines pourvues d'un rapport d'aspect d'au moins 1:10, voire 1:20. L'utilisation du silicium permet en outre non seulement la construction de la structure et de liaisons flexibles, mais aussi d'actionneurs et de capteurs. Les micropinces monolithiques expérimentées durant cette étude ont été conçues et réalisées à l'*Institute of Robotics and Intelligent Systems (IRIS)* à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (ETHZ).

La micropince MEMS comprend un actionneur électrostatique basé sur une structure en peigne (*comb drive*) et un capteur de force capacitif qui mesure le déplacement du doigt sous l'effet du serrage (Fig. 7.7). Fabriqué par gravure ionique réactive profonde (*Deep Reactive Ion Etching - DRIE*) à partir d'un wafer SOI (*silicon-on-insulator*), les structures portantes ont une épaisseur de 200 $\mu\text{m}$  et 400 $\mu\text{m}$  alors que le bout des doigts, les éléments flexibles et les structures en peigne sont obtenues sur la couche plus mince du wafer SOI (50 $\mu\text{m}$ ). Les détails de conception et de fabrication peuvent être trouvés dans [Beyeler07]. Les caractéristiques et performances de la micropince silicium sont reportées dans le tableau (7.2).

L'intégration des micropinces MEMS à l'installation se fait sur la base de l'interface développée. Le préhenseur y est collé et les connexions sont établies au moyen d'un PCB flexible sur lequel l'électronique de traitement du capteur de force est intégrée. La micropince y est reliée par wire-bonding (Fig. 7.8).

La qualité des surfaces a une grande importance concernant les effets d'adhésion apparaissant au contact d'un micro-objet. Il est donc intéressant de remarquer les différences selon les procédés de fabrication utilisés. L'obtention de motifs fins, notamment la forme des doigts, n'est pas possible avec une découpe laser, puisqu'à cette échelle la taille du faisceau devient de la même grandeur que le motif. Il en va de même avec les procédés d'électro-érosion, qui permettent une qualité de surface nettement supérieure au laser, mais dont le diamètre du fil limite aussi la finesse des motifs. (Fig. 7.9)



**Figure 7.7 :** (a) Modèle de la micropince silicium avec à gauche l'actionneur électrostatique et à droite le capteur de force intégrés. (b) schéma de fonctionnement de la micropince.

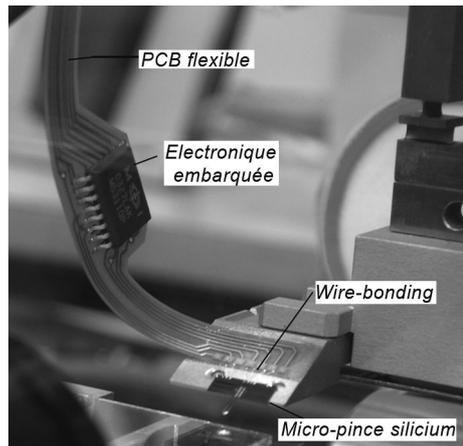
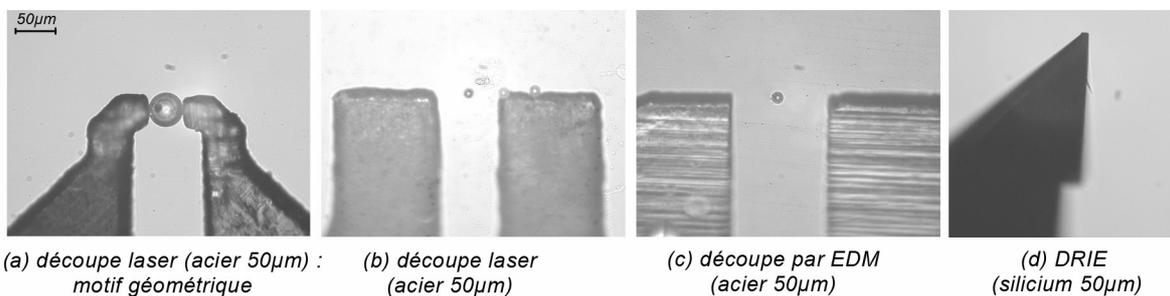


Figure 7.8 : Interfaçage d'une micropinçe silicium.



(a) découpe laser (acier 50µm) : motif géométrique

(b) découpe laser (acier 50µm)

(c) découpe par EDM (acier 50µm)

(d) DRIE (silicium 50µm)

Figure 7.9 : Comparaison des qualités de surfaces selon le procédé de fabrication (échelle identique).

Actionneur	Longueur lames flexibles	900µm	
	Déplacement	0-100µm	
	Tension d'actionnement	0-150V	
Capteur	Longueur lames flexibles	150µm	300µm
	Plage linéaire	±2800µN	±360µN
	Sensibilité	0.55mV/µN	4.41mV/µN
	Résolution	520nN	70nN

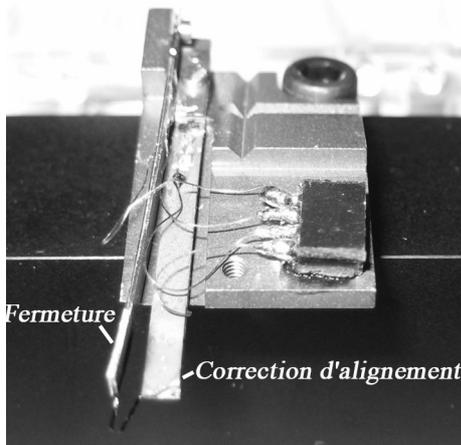
Tableau 7.2 : Spécifications de l'actionneur et des capteurs de la micropinçe silicium.

La fine sensibilité du capteur de force est suffisante pour mesurer la force d'adhésion lors de la dépose. Il faut néanmoins noter que la présence du capteur de force sur le doigt opposé à l'actionneur va induire un petit déplacement du doigt au moment du serrage et surtout lors de l'ouverture. Ainsi lors de la dépose, les éléments élastiques du capteur de force vont perturber le positionnement final de l'objet. L'amplitude du déplacement est très faible (inférieure au micron), mais il représente une source d'erreur en cas de hautes performances de positionnement recherchées. En ce cas, il serait préférable d'intégrer actionneur et capteur sur le même doigt afin d'obtenir une référence de position mécanique rigide.

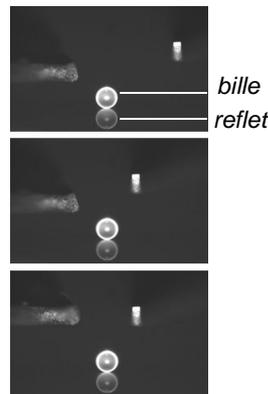
Cette micropinçe est pourvue de très hautes performances pour des situations nécessitant une force de serrage contrôlée. Le but ici n'est pas d'atteindre de grandes forces de serrage, mais au contraire de permettre la manipulation avec des forces minimales, voire de quantifier simultanément les effets d'adhésion ou la tenue d'un composant. Ces performances sont contre-balançées par la fragilité des structures silicium, ainsi que leur sensibilité aux poussières qui provoquent notamment des courts-circuits au niveau de l'actionneur et du capteur. L'interfaçage de tels outils est ainsi rendu plus contraignant et risqué.

### 7.2.3 PRÉHENSEUR À MOBILITÉ AUGMENTÉE

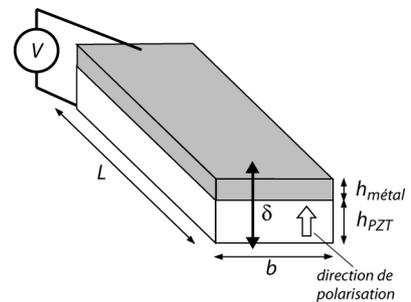
Tout en voulant conserver une référence fixe et rigide, l'ajout d'un degré de liberté au préhenseur permet de contrôler activement l'alignement des doigts. D'autres mouvements plus «spéciaux» et/ou ne pouvant être réalisés par un manipulateur à trois degrés de liberté en translation peuvent aussi être imaginés, tel que le contrôle de l'orientation d'un composant par exemple ou simplement en vue de libérer l'accès au second doigt. Les deux mobilités sont donc disposées perpendiculairement (Fig. 7.10). Nous proposons ici une micropince munie de deux doigts indépendants basés chacun sur un bimorphe hétérogène, c'est-à-dire contenant une couche piézoélectrique et une couche élastique. En appliquant un champ électrique au travers de l'élément piézoélectrique, les contraintes obtenues dans la couche élastique vont induire un moment de flexion à la structure. Les embouts sont ensuite fixés sur chaque doigt. La Fig. 7.11 montre les mouvements obtenus pour une telle micropince sur laquelle deux doigts en silicium, identiques aux micropinces monolithiques, ont été fixés.



**Figure 7.10 :** Configuration de micropince à deux degrés de liberté.



**Figure 7.11 :** Mouvement autour d'une bille de polystyrène de 50µm de diamètre.



**Figure 7.12 :** Schéma d'un bimorphe hétérogène.

Le dimensionnement des actionneurs piézoélectriques est basé sur les relations constitutives présentées par Smits et al. [Smits91] pour les éléments bimorphes hétérogènes. Sous l'action d'une tension  $V$  entre les faces de la couche piézoélectrique et d'une force  $F$  appliquée en bout de la lame et perpendiculairement à celle-ci, le déplacement  $\delta$  engendré s'exprime par :

$$\delta = \frac{4AL^3}{Kb} \cdot F + \frac{3d_{31}ABL^2}{K} \cdot V \quad (7.4)$$

avec les définitions suivantes :

$$A = s_{11}^m s_{11}^p (s_{11}^p h_m + s_{11}^m h_p)$$

$$B = \frac{h_m (h_m + h_p)}{s_{11}^p h_m + s_{11}^m h_p}$$

$$K = (s_{11}^m)^2 (h_p)^4 + 4s_{11}^m s_{11}^p h_m (h_p)^3 + 6s_{11}^m s_{11}^p (h_m)^2 (h_p)^2 + 4s_{11}^m s_{11}^p (h_m)^3 h_p + (s_{11}^p)^2 (h_m)^4$$

et en considérant les grandeurs  $L$ ,  $b$ ,  $h_m$  et  $h_p$  selon la Fig. 7.12, avec l'indice  $p$  pour piézoélectrique et  $m$  pour la couche élastique (métallique dans notre cas).  $d_{31}$  est un coefficient piézoélectrique et  $s_{11}$  la compliance de chaque couche ( $= 1/E$ ). Le tableau (7.3) regroupe les caractéristiques des structures utilisées pour chaque doigt et les performances maximales atteignables pour une tension de 200V.

L'utilisation et l'assemblage d'éléments piézoélectriques bimorphes requièrent un certain soin notamment au niveau des connexions électriques des électrodes. Un effet d'hystérèse a notamment été

	PZT	Acier (1.4310)		Fermeture	Alignement
$h$	0.25mm	0.1mm	$L$	23mm	17mm
$b$	2mm	2mm	$\delta$	184 $\mu$ m	101 $\mu$ m
$\rho$	7.8 $\cdot 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	7.8 $\cdot 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	$F(\delta=0)$	35.4mN	47.9mN
$s_{11}$	1.43 $\cdot 10^{-11}$ m <sup>2</sup> /N	5.13 $\cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N	$\alpha$	0.92°	0.68°
$d_{31}$	210 $\cdot 10^{-12}$ C/N	-	$L_{total}$	26.2mm	20.2mm
$V_{max}$	200V		$\delta_{bout}$	235 $\mu$ m	138 $\mu$ m

**Tableau 7.3** : Caractéristiques des bimorphes.

observé lors de la mise sous tension et est certainement dû à de mauvais contacts à l'interface entre les deux couches (inhomogénéités de la colle par exemple) et à des courts-circuits locaux au niveau de la tranche du bimorphe.

Les embouts peuvent être adaptés aux composants à manipuler, mais pour atteindre une meilleure modularité, il serait nécessaire de changer uniquement les embouts afin de conserver les parties actionneurs, plus coûteuses et plus sensibles aussi. [Clévy05] a notamment développé une telle solution, basée sur l'utilisation d'une colle thermique réutilisable et permettant de changer les embouts de manière automatisée.

#### 7.2.4 REMARQUE SUR LA CONCEPTION DES MICROPINCES

Les problèmes d'alignement des doigts peuvent occasionner de grosses perturbations sur le positionnement des objets, voire l'impossibilité de les manipuler. Comme présenté ci-dessus, il est possible d'usiner in-situ les embouts d'une micropince, voire directement sa structure. Une autre solution serait de fabriquer la structure et ses embouts comme un seul et même élément et de venir y rapporter l'actionneur. Ainsi les avantages de la modularité et de l'intégration monolithique pourraient être couplés :

- minimisation des erreurs d'assemblages et appariement pour ce qui est des contraintes résiduelles;
- adaptation de l'interface «préhenseur - micro-objet» sans implication au niveau de l'actionneur;
- les connexions (alimentation et contrôle) de l'actionneur et éventuellement du capteur ne sont pas à refaire à chaque adaptation de la pince;
- bonne qualité des surfaces de part l'utilisation de technologies lithographiques;
- possibilité d'intégrer une limitation passive de la force de serrage ou un capteur de force actif.

### 7.3 PRÉHENSEUR INERTIEL

Le préhenseur inertiel combine l'utilisation des effets d'adhésion pour la prise avec, comme son nom l'indique, une dépose inertielle. L'orientation des contacts au préhenseur et au substrat influence la réussite des opérations pour ces deux principes ainsi que le font les caractéristiques propres à chaque interface (Fig. 4.46). Par soucis d'efficacité et de précision, la direction de l'accélération de dépose a été choisie normale aux deux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat». Les surfaces de contact sont donc alignées de part et d'autre du micro-objet. L'accessibilité aux composants est de ce fait aussi optimisée.

Nous proposons ici deux configurations permettant d'engendrer l'accélération nécessaire à la dépose :

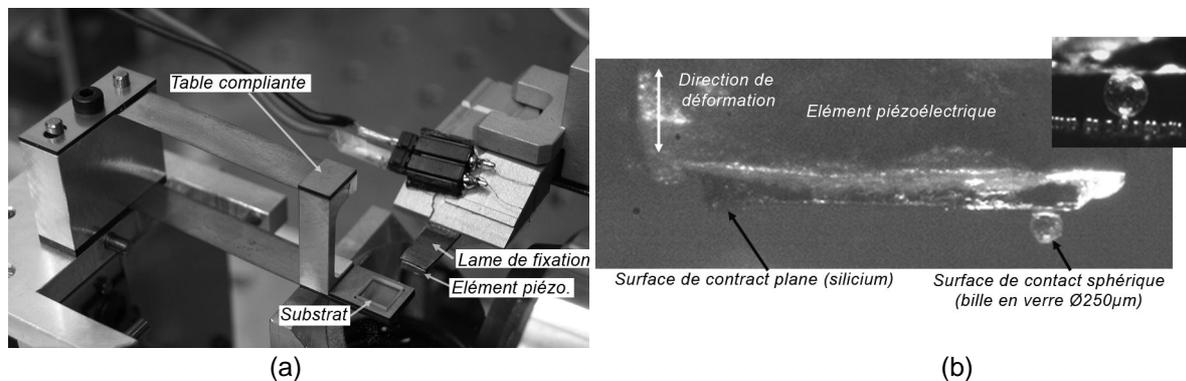
1. Préhenseur inertiel actif où l'accélération provient de la déformation contrôlée d'un élément piézoélectrique;

2. Préhenseur passif pour lequel la décélération provoquée lors d'un impact (donc de l'arrêt brutal) du préhenseur permet d'en libérer le micro-objet.

### 7.3.1 PRÉHENSEUR INERTIEL ACTIF

L'accélération nécessaire pour rompre l'interface d'adhésion entre un micro-objet et la surface du préhenseur est de plusieurs dizaines de milliers de  $g$  (voire § 4.7). En comparaison, les accélérations atteintes en cours de manipulation sont de l'ordre de 10 à 100 $g$  seulement. Les matériaux piézoélectriques ont par contre la capacité de se déformer très rapidement sous l'action d'une tension électrique et pour un volume d'encombrement restreint.

Le préhenseur inertiel actif est ainsi basé sur un actionneur piézoélectrique axial. La Fig. 7.13 présente sa construction. Afin d'obtenir une zone de prise détectable et surtout permettant de prendre un micro-objet sans entrer en contact avec les autres composants reposant sur le substrat, une bille de verre de  $\varnothing 250\mu\text{m}$  est fixée sous l'actionneur. Une seconde zone de prise est délimitée par une plaquette en silicium. Ces deux éléments permettront de qualifier les opérations de prise et de dépose selon les matériaux à l'interface.



**Figure 7.13 :** (a) Préhenseur inertiel actif sur l'installation de micromanipulation; (b) vue rapprochée de l'élément piézoélectrique et des surfaces de contact à disposition (encart) pendant la manipulation de billes de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

Le signal d'excitation est de forme sinusoïdale. L'accélération fournie par un actionneur piézoélectrique travaillant dans le mode  $d_{33}$  est exprimée par :

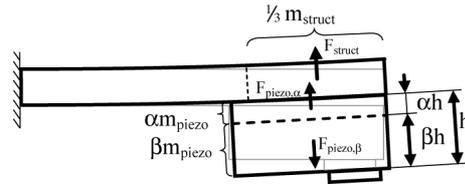
$$a^* = \delta \cdot \omega^2 = \eta \cdot V \cdot d_{33} \cdot (2\pi f)^2 \quad (7.5)$$

avec  $\delta$  l'amplitude du déplacement,  $V$  la tension appliquée,  $f$  la fréquence,  $\omega$  la pulsation et  $d_{33}$  le coefficient piézoélectrique ( $d_{33} = 450 \cdot 10^{-12} \text{m/V}$  pour du PIC 151 de *Physik Instrumente, GmbH*). Le coefficient  $\eta$  permet de tenir compte des facteurs d'atténuation du déplacement du piézoélectrique, ceux-ci sont explicités ci-dessous.

Les fréquences utilisées pour la dépose inertielle étant nettement plus élevées que la fréquence de résonance du préhenseur (quelques kHz), la force élastique du support de l'actionneur est négligeable par rapport aux forces inertielles. L'amplitude du déplacement au niveau du micro-objet est par contre atténuée par la réaction du support et peut être évaluée par l'équilibre des forces inertielles agissant verticalement (Fig. 7.14) :

$$F_{struct} + F_{piezo, \alpha} = F_{piezo, \beta} \quad (7.6)$$

On considère alors qu'une fraction  $\alpha h$  de l'épaisseur totale  $h$  de l'actionneur participera à l'accélération de la lame, et ainsi que seule la fraction  $\beta h$  contribuera à la génération de l'accélération désirée. Une partie du déplacement du piézoélectrique sera alors perdue dans la déformation de la lame. L'amplitude de la force inertielle générée par une vibration sinusoïdale d'amplitude  $A$  sur une masse  $m$  vaut  $A \omega^2 m$ .



**Figure 7.14 :** Schéma de l'atténuation du déplacement due à la déformation de la structure et de l'équilibre des forces inertielles.

La fréquence est identique pour les trois forces et le déplacement généré par une fraction de l'actionneur est proportionnelle à l'épaisseur de ces fractions. L'expression (7.6) peut alors s'écrire :

$$\alpha h \frac{m_{struct}}{3} + \frac{\alpha h}{2} \alpha m_{piezo} = \frac{\beta h}{2} \beta m_{piezo} \quad (7.7)$$

Les centres de gravité de chaque fraction étant situés au centre de celles-ci, ils ne se déplacent en fait que de la moitié de la déformation totale pour la fraction concernée, d'où les facteurs 1/2. D'autre part, on considère que la longueur effective de la structure correspond à 1/3 de sa longueur physique étant donné l'approximation de la déformation par une fonction quadratique. Les valeurs des fractions  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent alors être résolues en considérant que  $\alpha + \beta = 1$ . Dans le cas considéré, soit avec l'actionneur piézoélectrique ( $4 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ , 94 mg) relié au support rigide par une lame d'acier ( $8 \times 4 \times 0.5 \text{ mm}^3$ , 125 mg), on trouve  $\alpha = 0.35$  et  $\beta = 0.65$ . Ainsi 35% du déplacement de l'actionneur est perdu dans la flexion de la lame. L'atténuation au niveau du micro-objet est ainsi de  $\eta_1 = 0.65$ .

Cette atténuation peut être réduite en rigidifiant la tenue de l'élément piézoélectrique, en plaçant une masse au niveau de la partie fixe ou en compensant activement le déplacement au niveau de la lame par un autre élément piézoélectrique connecté en opposition.

L'autre facteur d'atténuation est due à la bande passante limitée de l'amplificateur de haute tension utilisé pour amplifier le signal de sortie du générateur (*Agilent 33120A*). Pour la plage de fréquence de 150-350 kHz, l'atténuation varie entre 0% et 4%. Nous prendrons donc en compte un facteur moyen  $\eta_2 = 0.98$ . Pour une fréquence plus importante, jusqu'à ~600 kHz, l'atténuation atteint 10%.

Enfin, la fréquence de résonance de l'actionneur piézoélectrique n'a pas été calculée en détail, mais sa valeur minimale peut être obtenue en considérant le cas d'un élément piézoélectrique parfaitement encastré, ce qui correspondrait à une lame de masse infinie. Le mode de résonance axial est alors calculé en considérant la rigidité axiale de l'actionneur ( $k_p$ ) et sa masse effective ( $m_{p,eff} = 1/3 \cdot m_p$ ) par :

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_{p,eff}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p S / h}{(1/3) m_p}} = 804 \text{ kHz} \quad (7.8)$$

avec  $E_p$  la module d'élasticité ( $E_p = 66.7 \text{ GPa}$ ) et  $S$  la section ( $4 \times 3 \text{ mm}^2$ ) [PI08]. En réalité, la masse de la lame n'étant pas infinie, la position du plan de déplacement nul va se déplacer de la surface de l'actionneur (masse infinie) vers l'intérieur du piézoélectrique, résultant en un accroissement de la fréquence de résonance. La plage de fréquence utilisée (150-350 kHz) est suffisamment inférieure à la fréquence  $f_p$  pour ne pas exciter ce mode de résonance à 804 kHz.

Finalement, le déplacement effectif généré par l'actionneur piézoélectrique au niveau du microcomposant est obtenu par :

$$\delta = \eta_1 \eta_2 d_{33} V \approx 0.65 \cdot 0.98 \cdot 450 \times 10^{-12} \text{ m/V} \cdot 200 \text{ V} = 57 \text{ nm} \quad (7.9)$$

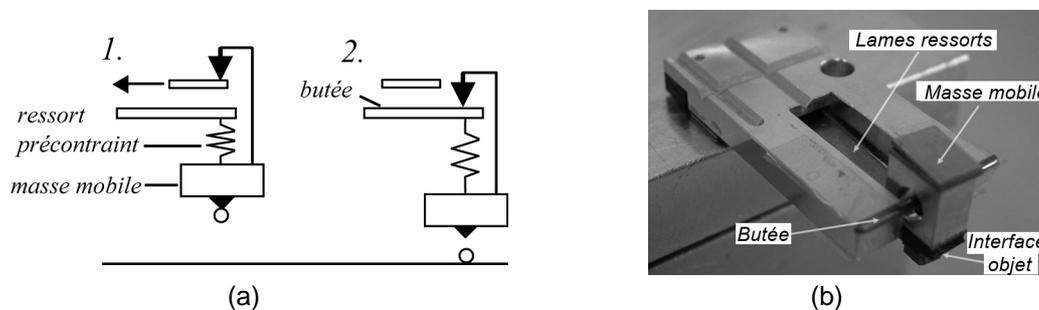
La plage de fréquence de 150-350 kHz, pour une tension de 200 V, correspond ainsi par l'expression (7.5) à des accélérations de  $5.1 \times 10^4$  à  $2.8 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ . La masse d'une bille de  $\varnothing 50 \mu\text{m}$  en polystyrène étant de  $6.9 \times 10^{-11} \text{ kg}$ , ces accélérations permettent de générer des forces d'inertie de  $3.5 \mu\text{N}$  à  $19.3 \mu\text{N}$ .

### 7.3.2 RELÂCHE PAR IMPACT

L'énergie d'adhésion à l'interface « objet - préhenseur » peut aussi être contrée par l'accélération produite lors d'un impact ou choc. Cette énergie pourrait alors être fournie par la dynamique du manipulateur lui-même ou par son accumulation dans un système élastique. Le préhenseur ne contiendrait donc pas d'actionneur, d'où le terme de préhenseur inertiel passif. Il requiert une conception en lien étroit avec l'application et est donc nettement moins flexible qu'un préhenseur actif en termes d'utilisation et d'adaptabilité, mais s'affranchit par contre de tous les problèmes liés à la connectique. Trois stratégies sont présentées ci-dessous.

#### 7.3.2.1 Précharge d'un élément ressort

La décélération produite lors d'un choc induit une force inertielle au niveau du micro-objet. L'efficacité de cet impact en tant que décélération, donc de dépose, dépend de la rigidité au point d'impact ainsi que de la vitesse du système avant le choc. L'utilisation d'un système ressort permet ainsi d'augmenter l'énergie cinétique au choc. La partie supportant le micro-objet est reliée à la structure du préhenseur par un élément ressort qui est précontraint puis relâché brutalement, la structure du préhenseur faisant office de butée (Fig. 7.15).



**Figure 7.15 :** (a) Principe de dépose inertielle passive par précharge d'un élément ressort; (b) prototype de préhenseur passif.

Un prototype basé sur ce principe a été testé (Fig. 7.15). L'élément élastique est constitué de deux lames ressorts parallèles qui guident la masse mobile. La précontrainte est effectuée à l'aide d'un élément vacuum externe qui retient la masse mobile pendant que le robot précharge le ressort. Des cycles de manipulations ont été menés avec réussite, démontrant la faisabilité du principe.

Ce genre d'outil pourrait se montrer très approprié pour des manipulations répétitives où la dépose s'effectue toujours au même endroit. Par exemple pour une alimentation en composants d'une chaîne d'assemblage, soit pour un transfert depuis la palette de stockage ou d'un vrac à un chariot indexé. La précontrainte du ressort se fait en position finale au contact d'un élément externe (butée ou suceur vacuum) selon le mouvement du manipulateur lui-même et la dépose est activée par un actionneur externe, un limiteur de force ou un système pneumatique afin de libérer le ressort.

#### 7.3.2.2 Utilisation de la dynamique du manipulateur

En vue d'un système autonome, le principe ici est d'utiliser l'inertie d'une masse mobile pour précharger l'élément ressort. La dynamique du robot est alors déterminante. En butée, la masse mobile est tout d'abord accélérée et quitte le contact sous l'effet de l'inversion du mouvement du robot (Fig. 7.16). L'impact aura ensuite lieu soit à une position fixe atteinte par le robot, ce qui permet d'optimiser le positionnement, ou après la seconde inversion du mouvement, ce qui tend à augmenter l'énergie du choc.

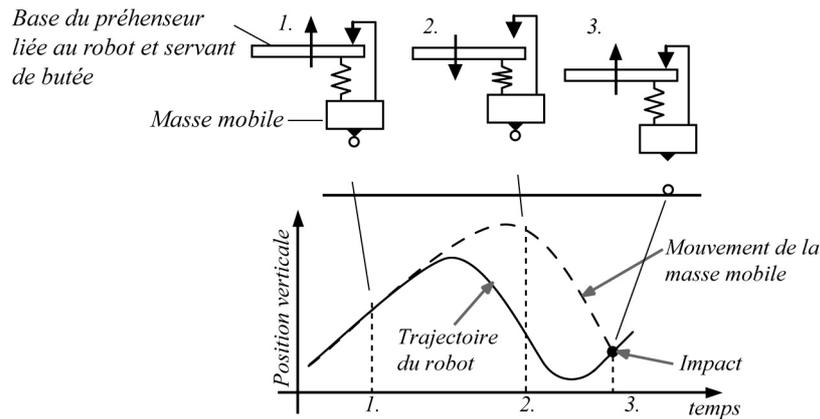


Figure 7.16 : Schéma de principe d'un préhenseur passif utilisant la dynamique du robot.

### 7.3.2.3 Dépose inertielle avec contact au substrat

Enfin, la troisième stratégie entend conjuguer l'adhésion au substrat et l'accélération du préhenseur pour rompre l'interface avec l'objet. A nouveau, la dynamique du robot entre en jeu. Une fois l'objet positionné sur le substrat, le manipulateur est brusquement relevé (Fig. 7.17). La vitesse de ce dernier au moment du choc conditionne le résultat et l'efficacité de la dépose. Cette stratégie optimise le positionnement du micro-objet au contraire de la proposition précédente.

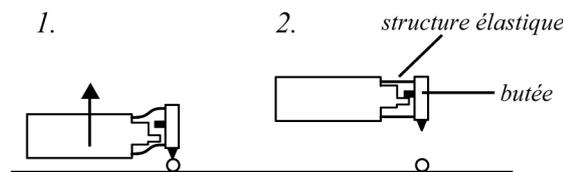


Figure 7.17 : Combinaison passive de l'adhésion au substrat et de l'inertie.

L'intégration d'un élément élastique au préhenseur joue de plus le rôle de limiteur de force pendant la prise. Des contraintes trop importantes sur le microcomposant peuvent ainsi être évitées tout en lui assurant un contact optimum avec la surface du préhenseur. Il faut par contre tenir compte de la masse en mouvement comme une charge supplémentaire sur l'objet, notamment lorsque l'adhésion au substrat est combinée à l'inertie pour la dépose, puisque cette masse s'ajoute à la charge du ressort<sup>2</sup>.

## 7.4 PRÉHENSEUR THERMODYNAMIQUE

La manipulation par adhésion peut bénéficier d'un apport de force important en utilisant les forces de capillarité. Bien qu'il y ait souvent une couche de liquide adsorbée, celle-ci n'est pas toujours suffisante pour assurer une force de capillarité adéquate. En effet, en-dessous de 70% d'humidité relative, la contribution des forces de capillarité aux effets d'adhésion n'est pas totale. De plus, la stabilisation d'un ménisque issue de la condensation capillaire peut prendre quelques secondes. Il est dès lors préférable d'utiliser un volume de liquide contrôlé pour effectuer les manipulations. Plutôt que d'aller chercher une goutte de liquide en y plongeant le préhenseur, nous proposons d'expérimenter l'utilisation des effets de condensation et d'évaporation comme alimentation et principe de ce préhenseur thermodynamique.

La conception de ce préhenseur est basée sur l'intégration d'un élément *Peltier* qui permettra de chauffer et refroidir alternativement l'embout du préhenseur. Les éléments Peltier sont des produits couramment utilisés notamment en stabilisation de systèmes électroniques et optiques. Ils sont composés de plu-

2. Ce qui n'est pas le cas lorsque l'on utilise un substrat compliant (§ 6.2.1).

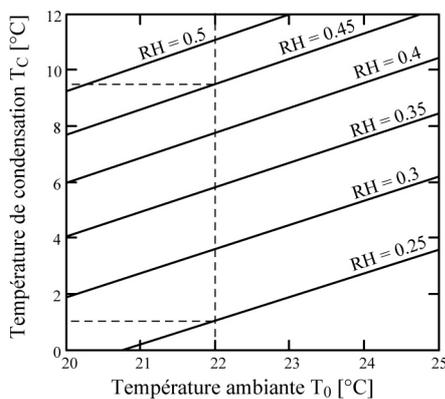
sieurs ponts constitués chacun d'un élément semi-conducteur de type p et d'un élément semi-conducteur de type n. Ces ponts sont connectés électriquement en série, mais thermiquement en parallèle. Ainsi l'application d'un courant électrique entraîne le déplacement des porteurs de charges d'une face (froide) à l'autre (chaude). Le flux thermique qui en résulte va donc s'opposer à celui de la conduction électrique. Ces ponts vont ainsi absorber de la chaleur à l'une des faces pour en dégager sur l'autre. En inversant la polarité, le flux thermique est aussi inversé. Il est alors possible de chauffer et refroidir l'embout du préhenseur.

Les puissances calorifiques absorbées  $P_f$  et dégagées  $P_c$  dépendent de l'effet Peltier selon le coefficient de Seebeck  $S_S$ , des pertes Joules et de la conductance thermique  $K$ . Elles s'expriment par :

$$P_f = n \left( S_S \cdot T_f \cdot I - \frac{1}{2} R_p \cdot I^2 - K_\lambda (T_c - T_f) \right) \quad (7.10)$$

$$P_c = n \left( S_S \cdot T_f \cdot I + \frac{1}{2} R_p \cdot I^2 - K_\lambda (T_c - T_f) \right) \quad (7.11)$$

avec  $R_p (= \rho(L/S))$  la résistance électrique d'un pont ( $\rho$  sa résistivité),  $K_\lambda (= \lambda(S/L))$  sa conductance thermique ( $\lambda$  est la conductivité thermique),  $I$  l'intensité électrique,  $S$  et  $L$  la section et la longueur d'un pont,  $n$  le nombre de ponts,  $T_c$  la température de la face chaude et  $T_f$  celle de la face froide.

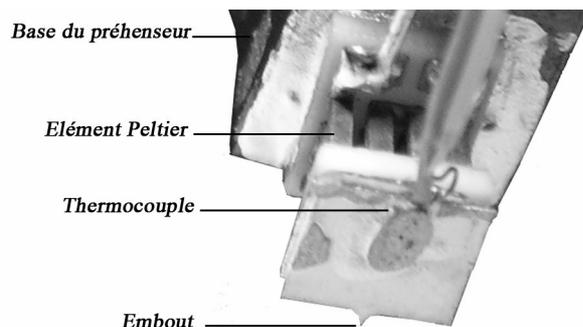


**Figure 7.18 :** Evaluation du point de rosée en fonction de la température et de l'humidité relative (RH) ambiantes.

La puissance nécessaire dépend de la température visée et de l'élément à chauffer/refroidir. La température de condensation dépend de la température et de l'humidité relative ambiante (Fig. 7.18). Les opérations de manipulation ayant lieu entre 25% et 45% d'humidité relative, à 22°C, la température  $T_f$  minimale à atteindre sera donc entre 1°C et 9.5°C. Pour l'évaporation, une température  $T_c$  de 60° permet de réduire le taux local d'humidité relative entre 4% et 7%.

L'embout du préhenseur qui subira ces cycles de chauffage/refroidissement doit avoir un volume le plus réduit possible pour limiter la puissance calorifique nécessaire. En terme de commodité de manipulation ainsi que pour le contrôle des opérations de prise et de dépose, la zone de préhension qui définira l'interface «objet - préhenseur» doit correspondre en taille aux composants à manipuler, soit si possible un maximum de 50µm de côté.

Le préhenseur thermodynamique est finalement constitué d'un élément Peltier miniature (PE-008-03-09 produit par Supercool AB d'une surface de 2.5x2.5mm<sup>2</sup> pour une épaisseur de 2.05mm) et d'une fine lamelle d'acier de 50µm d'épaisseur découpée au laser (Fig. 7.19). Un capteur de température (thermocouple de type J, fils de Ø80µm) est fixé au niveau de l'embout. Finalement, l'ensemble a été verni, donc isolé thermiquement, afin de limiter les pertes dues à la convection et d'optimiser le flux thermique.



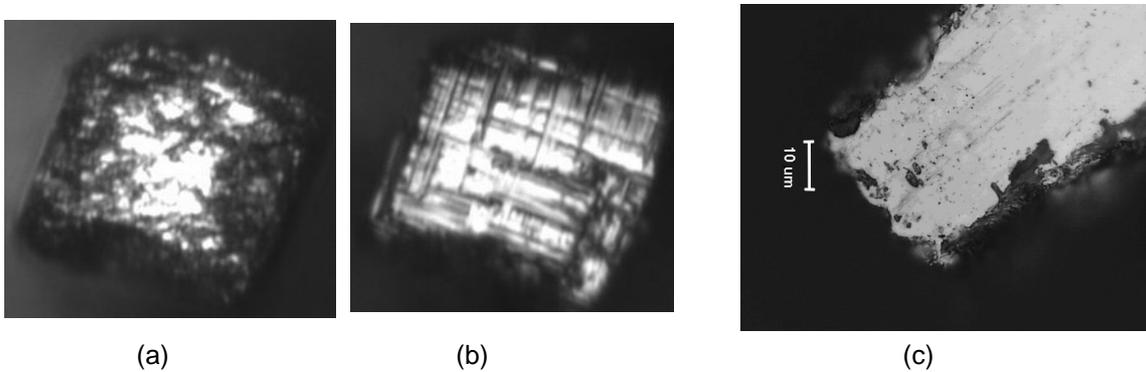
**Figure 7.19 :** Préhenseur thermodynamique.

Les énergies nécessaires au refroidissement ( $\Delta T_f = 20\text{K}$ ) et au chauffage ( $\Delta T_c = 60\text{K}$ ) de l'embout du préhenseur s'expriment par :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (7.12)$$

avec  $m$  la masse de l'élément et  $c_p$  sa chaleur massique. Par conséquent, les énergies nécessaires sont de 25mJ pour  $\Delta T_f = 20\text{K}$  et 74mJ pour  $\Delta T_c = 60\text{K}$ . L'élément Peltier<sup>3</sup> en question peut délivrer une puissance maximale de 0.3W (à  $\Delta T = 0\text{K}$ ). Sans considérer les pertes, ainsi que l'énergie nécessaire à la condensation et à la vaporisation<sup>4</sup>, les spécifications de l'élément Peltier limitent le temps de refroidissement à 0.12s, alors que l'échauffement de l'embout nécessite 0.6s.

L'interface «objet - préhenseur» se situe sur la tranche de la lamelle d'acier. La découpe laser est très bien adaptée à la découpe de cette lamelle, mais pas à l'obtention d'une qualité, au niveau de la tranche, adéquate pour la micromanipulation. Avant d'effectuer les opérations de prise et de dépose, une étape de polissage par abrasion est nécessaire. De manière analogue à l'usinage in-situ par  $\mu\text{EDM}$  (§ 7.2.1), cette opération a lieu directement sur l'installation de micromanipulation (Fig. 7.20).



**Figure 7.20** : Surface de préhension de  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  en vue de dessous (a) après découpe laser, (b) après polissage; (c) vue de côté.

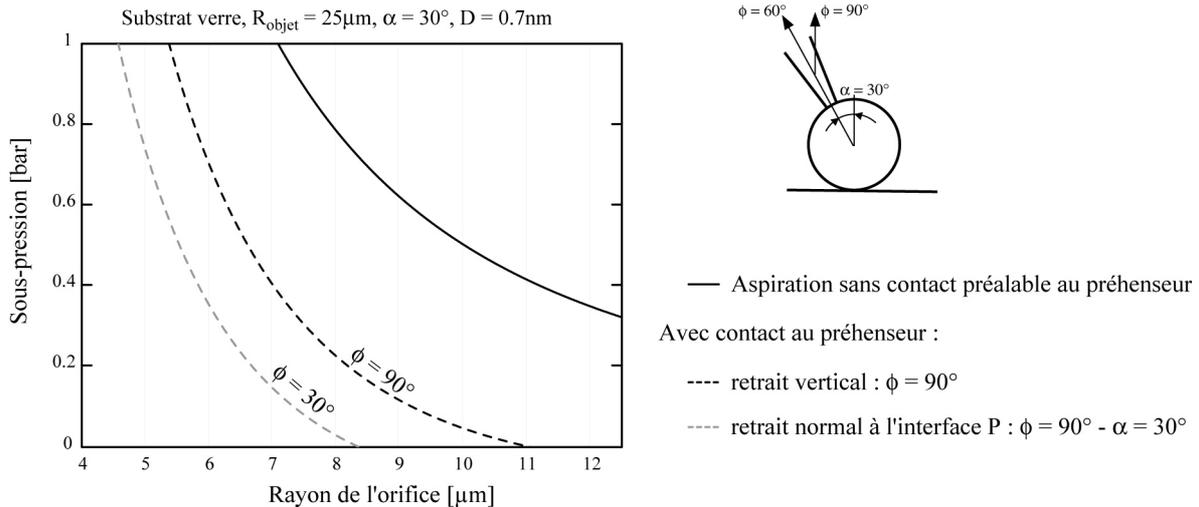
## 7.5 PRÉHENSEUR VACUUM

Ainsi qu'il en a été discuté au § 4.6, l'utilisation de la succion en micromanipulation est fortement limitée par les effets d'adhésion. En-dessous d'environ  $20\mu\text{m}$  de diamètre, les composants ne peuvent plus être manipulés selon ce principe. La dépose est aussi limitée par l'adhésion au préhenseur et au substrat. Nous proposons alors de combiner l'effet de succion en prise par une vibration du préhenseur pour provoquer la dépose, voire simplement la faciliter. En effet, s'il est nécessaire d'utiliser une sous-pression pour assurer la prise du composant, la dépose sur le même substrat devrait donc pouvoir se faire en comptant simplement sur l'adhésion au substrat. Néanmoins, la difficulté de contrôler et de valider le contact avec le substrat apparaît souvent. En appliquant une vibration au préhenseur, la rupture de l'interface «objet - préhenseur» (donc le transfert de l'objet) devrait se faire dès le contact établi et ce, sans avoir à induire un quelconque mouvement au préhenseur.

La Fig. 7.21 permet d'évaluer la taille de l'orifice de la buse pour la manipulation d'une bille de  $50\mu\text{m}$  de diamètre en polystyrène. La prise sans contact effectif au préhenseur est limitée à un rayon d'au minimum  $7\mu\text{m}$ .

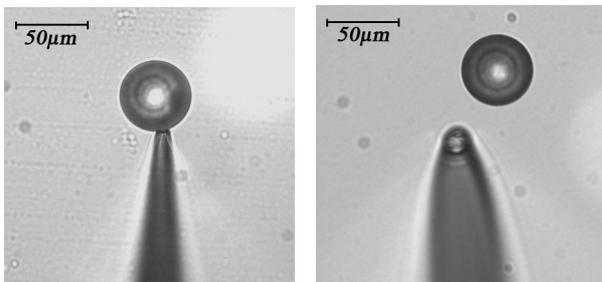
3. Caractéristique de l'élément Peltier PE-008-03-09 :  $I_{max} = 0.5\text{A}$ ,  $V_{max} = 1\text{V}$ ,  $P_{max} = 0.3\text{W}$ ,  $\Delta T_{max} = 71\text{K}$ ,  $R_{AC} = 1.82\Omega$ .

4. En évaluant cette énergie par  $Q = (c_p \Delta T + L_v)m$  et en considérant la masse  $m$  d'une goutte hémisphérique de  $25\mu\text{m}$  de rayon, on trouve pour la vaporisation avec  $\Delta T_c = 60\text{K}$  :  $E_c = 0.164\text{mJ}$ .

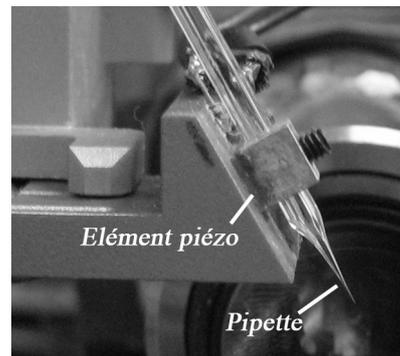


**Figure 7.21 :** Evaluation du rayon de la buse pour la manipulation d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  et une orientation de  $30^\circ$  du préhenseur.

Des pipettes en verre (borosilicate), utilisées de manière courante pour les opérations sur cellules ou neurones, permettent d'obtenir de telles orifices tout en conservant un encombrement très réduit, ce qui amène un confort maximal à l'utilisateur. La taille à leur extrémité varie néanmoins quelque peu et leur fragilité y favorise parfois des fissures. La répétabilité des opérations est donc sujette à la variabilité des extrémités, qu'il faudrait donc pouvoir contrôler pour assurer la répétabilité des opérations (Fig. 7.22). D'un autre point de vue, ces éléments peuvent être considérés comme des consommables à changer selon les composants à manipuler.

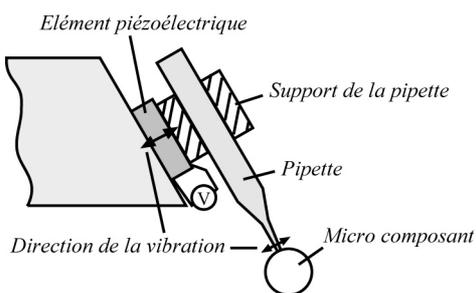


**Figure 7.22 :** Différence de forme et taille en bout de pipettes en verre.



**Figure 7.23 :** Préhenseur vacuum avec vibreur piézoélectrique.

L'orientation du préhenseur est fixée à  $30^\circ$  par rapport à la verticale (Fig. 7.23). Cette orientation représente un bon compromis entre la sous-pression nécessaire à la prise et le confort visuel. Les efforts sur la pipette sont aussi moins dommageables, puisque la pipette est contrainte en flexion dans cette configuration. Une orientation verticale aurait tendance à provoquer des effets de flambage sur le bout de la pipette lors du contact avec les composants.

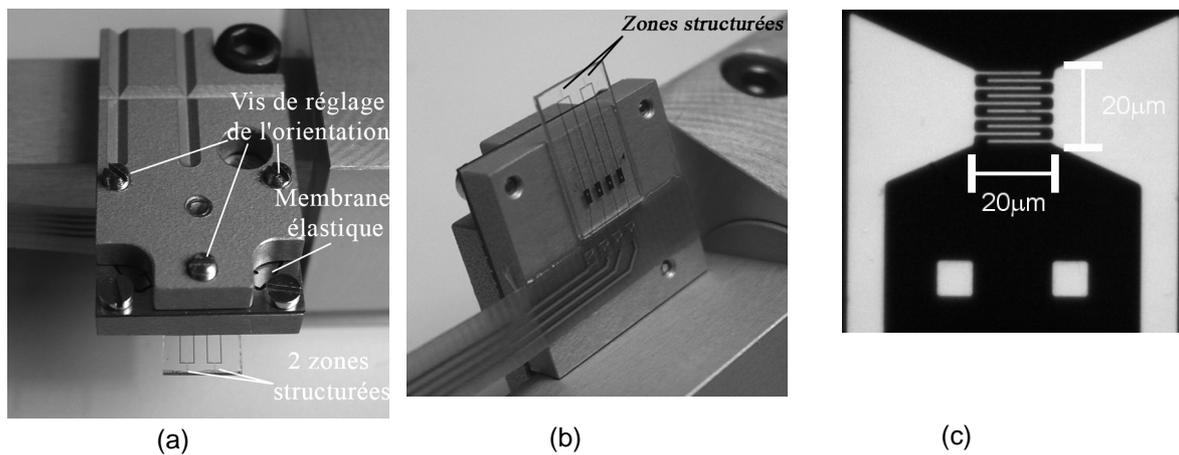


**Figure 7.24 :** Vibration de la pipette.

Un élément piézoélectrique est intégré au support de la pipette. Il permet d'appliquer une vibration au système et ainsi de rompre l'interface «objet - préhenseur» par cisaillement lors du contact avec le substrat. La pastille piézoélectrique est polarisée axialement. Le signal d'excitation est de très faible amplitude (0.3- 0.6V) pour une fréquence de 2kHz en signal carré. L'amplitude de la déformation est ainsi inférieure au nanomètre.

## 7.6 PRÉHENSEUR ÉLECTROSTATIQUE

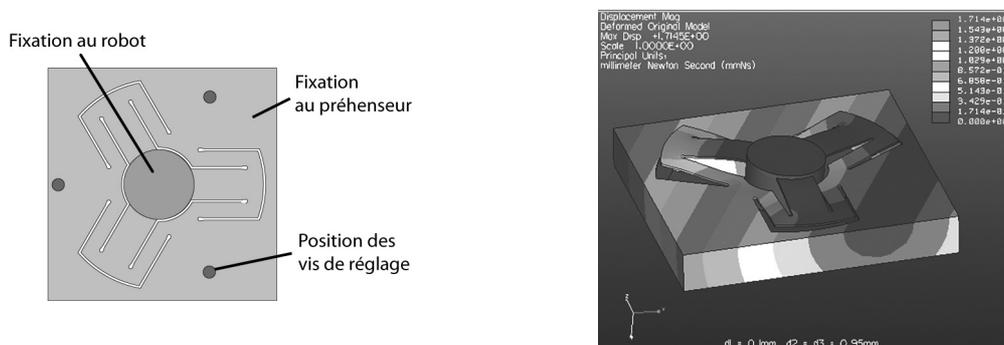
Un préhenseur électrostatique a également été réalisé. Le champ électrique est créé au niveau d'électrodes structurées en forme de peigne sur une surface de  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  (Fig. 7.25 (c)). Ces électrodes ont été conçues et réalisés par M. Jenke du *Laboratoire d'Optique Appliqué* de l'EPFL. La modélisation et les mesures des forces électrostatiques générées au niveau de ces structures sont présentées dans [Jenke07, Jenke08]. Nous présentons ici l'intégration de ces structures dans l'installation de micromanipulation.



**Figure 7.25 :** (a) Vue générale du préhenseur électrostatique, (b) vue de dessous avec la connexion au pcb flexible par wire bonding, (c) détail de la zone structurée.

Les électrodes sont fabriquées sur un wafer en quartz de  $525 \pm 50 \mu\text{m}$  d'épaisseur par la déposition d'une couche de 50nm de titane et de 100nm de platine. La couche métallique est ensuite structurée par un procédé standard de photolithographie UV et une gravure plasma de haute densité. Finalement, deux zones structurées sont disponibles sur le préhenseur. Chacune d'elles a une surface de  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  et une distance de  $1 \mu\text{m}$  entre les doigts du peigne.

Les zones de préhension étant réparties sur une relativement grande surface plane ( $6 \times 12 \text{mm}^2$ ), un système de réglage de l'orientation a été intégré au préhenseur. Trois vis de réglage à pas fin agissent sur une membrane flexible qui assure en contre-partie une force de rappel suffisante (Fig. 7.26). Ce système permet de gérer le parallélisme entre le substrat et le préhenseur, mais aussi de varier l'angle de prise, ainsi que de positionner l'une des électrodes de manière préférentielle par rapport aux composants.



**Figure 7.26 :** Membrane pour le réglage de l'orientation du préhenseur électrostatique

## 7.7 CONCLUSION

Le développement des préhenseurs est basé sur une série de principes de micromanipulation qui se doivent d'être combinés pour assurer les deux opérations de prise et de dépose.

Différentes micropinces ont été présentées dans ce chapitre. Elles se différencient d'une part par la résolution de leur actionneur et donc des forces de serrage générées, d'autre part par la qualité de l'interface «objet - préhenseur». Des problèmes de désalignement des doigts sont survenus durant l'assemblage puis durant les manipulations. Ils ont été résolus par le développement d'un procédé de correction in situ par micro-EDM. Une autre alternative a consisté à la conception d'une pince à deux degrés de liberté, permettant de corriger ce désalignement de manière active.

L'application d'une accélération suffisamment élevée pour rompre l'interface d'adhésion retenant l'objet au préhenseur peut être fournie par un élément piézoélectrique. Un préhenseur inertiel, basé sur les forces d'adhésion pour assurer les opérations de prise, a ainsi été développé. D'autres configurations, dites passives, font intervenir l'énergie libérée lors d'un choc pour induire la dépose. Quelques solutions de principes sont proposées.

Les forces d'adhésion interviennent à toutes les interfaces lors d'opérations sur des microcomposants. Néanmoins, les forces présentes contribuent souvent à perturber ou empêcher une manipulation. Il est donc intéressant de pouvoir soit les contrôler ou les diminuer à souhait, soit les accroître pour les utiliser ensuite comme principe de manipulation. Le préhenseur thermodynamique permet ainsi de provoquer la condensation d'un ménisque à l'interface «objet - préhenseur» puis de l'évaporer en cours de dépose. Parmi les phénomènes d'adhésion, les forces électrostatiques apparaissant aux interfaces entre les microcomposants sont certainement les moins bien connues et contrôlées. Il est par contre possible de les générer et donc de les utiliser comme élément de préhension.

Enfin, l'utilisation de préhenseurs vacuum est très répandue pour des macro objets. Il est alors intéressant d'en connaître les limites dans le micromonde ainsi que d'étudier certaines solutions annexes permettant, telles les vibrations, de faciliter la rupture d'une interface d'adhésion.

Les expériences menées avec ces différents préhenseurs sont présentées et discutées au chapitre 8. Une application d'assemblage définie, ainsi que les préhenseurs développés dans ce cadre, font l'objet du chapitre 9.

# OPÉRATIONS DE MICROMANIPULATION

---

Les expériences de micromanipulation menées avec les préhenseurs présentés au chapitre précédent sont le sujet de ce chapitre. La faisabilité des opérations pour les différents principes de préhension développés (chapitre 7) ainsi que la validation des tendances observées par modélisation (chapitre 4) sont investiguées.

L'étude expérimentale est basée sur les mesures des taux de réussite des opérations de prise et de dépose ainsi que sur l'évaluation des performances de positionnement, principalement en dépose. Nous rappelons que les composants considérés sont des billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

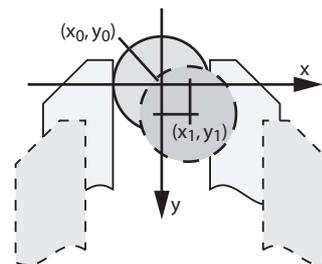
Les paramètres mesurés et évalués sont tout d'abord définis. Les résultats sont ensuite présentés par famille de préhenseurs, soit les micropinces, les préhenseurs inertiels, la manipulation par capillarité, les préhenseurs vacuum, puis électrostatique.

## 8.1 PARAMÈTRES D'ÉVALUATION

La caractérisation des opérations de prise et de dépose pour les différents préhenseurs est basée sur les mesures des taux de réussite des opérations ainsi que sur l'évaluation des performances de positionnement. Nous nous référons dans ce cas à la répétabilité de positionnement. Ces éléments sont définis ci-dessous :

- **Erreur de position  $(x,y)$**  : il s'agit de l'erreur de position du composant engendrée par l'opération, en général la dépose. L'erreur de position  $(x,y)$  est donc la différence entre les mesures de la position finale  $(x_1, y_1)$  du composant et sa position avant transfert  $(x_0, y_0)$  (Fig. 8.1) :

$$(x, y)_i = (x_1, y_1)_i - (x_0, y_0)_i \quad (8.1)$$



**Figure 8.1** : Schéma de l'erreur de position de dépose.

- **Taux de réussite** : il représente le rapport entre le nombre d'opérations réussies en prise ou en dépose et le nombre total d'opérations effectuées. Une opération de prise ou de dépose est considérée comme réussie si elle a été effectuée avec succès et avec une erreur de position inférieure à 20µm.

$$\text{Taux de réussite [\%]} = \frac{\text{Nombre d'opérations réussies}}{\text{Nombre total d'opérations}} \times 100 \quad (8.2)$$

- **Répétabilité de positionnement** : cet indice quantifie la variabilité des opérations en terme de positionnement et dépend de l'écart-type  $\sigma$  :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} x_i \text{ l'erreur de position de l'opération } i \\ \bar{x} \text{ moyenne des erreurs de position} \\ n \text{ le nombre total de mesures} \end{cases} \quad (8.3)$$

Nous définissons la répétabilité de positionnement comme deux fois l'écart-type  $\sigma$  des mesures d'erreurs de position : ainsi 95% des opérations résultent en une erreur de position inférieure à la répétabilité mentionnée.

$$\text{Répétabilité de positionnement} = 2 \cdot \sigma \quad (8.4)$$

Chaque mesure de répétabilité de positionnement fait référence à une série d'au moins 30 opérations réussies dans des conditions identiques.

Les influences des matériaux aux interfaces, de l'humidité relative, de la direction de retrait ou de la force nécessaire au transfert sont étudiées par le biais de ces mêmes paramètres d'évaluation. Les opérations ne font intervenir aucun moyen de fixation au niveau du substrat, sauf bien entendu les effets d'adhésion. Il s'agit donc uniquement d'opérations de *pick&place* et non d'opérations d'assemblage. Ces dernières feraient intervenir l'influence et les contraintes d'un élément de fixation qui représente en lui-même un autre sujet d'étude.

Chaque principe de manipulation requiert bien sûr des étapes qui lui sont spécifiques : la stratégie de prise et de dépose est particulière à chaque famille de préhenseur. Le mode opératoire général est représenté à la figure Fig. 8.2.

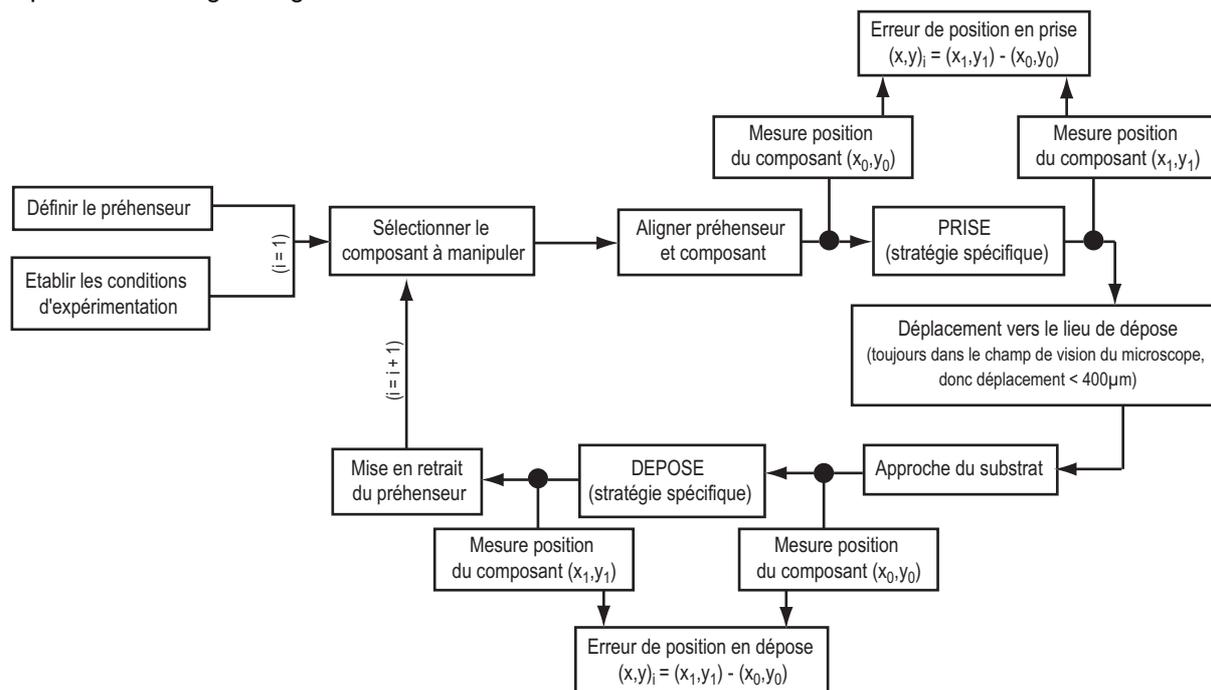
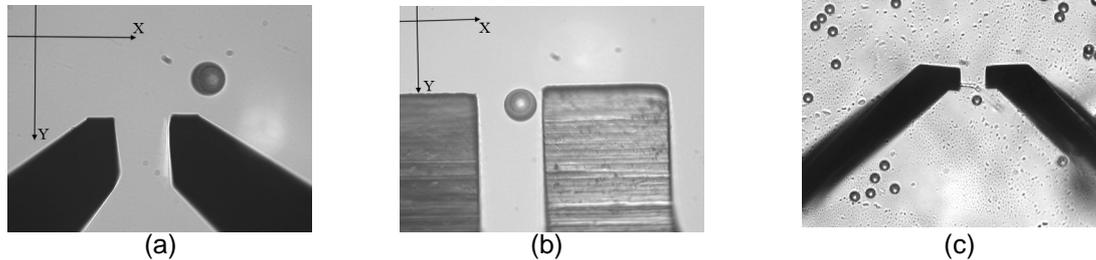


Figure 8.2 : Mode opératoire général de la caractérisation des opérations de prise et de dépose.

## 8.2 MANIPULATIONS AVEC DES MICROPINCES

Comme présenté au chapitre 7, plusieurs micropinces ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Les différentes configurations au niveau des embouts sont présentées à la Fig. 8.3. Les axes X et Y utilisés par la suite pour rendre compte du positionnement y sont aussi décrits.



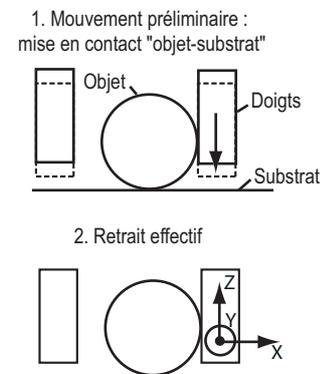
**Figure 8.3 :** Champ de vision avec les différents embouts des micropinces utilisées : (a) de la pince MEMS, en silicium d'épaisseur  $50\mu\text{m}$ , (b) de la pince modulaire pneumatique, en acier inox  $50\mu\text{m}$  fabriqués par  $\mu\text{EDM}$  et (c) en silicium de  $12\mu\text{m}$  d'épaisseur.

### 8.2.1 OPÉRATIONS DE PRISE

La prise des billes de  $\text{Ø}50\mu\text{m}$  en polystyrène ne pose pas de problème particulier si ce n'est lors de désalignements importants des deux doigts de la micropince. Il s'agit donc de problèmes inhérents à la construction de la micropince, à la qualité des surfaces ou encore à la détection optique. La seule perturbation importante en dehors des considérations de développement des préhenseurs est la présence de charges électriques ou de zones chargées de manière inhomogènes au niveau du substrat, du composant ou du préhenseur. Le substrat et le composant étant tous les deux non conducteurs, la mise à terre de ces éléments n'est pas possible. Une buse ionisante a parfois été utilisée entre les séries de tests dans le but de réduire ces effets. L'influence d'un tel outil n'a pas pu être démontrée de manière répétitive du fait aussi que l'apparition des charges n'était pas répétitive en elle-même. Par contre, les billes avaient une forte tendance à « sauter » sur les doigts des micropinces, et de la pince MEMS en particulier, à la mise en fonction de la buse. Un tel principe de prise pourrait donc très bien être imaginé, basé sur un élément générateur de charges électriques externe au préhenseur et agissant sur un élément conducteur prenant le rôle de préhenseur. Hesselbach et al. [Hesselbach07] proposent d'ailleurs un système basé sur l'utilisation d'un pistolet à ions pour charger/décharger la surface de préhension.

### 8.2.2 DIRECTION DE RETRAIT

L'ouverture simple de la micropince ne permet pas la dépose puisque l'objet va adhérer à l'un des doigts. Il faut donc d'abord s'assurer du contact entre le microcomposant et le substrat, voire l'induire ou le forcer. La direction du retrait va ensuite influencer le positionnement du composant. Les stratégies, dont les résultats de positionnement sont présentés au tableau (8.1), débutent toutes, après ouverture de la pince, par un premier mouvement normal au substrat et dirigé vers ce dernier ( $10\mu\text{m}$ ). Ce mouvement permet d'assurer le contact « objet - substrat » et d'amorcer la rupture de l'interface « objet - préhenseur ». Il s'agit ensuite de réaliser le retrait complet du préhenseur. Les directions principales investiguées sont illustrées à la Fig. 8.4. Ces différentes stratégies de retrait sont modélisées au § 4.3.2.



**Figure 8.4 :** Stratégie de dépose avec les directions de retraits expérimentées (schématisée en vue de face).

DIRECTION DU RETRAIT	RÉPÉTABILITÉ	
	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]
X : «latéral»	<b>4.20</b>	2.20
Y : «tangent»	2.34	<b>12.54</b>
Z : «vertical»	<b>1.40</b>	<b>1.76</b>

**Tableau 8.1 :** Influence de la direction de retrait sur le positionnement d'une bille de polystyrène de  $\text{\O}50\mu\text{m}$ . Manipulations effectuées avec une pince MEMS. Un coating hydrophobe (Perfluoroalkylchlorosilane PFS [Hoffmann97]) a été déposé sur les doigts de la pince, le substrat est en verre +10nm chrome.

Les performances de positionnement dépendent bien sûr de la qualité de l'alignement des surfaces du préhenseur et du substrat et de la direction de retrait. Durant la première phase de la dépose, soit la mise en contact «objet - substrat» et l'amorce de rupture de l'interface «objet - préhenseur», la perturbation va dépendre de l'erreur de perpendicularité entre la surface du préhenseur et celle du substrat. Il en va de même lors d'un retrait vertical. Un retrait parfaitement tangent va bien sûr être directement dépendant de l'alignement de la surface du préhenseur avec la direction de retrait. Ces erreurs proviennent directement des erreurs cumulées lors des différents assemblages et fixations entre le préhenseur et le robot ou de la phase de calibration. Ainsi pour des alignements peu maîtrisés, le retrait latéral est celui qui dépendra le moins de l'orientation des surfaces. Il est par contre le moins fiable en terme d'adhésion, autrement dit, il nécessite la plus faible adhésion au préhenseur comparée à celle au substrat.

Au vu des résultats obtenus (tableau (8.1)), le retrait vertical offre les meilleures perspectives de positionnement répétables. Ces résultats corroborent ceux obtenus par la modélisation des efforts aux interfaces au § 4.3.2 et par lesquels le retrait vertical permet la dépose pour des rapports d'adhésion  $\Gamma$  élevée ( $\Gamma_{depose} < 1/\mu_p^2$ ), ainsi qu'une perturbation minimale de l'interface «objet - substrat». Cette stratégie sera donc exclusivement utilisée lors des opérations relatives par la suite.

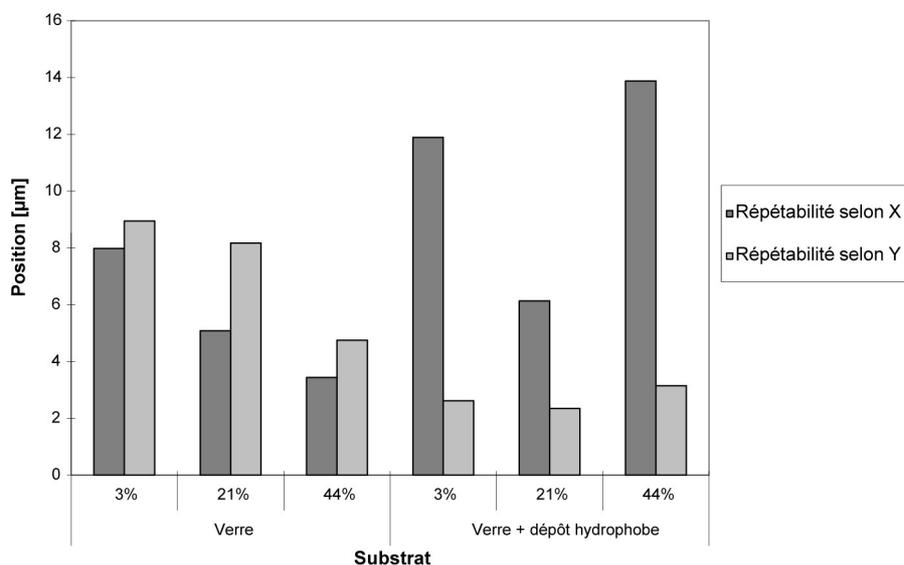
Le mouvement vertical dirigé vers le substrat, préliminairement au retrait effectif du préhenseur, permet d'assurer le contact entre le composant et le substrat. Ce type de mouvement permet de «rompre» l'interface «objet - préhenseur» dans toutes les configurations des interfaces, soit sans limitation du rapport d'adhésion  $\Gamma$ . L'interaction entre la bille et le préhenseur est diminuée mais pas annulée : la position du composant est effectivement influencée différemment suivant la direction du retrait comme le montrent les résultats du tableau (8.1). Sans assurance du contact au substrat, l'objet adhère au préhenseur et la dépose rate.

### 8.2.3 INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE

L'augmentation de l'humidité relative provoque la condensation spontanée de liquide sur les surfaces et ainsi accroît les effets de capillarité aux interfaces. A faible humidité relative, il y aura donc moins d'adhésion au préhenseur, mais aussi au substrat. La présence d'une couche hydrophobe sur l'une des surfaces devrait par contre rendre cette interface beaucoup moins sensible à la variation de l'humidité relative.

Les résultats des déposes sur un substrat en verre et pour des taux d'humidité relative entre 3% à 44% sont présentés à la Fig. 8.5 et au tableau (8.2). On remarque une tendance d'amélioration du positionnement avec l'augmentation de l'humidité relative. Le substrat a une tendance hydrophile, les effets de capillarité s'accroissent avec l'humidité relative. L'augmentation du taux de réussite des opérations de dépose confirme d'ailleurs cette tendance.

Les manipulations ont été ensuite effectuées avec le même préhenseur, mais cette fois sur un substrat hydrophobe. Les résultats des mesures (Fig. 8.5) montrent une détérioration du positionnement avec l'augmentation de l'humidité relative entre 21% et 44%. A 3%, les effets de charges électrostatiques ont été importants, d'où des erreurs de positionnement plus élevées.



**Figure 8.5 :** Performances de positionnement selon l'humidité relative et avec/sans couche hydrophobe au substrat.

SUBSTRAT	HUMIDITÉ RELATIVE	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	3% $\pm$ 1%	7.98	<b>8.94</b>	76%
	21% $\pm$ 1%	5.08	<b>8.18</b>	89%
	44% $\pm$ 3%	3.44	<b>4.76</b>	91%
Verre + coating hydrophobe	3% $\pm$ 1%	<b>11.9</b>	2.62	95%
	21% $\pm$ 1%	<b>6.14</b>	2.34	89%
	44% $\pm$ 3%	<b>13.88</b>	3.14	93%

**Tableau 8.2 :** Performances de positionnement pour différents taux d'humidité relative. Manipulations effectuées avec la pince pneumatique et les embouts en silicium (12 $\mu\text{m}$  d'épaisseur).

Une augmentation de l'adhésion au niveau du préhenseur seulement provoque ainsi une altération de la répétabilité de positionnement. En outre, la perte de maîtrise du positionnement est nettement plus importante en X qu'en Y. L'adhésion étant moins importante au niveau du substrat hydrophobe, ce dernier va nettement moins retenir l'objet durant l'opération de dépose, contrairement au substrat en verre où la distribution en X et Y est plus homogène.

Les opérations de dépose sont donc effectivement très dépendantes des caractéristiques d'adhésion du substrat. Dans le cas considéré, l'augmentation de l'humidité relative, donc des effets de capillarité, a eu un effet positif pour autant que le substrat ait une tendance hydrophile et ce bien que le préhenseur subisse aussi les effets de capillarité.

## 8.2.4 INFLUENCE DES MATÉRIAUX

### Dépôt hydrophobe (PFS)

Intuitivement, la diminution des effets d'adhésion au niveau du préhenseur devrait faciliter les opérations de dépose. Les mesures relatives au tableau (8.3) confirment effectivement cette tendance. Le taux de réussite des opérations de dépose est plus important dans le cas où un dépôt hydrophobe est appliqué au préhenseur. Néanmoins, dans le cas considéré, cette évolution n'est pas si flagrante et surtout ne s'observe pas au niveau du positionnement.

Au contraire, et comme vu ci-dessus, l'utilisation d'un dépôt hydrophobe au niveau du substrat va surtout induire des perturbations du positionnement. Ceci pourrait s'expliquer par l'importance de la stratégie adoptée. En effet, une faible adhésion au substrat, qui induit généralement un rapport d'adhésion  $\Gamma$  élevé, ne représente pas un cas favorable à la dépose. Mais, à condition que la rupture de l'interface «objet - préhenseur» soit amorcée, l'opération de dépose n'est pas empêchée.

Il est donc intéressant d'utiliser un préhenseur développant peu d'effet d'adhésion, par exemple par le dépôt d'une couche hydrophobe. L'interaction avec un substrat le plus adhérent possible est encore plus favorable aux déposes fiables et contrôlées.

SUBSTRAT	COATING HYDROPHOBE AU PRÉHENSEUR	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE
		x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	non	1.34	1.48	<b>86%</b>
	oui	1.68	1.84	<b>93%</b>
Verre + 10nm chrome	non	1.32	2.20	<b>71%</b>
	oui	1.40	1.76	<b>89%</b>

**Tableau 8.3 :** Résultats de positionnement de billes de  $\text{Ø}50\mu\text{m}$  en polystyrène à l'aide d'une pince MEMS en présence ou non d'un dépôt hydrophobe sur les embouts.

### Substrat en verre avec/sans dépôt de chrome (10nm)

En considérant un fin dépôt de chrome (10nm) sur le substrat de verre, on remarque une diminution des taux de réussite (tableaux (8.3) et (8.4)). La différence est nettement plus marquée sans utilisation de couche hydrophobe au niveau du préhenseur MEMS. La répétabilité du positionnement en est par contre peu affecté. La configuration «silicium au préhenseur» et «verre + chrome au substrat» représente donc le rapport d'adhésion le plus élevé, donc le moins favorable à l'opération de dépose<sup>1</sup>. Le positionnement y est d'ailleurs aussi le moins performant.

### Doigts métalliques avec dépôt hydrophobe

Les résultats obtenus avec la pince pneumatique et les embouts en acier inoxydable munis d'une couche hydrophobe font apparaître la même tendance au niveau du taux de réussite selon la présence ou non d'un dépôt de chrome au substrat. On note néanmoins une grande variation de la répétabilité de positionnement entre les deux configurations.

La qualité des opérations de dépose est nettement moindre en comparaison de celle obtenue à l'aide d'une pince MEMS. Il faut alors considérer la force de serrage ainsi que la qualité des surfaces du préhenseur. La force de serrage est de l'ordre de 2mN, soit nettement supérieure à la force minimale nécessaire en théorie (83 $\mu\text{N}$ ).

1. La couche de 10nm de chrome augmente surtout la rugosité du substrat, alors que sa faible épaisseur induit une couche non homogène qui ne permet pas d'assurer la conduction électrique.

SUBSTRAT	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE[%]
	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	
Verre	12.36	6.08	<b>71%</b>
Verre + 10nm chrome	2.92	3.42	<b>59%</b>

**Tableau 8.4** : Performances de positionnement obtenues lors de la dépose de billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  à l'aide de la micropince pneumatique munie d'embouts en acier inoxydable avec une couche hydrophobe.

### 8.2.5 DISCUSSION DE LA MANIPULATION AVEC UNE MICROPINCE

Toutes les expérimentations n'ont malheureusement pu être menées avec toutes les micropincettes, mais les tests effectués permettent de discuter des tendances observables, ainsi que de comparer ces différents outils.

Les deux éléments majeurs d'une manipulation réussie avec une micropince (et c'est le cas pour le transfert par adhésion dans tous les cas) concernent :

1. la capacité d'induire un contact effectif entre le composant et le substrat,
2. la qualité de l'adhésion au substrat.

Sans l'établissement du contact avec le substrat, le composant va adhérer à l'un des doigts de la micropince et repartir avec celle-ci lors du retrait. Une fois le contact établi, l'adhésion au substrat permet de limiter les mouvements de l'objet durant le retrait du préhenseur. Bien entendu, moins le préhenseur perturbera le composant, plus précis sera le positionnement. L'importance de la direction de retrait en découle, ainsi que l'intérêt d'une surface de préhension peu adhésive.

La phase de mise en contact avec le substrat, soit le mouvement vertical dirigé vers le substrat, permet d'atteindre des taux de réussite de dépose proche voire supérieur à 90% sans qu'il n'y est quoi que ce soit d'autre que la surface plane du substrat pour retenir l'objet. Que dire des situations d'échecs ? Tous les cas ne peuvent évidemment pas être répertoriés. Nous pouvons par contre mettre en évidence certains aspects :

- Les effets électrostatiques : les objets ont alors tendance à sauter ou à être attirés en un certain point. Ces effets peuvent provoquer de grands mouvements des microcomposants.
- Le déplacement du composant dans les mors de la pince : le composant est donc hors de portée du substrat. Ce déplacement peut être dû à une adhérence trop importante au préhenseur, donc trop faible au substrat, ou à nouveau à quelque effet électrostatique. Ce peut être aussi une conséquence du désalignement des deux doigts ou d'une erreur d'orientation des surfaces.

Notons aussi qu'une force de serrage importante risque d'induire des pressions locales trop importantes. Les zones de contact se déforment et l'effet d'adhésion s'accroît. Il est alors plus difficile d'amorcer la rupture de l'interface. L'intérêt d'une grande force de serrage provient surtout des situations de prise où les composants doivent être détachés ou retirés mécaniquement du substrat. Il faut alors logiquement mettre en adéquation la rigidité des doigts à la force générée par l'actionneur.

La configuration «pince pneumatique et embouts en silicium de  $12\mu\text{m}$  d'épaisseur» montre des taux de réussite similaires à ceux obtenus avec la pince MEMS, mais des répétabilités de positionnement inférieures. L'atout de cette configuration est d'avoir une épaisseur des doigts inférieure au rayon des objets manipulés. Le mouvement vertical de  $10\mu\text{m}$ , préliminaire au retrait et dirigé vers le substrat, permet ainsi de séparer complètement la surface du préhenseur de celle du composant. Pour les autres configurations, après ce mouvement, le contact avec le composant subsiste encore. La dépose est ainsi favorisée. Les répétabilités de positionnement sont par contre altérées par la faible rigidité des doigts et par leur désalignement.

En comparant les résultats obtenus avec les différentes micropinces, la pince MEMS permet les meilleures performances ce qui s'explique principalement par :

- sa structure monolithique : ne nécessitant pas d'assemblage, les désalignements des doigts sont limités aux contraintes résiduelles à la fabrication de la structure.
- ses surfaces de contact très bien définies : cet aspect dépend surtout du procédé de fabrication. Grâce à un excellent état de surface, les contours du préhenseur sont ainsi précisément détectables optiquement. Les surfaces ne perturbent a priori pas la position du composant.
- la bonne résolution de l'actionneur : la force de serrage est ainsi maîtrisée, du moins en répétabilité, si ce n'est en amplitude. Le contrôle de l'amplitude dépendra aussi de la résolution du capteur (si présent) ou de la qualité/résolution de la détection du contact «objet - préhenseur». Une limitation de force passive est en outre engendrée par le mouvement au niveau du capteur de force situé sur le second doigt, en vis-à-vis de l'actionneur. La force de serrage  $F_S$  s'exprime alors par :

$$F_S = F_A \frac{K_C}{K_C + K_A} - F_F \quad (8.5)$$

avec  $F_A$  la force au niveau de l'actionneur,  $F_F$  la force de fermeture de la pince (au moment du contact avec le micro-objet),  $K_C$  la rigidité du capteur,  $K_A$  la rigidité du guidage du doigt mobile.

Les aspects de rigidité des doigts, notamment au niveau de la référence mécanique, interviennent dans le contrôle du positionnement. Des doigts de faible rigidité vont générer une force de rappel à l'ouverture de la pince. Cet aspect pourrait être amoindri en effectuant l'alignement du composant après l'ouverture de la pince, bien que ce ne soit pas optimal en terme de référencement mécanique.

La rigidité hors-plan intervient surtout dans les problèmes de désalignement des doigts. En terme de structure, l'optimum correspondrait alors à des doigts de faible épaisseur dans la zone de préhension, appartenant tous les deux à un élément monolithique d'épaisseur plus importante lui conférant ainsi rigidité et alignement.

En conclusion, les micropinces permettent les positionnements les mieux contrôlés que nous ayons pu expérimenter. L'influence de plusieurs points de contact (exercés lors d'un référencement mécanique à plusieurs degrés de liberté par exemple) sur les opérations de dépose est expérimentée au chapitre 9. Dans ces configurations, l'effet d'adhésion au préhenseur augmente, alors que les directions de retrait et surtout les possibilités d'amorcer la rupture des interfaces d'adhésion se restreignent.

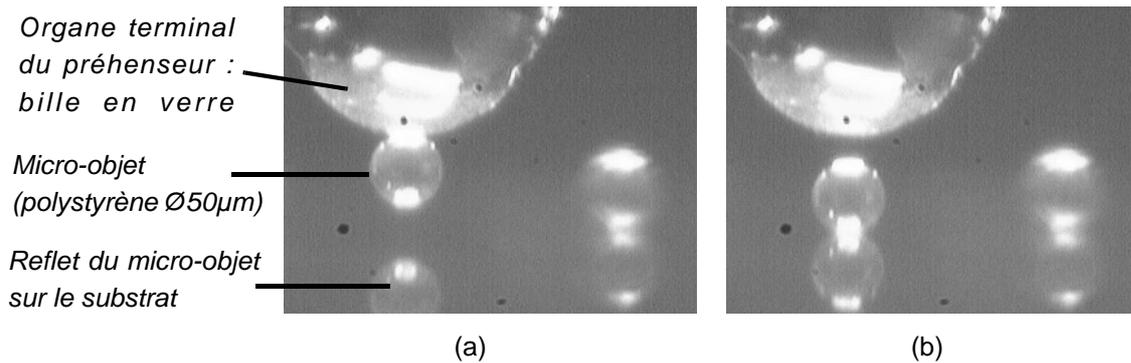
Un élément limitant l'utilisation de pinces en micromanipulation peut provenir des aspects d'accessibilité aux composants. Deux faces ou directions au minimum sont logiquement nécessaires à la prise alors que d'autres principes tel l'adhésion n'en nécessitent qu'une seule. D'autre part, la taille des doigts est généralement au moins équivalente à la taille des composants (Fig. 8.3).

## 8.3 PRÉHENSEUR INERTIEL

Les expériences menées avec le préhenseur inertiel (§ 7.3) concerne la prise par adhésion ainsi que les éléments de dépose inertielle. Ces derniers concernant tout d'abord la fréquence minimale d'excitation de l'actionneur piézoélectrique induisant la dépose. Les performances de positionnement sont ensuite mesurées selon la fréquence d'excitation et l'humidité relative ambiante.

### 8.3.1 PRISE PAR ADHÉSION

Un des paramètres importants lors d'un transfert par adhésion est la force exercée sur le microcomposant par le préhenseur lors de la mise en contact. Sans limitation de cet appui, la déformation aux interfaces atteint rapidement le domaine plastique. Dans ces conditions, la prise est très peu efficace, même en utilisant un rapport d'adhésion  $\Gamma$  aux interfaces très favorable à cette opération. Les quelques tests



**Figure 8.6 :** Dépose par inertie : zoom sur la zone de préhension (bille en verre de  $\text{Ø} 150\mu\text{m}$ ) avec une bille de polystyrène de  $\text{Ø} 50\mu\text{m}$  (a) prise par adhésion puis (b) éjectée sous l'effet de l'accélération issue de l'actionneur piézoélectrique (non visible sur l'image).

préliminaires effectués sans contrôle de la force d'appui se sont finalisés avec un taux de succès en prise d'à peine 20%. La dépose par inertie n'a ensuite que rarement été concluante. Pour limiter cette force d'appui, un capteur de force peut bien sûr être intégré au niveau du préhenseur ou du substrat. Dans tous les cas, un élément flexible doit être inséré dans la boucle d'effort. Cette force peut donc aussi être limitée passivement en fixant le substrat sur un élément flexible. Les opérations suivantes ont dès lors toutes été effectuées alors que le substrat était fixé sur une table compliant (10µN/µm).

La prise par adhésion selon une stratégie «touch and go», c'est-à-dire en venant au contact puis en repartant, n'est valable que lorsque les effets d'adhésion au préhenseur sont nettement plus importants qu'au substrat. Notamment une surface plane en silicium au niveau du préhenseur et un substrat recouvert d'une couche hydrophobe ont permis d'atteindre un taux de réussite variant entre 70% et 80% même à 2% d'humidité relative. Les mêmes opérations avec une bille en verre de  $\text{Ø} 150\mu\text{m}$  comme élément de préhension sont nettement moins efficaces, le rapport des adhésions aux interfaces<sup>2</sup> ( $\Gamma$ ) pouvant être évalué comme juste supérieur à 1. Par contre, un mouvement de roulement de l'objet permet d'amorcer la rupture de l'interface au substrat avant d'effectuer un retrait vertical. Les taux de réussite atteignent alors plus de 70%, sauf pour une faible humidité relative (tableau (8.5)).

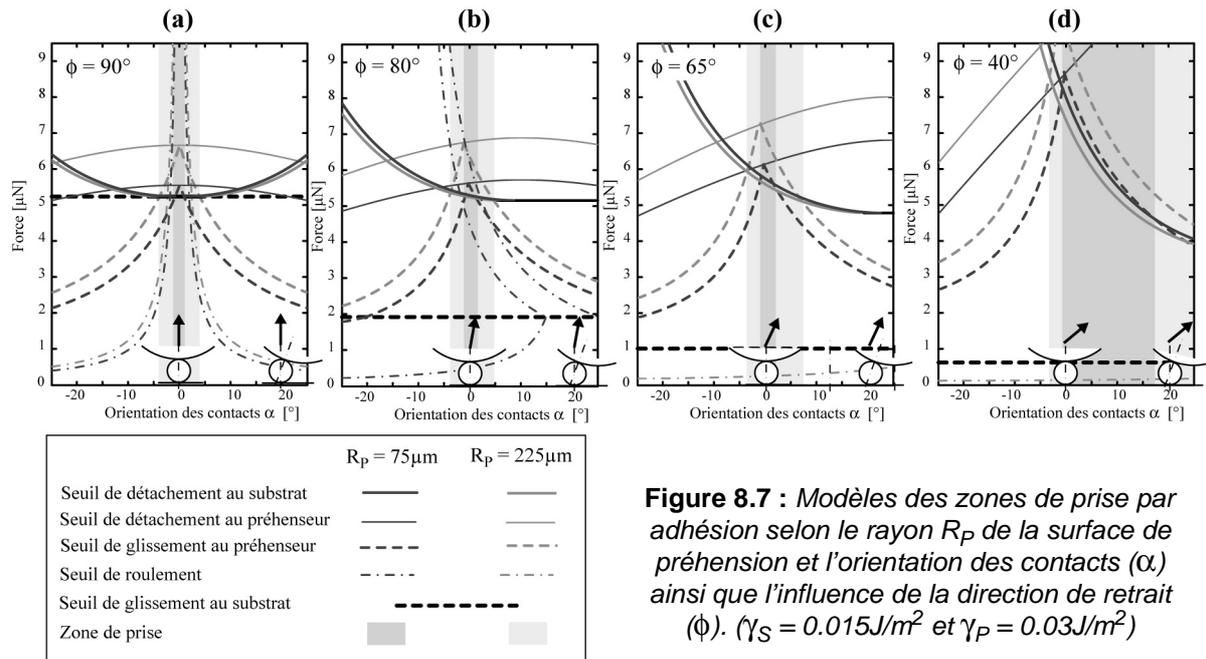
Les prises ont été effectuées avec une force d'appui de 100µN à 200µN et une distance de roulement de 2µm. La distance de roulement nécessaire peut ainsi être évaluée comme le diamètre de la zone de déformation à l'interface. Pour une bille de polystyrène de  $\text{Ø} 50\mu\text{m}$  sur un substrat en verre hydrophobe, le rayon de déformation au contact vaut  $\sim 1.1\mu\text{m}$  pour une force d'appui de 200µN (expression (3.68)).

Humidité relative	40%	20%	2%
Taux de réussite	83%	71%	54%

**Tableau 8.5 :** Taux de réussite (au premier essai) de la prise par adhésion d'une bille de polystyrène de  $\text{Ø} 50\mu\text{m}$  pour une surface sphérique en verre à partir d'un substrat en verre recouvert d'une couche hydrophobe.

Notons aussi que pour un rapport d'adhésion aussi faible, la modélisation des zones de prise en fonction des angles de contact et de retrait montre bien qu'une erreur d'orientation de  $\pm 2^\circ$  pour un retrait parfaitement vertical engendre déjà un glissement successif aux deux interfaces (Fig. 8.7). Cette marge s'accroît soit avec un préhenseur de plus grand rayon, soit évidemment avec l'augmentation du rapport des adhésions  $\Gamma$ . Pour des orientations peu contrôlées, il serait d'ailleurs préférable de retirer le préhenseur presque latéralement ( $\phi \sim 40^\circ$  par exemple).

2. Etant donnée la force d'inertie nécessaire à la dépose (§ 8.3.2), l'énergie de surface au préhenseur peut être évaluée à  $\gamma_p \sim 0.03\text{J/m}^2$ . La couche hydrophobe au substrat correspond à  $\gamma_s \sim 0.015\text{J/m}^2$ . Avec une surface sphérique au préhenseur, le rapport  $\Gamma$  devient alors  $\Gamma = (\gamma_p/\gamma_s)(R_p/(R_p + R_o))^2 = 1.13$



**Figure 8.7 :** Modèles des zones de prise par adhésion selon le rayon  $R_P$  de la surface de préhension et l'orientation des contacts ( $\alpha$ ) ainsi que l'influence de la direction de retrait ( $\phi$ ). ( $\gamma_S = 0.015\text{J/m}^2$  et  $\gamma_P = 0.03\text{J/m}^2$ )

Finalement, divers effets aléatoires sont apparus comme les sauts inopinés des billes ou leur retour vers une position toujours identique lors de prises ratées par exemple. Ces effets semblent dûs à la présence de charges électrostatiques. Ils apparaissent parfois dès les premières opérations sur une bille, mais interviennent souvent aussi après une série de manipulations. Ces effets électrostatiques sont aussi nettement plus importants à faible humidité relative.

### 8.3.2 DÉPOSE INERTIELLE

#### 8.3.2.1 Conditions d'expérimentation

Les expériences menées avec le préhenseur inertiel sont décrites selon des conditions de l'environnement ambiant dénommées 2%, 20% ou 40%. Ces conditions correspondent aux caractéristiques explicitées au tableau (8.6) ci-dessous.

INTITULÉ	HUMIDITÉ RELATIVE	TEMPÉRATURE
2%	2.3% ± 1.0%	24.9°C ± 0.2°C
20%	20.9% ± 1.0%	25.0°C ± 0.6°C
40%	42.9% ± 1.9%	23.7°C ± 1.2°C

**Tableau 8.6 :** Conditions de l'environnement ambiant de manipulation durant les expérimentations.

#### 8.3.2.2 Fréquence minimale de dépose

Pour le dépose inertielle, deux types de signaux d'excitation de l'actionneur piézoélectrique permettant d'induire l'accélération nécessaire à la dépose ont été utilisés. Il s'agit dans les deux cas de signaux sinusoïdaux d'une amplitude de 200V.

- Le mode *single* correspond à une impulsion sinusoïdale unique dont on varie la fréquence.
- Le mode *multiple* est par contre un train de 10 impulsions sinusoïdales à la fréquence voulue.

Ces signaux sont envoyés tous les 20ms, donc à 50Hz, à l'actionneur piézoélectrique. La fréquence minimale de dépose est obtenue en augmentant la fréquence par pas de 10kHz entre 60kHz et 500kHz.

Une opération est donc considérée comme réussie si la dépose a été effectuée pour une fréquence inférieure à 500kHz.

Les résultats des mesures de la fréquence minimale de dépose sont présentés aux tableaux (8.7) et (8.8) ainsi qu'à la Fig. 8.8 pour les deux modes d'excitation et en fonction des conditions d'humidité relative. Lors du dimensionnement du préhenseur, les forces d'adhésion avaient été estimées sur la base d'une surface de préhension sphérique d'énergie d'adhésion  $\gamma_P = 0.03\text{J/m}^2$ . Une bille de  $\varnothing 150\mu\text{m}$  a été utilisée au niveau du préhenseur. La force de pull-off agissant à l'interface avec une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  peut être évaluée à  $5.6\mu\text{N}$  (3.71). Une accélération de  $8.1 \cdot 10^4\text{m/s}^2$  serait donc nécessaire à induire la dépose ce qui correspondrait à une fréquence d'excitation de 190kHz (cf (7.5) et (7.9)). Dans le cas où la force de capillarité serait dominante, la force correspondrait à  $22.6\mu\text{N}$  pour notre configuration et nécessiterait une fréquence de 382kHz pour induire la dépose. Les forces d'inertie équivalentes calculées sur la base des mesures sont reportées au tableau (8.9).

HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHz]	ECART-TYPE [KHz]	MIN [KHz]	MAX [KHz]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	213.16	44.12	150	310	87%
20%	239.6	43.54	160	330	81%
40%	253.33	55.75	140	400	88%

**Tableau 8.7** : Mesure des seuils de fréquence minimum induisant la dépose par inertie en mode *single*.

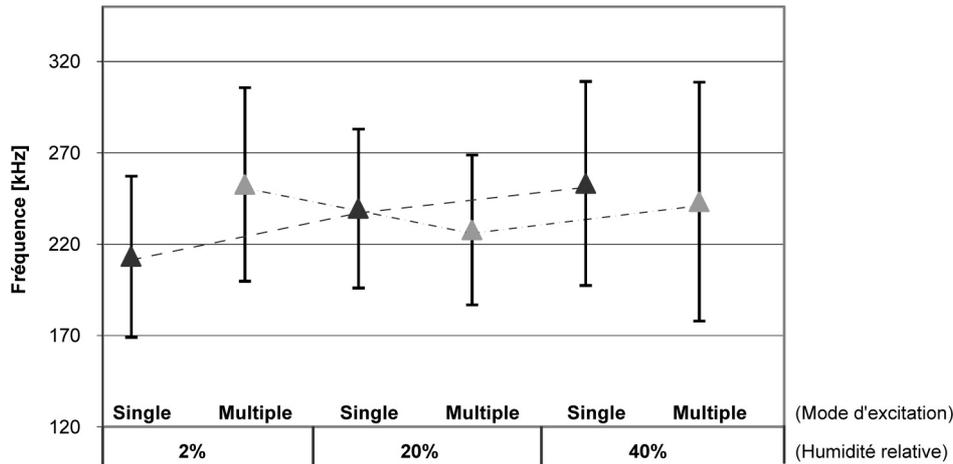
HUMIDITÉ RELATIVE	MOYENNE [KHz]	ECART-TYPE [KHz]	MIN [KHz]	MAX [KHz]	TAUX DE RÉUSSITE
2%	252.73	52.93	160	380	100%
20%	227.92	40.96	150	340	96%
40%	243.29	65.35	130	490	100%

**Tableau 8.8** : Mesure des seuils de fréquence minimum induisant la dépose par inertie en mode *multiple*.

Les fréquences minimales de dépose sont plus élevées, mais du même ordre de grandeur, que celle évaluée sur la base d'une force de pull-off. Il y a par contre une grande dispersion des valeurs. On remarque une augmentation de la fréquence de dépose avec l'augmentation de l'humidité relative. Cela dénote bien d'une augmentation de la force d'adhésion due à l'apparition et à la croissance des effets de capillarité. Cette tendance est bien visible en mode *single*, alors que la fréquence minimale en mode *multiple* est relativement constante.

Hormis à basse humidité (2%), les fréquences minimales sont inférieures en mode *multiple* par rapport au mode *single*. Il est donc possible qu'il faille en réalité très souvent plus d'une impulsion pour déposer l'objet. Cette tendance a d'ailleurs été montrée par [Haliyo03] dans le cas d'une accélération proche du seuil limite de dépose. L'objet est alors éjecté seulement après quelques oscillations et non pas dès la première impulsion. Le mode *multiple* serait donc plus efficace, ce qui se confirme par les taux de réussite plus élevés du mode *multiple*.

La dispersion des mesures est assez importante. Les conditions à l'interface, d'une opération à l'autre, ne sont donc a priori pas similaires ni stables. En analysant les valeurs des forces équivalentes (tableau (8.9)), on remarque effectivement que les valeurs maximales dans chaque configuration tendent vers la présence d'un ménisque à l'interface. A basse humidité, l'effet est moins important, mais néanmoins non négligeable. Les valeurs minimales sont quant à elles inférieures à la force de pull-off évaluée, ce qui tend à confirmer que notamment la qualité des surfaces influence les effets d'adhésion.



**Figure 8.8 :** Distribution et évolution de la fréquence minimale induisant la dépose inertielle d'une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  selon le type de signal d'excitation et l'humidité relative.

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	FORCE ÉQUIVALENTE [ $\mu\text{N}$ ]		
		MOYENNE	MIN	MAX
2%	Single	7.6	3.5	15.0
	Multiple	10.3	4.0	22.3
20%	Single	9.2	4.0	16.8
	Multiple	8.3	3.5	17.9
40%	Single	10.4	3.0	24.7
	Multiple	9.8	2.6	37.1

**Tableau 8.9 :** Force d'inertie équivalente calculée à partir des mesures de la fréquence minimale de dépose.

### 8.3.2.3 Positionnement

Les mesures de positionnement ont été effectuées lors de déposes à fréquences minimales ainsi qu'en appliquant une fréquence seuil. Ce seuil a été fixé à 350kHz ce qui équivaut à une force d'inertie de 19 $\mu\text{N}$ . Cette fréquence est supérieure ou égale à 98% des fréquences minimales mesurées. Les déposes ont été effectuées en positionnant toujours le composant 5 $\mu\text{m}$  au-dessus du substrat. La surface de dépose est identique à celle de la prise (verre muni d'une couche hydrophobe). Les performances de positionnement correspondent uniquement à l'opération de dépose. L'erreur de position correspond à la différence entre les positions des composants avant et après dépose inertielle. Les résultats sont reportés dans les tableaux (8.10) et (8.11), puis aux Fig. 8.9 et Fig. 8.10.

En regard des taux de réussite du tableau (8.11), les résultats confirment l'intérêt d'appliquer un train d'impulsions (mode *multiple*) plutôt qu'une impulsion unique. L'utilisation d'un seuil élevé, qui induit donc une force d'inertie plus grande que nécessaire, n'améliore ni le taux de réussite de la dépose, ni par ailleurs le positionnement. Il vaut donc mieux un signal minimal et répétitif qu'une impulsion à haute fréquence. Il apparaît aussi que la répétabilité du positionnement est meilleure à basse humidité relative. Ceci pourrait s'expliquer par une perturbation due à la présence d'un ménisque à plus haute humidité relative dont la rupture serait moins homogène qu'en cas de contact sec.

L'erreur de position est mesurée entre les positions des billes avant, donc solidaires du préhenseur, et après dépose. Elle ne nous renseigne donc pas sur la position relative «micro-objet - préhenseur» et notamment donc sur l'erreur de centrage (soit l'angle  $\alpha$  discuté lors de la prise). La Fig. 8.11 montre la distribution des positions après dépose. L'erreur selon la direction X, soit la direction de roulement utili-

sée lors de la prise par adhésion, y est plus importante que selon X. L'influence de l'erreur de centrage due à la prise est donc mise en évidence. La répétabilité selon Y indiquerait ici alors mieux les performances attendues pour des objets centrés.

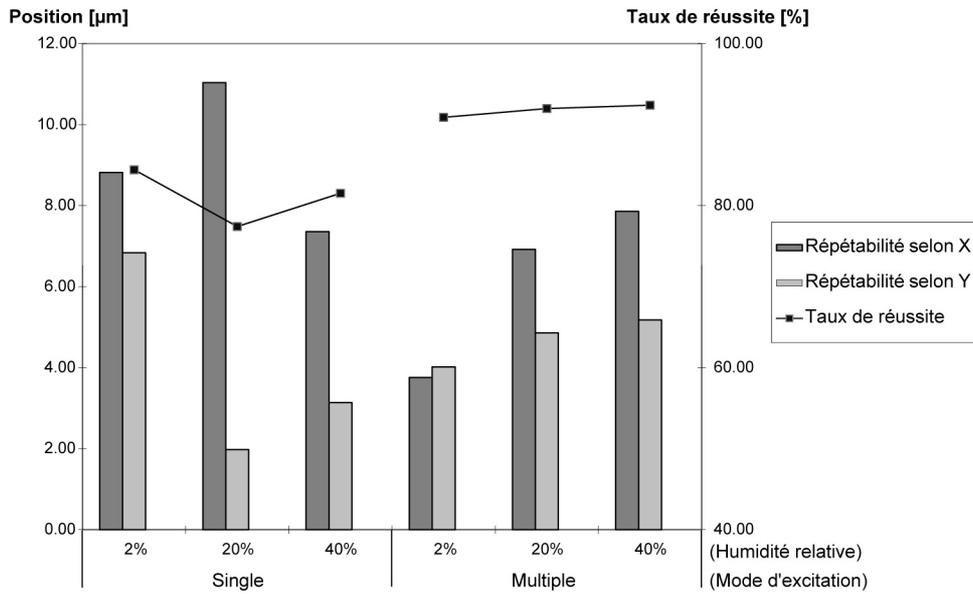


Figure 8.9 : Performances de positionnement lors de déposes à fréquence minimale.

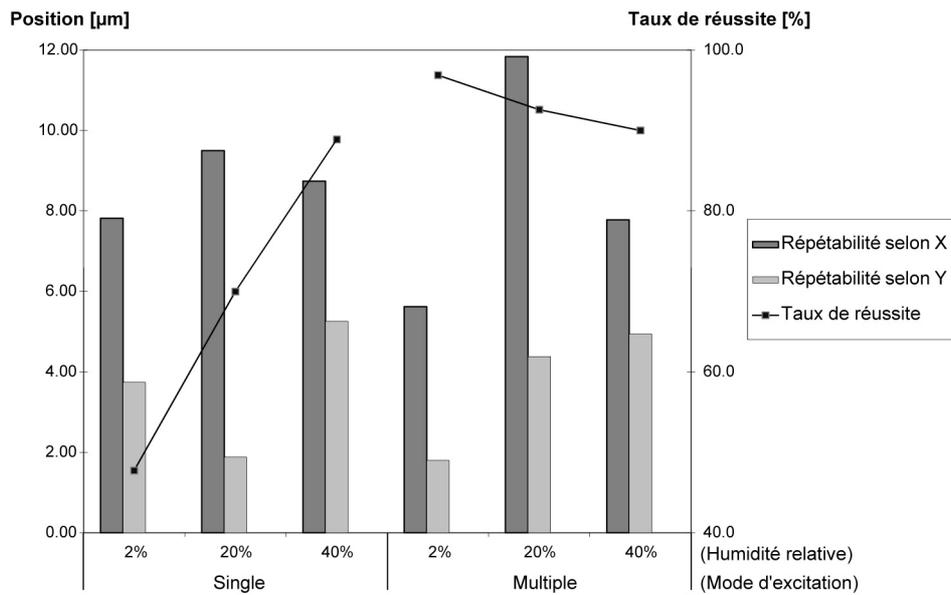


Figure 8.10 : Performances de positionnement lors de déposes à une fréquence seuil de 350kHz.

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [µm]	y [µm]	Dépose	Erreur < 20µm
2%	Single	8.82	6.84	87%	84%
	Multiple	3.76	4.02	100%	91%
20%	Single	11.04	1.98	81%	77%
	Multiple	6.92	4.86	96%	92%
40%	Single	7.36	3.14	88%	81%
	Multiple	7.86	5.18	100%	92%

Tableau 8.10 : Performances de positionnement à la fréquence minimale induisant la dépose.

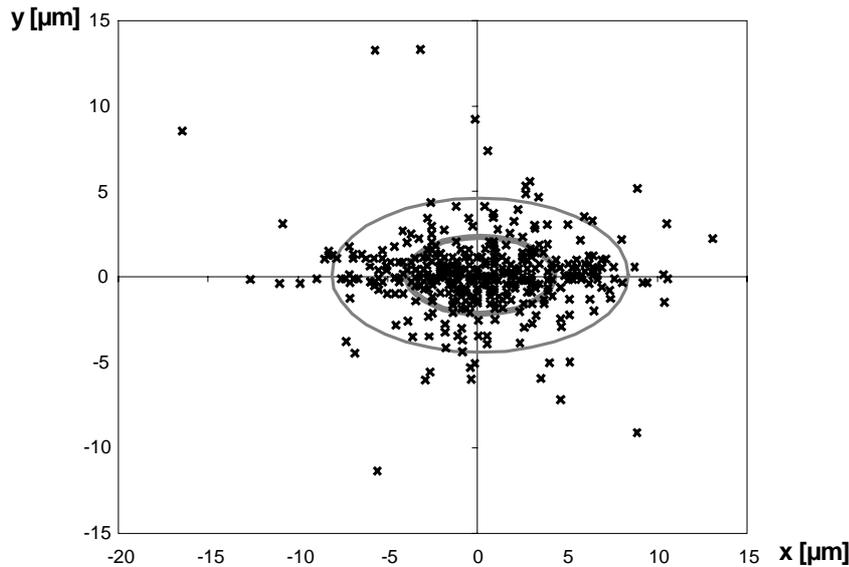


Figure 8.11 : Distribution des positions après dépose par inertie (lignes continues :  $1\sigma$  et  $2\sigma$ ).

HUMIDITÉ RELATIVE	MODE D'EXCITATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]	
		x [μm]	y [μm]	Dépose	Erreur < 20μm
2%	Single	7.82	3.74	59%	48%
	Multiple	5.62	1.80	97%	97%
20%	Single	9.50	1.88	73%	70.0%
	Multiple	11.84	4.38	100%	93%
40%	Single	8.74	5.26	92%	89%
	Multiple	7.78	4.94	100%	90%

Tableau 8.11 : Performances de positionnement pour un seuil de 350kHz.

### 8.3.3 CONCLUSION

La prise par adhésion a été expérimentée uniquement dans le contexte du préhenseur inertiel. La configuration n'est effectivement pas la plus optimale pour une prise par adhésion, mais répond aux besoins des opérations de dépose. Nous avons notamment favorisé une orientation  $\alpha = 0^\circ$  pour optimiser la dépose. Une des seules concessions à la prise correspond donc au choix d'un substrat développant les plus faibles effets d'adhésion (dépôt hydrophobe), puis bien sûr à la limitation de la force exercée sur le composant. Cette configuration permet par contre d'optimiser la dépose en terme de direction de «l'éjection» du composant. Il serait intéressant d'expérimenter une prise avec une orientation perpendiculaire ( $\alpha = 90^\circ$ ), d'étudier d'autres directions de retrait, ainsi que d'autres orientations d'éjection. La configuration expérimentée est cependant optimale en terme d'accessibilité aux composants puisqu'en venant sur le dessus, il est possible de «piocher» un microcomposant parmi d'autres, ce qui ne serait pas aussi évident au moyen d'une configuration perpendiculaire.

Les tendances observées lors des mesures montrent tout d'abord l'intérêt d'appliquer un train d'impulsions (mode *multiple*) comme signal d'excitation par rapport à une impulsion unique (mode *single*). L'utilisation d'une fréquence seuil n'a pas modifié, de manière significative, les performances de positionnement, mais a confirmé le bénéfique du mode *multiple* en regard du succès des opérations. Le seuil de fréquence utilisé est situé juste au-dessus des fréquences minimales de dépose. Il serait donc intéressant d'observer le positionnement obtenu avec un seuil beaucoup plus élevé.

Le préhenseur inertielle correspond à une combinaison de principes de manipulation pour assurer les deux opérations de prise et de dépose. Les conditions de manipulation doivent permettre d'optimiser au mieux les deux principes simultanément. La configuration expérimentée ici combine adhésion et inertie. Bien que le positionnement semble s'améliorer à basse humidité en dépose inertielle, le taux de réussite d'une prise dans ces conditions est trop faible, du moins pour les matériaux considérés ici. Il serait donc plus optimal d'augmenter l'humidité relative afin d'améliorer la prise. Notons par ailleurs que la détérioration du positionnement en dépose avec l'augmentation de l'humidité relative pourrait s'expliquer par une perturbation provoquée par la présence d'un ménisque à l'interface préhenseur. De ce fait, et si cela se confirme, la combinaison de la dépose inertielle avec une prise par capillarité devrait être évitée.

En outre, il serait intéressant d'étudier le positionnement sur un substrat plus adhésif. Cela permettra de déterminer le mouvement des composants lors de la dépose. En cas de mouvement de glissement ou de roulement induit à l'objet, un substrat plus adhésif devrait permettre de limiter ces déplacements et donc d'améliorer le positionnement. Cet aspect s'oppose par contre à nouveau au principe de prise si les deux opérations doivent s'effectuer sur un substrat de prise et dépose aux propriétés identiques.

## 8.4 MANIPULATION PAR CAPILLARITÉ

Nous proposons ici deux stratégies de manipulation par capillarité. La première se base sur les possibilités de condensation puis d'évaporation d'un ménisque à partir de l'humidité ambiante sur la surface du préhenseur puis du substrat (§ 7.4). Elle a été expérimentée pour les billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  ainsi qu'avec des cubes de silicium de  $50\mu\text{m}$  de côté. La seconde utilise le même principe pour la prise d'une roue dentée de  $\varnothing 2\text{mm}$ , mais la dépose est effectuée en réduisant la surface de contact du préhenseur.

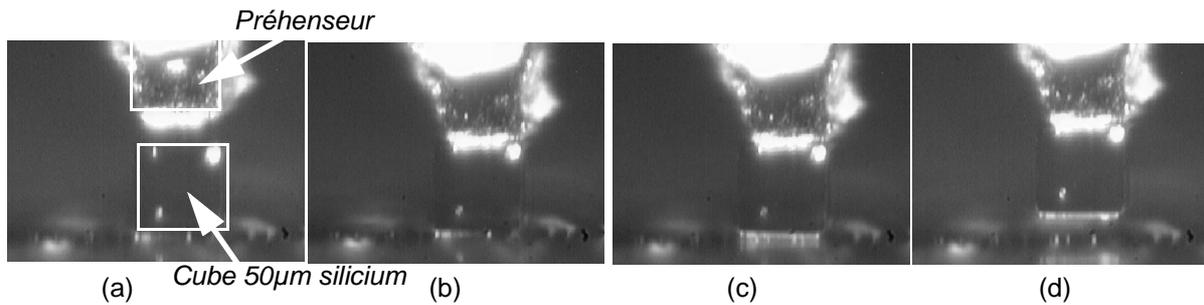
### 8.4.1 MANIPULATION PAR CONDENSATION/ÉVAPORATION

Les phénomènes de condensation et d'évaporation sont induits par la modification locale de la température du préhenseur par l'intermédiaire d'un élément Peltier. La stratégie adoptée est la suivante :

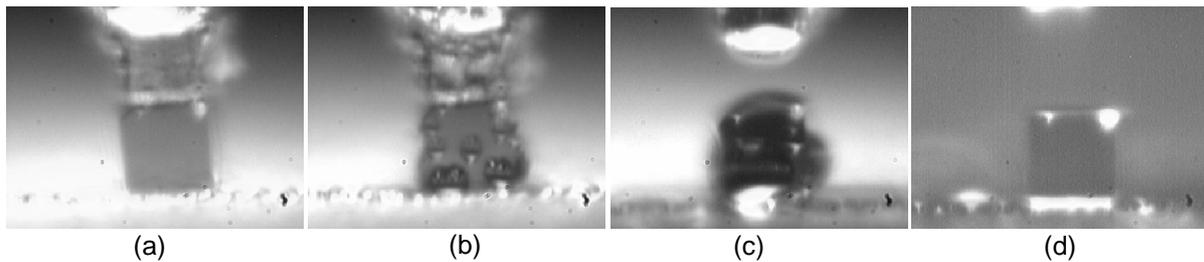
- Prise :
  - la température du préhenseur est abaissée jusqu'à  $3^\circ\text{C}$  pour provoquer la condensation dans la zone de préhension;
  - la mise en contact avec le microcomposant est effectuée, il y a donc création d'un ménisque entre les deux surfaces;
  - enfin, le retrait est purement vertical.
- Dépose :
  - le préhenseur est placé à  $80\mu\text{m}$  au dessus du lieu de dépose;
  - la température au préhenseur est augmentée jusqu'à  $30^\circ\text{C}$ , le composant est alors mis en contact avec le substrat;
  - la température du préhenseur est alors abaissée à nouveau à  $3^\circ\text{C}$  afin de provoquer la condensation au niveau du substrat,
  - puis finalement augmentée jusqu'à  $30^\circ\text{C}$  et le retrait du préhenseur est effectué,
  - finalement le liquide s'évapore naturellement au niveau du substrat.

Les Fig. 8.12 et Fig. 8.13 illustrent les opérations de prise et de dépose effectuées pour un cube de silicium de  $50\mu\text{m}$ . Les conditions de manipulation étaient alors de  $40\% \pm 4\%$  pour l'humidité relative pour une température de  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ . Les résultats des mesures sont reportés au tableau (8.12) et Fig. 8.14.

Les manipulations sont plus aisées avec des cubes de silicium qu'avec des billes de polystyrène. Cela peut s'expliquer par le fait que le polystyrène est moins hydrophile que le silicium. D'autre part, les forces de capillarité sont plus importantes entre deux surfaces planes qu'entre une sphère et un plan. Les deux types de composants ont néanmoins pu être saisis et déposés par ce principe.



**Figure 8.12** : Prise d'un cube en silicium de 50µm de côté par capillarité : (a) approche, (b) contact «préhenseur - composant», (c) retrait, (d) prise réussie.



**Figure 8.13** : Dépose d'un cube de silicium de 50µm de côté par transfert du ménisque au substrat : (a) approche et augmentation de la température du préhenseur à 30°C, (b) refroidissement du préhenseur à 3°C, (c) chauffage à 30°C et retrait du préhenseur, (d) évaporation.

La répétabilité du positionnement en prise, pour les cubes de silicium, est meilleure qu'en dépose. Le préhenseur étant de taille similaire (50µm), un effet de centrage dû au ménisque pourrait en être la cause. Pour les billes, les valeurs en prise sont aussi plus homogènes, mais l'effet de centrage est moins important du fait de la géométrie du composant.

Durant l'opération de prise, un cycle de température «augmentation jusqu'à température ambiante - diminution à 3°C» a pour effet d'augmenter la taille du ménisque. Le composant est ainsi presque englobé dans une goutte d'eau. Cette stratégie s'est montrée plus efficace pour la prise des billes de polystyrène.

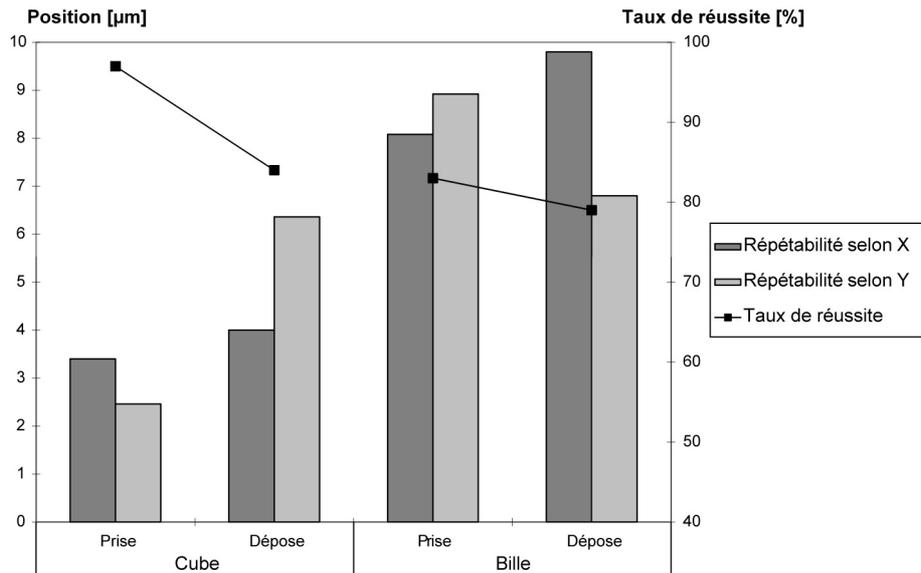
Finalement le retrait du préhenseur durant l'opération de dépose est plus efficace s'il est rapide et effectué en un seul mouvement. La dynamique aide la rupture du ménisque durant le retrait. Cet aspect a notamment été étudié par [Lambert05] qui a effectivement mis en évidence des zones de prise ou de dépose selon la masse du composant pour une dynamique donnée du préhenseur.

MICROCOMPOSANT	OPÉRATION	RÉPÉTABILITÉ		TAUX DE RÉUSSITE [%]
		x [µm]	y [µm]	
Cubes 50µm silicium	Prise	3.40	2.46	<b>97%</b>
	Dépose	4.00	6.36	<b>83%</b>
Billes Ø50µm polystyrène	Prise	8.08	8.92	<b>75%</b>
	Dépose	9.80	6.80	<b>79%</b>

**Tableau 8.12** : Opérations de prise et dépose par condensation et évaporation du ménisque.

#### 8.4.2 DÉPOSE PAR RÉDUCTION DE LA SURFACE DE CONTACT

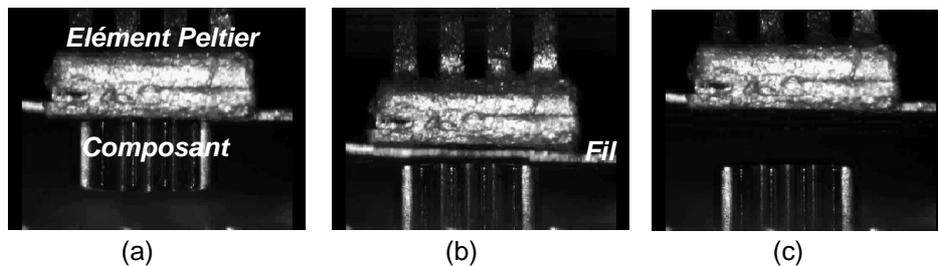
L'évaporation totale du ménisque n'est pas atteignable rapidement par l'augmentation locale de la température. La réduction du ménisque n'est même souvent pas suffisante pour permettre la dépose. En effet, la diminution du volume d'eau à l'interface a tout d'abord tendance à amplifier la force de capillarité



**Figure 8.14 :** Performances de positionnement pour les opérations de prise et dépose par condensation et évaporation du ménisque.

du fait de la diminution de l'espace entre les surfaces. Si l'adhésion au niveau du substrat n'est pas nettement supérieure à la force de capillarité au préhenseur, une autre stratégie devra donc être appliquée pour la dépose. [Valsamis06] a d'ailleurs montré qu'il n'était pas nécessaire de recharger une goutte de liquide sur le préhenseur avant chaque opération de prise. Au contraire la force augmente durant les premières opérations du fait de la diminution du volume de liquide au préhenseur : une partie du liquide reste en fait sur le composant à chaque dépose. Plusieurs milliers d'opérations pouvaient alors être effectuées sans recharger de liquide. Bien sûr, pour un liquide volatil, le nombre d'opération va être limité par l'évaporation du liquide.

Lorsque l'on ne peut pas utiliser la condensation d'un ménisque sur le substrat pour la dépose, une autre solution consiste à réduire la surface de contact entre le préhenseur et le composant lors de la dépose. Cette stratégie a été expérimentée dans le cas de roues dentées de  $\varnothing 2\text{mm}$ . La prise par capillarité est aussi basée sur la condensation du ménisque par diminution de la température au préhenseur. Pour la dépose, le préhenseur vient mettre le composant en contact avec le substrat. Lors du retrait, un actionneur électro-magnétique compense le mouvement du manipulateur et permet de garder le contact avec le composant sur une surface réduite (simplement un fil dans le cas de notre démonstrateur). Puis le retrait total est effectué. Cette surface réduite peut prendre toute autre forme et devrait même intégrer les éléments de référencement mécanique pour optimiser le positionnement du composant.



**Figure 8.15 :** Démonstration d'une dépose par réduction de la surface de contact au préhenseur : (a) avant la dépose, (b) retrait du préhenseur avec contact conservé mais sur une surface réduite (retrait de  $200\mu\text{m}$ ), (c) dépose effectuée.

## 8.5 PRÉHENSEUR ÉLECTROSTATIQUE

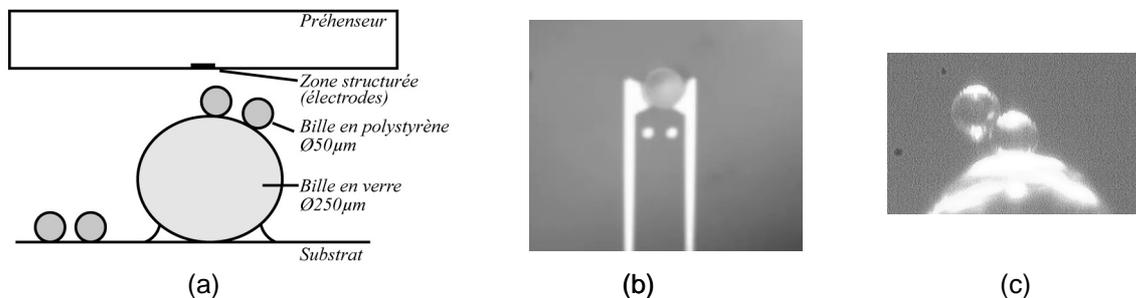
Les manipulations par le préhenseur électrostatique (§ 7.6) sont basées sur le champ électrique généré par le préhenseur pour la saisie du composant et sur une dépose par adhésion. L'utilisation du préhenseur électrostatique nécessite au préalable quelques préparatifs afin de permettre la caractérisation de la prise selon l'interaction avec le champ électrique et non par l'adhésion au contact, ainsi que de ne prendre de composants que spécifiquement dans la zone de préhension. Les mesures de la tension minimale de prise sont ensuite présentées avant de discuter des opérations de prise et de dépose.

### 8.5.1 DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS

Les électrodes génèrent un champ électrique dont le volume d'interaction se situe dans la zone proche de la surface et sur une distance pouvant être approximée comme deux fois le pas de l'électrode (Fig. 8.18). L'interaction est néanmoins maximale jusqu'à une distance de 150 à 300nm pour des pas jusqu'à 1 $\mu$ m [Jenke08]. Il n'est donc a priori pas nécessaire d'assurer un contact mécanique entre le composant et la surface des électrodes pour l'opération de prise. Mais l'interaction n'aura lieu qu'à faible distance, soit au maximum 2 $\mu$ m dans le cas de la configuration utilisée (pas de 1 $\mu$ m).

La dépose des composants est basée uniquement sur les effets d'adhésion : une adhésion plus faible au préhenseur qu'au substrat est indispensable. Une couche hydrophobe a donc été déposée sur la surface du préhenseur pour y diminuer les effets d'adhésion. L'opération de prise serait bien sûr facilitée par une forte adhésion au préhenseur en plus de la force générée par les électrodes, mais dans ce cas il serait aussi difficile de différencier l'effet des électrodes et celui de l'adhésion à l'interface.

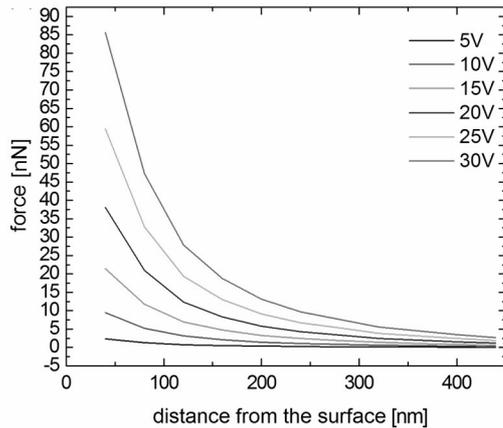
Afin d'obtenir une zone de prise bien localisée, les objets (billes de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ ) sont disposés sur des billes en verre d'un diamètre de 200 $\mu\text{m}$  à 300 $\mu\text{m}$  fixées elles-même sur la surface du substrat (Fig. 8.16). Le tout est placé sur le support flexible afin de limiter la force d'appui, notamment en phase de dépose par adhésion.



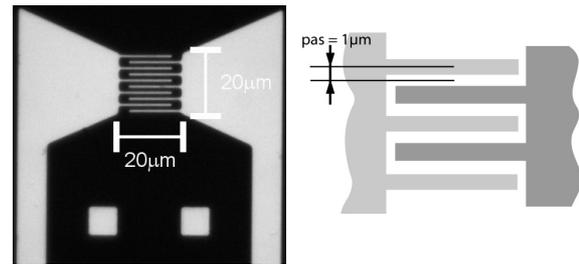
**Figure 8.16 :** Préhenseur électrostatique : (a) schéma des opérations : les micro-objets sont placés sur une bille en verre fixée au substrat afin de délimiter la zone de manipulation; (b) bille de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  prise par électrostatisme; (c) vue de côté de la zone de prise représentée par une bille de verre de  $\varnothing 200\mu\text{m}$  avec deux billes en polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .

### 8.5.2 TENSION MINIMALE DE PRISE

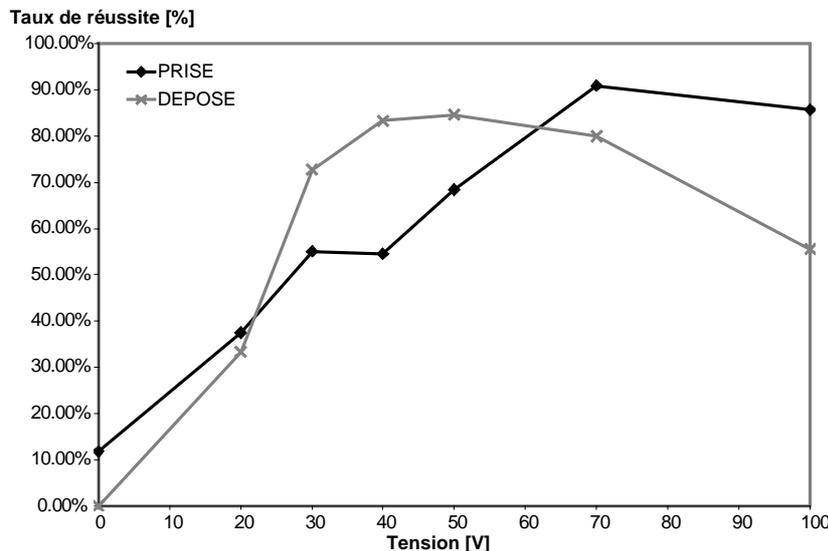
La force électrostatique générée par les électrodes dépend largement de la distance de séparation «électrode - composant», des caractéristiques de l'électrode (surface totale et dimensions géométriques de la structure définies principalement par le pas (Fig. 8.18)) ainsi que des caractéristiques du composant et notamment de sa constante diélectrique. La force diminue rapidement avec la distance de séparation et évolue en outre de manière quadratique avec la tension appliquée. La Fig. 8.17 représente l'évolution de la force électrostatique en fonction de la distance et de la tension appliquée [Jenke08]. L'interaction avec un composant diélectrique est plus faible qu'avec un composant conducteur. Les tensions nécessaires à la saisie de billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  seront donc plus élevées. Les électro-



**Figure 8.17 :** Force électrostatique en fonction de la distance et de la tension appliquée. Résultats de simulations pour l'interaction d'une pointe conductrice de 300nm de rayon et d'une électrode d'un pas de 500nm [Jenke08].



**Figure 8.18 :** Caractéristiques des électrodes utilisées.



**Figure 8.19 :** Taux de réussite des opérations de prise et de dépose selon la tension appliquée (en prise). (Humidité relative 28%  $\pm$  1%)

des intégrées au préhenseur électrostatique ont de ce fait un pas de 1 $\mu$ m. Celui-ci permet d'augmenter la distance d'interaction et d'utiliser des tensions plus élevées. Selon nos expériences, les électrodes supportent une tension maximale de 130V.

Les taux de réussite des opérations de prise et de dépose selon la tension appliquée sont reportées à la Fig. 8.19. Les expériences ont été menées avec une humidité relative de 28%. Pour les opérations de prise, la force d'appui maximale au contact est de 20 $\mu$ N. Certains composants ont par contre pu être pris avant que le contact ne soit établi. Ces situations sont apparues, logiquement, avec les tensions les plus élevées. Le taux de réussite augmente effectivement avec la tension pour atteindre un maximum vers 70V. Certaines prises ont pu être effectuées avec des tensions inférieures à 30V, voire même nulles, signe que les effets d'adhésion au préhenseur étaient parfois suffisamment importants pour permettre la saisie.

Pour les opérations de dépose, dans 10% des cas réussis, la bille est tombée à une tension non nulle (entre 5V et 20V). La dépose a d'ailleurs été réalisée sans contact dans 21% des cas. Ces situations

sont apparues majoritairement lorsque le composant se trouvait juste au-dessus d'une autre bille de polystyrène et pour des tensions de prise d'au moins 50V (résultant typiquement à la situation de la Fig. 8.16(c)). Pour tous les autres cas, la dépose a été effectuée par adhésion, par contact avec la surface de verre combiné avec un mouvement latéral. Le contact avec une autre bille de polystyrène a aussi souvent permis la dépose. Pour les tensions les plus élevées, bien que ces phénomènes de chute apparaissent, le taux de réussite des déposes diminue.

### 8.5.3 REMARQUES ET DISCUSSION

Durant les opérations, nous avons souvent remarqué des comportements faisant référence à la présence importante et inhomogène de charges électriques sur les surfaces du substrat, des composants eux-mêmes ou en-dehors de la zone d'électrode du préhenseur. Les objets ont aussi tendance à sauter sur des côtés de l'électrode (parties trapézoïdales, voire Fig. 8.18) ou au niveau des pistes de connexions des électrodes. Lors de la dépose, les composants sont souvent attirés par une autre bille et très souvent à la position qu'ils occupaient avant leur prise (distante jusqu'à environ 50 $\mu$ m). Enfin, durant l'approche du préhenseur, des effets d'attraction/répulsion s'observent parfois sous la forme d'un mouvement du composant ressemblant à une vibration.

Les résultats exposés ci-dessus décrivent les potentialités d'un tel principe. Malheureusement, certains effets n'ont pu être quantifiés. Notamment il est souvent arrivé qu'il était tout simplement impossible d'effectuer les opérations de prise sans que l'on puisse en définir les causes. Alors qu'en d'autres circonstances (donc un autre jour), chaque composant pouvait être manipulé plusieurs fois. Ces phénomènes semblent évidemment provenir des conditions de l'environnement mais sans que la vraie raison en soit perceptible.

La prise d'une bille de polystyrène placée sur une autre bille de polystyrène est plus aisée qu'à partir d'une bille en verre. Il y a effectivement une réduction des rayons au contact ainsi qu'une diminution des énergies de surface, d'où une force d'adhésion plus faible qu'au contact de la bille en verre. La dépose y est par contre également souvent facilitée. Ceci s'expliquerait plutôt par la présence de charges électrostatiques. Il est alors possible que le substrat se charge aussi durant les opérations provoquant une force répulsive par rapport à la bille manipulée. Enfin, la prise de plusieurs billes simultanément ne peut être empêchée : elles se répartissent sur la surface du préhenseur ou se lient les unes aux autres.

La géométrie des électrodes ne provoque pas d'effet de centrage. Seul environ un composant sur deux s'est positionné sur la partie structurée de l'électrode. Bien que cette zone soit toujours centrée sur le composant, les autres composants ont généralement été attirés par l'un des côtés et par contre de manière assez répétitive.

Des opérations de prise et dépose avec des cubes de 50 $\mu$ m en silicium ont été expérimentées. Le processus a montré une grande sensibilité à l'orientation des surfaces, rendant la prise très incertaine. Dans les cas où la prise a été effectuée avec succès, la dépose s'est avérée impossible, même en essayant de transférer le composant d'une électrode à l'autre. Les forces d'adhésion pour une géométrie de contact «plan - plan» sont effectivement beaucoup plus importantes qu'en situation «sphère-plan», et pourtant ces objets devraient être théoriquement plus sensibles au champ électrique que les billes de polystyrène.

[Hesselbach01] avait aussi relevé les problèmes de dépose inhérents à la présence de charges résiduelles sur les surfaces. La mise en court-circuit des électrodes, comme il le proposait, n'a pas suffi dans notre cas à permettre la dépose. Ce problème peut évidemment être contourné en venant fixer les composants au substrat. Dans ce cas, l'application d'une tension plus élevée permet d'optimiser la prise alors que la dépose est assurée par le biais du substrat. [Enikov05] a ainsi élaboré un système d'assemblage automatique basé sur des préhenseurs électrostatiques. Finalement, nous avons vu au chapitre 3 que les forces d'adhésion (van der Waals et capillarité) sont très sensibles à la rugosité des surfaces.

[Sausse-Lhernould07] propose une étude de forces électrostatiques en micromanipulation incluant ce paramètre.

Un des grands intérêts du préhenseur électrostatique est la possibilité de prendre un composant sans avoir à assurer de contact mécanique. Les phases d'approche peuvent alors être simplifiées et sécurisées. Pour une meilleure efficacité de la prise, il est intéressant de pouvoir appliquer une tension seuil élevée. L'utilisation d'une tension élevée pour la saisie n'est par contre pas favorable à la dépose par adhésion. Il serait dès lors plus intéressant d'utiliser un autre principe de dépose, par exemple inertiel. Cette combinaison est d'autant plus intéressante que leurs signaux de commande requièrent tout deux des tensions élevées.

## 8.6 PRÉHENSEUR VACUUM

Les deux paramètres importants de ce préhenseur sont la taille de la pipette ainsi que la présence ou non d'une vibration générée par l'élément piézoélectrique.

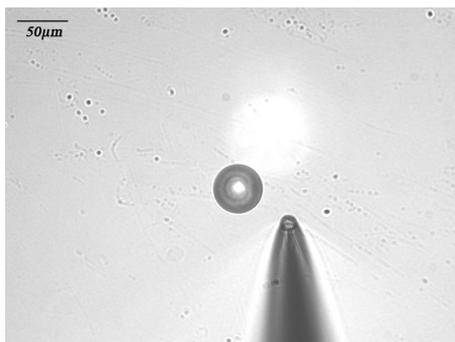
Concernant la taille de la pipette, la situation est assez simple pour des composants de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ . Un orifice de diamètre inférieur à  $\sim 8\mu\text{m}$  ne permettra pas la prise quel que soit la sous-pression utilisée. Selon la notation utilisée au §4.4.2, la limite de taille ( $n = \text{rayon de l'objet} / \text{rayon de l'orifice}$ ) intervient à donc  $n = \sim 6.25$ . Elle s'approche donc des valeurs obtenues du modèle.

Pour des pipettes de diamètre inférieur, il arrive que quelques saisies soient effectivement réussies, probablement dû au fait de l'adhésion à l'interface. Les taux de succès n'ont pas été rigoureusement mesurés pour ces cas-là, mais atteignent difficilement les 20%. Des pipettes au diamètre plus important permettent par contre de prendre les billes très facilement. En s'autorisant plusieurs essais, le taux de succès avoisine ainsi les 100%.

On notera par ailleurs que la présence ou non d'une vibration au niveau de l'actionneur piézoélectrique n'a pas d'effet sur la capacité de prise. Finalement, le contact avec le composant n'a pas été nécessaire dans 78% des cas, alors que les billes ont même été attirées sur des distances allant jusqu'à  $12\mu\text{m}$ . Hormis ces cas particuliers, la saisie s'effectue à une distance de 1 à  $3\mu\text{m}$  entre l'orifice de la pipette et le composant. Ces valeurs concernent des manipulations sur un substrat de verre pour une humidité relative de  $42\% \pm 3\%$ .

Pour la dépose, les manipulations effectuées sans vibration nécessitent des essais successifs pour permettre le transfert vers le substrat. Le positionnement obtenu est aussi nettement influencé dans la direction Y, soit la direction de la pipette. En présence d'une vibration, la dépose intervient au contact, mais sans nécessiter aucun autre mouvement que la mise en contact et le retrait vertical. On notera par contre qu'il est arrivé pour certains sets d'expérimentations, que la bille «tombe» dès l'arrêt du vacuum alors que le contact au substrat n'est pas encore effectué. Le tableau (8.13) donne les résultats de répétabilité de positionnement pour deux configurations se différenciant uniquement par la présence ou non d'une vibration. Le diamètre de la pipette est de  $13\mu\text{m} (\pm 0.2\mu\text{m})$ . Les billes sont positionnés sur un substrat en verre. La présence de la vibration permet une nette amélioration du positionnement. Les valeurs de répétabilités en prise sont sujettes à l'erreur d'alignement de la pipette et du composant, mais elles montrent la faible influence de la vibration sur la saisie.

Le signal d'excitation de l'actionneur piézo-électrique est de 300mV pour une fréquence de 2kHz en signal carré. L'amplitude du signal a été varié au cours des opérations entre 300mV et 1V pour certaines situations où la bille adhérait manifestement trop à la pipette. Notamment dans le cas de pipette de diamètre plus important. L'amplitude du mouvement au niveau de l'actionneur est inférieure à 1nm pour une telle tension ( $d_{33} = 450 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ). L'augmentation de l'amplitude suffit à générer la dépose en cas d'adhésion plus importante. Notons tout de même que l'application d'un signal sinusoïdal n'induit pas un effet aussi visible. L'accélération à l'interface joue donc un rôle important.



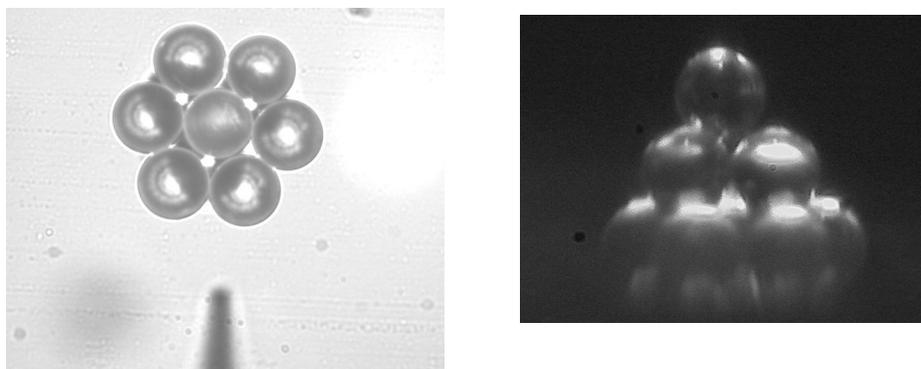
**Figure 8.20 :** Pipette utilisée pour les résultats reportés au tableau (8.13).

TYPE DE DÉPOSE	RÉPÉTABILITÉ DE POSITIONNEMENT			
	PRISE		DEPOSE	
	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]	x [ $\mu\text{m}$ ]	y [ $\mu\text{m}$ ]
Avec vibration	2.83	5.81	1.56	3.19
Sans vibration	2.18	3.77	3.29	16.41

**Tableau 8.13 :** Répétabilité de positionnement d'une bille de  $\text{Ø}50\mu\text{m}$  en polystyrène avec ou sans vibration de la pipette (300mV, 2kHz) sur un substrat en verre.

Ces outils, vu leur géométrie, permettent la meilleure accessibilité de tous les préhenseurs discutés jusqu'ici. L'avantage étant bien sûr la possibilité de mettre côte à côte divers composants ou de « piocher » un composant parmi d'autres. La Fig. 8.21 illustre un tel assemblage. Cet atout est contre-balancé par la fragilité des pipettes en verre qui ne tolèrent ni au montage ni à l'utilisation des contacts trop contraignants.

Finalement un aspect abordé au niveau de la méthodologie concerne l'aspect intuitif de l'utilisation du préhenseur et son emploi aisé (§5.3). Ce préhenseur est certainement le plus simple à utiliser parmi les familles présentées ici. En outre, le fait que la pipette soit en réalité un consommable rend aussi la manipulation moins stressante, ce qui est un atout pour une installation accueillant différents utilisateurs.



**Figure 8.21 :** Opération d'assemblage de 11 billes de  $\text{Ø}50\mu\text{m}$  en polystyrène en forme de pyramide.

## 8.7 SYNTHÈSE

Le choix d'un type de préhenseur fait intervenir des paramètres très variés comme bien entendu ses performances attendues en termes de fiabilité et de positionnement, mais aussi les aspects liés à sa sensibilité aux conditions d'environnement.

Les éléments, tels que la nécessité d'assurer un contact mécanique pour permettre la prise ou la dépose, dictent des spécifications au niveau de l'installation ou des fonctionnalités supplémentaires au niveau du préhenseur. Par exemple, l'utilisation d'un limiteur de force, d'une détection du contact ou d'un capteur de force est nécessaire pour les manipulations basées sur l'adhésion. Au contraire, un préhenseur inertiel (sans considérer l'aspect de prise) ne nécessite a priori pas l'intégration d'un élément de mesure, bien que ce dernier permette de détecter la présence d'un composant [Haliyo03] et peut donc être très utile voire indispensable dans une installation automatisée. Les signaux d'excitation vont par contre nécessiter une infrastructure conséquente pour appliquer un signal de 200V à ~300kHz.

Les aspects géométriques peuvent être fortement contraignants. Les préhenseurs électrostatiques sont en général disposés sur une large surface plane en comparaison de la taille des composants et nécessitent dès lors un soin particulier à la mise en place des opérations.

Finalement les aspects de « confort » de l'utilisateur sont parfois prépondérants, tel que discuté au niveau des préhenseurs vacuum où l'aisance d'utilisation permet un apprentissage et une autonomie rapide de l'utilisateur.

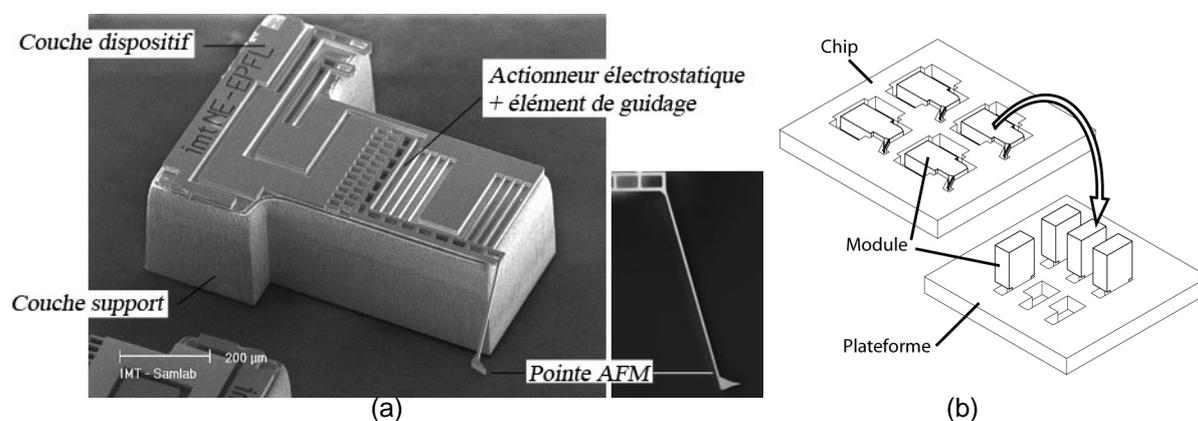


# MICROASSEMBLAGE : SYSTÈME DE MESURE AFM MULTISONDE

Nous décrivons ici une application réelle de microassemblage pour laquelle la méthodologie de conception présentée au chapitre 5 a été utilisée. Au moyen de cette application nous exposons les aspects concernant le référencement mécanique de microcomposants ainsi que la problématique de leur fixation à l'élément récepteur.

Le produit à assembler est un système de mesure AFM multisonde. Il se compose d'une série de modules comprenant chacun une pointe AFM microstructurée ainsi qu'un actionneur permettant de la faire vibrer ou de la déplacer verticalement (Fig. 9.1(a)). Ces modules, après verticalisation, sont assemblés un par un sur une plateforme réceptrice sous la forme d'une matrice bidimensionnelle (Fig. 9.1(b)). Cette plateforme contient également les éléments de connexion électrique.

Le développement de ces composants ainsi que leur assemblage ont été menés au cours du projet *CIMENT* «*Exploratory Nanoscale Systems*». Un brevet a été déposé au terme de ce projet. Les composants ont été conçus à l'*IMT* de Neuchâtel (Prof. U. Staufner, Dr T. Akiyama), alors que le procédé d'assemblage et les préhenseurs ont été développés et réalisés au *LSRO* de l'*EPFL*.



**Figure 9.1 :** (a) Module de mesure AFM de  $630\mu\text{m} \times 750\mu\text{m}$ ; (b) assemblage du système de mesure multisonde : les modules sont verticalisés puis insérés dans la plateforme.

La mise en parallèle de sondes de mesure permet un gain de temps lors du balayage d'une surface ainsi que lors de la caractérisation simultanée de plusieurs échantillons. L'attrait de ce concept réside dans l'intégration de modules de mesure indépendants. L'actionnement de chaque sonde permet au système de s'adapter à la morphologie de la surface ou aux épaisseurs variables de différents échantillons mesurés simultanément.

La construction de ce système est basée sur un concept de briques de type *LEGO*. Chaque module peut être indépendamment monté puis démonté de la plateforme réceptrice. Il est ainsi possible de réparer un système coûteux en changeant un module défectueux. Diverses fonctionnalités sont potentiellement intégrables aux modules : par exemple le traitement local des données par une unité électronique, un autre type de mesure ou encore une modification locale de la surface de l'échantillon. Ce concept de briques rend possible l'utilisation de modules issus de procédés de fabrication non compatibles sur une structure monolithique. Différentes plateformes peuvent être définies notamment dans le but d'adapter la position relative des modules à une tâche spécifique. Dès lors, de nouvelles perspectives apparaissent. A partir de modules fabriqués en grande série, le produit final peut être personnalisé selon les besoins spécifiques du client, réparé, voire ré-adapté en intervertissant des fonctionnalités.

Finalement, la verticalisation des modules a l'avantage d'étendre la surface des dispositifs sans augmentation de la distance entre les modules. Des fonctionnalités de plus en plus complexes peuvent alors être intégrées aux modules sans pour autant modifier la plateforme réceptrice.

Les développements des composants et du procédé d'assemblage ont été menés en parallèle. Une étroite collaboration a permis une réelle interaction entre les éléments à chaque stade de développement.

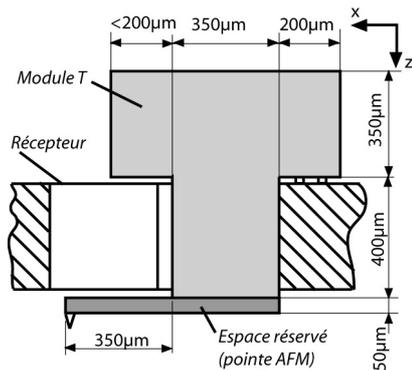
La structure de ce chapitre est la suivante. Les cahiers des charges de l'assemblage puis du préhenseur sont tout d'abord présentés. Le choix du type de préhenseur et du mode opératoire de l'assemblage sont ensuite discutés. La disposition des éléments de référencement mécanique au niveau de la liaison «composant - récepteur» ainsi que la fixation du module ont été expérimentées sur deux versions successives de modules. Nous verrons ensuite de plus près la conception des préhenseurs. Enfin, l'assemblage robotisé du système est démontré.

## 9.1 CAHIER DES CHARGES

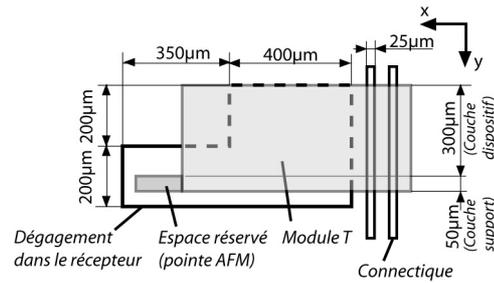
*Il s'agit du **cahier des charges de l'application** (§ 5.1) qui précise les spécifications préliminaires et les buts visés du système à assembler. Il a été établi durant la phase de conception des composants et avant toute interaction entre les différents éléments intervenant en cours d'assemblage.*

Le but est d'assembler une matrice bidimensionnelle de modules de mesure AFM. Ces modules contiennent une pointe microstructurée, un actionneur électrostatique (*comb drive*) ainsi que les éléments nécessaires à leur connexion. Les spécifications en terme d'assemblage des modules et de la plateforme réceptrice sont les suivantes :

- Modules :
  - Fabrication par DRIE à partir d'un wafer SOI de  $\sim 350\mu\text{m}$  d'épaisseur avec une couche dispositif de  $50\mu\text{m}$  et une couche support de  $300\mu\text{m}$ .
  - Géométrie en T d'un encombrement d'environ  $750\mu\text{m} \times 750\mu\text{m}$  sans la pointe AFM elle-même.
  - Le wafer est découpé en chips de  $6 \times 6$  modules.
  - Les modules sont maintenus au chip par des ponts en silicium au niveau de la couche dispositif.
  - L'extrémité de la pointe AFM doit être visuellement accessible depuis le haut une fois l'assemblage effectué.



**Figure 9.2 :** Schéma du module monté sur le récepteur avec les principaux encombrements (vue de face).



**Figure 9.3 :** Schéma d'un emplacement du récepteur avec représentation du module une fois assemblé (vue de dessus).

- La face avant (couche dispositif) est réservée aux fonctionnalités du module et ne peut être utilisée comme zone de préhension.
- Plateforme réceptrice :
  - Surface totale de 10mm x 10mm y compris le réseau des connexions électriques aux différents modules.
  - Emplacement pour 6 x 6 modules.
  - Au moins 2 électrodes de connexion électrique par modules.
  - Répétabilité de positionnement à l'assemblage de chaque module : 5 μm dans le plan (soit en x et y), 1 μm en z.
  - Rotation de 90° ( $\theta_x$ ) des modules avant insertion pour passer du wafer à l'orientation d'insertion).
  - Chaque module de la matrice doit pouvoir être accessible en tout temps.
  - Possibilité de pouvoir extraire un module usagé de la matrice pour l'échanger.
  - Fixation du module sur la plateforme : par un élément élastique (ressort de maintien) disposé au niveau de la plateforme ou du module.

## 9.2 SPÉCIFICATIONS DU PRÉHENSEUR

Les **spécifications du préhenseur** (§ 5.2) sont établies d'après le cahier des charges de l'application. Une première interaction entre les concepteurs des composants et du procédé d'assemblage a permis de déterminer la stratégie de positionnement : la liaison «composant-récepteur» assurera le référencement mécanique.

Le préhenseur devra remplir les conditions suivantes :

- Prise du composant :
  - Accessibilité au composant : la face avant (couche dispositif) ainsi que la zone contenant la pointe AFM sont interdites de tout contact; les côtés du module sont accessibles moyennant un encombrement minimal du préhenseur (limité par la distance inter-composants sur la plateforme réceptrice et la taille des dégagements sur le chip, soit 320 μm (dimension issue du design final)).
  - Force de maintien suffisante pour maintenir le composant en position pendant son détachement du chip; un ou des ponts doivent être cassés.
- Verticalisation du composant :
  - Pas de pertes de référencement durant cette opération.
- Insertion sur la plateforme réceptrice :
  - Maintien rigide en position durant l'insertion et l'ouverture de l'élément ressort assurant la fixation.

- Positionnement final : mise en contact des éléments de référencement mécanique du module et du récepteur.
- Assurer la sécurité des prises et du maintien du composant.
- Connaître en tout temps la position relative «composant - préhenseur» et contrôler l'orientation du composant par son référencement au préhenseur.

### 9.3 PRINCIPE DE PRÉHENSION - STRATÉGIE D'ASSEMBLAGE

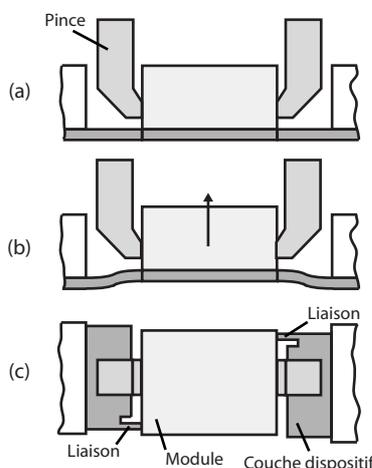
Dans le but de déterminer le **principe de manipulation** (§ 5.3) le mieux adapté à cette application, certains critères de choix sont mis en évidence. Le mode opératoire est finalisé durant cette étape.

La définition du principe de préhension ainsi que de la stratégie de manipulation dépend de trois critères principaux : le référencement mécanique et le maintien du composant tout au long des opérations, la prise avec rupture des liaisons de fixation au chip, et enfin la verticalisation du module. En outre, l'installation d'assemblage de ces composants se base sur celle présentée au chapitre 6 et modifiée en conséquence. Le manipulateur utilisé est le robot Delta<sup>3</sup>, dont on rappelle qu'il comporte des courses de  $\pm 2\text{mm}$  selon les trois degrés de liberté en translation.

#### Référencement mécanique

La liaison «module-récepteur» assure le référencement final du module dans la matrice. Néanmoins et de manière à limiter les corrections d'alignement du module, le préhenseur devrait contenir les éléments de référencement mécanique. Cela permet d'agir sur le composant (prise, transfert) en conservant une orientation connue. Lors de l'insertion, la liaison au préhenseur doit être rigide de manière à insérer le composant tout en actionnant l'ouverture de système élastique de fixation.

#### Prise du module - rupture des liaisons au chip



**Figure 9.4 :** Schéma de la fixation des modules : vue de face (a) avant et (b) pendant la saisie, (c) disposition des liaisons (vue de dessus).

Les modules sont reliés au chip par deux liaisons au niveau de la couche dispositif (Fig. 9.4). La force de préhension doit donc être suffisante pour maintenir le module durant et après la rupture de ces liaisons.

Nous nous restreignons à l'utilisation de mouvements purement perpendiculaires au chip de manière à réduire les risques de collision au niveau de la zone sensible qu'est la pointe AFM.

La force nécessaire à la rupture peut également être induite par le manipulateur en appuyant le préhenseur sur le module au lieu de le retirer comme dans la Fig. 9.4(b). Cette stratégie qui permet a priori de réduire le maintien au préhenseur a été expérimentée avec un préhenseur vacuum. La rupture apparaît effectivement, mais le vacuum ne suffit pas à retenir le composant du fait des forces latérales introduites au moment de la rupture.

L'utilisation d'un préhenseur par capillarité induira le même effet puisque la tenue latérale est faible et qu'une erreur de parallélisme entre les surfaces du module et du préhenseur décroît fortement la force de capillarité.

L'utilisation d'une micropince est donc plus appropriée du fait de la force de serrage importante et contrôlable.

### Verticalisation du module

Le manipulateur utilisé pour cet assemblage est le robot Delta<sup>3</sup> présenté précédemment. Un axe de rotation doit donc être ajouté à l'installation afin d'effectuer la verticalisation du module.

L'intégration de ce degré de liberté supplémentaire au niveau du robot a l'avantage de permettre des corrections d'alignement durant l'insertion du module sur la plateforme. Par contre cette solution occasionne des restrictions en terme d'accessibilité mécanique (encombrement minimal pour éviter les collisions durant l'assemblage et la rotation et en adéquation avec les faibles courses du robot Delta<sup>3</sup>) et optique (au niveau du champ de vision).

Une solution modulaire s'est alors imposée : le transfert du module entre le préhenseur de saisie et un élément de rotation externe et inversement après verticalisation. Cette solution offre une flexibilité accrue en terme d'accessibilité puisque l'élément de rotation peut être dégagé de la zone de travail. Dans ce cas, l'installation finale nécessite deux préhenseurs : un premier pour les opérations de saisie et d'assemblage, un second pour la verticalisation (voire Fig. 9.5). Les transferts occasionnent deux opérations de plus. Ils peuvent par contre être mis à profit pour corriger l'orientation du module avant son insertion : notamment lorsque les forces importantes qui sont engendrées durant l'étape de prise modifient l'orientation du module. Cette correction peut être obtenue en contrôlant l'orientation de l'élément de rotation ou encore par des mouvements relatifs entre les deux pinces afin d'assurer le contact mécanique des éléments de référencement.

Grâce à ces transferts, la tenue du module pendant l'insertion optimise de façon déterminante la distance entre éléments sur la plateforme (Fig. 9.5(7)). Toutes les positions de la matrices sont également parfaitement accessibles en tout temps.

#### 9.3.1 MODE OPÉRATOIRE

La manipulation de ces composants a été réalisée à l'aide de deux micropinces dont les embouts sont taillés en concordance avec le design des éléments afin d'assurer l'alignement du composant dans la pince. L'assemblage d'un module de mesure AFM sur la plateforme est établi de la manière suivante, illustrée à la Fig. 9.5 :

1. Prendre le composant par l'arrière dans le chip
2. Briser les liaisons et l'extraire du chip
3. Transférer le composant au second préhenseur
4. Effectuer la rotation de 90° (verticalisation du module)
5. Transférer le composant au premier préhenseur
6. Positionner le module au-dessus de la plateforme
7. L'insérer dans la plateforme et le plaquer contre les éléments de référencement mécanique.

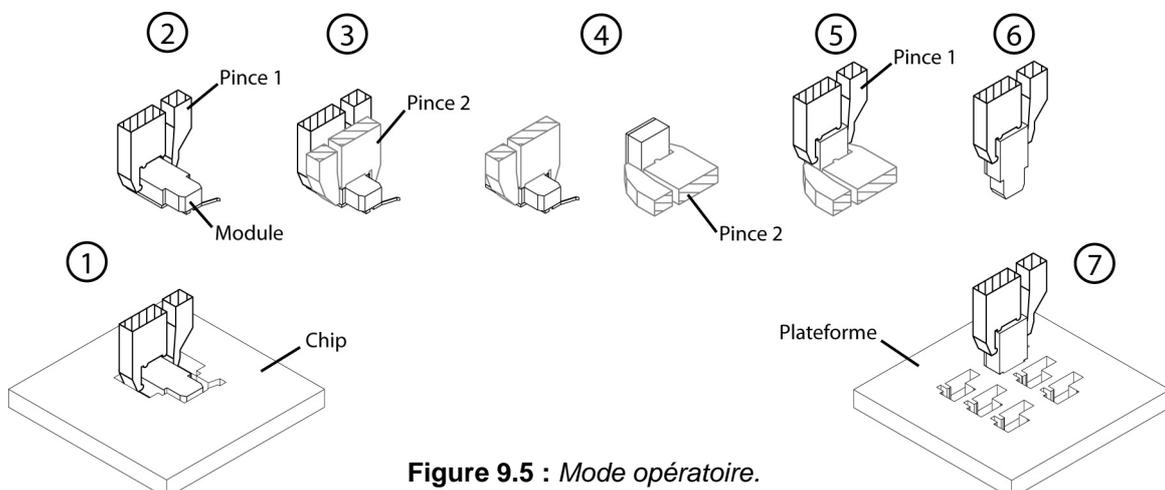
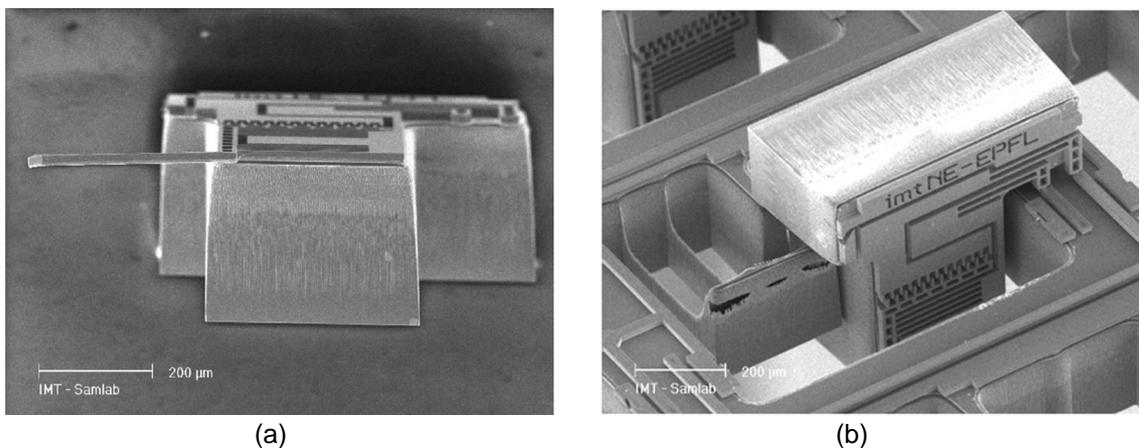


Figure 9.5 : Mode opératoire.

## 9.4 INTERACTION «PRÉHENSEUR - COMPOSANT - RÉCEPTEUR»

Cette étape d'interaction entre le développement des composants à assembler et celui des outils d'assemblage permet d'adapter efficacement les besoins des uns aux spécifications des autres. Dans le processus décrit ici, cette opération a été effectuée deux fois durant la phase de validation : deux versions de modules et de plateformes ont été réalisées et assemblées. Cette interaction concerne principalement les éléments de référencement et de fixation du module sur la plateforme de réception ainsi que la géométrie et la taille des modules qui vont permettre de déterminer les organes terminaux des pinces.

La fabrication de la première version de composants a permis de mettre en évidence l'influence de la sous-gravure. Il en résulte un angle de fabrication au niveau des flans des modules et des encoches de la plateforme de réception. Cet aspect limite aussi la taille minimale des éléments. Les structures trop fines disposées sur la couche support, comme des éléments ressorts, sont tronquées.



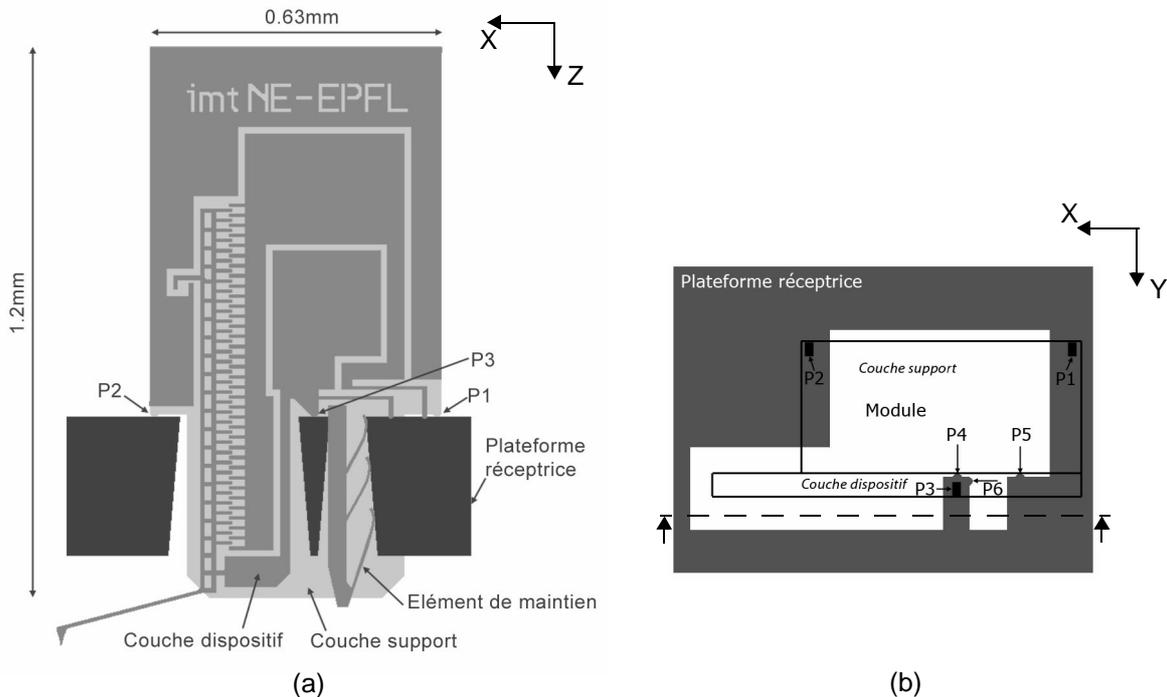
**Figure 9.6 :** (a) Vue des flans d'un module avec l'angle dû à la sous-gravure; (b) Module inséré dans un logement de la plateforme avec l'élément élastique de maintien (tronqué) (images T. Akiyama IMT).

Des éléments de référencement mécanique ont été intégrés aux modules et à la plateforme réceptrice dans le but d'assurer la répétabilité de l'assemblage. La disposition des zones de référencement mécanique est directement influencée par la qualité et la planéité des surfaces. Dans cette première version, l'orientation du module est définie par ses flans. Le module sera donc forcément incliné une fois assemblé.

Pour la seconde version, la surface du récepteur est utilisée comme plan de référence. Elle définit donc la position verticale ( $Z$ ) ainsi que les orientations  $\theta_X$  et  $\theta_Y$  du module. Les dimensions nominales du module sont identiques sur les deux couches, ce qui permet un appui à l'avant et à l'arrière du module en s'affranchissant de la sous-gravure. Dans ce cas, cette dernière est même avantageuse puisqu'elle permet de définir deux zones de contact distinctes entre l'avant (couche dispositif, point P3 Fig. 9.7) et l'arrière du module (couche support, points P1 et P2). L'orientation sera dépendante de l'alignement des masques durant le procédé de fabrication. La couche dispositif du module est utilisée comme surface de référence pour le positionnement selon  $X$ ,  $Y$  et  $\theta_Z$  (points P4, P5, P6 Fig. 9.7(b)). La position finale de la pointe AFM ne dépend ainsi pas de l'épaisseur de la couche support, ni de sa variation, ce qui permet d'assembler des modules provenant de différents wafers.

Dans la première version, le système de fixation est placé au niveau du récepteur (Fig. 9.6(b)). Pour la seconde version, les structures fines sont cette fois intégrées uniquement à la couche dispositif. Le système de fixation a donc été intégré au module. L'avantage est de permettre ainsi le démontage d'un module, puis surtout son remplacement, indépendamment de l'état du système de fixation. La plateforme

a donc une durée de vie plus longue que les modules. En outre, la plateforme de réception ne contient pas de couche dispositif sur laquelle on pourrait concevoir des éléments élastiques, sa surface étant occupée par le réseau des lignes de connexions des modules. Finalement, l'intégration de ce système à la plateforme déterminerait, et augmenterait de manière considérable, la distance entre les modules.



**Figure 9.7 :** *Seconde version des modules T et de la plateforme avec disposition des éléments de référence (P1 à P6) : (a) vue de face (b) vue de dessus.*

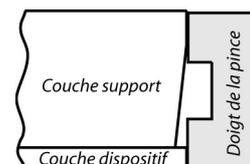
## 9.5 CONCEPTION DES MICROPINCES

Ces pinces sont développées dans le but de valider la faisabilité du procédé d'assemblage. Il s'agit donc de **démonstrateurs de principe** (§ 5.4) qui vont permettre d'évaluer les opérations et les stratégies.

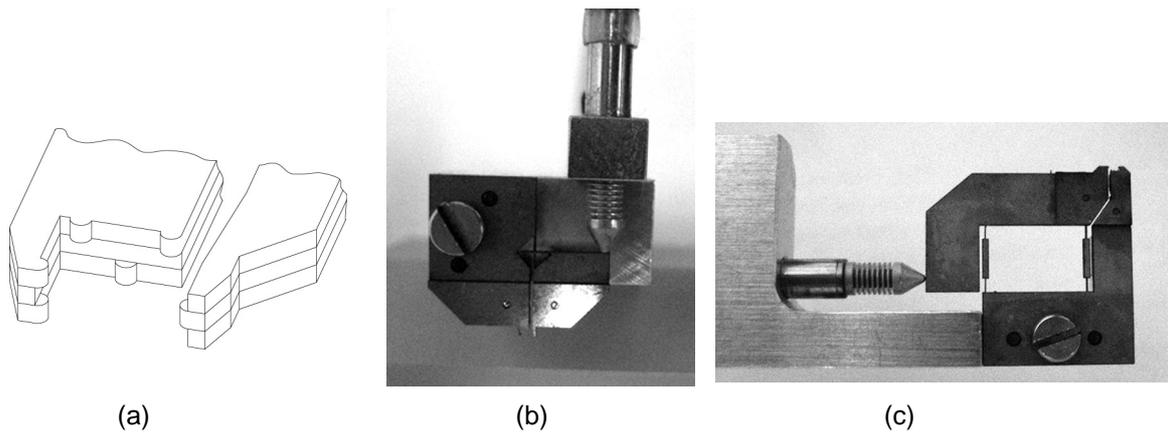
Deux micropinces à actionnement pneumatique ont été conçues et intégrées à la station d'assemblage. Une force de serrage importante (400mN) étant nécessaire, les actionneurs pneumatiques sont tout à fait adaptés à ce genre de besoin, d'autant que leur compacité est clairement profitable. Ils permettent aussi de développer une structure de guidage indépendante de l'actionneur. Celui-ci vient ensuite simplement s'appuyer sur la partie mobile pour assurer la fermeture autant que la force de serrage.

Les préhenseurs sont découpés au laser. La structure de base, sur laquelle vient s'appuyer l'actionneur, contient l'articulation élastique et supporte les organes terminaux. Ces derniers sont formés par une structure en sandwich de trois couches d'acier inoxydable (0.1mm d'épaisseur). Ils délimitent les zones de contact permettant de déterminer le référencement mécanique du module (Fig. 9.9(a)).

L'épaisseur totale de 0.3mm permet de prendre appuis simultanément sur la couche dispositif et sur l'arrière de la couche support du module (Fig. 9.8). Le choix des articulations, leur disposition, ainsi que celle de l'actionneur sont déterminés par les contraintes d'encombrement lors du premier transfert du module. Durant cette étape (voire Fig. 9.5(3)), les deux préhenseurs sont parallèles et distants de 100µm. La forme générale des doigts est imposée par les zones d'accès disponibles pour le préhenseur d'assemblage (pince 1 Fig. 9.5), soit les dégagements dans le chip de départ et la distance inter-module sur la plateforme (Fig. 9.12(a) et (g)).



**Figure 9.8 :** *Appuis sur la tranche du module.*



**Figure 9.9 :** (a) Disposition des zones de contact du préhenseur permettant de définir le référencement mécanique du module, (b) préhenseur d'assemblage : l'articulation est un pivot à lames croisées non séparées, (c) préhenseur de verticalisation : le doigt mobile est guidé par des lames parallèles.

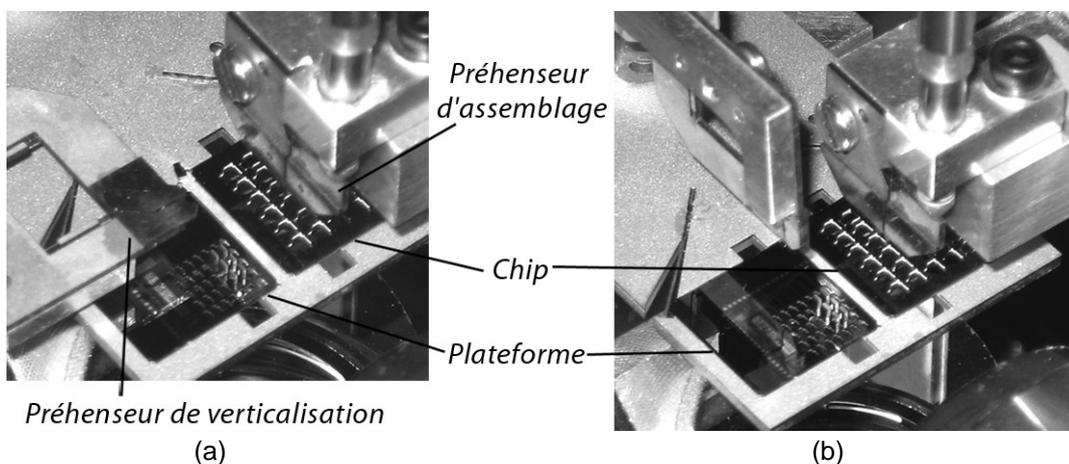
## 9.6 OPÉRATIONS D'ASSEMBLAGE

Cette étape permet d'expérimenter la **faisabilité** du procédé d'assemblage (§ 5.5). L'analyse des résultats et des observations va permettre de proposer des améliorations au niveau des préhenseurs et des composants en vue de l'étape de conception finale (§ 5.6).

### 9.6.1 INSTALLATION DE MICROASSEMBLAGE

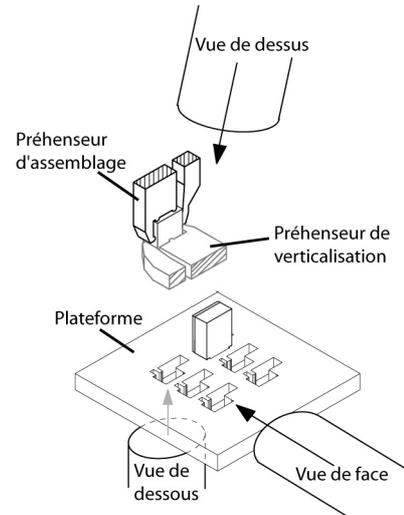
L'installation d'assemblage est basée sur celle présentée au chapitre 6. Le chip et la plateforme sont placés sur une table XY afin de positionner chaque logement et module dans le volume de travail du robot Delta<sup>3</sup>. L'installation est complétée par les systèmes suivants :

- un système de verticalisation : ce degré de liberté supplémentaire en rotation est réalisé au moyen d'un axe motorisé (moteur *Maxon A-max12*) supportant le préhenseur de verticalisation et entraîné entre deux butées ajustables. Le déport de la structure permet de positionner l'axe de rotation au niveau du composant à réorienter afin de réduire les risques de collision durant la verticalisation et de limiter le déplacement nécessaire pour reprendre le module après verticalisation (soit la distance entre les positions avant et après verticalisation) (Fig. 9.10).



**Figure 9.10 :** Les préhenseurs d'assemblage et de verticalisation (a) à l'horizontal et (b) à la vertical.

- un champ de vision supplémentaire : la supervision des opérations nécessite en effet trois angles de vision. Leur disposition est illustrée à la Fig. 9.11, soit :
  - une vue de face : elle donne l'information de la position verticale et est utilisée durant toutes les opérations de prise, transfert et insertion. Une caméra Lumenera (*Lu175*, 1280 × 1024 pixels, 1/2") est munie d'une optique permettant un agrandissement de 3x à 28x (*video zoom lens Marcel Aubert*).
  - une vue de dessous : elle est utilisée durant le positionnement puis l'insertion du module dans la plateforme. Il s'agit d'une caméra Sony *XCD-X710*, 1024 × 768 pixels, 1/3", avec un agrandissement de 10x (*InfiniTube In-line* et objectif *Mitutoyo MPlan Apo*), soit un champ de vision de 476×357µm<sup>2</sup>.
  - une vue de dessus : cette vue supplémentaire permet de détecter la position du module et des encoches de prise sur le chip. Elle est aussi utilisée lors du second transfert ainsi que pour le positionnement grossier sur la plateforme. L'optique est inclinée de 7° par rapport à la verticale pour permettre de distinguer les doigts de la pince d'assemblage (caméra *Philips ToUcam*, 640×480 pixels, 1/3", et un agrandissement de 0.5x à 3.4x).

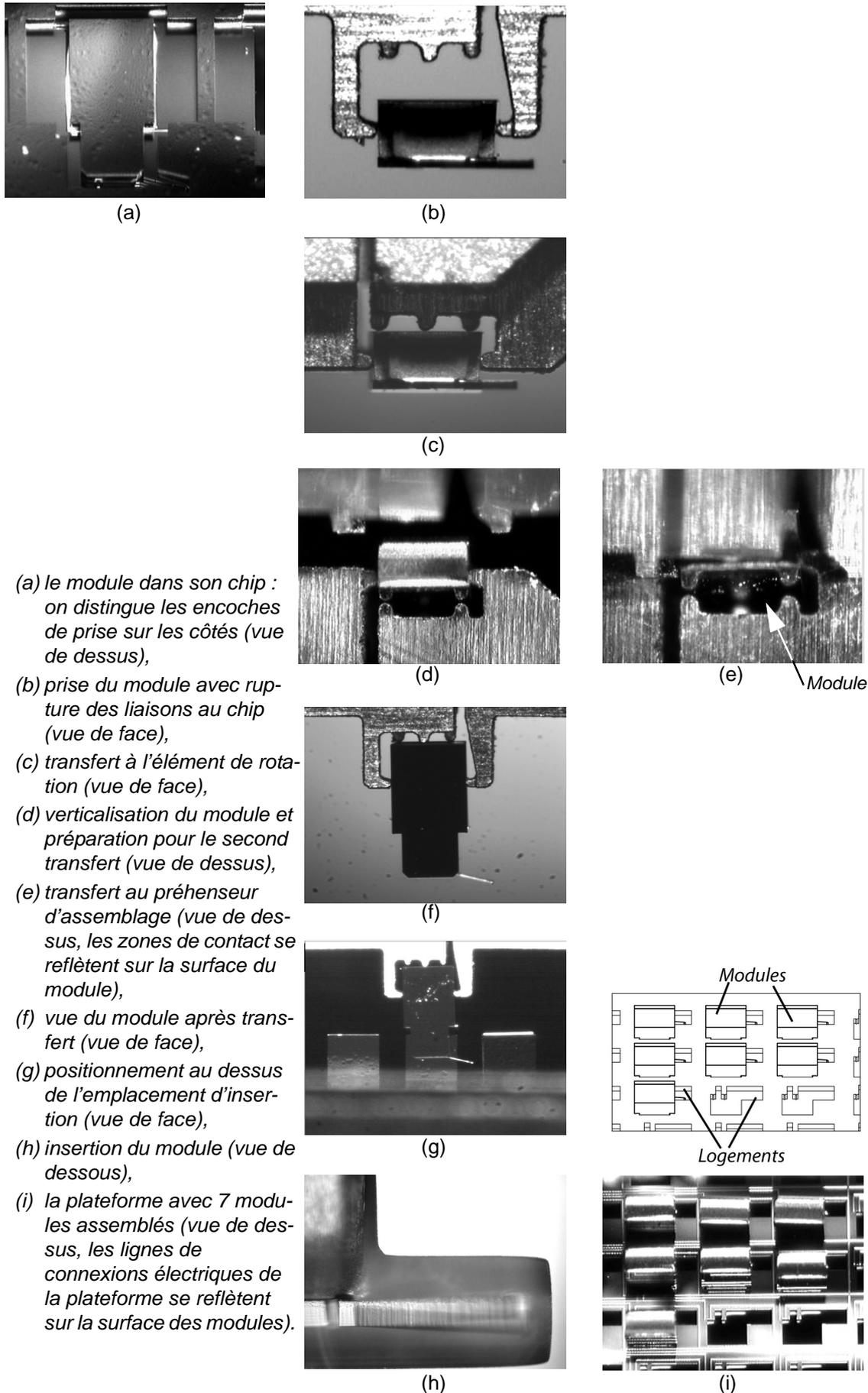


**Figure 9.11 :** Installation d'assemblage et orientations des optiques.

### 9.6.2 DESCRIPTION DES OPÉRATIONS

Les illustrations de la Fig. 9.12 présentent les étapes de manipulation de la saisie du module dans le chip à son assemblage sur la plateforme. Les opérations d'assemblage ont eu lieu à une température de 23±0.5°C et 30±3% d'humidité relative. Elles se déroulent de la manière suivante :

- Les dégagements autour du module à saisir sont détectés. Le préhenseur se positionne de manière à saisir le module à son extrémité. Cette disposition permettra par la suite de transférer le module au second préhenseur.
- Le module est retiré du chip par un mouvement vertical permettant de sécuriser la zone sensible de la pointe AFM. Les dégagements n'étant pas traversants, le préhenseur n'utilise pas toute l'épaisseur du module lors de cette étape. La saisie se fait à mi-hauteur.
- Le module est transféré au préhenseur de verticalisation. Une correction de l'orientation du module est obtenue si besoin par des mouvements relatifs entre les deux pinces pour appuyer les trois points de référence sur le dos du module.
- La rotation de 90° est effectuée.
- Le second transfert a lieu. La prise de référence est alors donnée par la couche dispositif du module.
- Le module est alors prêt à être inséré.
- La phase d'approche de la plateforme puis l'alignement grossier du module avec son logement final sont effectués à l'aide des vues de face et de dessous.
- Le positionnement fin et l'insertion sont supervisés au moyen de la vue de dessous. Une fois la position finale atteinte (mise en butée du module), la pince est ouverte puis retirée verticalement. L'élément ressort placé au niveau du module assure le maintien au récepteur.
- L'assemblage est effectué.



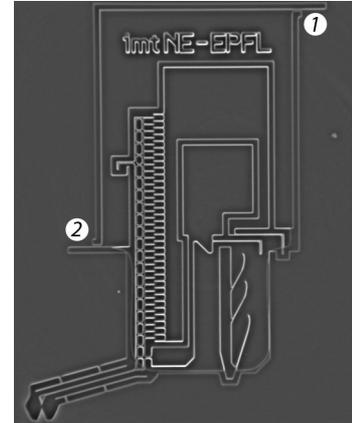
**Figure 9.12 :** Assemblage robotisé d'une matrice de modules de mesure AFM (a-i).

### 9.6.3 ANALYSE DES OPÉRATIONS

L'assemblage robotisé de ces composants de mesures AFM a été démontré avec succès. 21 modules ont ainsi été assemblés correctement. Durant les opérations, aucune perte de modules, ni de dommage aux pointes AFM n'a été déploré. Tout contact mécanique avec les zones sensibles des modules a été évité, ce qui donne effectivement un intérêt majeur aux opérations robotisées.

La stratégie visant à laisser quelques liaisons sur le chip pour y retenir les composants offre le grand avantage de fournir une «palettisation» automatique garantissant la position des composants.

Lors de la prise, le préhenseur a été positionné au plus proche de l'extrémité du module afin de permettre ensuite le transfert à la seconde pince. Les liaisons retenant le module au chip sont réparties de part et d'autre du corps du module. Elles ne sont ainsi pas alignées avec les doigts de la pince. Il en résulte que la liaison 1 (Fig. 9.13), plus proche du préhenseur, se rompt en premier. La liaison 2 est ensuite contrainte en torsion, la force de serrage n'étant pas suffisante pour empêcher la rotation du module. En effet, la pince utilisée ne bloque pas ce degré de liberté durant la saisie. Une disposition symétrique des liaisons par rapport au préhenseur pourrait aussi optimiser la prise en terme de positionnement.



**Figure 9.13 :** Vue du côté dispositif d'un module fixé au chip.

Cette inclinaison peut néanmoins être compensée durant les opérations de transfert par des mouvements relatifs entre les deux pinces qui permettent de réorienter le module par rapport aux éléments de référencement. Cette correction peut aussi être obtenue en adaptant l'orientation du préhenseur de verticalisation après avoir mesuré l'erreur d'inclinaison à compenser.

Le référencement de l'assemblage est donné par l'interaction «module - plateforme». La mise en butée dans chaque direction de l'espace doit être assurée par le manipulateur, alors que l'élément ressort sert à maintenir ensuite la position. L'optimum en terme de référencement mécanique au récepteur consiste à intégrer un élément de maintien contraignant toutes les directions référencées simultanément<sup>1</sup>. Dans le cas présent, l'élément ressort agit dans une seule direction. Le manipulateur doit donc assurer le contact dans les autres directions puis effectuer la dépose sans perturber cette position. Cependant, durant la dépose, la détente de l'élément élastique produit un déplacement vertical. De ce fait, le module ne peut être positionné en butée selon l'axe vertical. Il y a donc perte du référencement dû à l'influence de la fixation.

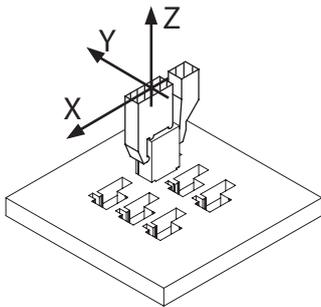
Concernant le retrait du préhenseur, la disposition des zones de contact «préhenseur - composant» conditionne la direction du mouvement comme il en a été discuté au chapitre 4 (§ 4.3.2). La disposition des contacts et de la force de maintien au niveau du substrat introduit également des directions préférentielles. La répétabilité du positionnement est déterminée par les éléments de référencement au niveau du récepteur. Pour en bénéficier, il est nécessaire d'assurer la mise en butée, puis de ne pas gêner la fixation lors du retrait<sup>2</sup>. La direction du retrait devrait donc pousser le composant en butée, idéalement dans la même direction que la force de maintien. Cette problématique est réellement importante dans le cas où l'élément de fixation génère une force inférieure aux contraintes (forces et moments) apparaissant durant le retrait comme c'est le cas ici avec un ressort de fixation.

Durant l'assemblage de ces modules AFM, les tentatives de retraits latéraux (en X, Fig. 9.14) et tangents (en Y) n'ont jamais permis de déposer le composant correctement. Les retraits verticaux ont par contre

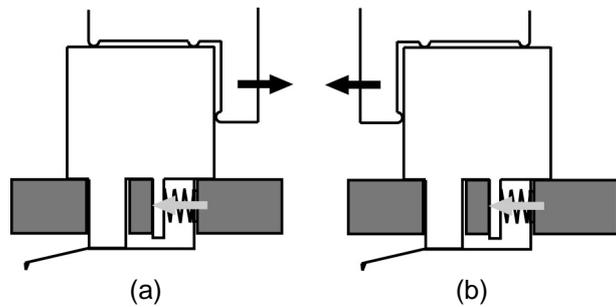
1. Ce principe correspond par exemple à l'interaction de trois appuis sphériques dans deux rainures perpendiculaires en forme de V et une force de maintien normale, tel qu'utilisé notamment pour la fixation des préhenseurs au manipulateur dans notre installation (Fig. 6.4).
2. Dans la configuration présentée ici, la fixation perturbe elle-même le positionnement. Il n'y a donc pas de solution robotique à ce problème, si ce n'est par l'ajout d'un autre moyen de fixation, par exemple une colle.

permis la dépose dans tous les cas. Le cas du retrait tangent (en Y) se comprend aisément. Le ressort ne contraint pas cette direction. Seules les deux butées sur le récepteur vont retenir le composant. Le cas du retrait latéral est plus intéressant et pourrait devenir le retrait préférentiel aux deux conditions suivantes (Fig. 9.15) :

1. modifier le ressort de fixation pour éliminer la détente verticale et si possible augmenter la contrainte,
2. réorienter la micropinçe de manière à obtenir un retrait dans la direction de butée et simultanément dans celle de la force de maintien.

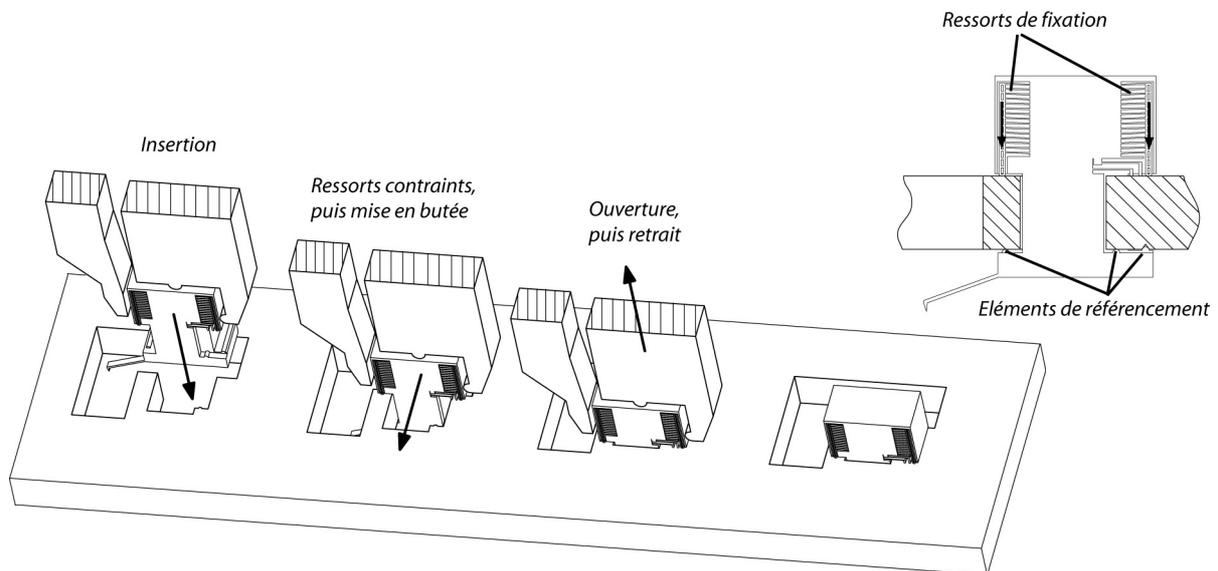


**Figure 9.14 :** Directions de retrait : X : latéral, Y : tangent, Z : vertical.



**Figure 9.15 :** Disposition du doigt fixe (a) actuelle, (b) inversée.

La direction de retrait optimale dépend donc des résistances dues à l'adhésion et au frottement, ainsi que de la force de maintien (direction et amplitude) et de la disposition des contacts mécaniques. La Fig. 9.16 illustre une configuration de liaison composant-récepteur maintenue par deux systèmes ressorts identiques au niveau du composant. Le retrait vertical vient ainsi pousser le composant dans ses butées.



**Figure 9.16 :** Proposition d'un design de référencement mécanique au niveau de la liaison composant-récepteur. Les position en x et y peuvent être contrôlées par butée au niveau du récepteur (par exemple en disposant une rainure en surface du récepteur (face inférieure)), sinon par le biais du préhenseur-manipulateur avec contact sur les parois du logement. La force de maintien est verticale et les forces durant le retrait du préhenseur favorisent la mise en butée du composant sans perturber la fixation.

Finalement, le positionnement absolu va dépendre des tolérances et de la qualité de fabrication des composants ainsi que celles concernant la fabrication et l'assemblage du préhenseur. La conception des modules, dans la seconde version, a permis de prendre en compte ces influences (phénomène de sous-

gravure ou parois rétrogrades). Il en va de même au niveau de l'optimisation du préhenseur, notamment en concevant une structure monolithique des organes terminaux pour s'affranchir de toute erreur d'assemblage.

## 9.7 CONCLUSION

Un système de mesure AFM multisonde a été présenté dans ce chapitre. Les fonctionnalités telles que la possibilité de montage/démontage et l'accessibilité à tout composant de l'ensemble ont été rendues possibles par les moyens d'assemblage développés. Le positionnement final est déterminé par les composants eux-même par référencement mécanique. Celui-ci est obtenu par la mise en butée opérée par le manipulateur. L'assemblage dépend ainsi de la conception de l'installation (préhenseur inclus), mais surtout de la conception des composants et de leur récepteur. Une collaboration étroite entre les différents intervenants est donc indispensable.

Cette application a permis de mettre en pratique la méthodologie proposée et d'en vérifier avantageusement l'efficacité. La faisabilité a été démontrée. Quelques itérations sont maintenant nécessaires pour atteindre les spécifications demandées, notamment en terme de répétabilité de positionnement. Sur la base des observations effectuées durant l'étape de validation, la phase de conception finale peut débiter. Pour autant, la nécessité d'un développement interactif entre les préhenseurs et le système à assembler reste de mise.

Pour l'application mentionnée, la limitation des forces en cours d'assemblage, par leur mesure (soit un contrôle en force plutôt qu'en position) ou par un système compliant, eut permis de contrôler plus finement la mise en butée des composants. Au niveau du développement des préhenseurs, une fois l'ensemble «composant-récepteur» défini, il faut souligner l'importance d'une analyse des forces aux interfaces intégrant la disposition finale des contacts mécaniques et des éléments de maintien. La configuration de l'interface «composant-préhenseur» peut alors être optimisée ainsi que la stratégie de retrait.

L'assemblage robotisé de ces composants a été démontré avec succès. Un axe motorisé externe a été intégré à l'installation pour assurer la verticalisation des modules. Ces derniers sont ainsi transférés d'une pince d'assemblage à une pince de verticalisation, puis inversement. Cette stratégie, n'impliquant que deux opérations supplémentaires, est parfaitement adaptée à l'assemblage d'une matrice de composants. En effet, la disposition optimale du préhenseur a permis l'assemblage réussi de tous les modules sur leur plateforme.



Ce travail a exploré le domaine de la manipulation de microcomposants par le biais de l'étude des forces d'adhésion aux interfaces puis par la modélisation du comportement du microcomposant durant les opérations de prise et de dépose. Un paramètre adimensionnel  $\Gamma$  a alors été introduit. Il représente le carré du rapport entre les forces d'adhésion agissant aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat», permettant ainsi de qualifier les opérations de prise et de dépose en fonction des configurations et des principes de micromanipulation.

Une installation modulaire de micromanipulation a été conçue et développée ainsi que plusieurs familles de micropréhenseurs permettant de ce fait l'expérimentation de principes de prise et de dépose diversifiés. La caractérisation de ces outils nécessite des mesures de fiabilité de prise-dépose ainsi que des mesures de répétabilité de positionnement et concerne des composants de 50 $\mu$ m.

Une méthodologie de conception de préhenseurs adaptés à l'assemblage de microcomposants a été proposée. Sa force est l'intégration de la problématique des effets d'adhésion dans la démarche de conception. Elle prône en outre une interaction anticipée, puis un développement concerté de l'ensemble «composant - récepteur - préhenseur». Cette démarche encourage également le concepteur à analyser un éventail de principes de prise et de dépose et leurs combinaisons, puis à effectuer rapidement dans le temps de développement une faisabilité expérimentale. Cette méthodologie a entre autre été utilisée durant le développement d'un système de mesure AFM multisonde. Grâce à une étroite interaction entre concepteurs du systèmes composants-récepteurs et ceux du procédé d'assemblage qui a débuté tôt dans le processus de développement, des structures tridimensionnelles référencées mécaniquement ont été obtenues. L'assemblage robotisé de ces composants a été démontré avec succès.

## 10.1 CONTRIBUTIONS

Les contributions de ce travail sont les suivantes :

- Synthèse des connaissances au niveau des effets d'adhésion concernant plus spécifiquement les opérations de micromanipulation. Dédiée aux ingénieurs impliqués dans l'assemblage de microcomposants, elle permet une approche rapide, mais détaillée, des phénomènes d'adhésion au contact, de leurs contributions et de leurs sensibilités.

- Introduction d'un paramètre adimensionnel  $\Gamma$  représentant le rapport des forces d'adhésion aux interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat». Il permet de comparer les configurations «préhenseur - composant - substrat» au niveau des différents principes de manipulation.
- Modélisation du comportement d'un micro-objet lors de son transfert entre deux surfaces. Evaluation des conditions de prise et de dépose fiables en fonction du mouvement de retrait du préhenseur et du rapport  $\Gamma$ . La présence d'une force supplémentaire agissant sur le composant (force inertiel) ou à l'une de ces interfaces (capillarité, sous-pression) est prise en compte et permet de généraliser la modélisation des principes de micromanipulation.
- Méthodologie de conception : elle met en évidence l'attention particulière et anticipée qui doit être portée au développement conjoint du préhenseur et des composants à assembler. Cette attention concerne notamment les caractéristiques des interfaces «objet - préhenseur» et «objet - substrat», dont vont d'ailleurs dépendre les effets d'adhésion, ainsi que la définition et la disposition des éléments de référencement mécanique. Cette démarche soutient l'importance des tests de faisabilité sur la base de démonstrateurs de principe. Cette étape permet d'ouvrir le champ des principes utilisables et de leurs combinaisons ainsi que d'évaluer expérimentalement l'influence des effets d'adhésion sur les opérations.
- Conception et développement d'une installation de micromanipulation modulaire permettant l'utilisation de différents préhenseurs. La caractérisation des opérations de prise et de dépose de microcomposants peut se faire sous des conditions d'environnement variables et contrôlables et sur la base de mesures de position optiques. Une interface standardisée permet l'utilisation de différents préhenseurs. Couplée à un changeur d'outils à la cinématique originale et efficace, ils offrent la possibilité d'utiliser plusieurs outils et d'en changer de manière automatique sans intervention de l'opérateur au niveau de l'espace de manipulation et sans modification des conditions d'environnement.
- Développement de plusieurs familles de préhenseurs faisant intervenir des principes variés de micromanipulation. Ils sont adaptés à des composants de 50 $\mu$ m. Dans ce cadre démonstration d'un procédé de micro-électroérosion permettant l'usinage *in situ* des surfaces de préhension (typiquement la correction de l'alignement et le façonnage des doigts d'une micropince).
- Opérations de micromanipulations avec des composants de 50 $\mu$ m. Etude de la fiabilité des opérations et mesures de répétabilité de positionnement.
- Microassemblage robotisé de matrices de composants MEMS permettant l'obtention de structures tridimensionnelles référencées mécaniquement.

## 10.2 PERSPECTIVES

Les perspectives sont présentées selon les trois domaines principaux que sont la modélisation du comportement d'un microcomposant au cours des opérations de prise et de dépose, le développement de principes de préhension et la caractérisation des préhenseurs.

### 10.2.1 AU NIVEAU DE LA MODÉLISATION

Les modèles établis durant ce travail de thèse sont des modèles statiques. Ils se basent en outre sur les forces d'adhésion au contact, c'est-à-dire indépendamment des distances entre surfaces, même si ces paramètres sont intégrés au paramètre  $\Gamma$ .

- Le retrait du préhenseur a été considéré de manière statique et donc modélisé par un vecteur force. Il serait intéressant d'étudier l'**effet de la dynamique du retrait** sur le comportement aux interfaces. [Rollot99], puis [Haliyo02] ont notamment proposé des modèles incluant le profil de

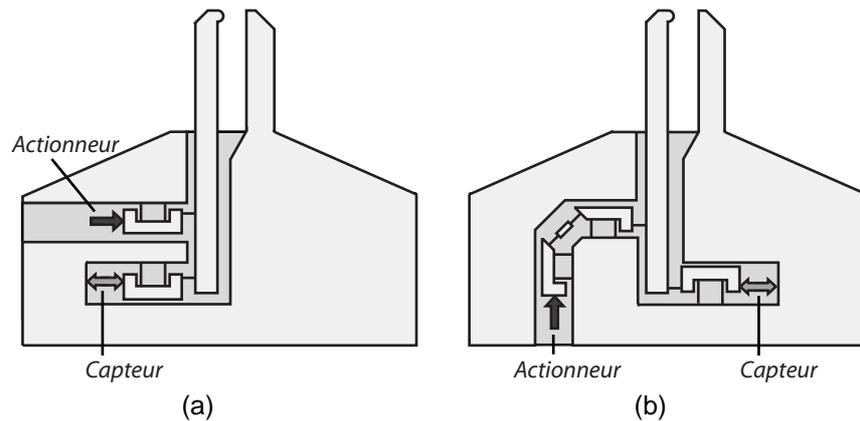
vitesse du manipulateur. Les critères de prise/dépose ont alors été spécifiés en tenant compte de la distance de séparation entre les surfaces. Concernant les forces d'adhésion, les modèles se basaient sur les expressions analytiques des forces de van der Waals en fonction de cette distance et pour des géométries simples. La modélisation des forces de capillarité proposée par [Lambert04] inclut aussi ce paramètre de distance entre les surfaces.

- Au niveau du frottement, qu'en est-il des coefficients une fois le glissement engendré ? Nous avons considéré une valeur constante des **coefficients de frottement** dans les modèles, bien que dans le macro-monde le coefficient de frottement dynamique soit inférieur au coefficient statique. De plus qu'en est-il de l'évaluation des coefficients de frottement ? Les valeurs d'une configuration à l'échelle macro ne sont pas forcément identiques à celles du micromonde. Ces dernières seront aussi influencées par l'environnement (notamment par la présence d'une couche d'eau jouant le rôle de lubrifiant) [Gnecco00, Sang01]. Des mesures de friction sont effectuées par AFM, reste à les extrapoler aux conditions de micromanipulation.
- Il en va de même au niveau de la connaissance des valeurs de **résistance au roulement**. Cet aspect est par contre certainement moins important que le frottement, du fait que, pour la plupart des composants, leur géométrie s'oppose à ce mode de mouvement.
- Dans le cas où il y a **plusieurs zones de contact**, seules les directions principales de retrait ont été étudiées. L'étude pourrait donc être adaptée aux orientations intermédiaires en fonction de la disposition, du nombre, voire de la qualité des points de contact.
- Pour valider ces modèles selon les différents paramètres pris en compte et notamment les orientations de retrait et de contact, il serait nécessaire d'effectuer des **mesures de force**. Qualifier  $\Gamma$  plus finement, puis le quantifier, permettrait aussi une meilleure utilisation des tendances modélisées. Dans ce but, il serait intéressant de mesurer les forces d'adhésion en situation multicontact, voire pour certains composants types.

### 10.2.2 VARIANTES DE PRÉHENSEURS

A partir des préhenseurs proposés et expérimentés dans ce travail, il serait intéressant de poursuivre certains développements :

- **Au niveau des pinces** : la micropince «idéale» combinerait les qualités du silicium (ou simplement des procédés lithographiques) pour obtenir des doigts d'excellente qualité de surface, avec une structure amovible mais monolithique sur laquelle viendrait se fixer l'actionneur. Les problèmes d'alignement des doigts sont ainsi en grande partie résolus. Il serait en outre très avantageux de concevoir la structure de sorte que les organes terminaux soient de la taille des composants à manipuler alors que la structure en elle-même serait plus épaisse pour garantir la rigidité. Le préhenseur peut ainsi s'adapter aux composants indépendamment de la partie actionneur. La structure des doigts peut aussi, suivant les applications, intégrer une compliance permettant la limitation de la force de serrage, mais plus certainement encore la mesure de cette force (Fig. 10.1).
- **Préhenseur à vaporisation explosive** : cet aspect, modélisé au §4.5.2, n'a pas été expérimenté. Néanmoins il serait intéressant d'en tester la faisabilité. Cet effet explosif permettrait d'éliminer le ménisque (ou en partie) à l'interface et en plus de générer une surpression localisée.
- **Préhenseur électrostatique et inertiel** : déjà discuté au chapitre 8, cette combinaison permettrait de développer un outil de transfert, pouvant s'affranchir d'un contrôle en force du fait des interactions à distance, donc ne nécessitant pas de contact mécanique effectif à l'approche.



**Figure 10.1 :** Schémas de pinces intégrant les éléments de guidage nécessaires à l'actionnement et la mesure de la force de serrage au niveau du doigt mobile. La direction d'actionnement varie entre les schémas (a) et (b). Les éléments d'actionnement et de mesure peuvent soit être intégrés à la structure, soit en être indépendant ce qui permet par ailleurs de réduire les problèmes de connectique lors du remplacement de la structure articulée.

- Les éléments présentés en tant que préhenseurs peuvent également être disposés au niveau du **substrat**. Notamment une condensation locale au niveau du substrat, si possible à un endroit prédéfini, favoriserait la dépose.
- Les aspects de **vibration** pourraient être investigués au niveau des pinces. Quelques expérimentations préliminaires ont effectivement montré une dépose plus aisée, mais la vibration ayant été appliquée à tout le préhenseur, le positionnement des composants en était clairement perturbé.

### 10.2.3 CARACTÉRISATION

Notre démarche a d'abord consisté en une première optimisation des paramètres, puis aux mesures des taux de réussite et de positionnement pour cette configuration donnée. Cette étude devrait être complétée par les aspects suivants :

- La présence de **charges électrostatiques** est un problème récurrent en micromanipulation. Il serait dès lors intéressant d'étudier l'influence réelle des ionisateurs du marché sur des composants microscopiques.
- La **dynamique** du manipulateur n'a pas été investiguée, il serait maintenant nécessaire d'effectuer des tests selon les vitesses de retrait pour en déterminer l'influence. Ces mesures donneraient notamment une base utile au développement des modèles incluant la dynamique.
- Finalement, cette étude a été restreinte au cas d'objets sphériques. L'expérimentation de ces mêmes préhenseurs avec des **composants prismatiques** consisterait en l'étape suivante.

## 10.3 NOTE FINALE

L'objectif principal de ce travail de thèse est de proposer une méthodologie de conception de préhenseurs adaptés à l'assemblage de microcomposants et intégrant la problématique des forces de surface.

Le concepteur d'une installation de micromanipulation trouvera dans cette étude une synthèse lui permettant d'acquérir les bases de compréhension des effets d'adhésion. La méthodologie qui lui est ensuite proposée couvre une large étendue d'applications du fait qu'elle oriente le concepteur plutôt que de le diriger de manière unilatérale. La démarche devrait en outre l'inciter à s'intéresser à divers principes de manipulation en vue notamment de combiner leurs effets avantageux.

Les modèles décrivant le comportement de l'objet durant les opérations de prise et de dépose lui permettront d'extraire les caractéristiques idéales des interfaces préhenseur - objet - substrat, ainsi que de déterminer la stratégie optimale. En se basant sur des cas concrets, une généralisation a été proposée afin d'adapter aisément le modèle à tout autre principe.

Sur cette base et étant donné la difficulté d'évaluer et de mesurer les effets d'adhésion en conditions réelles d'assemblage, l'étape (itérative si besoin) de validation de la faisabilité est déterminante.

Par le développement de cinq familles de préhenseurs aux principes variés, cette faisabilité a été testée pour des billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ . Leur caractérisation pourrait certes intégrer des paramètres supplémentaires, néanmoins une stratégie fonctionnelle au moins a été proposée pour chacun d'eux.

L'application qui illustre cette méthodologie a en outre permis d'étudier les aspects de référencement mécanique. En plus de la mise en évidence de l'intérêt d'une collaboration étroite entre les concepteurs des divers éléments de l'assemblage, l'importance de prendre en compte toutes les forces intervenant durant les opérations ainsi que la disposition des zones de contact a été relevée. Cet aspect ne doit pas être négligé. Rapporté aux modèles de comportement, il permet d'éviter des configurations peu fiables tout en mettant en évidence les situations optimales.

Cette étude est ainsi un outil pour le concepteur d'installation de microassemblage. Par la méthodologie proposée, nous espérons ou plutôt offrons les moyens de stimuler l'intégration ou la combinaison de principes novateurs de micromanipulation.



# ANNEXE A

## CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

---

Les tableaux ci-dessous regroupent quelques valeurs tirées de la littérature des constantes de Hamaker AH et d'énergies de surface  $\gamma$  pour différents matériaux.

- Tableau (A.1) : Energie de surface
- Tableau (A.2) : Constante de Hamaker pour des matériaux interagissant dans le vide
- Tableau (A.3) : Constante de Hamaker pour des matériaux interagissant dans l'eau

**Tableau A.1:** Energie de surface, valeurs tirés de [Israelachvili97]

MATÉRIAU	ENERGIE DE SURFACE $\gamma$ (mJ/m <sup>2</sup> )
Acetone	20 - 23.7
Ethanol	20.5 - 22.8
Eau	73
Eau (100°C)	58
PTFE	18.3 - 21.8
Polystyrène	33
Polyvinyl chloride	39
Aluminium (300K)	1100
Argent (300K)	1500
Or	1500
Cuivre (300K)	2000
Fer (300K)	2400
Tungstène (300K)	4400
Silicium (300K)	1400

**Tableau A.2:** Constantes de Hamaker pour matériaux interagissant dans le vide

MATERIAU 1	MATERIAU 2	CONSTANTE HAMAKER $A_H$ ( $10^{-20}J$ )	RÉFÉRENCES
Eau	Eau	3.7	[Israelachvili97]
Acetone	Acetone	4.1	[Israelachvili97]
Ethanol	Ethanol	4.2	[Israelachvili97]
Polystyrène	Polystyrene	6.5, 6.6-7.9	[Israelachvili97]
PTFE	PTFE	3.8 3.9 exp	[Israelachvili97] [Butt05]
Silice	Silice	6.5	[Israelachvili97]
Mica	Mica	10	[Israelachvili97]
Quartz	Quartz	6.5/6.3	[Israelachvili97]
Alumine ( $Al_2O_3$ )	Alumine	14	[Israelachvili97]
Oxyde de fer ( $Fe_3O_4$ )	Oxyde de fer	21	[Israelachvili97]
Oxyde de titane ( $TiO_2$ )	Oxyde de titane	43	[Israelachvili97]
Carbure de silicium	Carbure de silicium	44	[Israelachvili97]
Métaux (Au, Ag, Cu)	Métaux (Au, Ag, Cu)	30-50	[Israelachvili97]
Ag	Ag	20-49 38.5±0.5 exp	[Butt05]
Cu	Cu	25-40 27.5 exp	[Butt05]
Ag	Cu	22-44 32.6-34 exp	[Butt05]
Silicium	Silicium	25.8	[Rollot00]
Polystyrène	Graphite	17	[Lee91]
Polystyrène	Or	17	[Lee91]
Polystyrène	Argent	16.3	[Lee91]
Polystyrène	Cuivre	13.8	[Lee91]
Polystyrène	Diamant	13.8	[Lee91]
Polystyrène	Silicium	13.2	[Lee91]
Polystyrène	Silicium + Oxyde (13nm)	11.3	[Lee91]
Polystyrène	Alumine	10.1	[Lee91]
Polystyrène	Eau	5.3	[Lee91]
Polystyrène	Verre ( $SiO_2$ )	5	[Lee91]
SiO2	Au	2.2-4.1 exp (Air)	[Butt05]
SiO2	Ag	11-18 13 exp	[Butt05]
SiO2	Cu	12-17 14 exp	[Butt05]

**Tableau A.3:** Constantes de Hamaker pour matériaux interagissant dans l'eau

MATERIAU 1	MATERIAU 2	CONSTANTE HAMAKER $A_H$ ( $10^{-20}J$ )	RÉRÉRENCES
Polystyrène	Polystyrène	1.4 0.95 - 1.3 exp	[Israelachvili97]
PTFE	PTFE	0.29 - 0.33	[Israelachvili97]
Mica	Mica	2 1.3-2.2	[Israelachvili97] [Butt05]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.2 - 5.3	[Israelachvili97]
Ag, Au, Cu	Ag, Au, Cu	30 - 40	[Israelachvili97]
Silicium	Au	20.3	[Rollot00]
Silicium	Polystyrène	0.29 - 0.33	[Rollot00]
TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	6 26 (rutile)	[Butt05] [Israelachvili97]
Au	Au	40 25 exp	[Butt05]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4.8-5.9 6.1 exp	[Butt05]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Mica	2.45 3.4 exp	[Butt05]
SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	0.46-0.85 0.85-1 exp	[Butt05]
SiO <sub>2</sub>	Au	12-15 exp	[Butt05]
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	0.69 1.4 exp	[Butt05]
SiO <sub>2</sub>	Mica	1.2-1.16	[Butt05]
ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	7.2-8.1 6 exp	[Butt05]



# ANNEXE B

## ETUDES DES COMPORTEMENTS POUR LES COMBINAISONS DE $\Gamma$

---

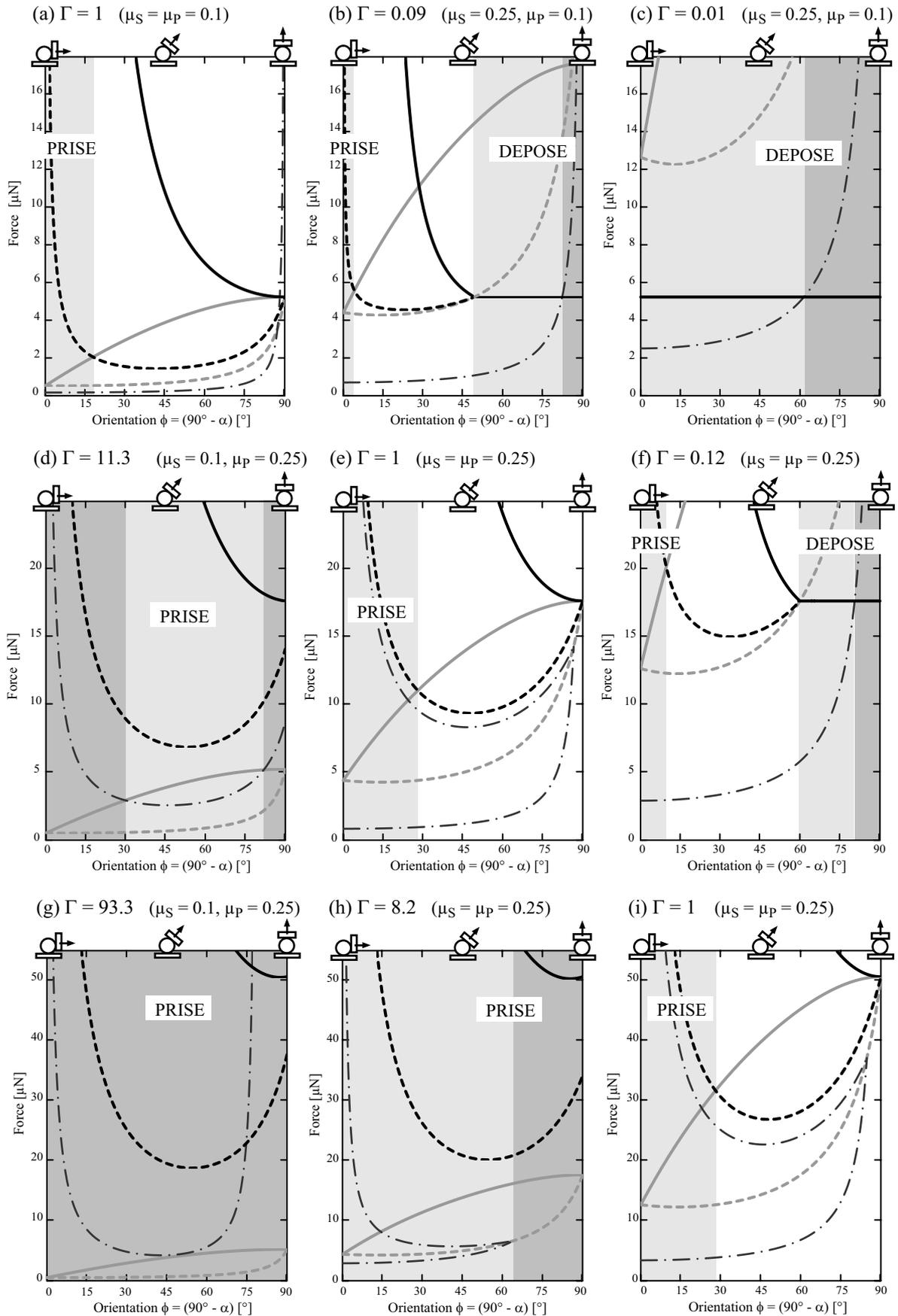
Cet annexe présente quelques résultats supplémentaires de modélisation concernant le comportement d'une microbille lors d'un transfert par adhésion. Les configurations représentées concernent un retrait perpendiculaire à l'interface «objet - préhenseur» en Fig. B.1, puis perpendiculaire à l'interface «objet - substrat» (Fig. B.2) et complètent celles discutées au § 4.2.4.1 et à la Fig. 4.10.

Le tableau (B.1) récapitule tout d'abord les combinaisons de matériaux utilisés aux niveaux du préhenseur et du substrat. Ces matériaux ont été choisis de manière à obtenir une large plage de rapports d'adhésion  $\Gamma$ , soit entre 0.01 et 100. Les Fig. B.1 et B.2 comportent les représentations des diverses situations pour toutes les combinaisons de matériaux obtenues.

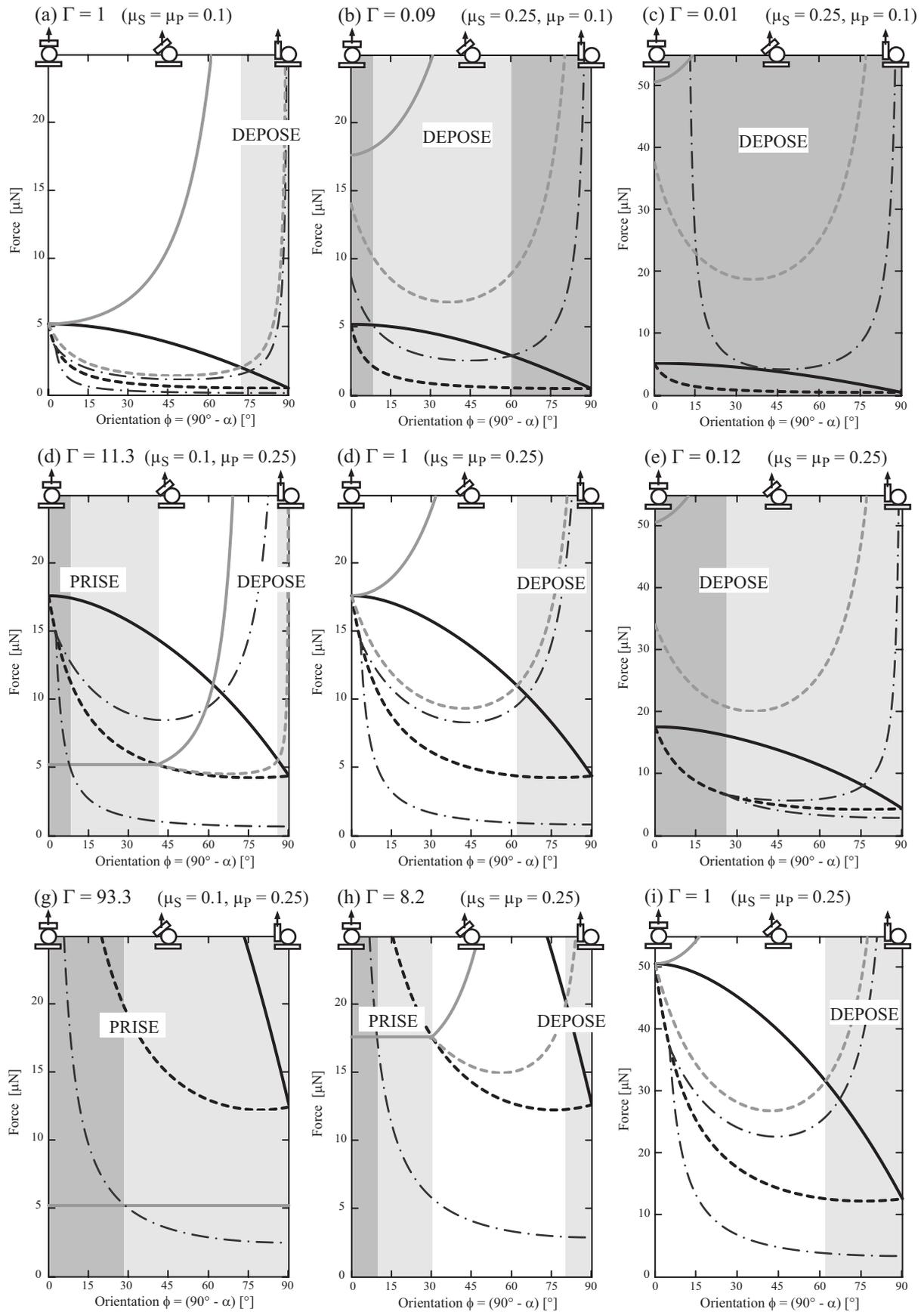
La signification des différentes courbes et zones utilisées aux Fig. B.1 et B.2 est explicitée à la Fig. B.3.

$\Gamma$		PRÉHENSEUR		
		Avec dépôt hydrophobe $\gamma_P = 0.015\text{Jm}^{-2}$	Verre $\gamma_P = 0.17\text{Jm}^{-2}$	Silicium $\gamma_P = 1.4\text{Jm}^{-2}$
SUBSTRAT	Avec dépôt hydrophobe $\gamma_S = 0.015\text{Jm}^{-2}$	1	0.09	0.01
	Verre $\gamma_S = 0.17\text{Jm}^{-2}$	11.3	1	0.12
	Silicium $\gamma_S = 1.4\text{Jm}^{-2}$	93.3	8.2	1

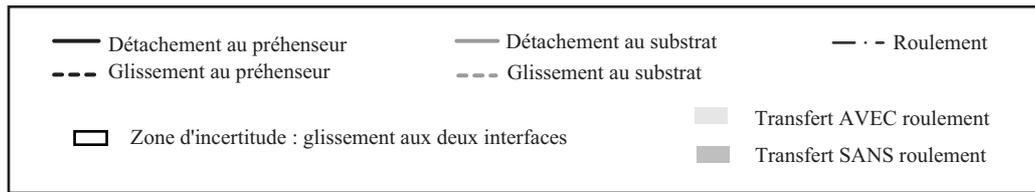
**Tableau B.1:** Valeurs du rapport d'adhésion  $\Gamma$  pour les combinaisons de matériaux utilisés dans les éléments de modélisation (tableau (4.2)).



**Figure B.1 :** Comportement d'une bille de  $\text{Ø}50\mu\text{m}$  lors d'un retrait perpendiculaire à l'interface « objet-préhenseur » pour les différentes combinaisons de matériaux présentés au tableau (B.1).



**Figure B.2 :** Comportement d'une bille de  $\text{\O}50\mu\text{m}$  lors d'un retrait perpendiculaire à l'interface « objet - substrat » pour les différentes combinaisons de matériaux présentés au tableau (B.1).



**Figure B.3 :** Légendes des différentes courbes et zones utilisées aux figures B.2 et B.3.

# ANNEXE C

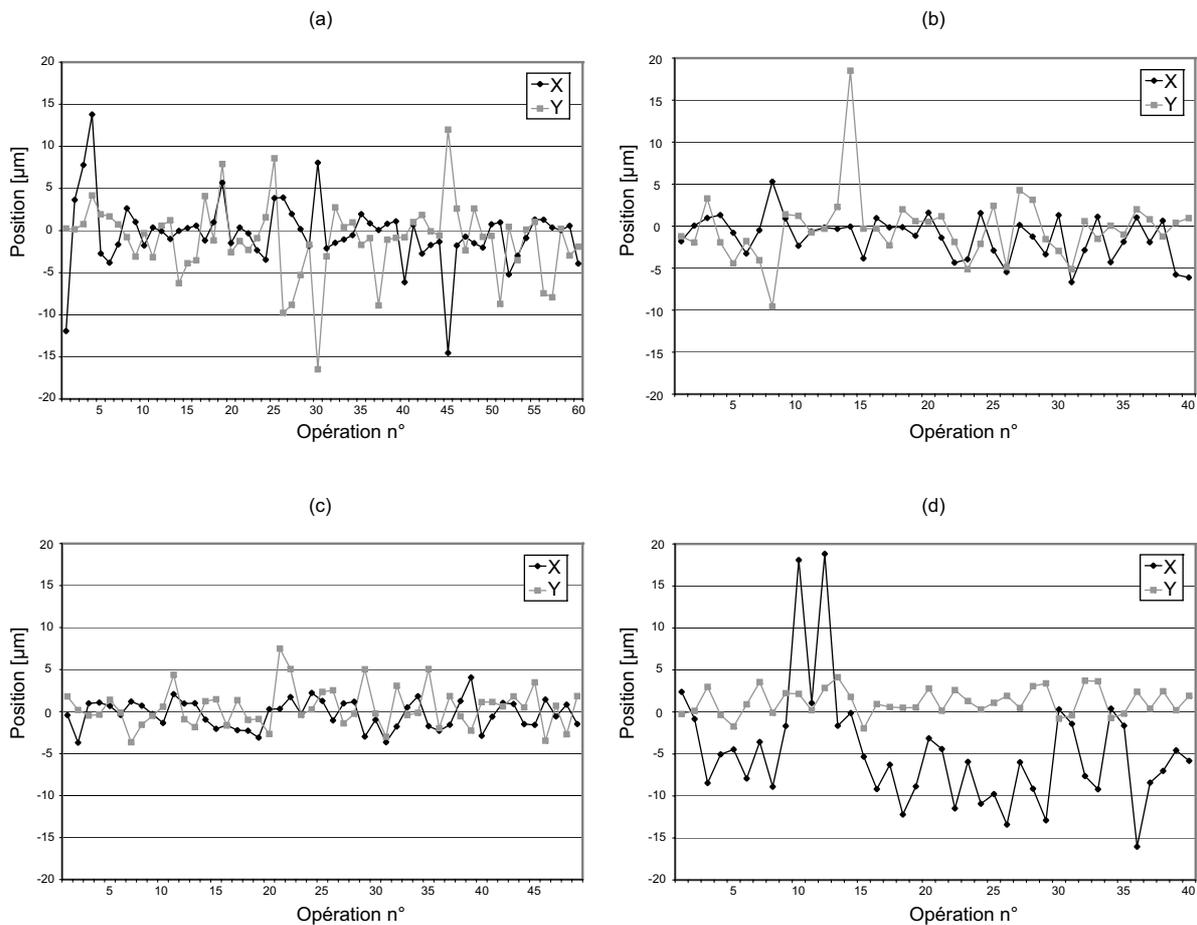
## REPRÉSENTATIONS COMPLÉMENTAIRES DES MESURES

---

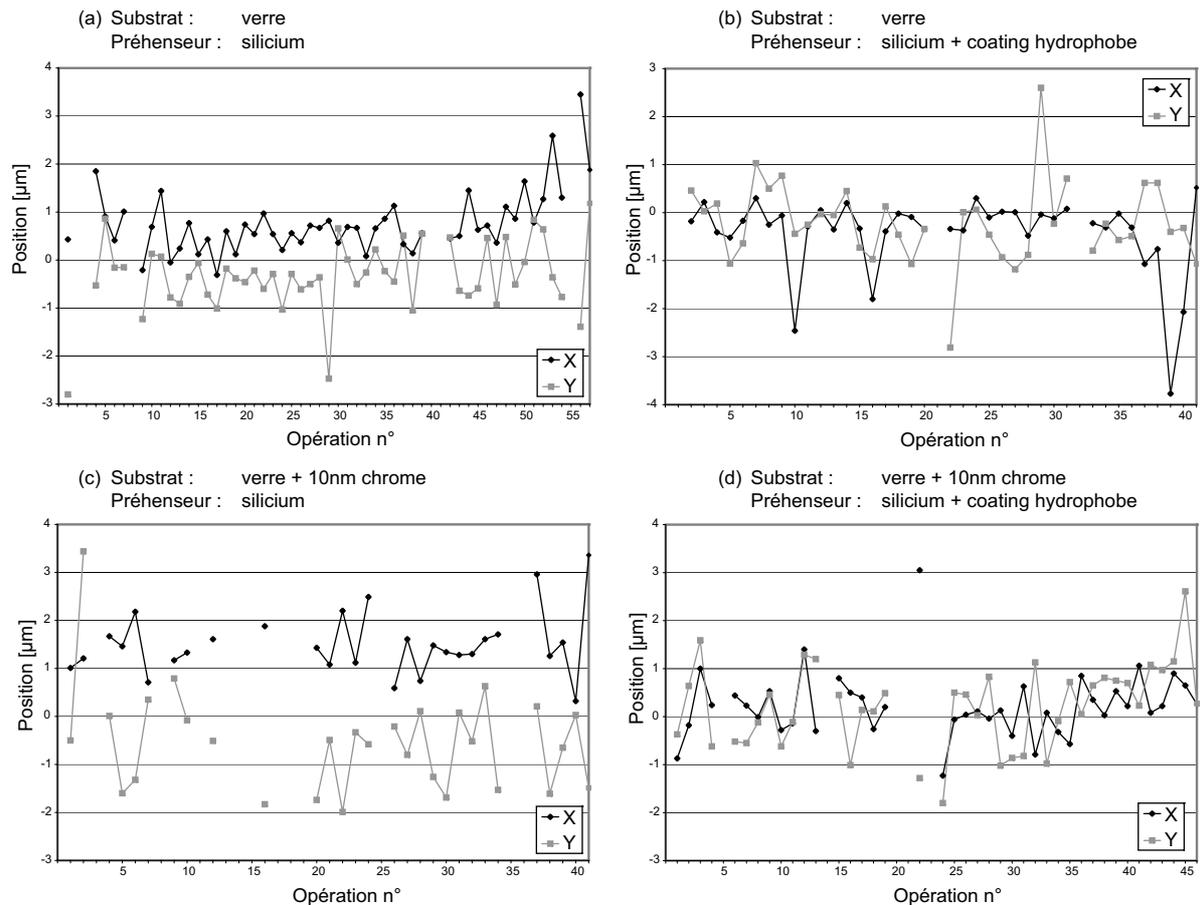
Cet annexe regroupe des graphiques supplémentaires qui relatent certains résultats d'opérations de micromanipulation avec les différentes familles de préhenseurs. Ces représentations se réfèrent ensuite aux tableaux du chapitre 8 pour le compte-rendu complet des résultats. L'information supplémentaire réside ici dans l'évolution dans le temps, soit au fil des opérations, pour des conditions identiques d'un set de mesure.

### 3.1 MANIPULATION AVEC DES MICROPINCES

- Fig. C.1 : influence de l'humidité relative sur les performances en positionnement (§ 8.2.3, p. 150). Les mesures présentées ici relatent un set d'opération effectué avec la pince pneumatique et des embouts en silicium ( $12\mu\text{m}$  d'épaisseur) sur un substrat en verre. La Fig. C.1(d) correspond au même préhenseur mais pour un substrat en verre recouvert d'un coating hydrophobe.
- Fig. C.2 : influence des matériaux sur les performances en positionnement (§ 8.2.4, p. 152). Ces résultats correspondent à un set d'opération effectué avec des pinces MEMS qui ont subi la déposition d'une couche hydrophobe (b-d) ou non (a-c). Le substrat est en verre (a-b) avec une couche de 10nm de chrome pour les figures c et d.



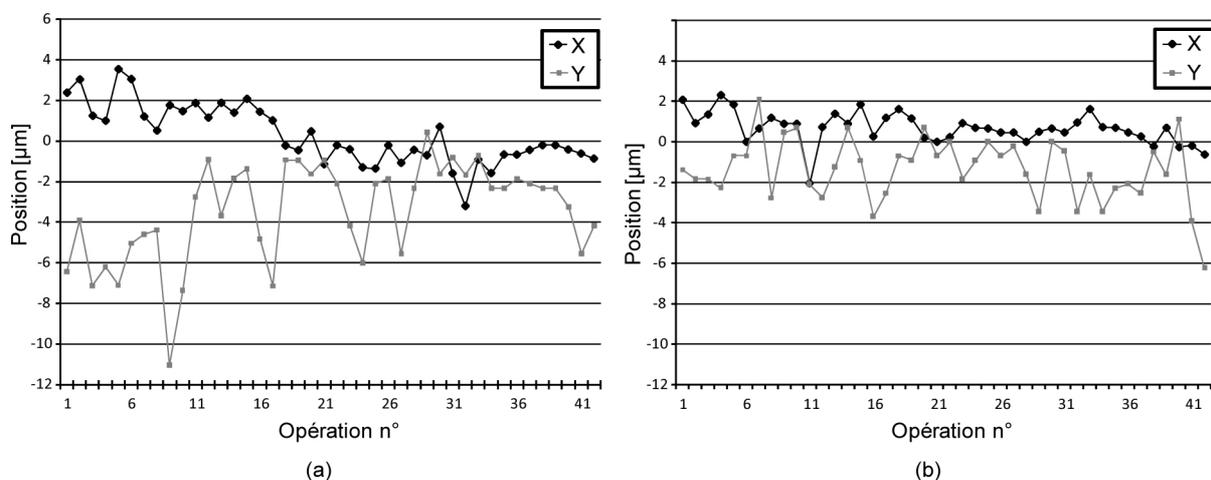
**Figure C.1 :** Mesure de l'erreur de position pour différents taux d'humidité relative : (a) 3%, (b) 21%, (c) et (d) 44%. Le substrat est en verre alors qu'en (d) un dépôt hydrophobe y a été déposé. Manipulations effectuées avec la pince pneumatique et les embouts en silicium ( $12\mu\text{m}$  d'épaisseur).



**Figure C.2 :** Mesure de l'erreur de position pour différents matériaux au niveau du substrat et du préhenseur. Manipulations effectuées avec une pince MEMS.

### 3.2 PRÉHENSEUR VACUUM

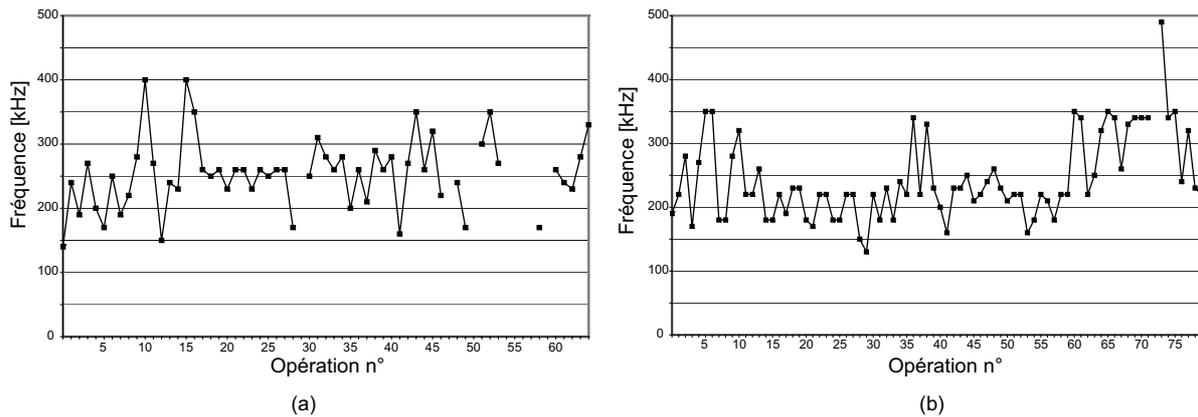
- Fig. C.3 : évolution du positionnement de billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$  par un préhenseur vacuum avec vibration (§ 8.6, p. 167). Les mesures concernent la position après les opérations (a) de prise et (b) de dépose.



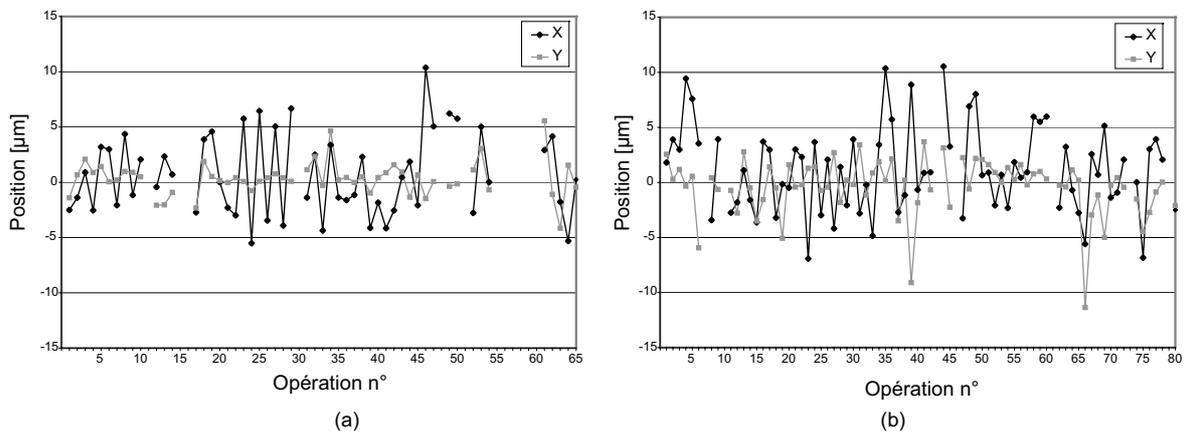
**Figure C.3 :** Mesure de l'erreur de position durant les opérations (a) de prise et (b) de dépose par un préhenseur vacuum avec vibration.

### 3.3 PRÉHENSEUR INERTIEL

- Fig. C.4 : évolution de la fréquence minimale engendrant une dépose inertielle pour les deux types de signal : (a) single et (b) multiple (§ 8.3.2.2, p. 156). Les opérations ont été effectuées sous 40% d'humidité relative.
- Fig. C.5 : évolution des performances de positionnement par une dépose inertielle à seuil de fréquence minimale selon le type de signal : (a) single et (b) multiple (§ 8.3.2.3, p. 158). Les opérations ont été effectuées sous 40% d'humidité relative.



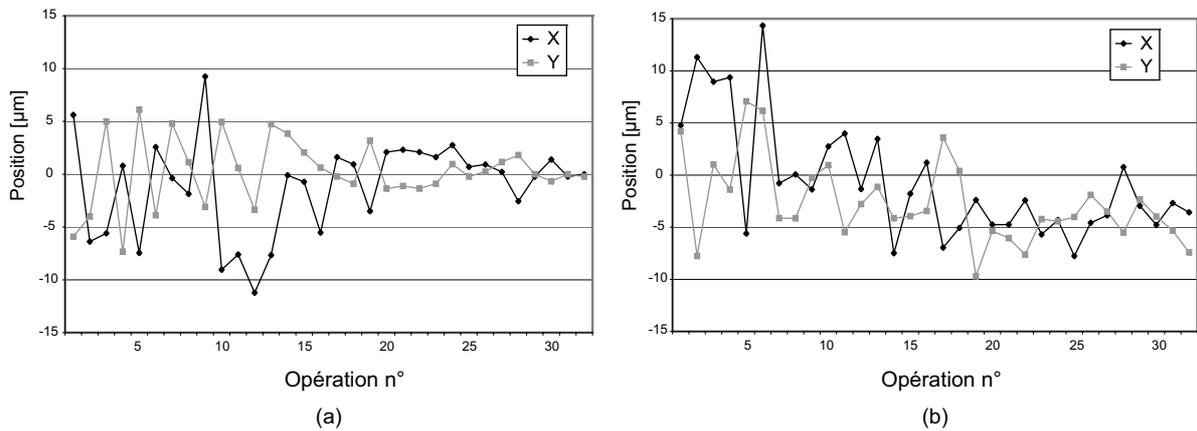
**Figure C.4 :** Mesure de la fréquence minimale pour engendrer une dépose inertielle (a) en mode single et (b) en mode multiple. (humidité relative : 40%)



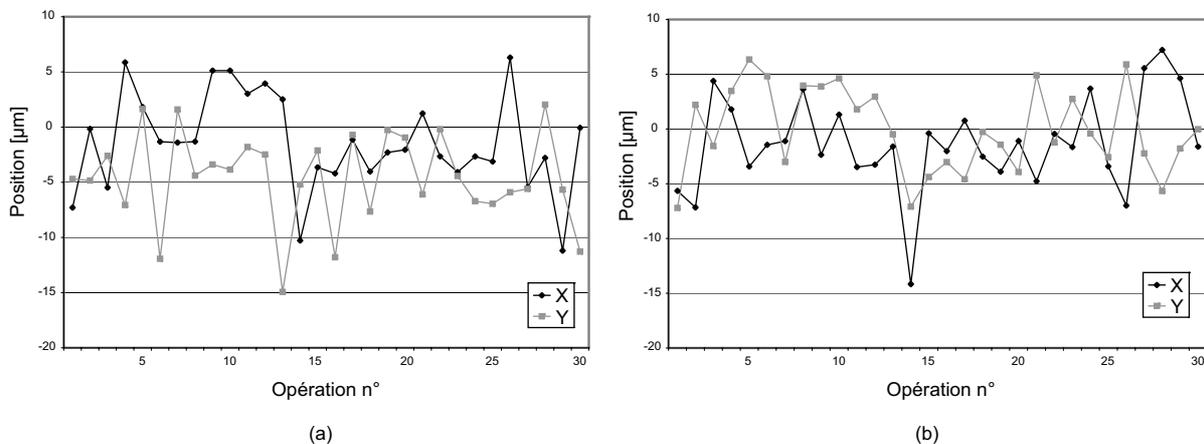
**Figure C.5 :** Mesure de l'erreur de position durant les opérations de dépose inertielle à fréquence minimale en mode (a) single et (b) multiple. (humidité relative : 40%)

### 3.4 MANIPULATION PAR CAPILLARITÉ

- Fig. C.6 et Fig. C.7 : évolution du positionnement pour une manipulation par capillarité avec condensation et évaporation du ménisque (§ 8.4.1, p. 161). La Fig. C.6 relate la manipulation de cubes de silicium de  $50\mu\text{m}$  alors que la Fig. C.7 concerne des billes de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ . Pour ce type de préhenseur, les mesures de position ont été effectuées aussi bien lors de la prise (a) que de la dépose (b).



**Figure C.6 :** Mesure de l'erreur de position durant les opérations de (a) prise et de (b) dépose par condensation et évaporation du ménisque pour un cube de silicium de  $50\mu\text{m}$ .



**Figure C.7 :** Mesure de l'erreur de position durant les opérations (a) de prise et (b) de dépose par condensation et évaporation du ménisque pour une bille de polystyrène de  $\varnothing 50\mu\text{m}$ .



# LISTE DES SYMBOLES

---

$A^H$	constante de Hamaker [J]
$A_P, A_S$	forces d'adhésion à l'interface «objet - préhenseur», «objet - substrat» [N]
$a$	rayon de déformation au contact [m]
$a_0$	rayon de déformation à charge nulle [m]
$a_s$	rayon de déformation à la séparation [m]
$a^*$	accélération [ $\text{m/s}^2$ ]
$b$	largeur [m]
$C$	capacité [F]
$c_p$	chaleur spécifique [ $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ]
$c_R$	résistance au roulement [m]
$D, d$	distance entre deux surfaces [m]
$D_0$	distance d'interaction au contact [m]
$d_{31}, d_{33}$	coefficients piézoélectriques [ $\text{m/V}$ ou $\text{C/N}$ ]
$E$	module d'élasticité [ $\text{N/m}^2$ ], champ électrique [ $\text{N/C}$ ]
$e$	charge électrique élémentaire [ $1.6022 \times 10^{-19}\text{C}$ ]
$F$	force [N]
$F_E$	force externe appliquée à l'objet à manipuler [N]
$F^P$	force de pull-off [N]
$F_P, F_S$	forces à l'interface «objet - préhenseur», «objet - substrat» [N]
$f$	fréquence [Hz]
$G^*$	module de cisaillement équivalent [ $\text{N/m}^2$ ]
$G_P, G_S$	forces de frottement au préhenseur, au substrat [N]

---

$H$	rayon de courbure moyen d'un ménisque [ $m^{-1}$ ], dureté
$h$	épaisseur [m]
$h_0$	distance de séparation d'équilibre [m]
$h_P$	constante de Planck [ $6.6262 \cdot 10^{-34}$ J·s]
$I$	moment d'inertie de la section d'une poutre [ $m^4$ ], intensité [A]
$K$	module d'élasticité effectif [ $N/m^2$ ]
$K_\lambda$	conductance thermique [W/K]
$K_i, k_i$	rigidité de l'élément $i$ [ $N/m$ ]
$k$	coefficient de forme [-]
$k_B$	constante de Boltzmann [ $1.3807 \cdot 10^{-23}$ J/K]
$k_L$	rigidité latérale au contact [ $N/m^2$ ]
$k_N$	rigidité au contact [ $N/m^2$ ]
$L$	longueur [m]
$L_v$	chaleur latente de vaporisation [J/kg]
$M$	moment [Nm]
$M^R, M^P$	moments de roulement, de pivotement [Nm]
$m$	masse [kg]
$m_M$	masse molaire [kg/mol]
$N_P, N_S$	forces normales aux interfaces «objet - préhenseur», «objet - substrat» [N]
$n$	densité [ $m^{-2}$ - $m^{-3}$ ], rapport des rayons [-]
$P$	puissance [W]
$p$	pression [Pa]
$p_s$	pression de saturation [Pa]
$Q$	énergie [J]
$Q_i, q_i$	charge électrique [C]
$r$	distance d'interaction [m], rayon (ménisque) [m]
$R$	rayon [m], constante des gaz parfaits [ $8.3144$ J/mol·K]
$Re$	nombre de Reynolds [-]
$RH$	humidité relative [%]
$R_a$	rugosité [m]
$R_e$	limite élastique [ $N/m^2$ ]
$R_\rho$	résistance électrique [ $\Omega$ ]
$r_k$	rayon de Kelvin [m]
$S$	surface [ $m^2$ ]
$S_S$	coefficient de Seebeck [V/K]

---

$T$	température [K]
$T_P, T_S$	forces tangentielles aux interfaces «objet - préhenseur», «objet - substrat» [N]
$t$	temps [s]
$U$	énergie potentielle [J]
$V$	volume [m <sup>3</sup> ], tension [V]
$V_C, V_S$	potentiels de contact, de surface [V]
$v$	vitesse [m/s]
$W_{ii}, W_{ij}$	travaux de cohésion, d'adhésion [J/m <sup>2</sup> ]
$w(r)$	potentiel d'interaction moléculaire [J]
$\alpha$	orientation du préhenseur [rad], paramètre d'ajustement [-], facteur d'interaction [-]
$\delta$	déplacement [m], profondeur d'écrasement au contact [m]
$\delta_{Ra}$	rapport des surfaces réelle et apparente [-]
$\delta_s$	profondeur d'écrasement à la séparation [m]
$\Delta_{trs}S$	entropie de transition de phase [J/mol·K]
$\Delta_{trs}V$	volume molaire de transition [m <sup>3</sup> /mol]
$\Delta_{vap}H$	enthalpie de vaporisation [J/mol]
$\epsilon$	constante diélectrique [-]
$\epsilon_0$	permittivité du vide [8.8542·10 <sup>-12</sup> A·s/V·m]
$\phi$	direction du retrait [rad]
$\phi_i$	fonction de travail [eV]
$\Gamma$	rapport d'adhésion aux interfaces [-]
$\gamma$	tension de surface [N/m], énergie de surface [J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_i, \gamma_{ij}$	énergie interfaciale [J/m <sup>2</sup> ]
$\eta$	viscosité du milieu [Pa·s], facteur d'atténuation ou de pertes [-]
$\varphi$	angle de mouillage (hauteur du ménisque) [rad]
$\lambda$	paramètre de transition ou paramètre d'élasticité [-], conductivité thermique [W/m·K]
$\mu$	coefficient de frottement [-]
$\mu_R$	coefficient de résistance au roulement [m]
$\nu$	coefficient de Poisson [-], fréquence d'orbite [s <sup>-1</sup> ]
$\epsilon$	énergie [J]
$\theta$	angle de contact [rad]
$\rho$	densité moléculaire [kg/mol], masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ], résistivité [ $\Omega$ ·m]
$\sigma$	distance interatomique [m], densité surfacique de charges [C/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_0$	seuil de contrainte correspondant à la valeur minimale du potentiel de Lennard-Jones à la distance de séparation d'équilibre [N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_x, \sigma_y$	écart-type
$\tau$	contrainte de cisaillement [N/m <sup>2</sup> ]

$\omega$	pulsation [ $\text{s}^{-1}$ ]
$\psi$	direction du retrait (contribution tangentielle) [rad], coefficient de pertes par hystérèse (roulement) [-]

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [Agnus03] Agnus J., De Lit P., Cleve C., Chaillet N., "Description and performances of a four-degrees-of-freedom piezoelectric gripper," in *Proc. of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp. 66-71, 2003.
- [Andersen08] Andersen K. N., Carlson K., Petersen D. H., Molhave K., Eichhorn V., Fatikow S., Boggild P., "Electrothermal microgrippers for pick-and-place operations," *Microelectronic Engineering*, vol. 10.1016/j.mee.2007.12.080, 2008.
- [Aoyama95] Aoyama H., Hiraiwa S., Iwata F., Fukaya J., Sasaki A., "Miniature robot with micro capillary capturing probe," in *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995.
- [Arai95] Arai F., Ando D., Fukuda T., Nonoda Y., Oota T., "Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'*, pp. 236-241 vol.2, 1995.
- [Arai97] Arai F., Fukuda T., "A new pick up and release method by heating for micromanipulation," in *MEMS '97*, pp. 383-388, 1997.
- [Ashkin70] Ashkin A., "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," *Physical Review Letters*, vol. 24, pp. 156 - 159, 1970.
- [Atkins00] Atkins P. W., *Chimie physique*: De Boeck Université, 2000.
- [Bacher03] Bacher J.-P., "Conception de robots de très haute précision à articulations flexibles : Interaction dynamique-commande," Thèse No. 2907: EPF Lausanne, 2003.
- [Bark98] Bark C., Binnenbose T., Vogele G., Weisener T. A.-W., T., Widmann M. A.-W., M., "Gripping with low viscosity fluids," in *Proc. of the Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 301-305, 1998.
- [Bellouard99] Bellouard Y., Lehnert T., Bidaux J.-E., Sidler T., Clavel R., Gotthardt R., "Local annealing of complex mechanical devices: A new approach for developing monolithic micro-devices," *Materials Science and Engineering*, vol. A273-275, pp. 795-798, 1999.
- [Bellouard00] Bellouard Y., "Conception de dispositifs en alliage à mémoire de forme en microtechnique," Thèse no 2308: EPF Lausanne, 2000.

- [Beyeler07] Beyeler F., Neild A., Oberti S., Bell D. J., Sun Y., Dual J., Nelson B. J., "Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 16, p. 7, 2007.
- [Bico02] Bico J., Thiele U., Quéré D., "Wetting of textured surfaces," *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 206, pp. 41-46, 2002.
- [Böhringer98] Böhringer K.-F., Goldberg K., Cohn M., Howe R., Pisano A., "Parallel microassembly with electrostatic force fields," in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1204-1211 vol.2, 1998.
- [Breguet07] Breguet J.-M., Driesen W., Kaegi F., Cimprich T., "Applications of piezo-actuated micro-robots in micro-biology and material science," *Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 57-62, 2007.
- [Buerkle01] Buerkle A., Schmoeckel F., Kiefer M., Amavasai B. P., Caparrelli F., Selvan A. N., Travis J. R., "Vision-based closed-loop control of mobile microrobots for micro handling tasks," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly III*, vol. 4568, 2001.
- [Bütefisch02] Bütefisch S., Seidemann V., Büttgenbach S., "Novel micro-pneumatic actuator for mems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 638-645, 2002.
- [Butt03] Butt H.-J., *Physics and chemistry of interfaces*: Wiley, 2003.
- [Butt05] Butt H.-J., Cappella B., Kappl M., "Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications," *Surface Science Reports*, vol. 59, pp. 1-152, 2005.
- [Carpick99] Carpick R. W., Ogletree F. D., Salmeron M., "A general equation for fitting contact area and friction vs load measurements," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 211, pp. 395-400, 1999.
- [Chan03] Chan H.-Y., Li W. J., "A thermally actuated polymer micro robotic gripper for manipulation of biological cells," in *International Conference on Robotics & Automation*, Taipei (Taiwan), 2003.
- [Chang06] Chang H.-C., Tsai J. M.-L., Tsai H.-C., Fang W., "Design, fabrication, and testing of a 3-dof harm micromanipulator on (1 1 1) silicon substrate," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 125, pp. 438-445, 2006.
- [Chau07] Chau A., Regnier S., Delchambre A., Lambert P., "Three-dimensional model for capillary nanobridges and capillary forces," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 15, pp. 305-317, 2007.
- [Chronis05] Chronis N., Lee L. P., "Electrothermally activated su-8 microgripper for single cell manipulation in solution," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, pp. 857-863, 2005.
- [Chu94] Chu P. B., Pister S. J., "Analysis of closed-loop control of parallel-plate electrostatic microgrippers," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 820-825, 1994.
- [Chu Duc07A] Chu Duc T., "Sensing microgripper for microparticles handling," Thesis: Delft University of Technology, 2007.
- [Chu Duc07B] Chu Duc T., Lau G. K., Sarro P. M., "Polymer constraint effect for electrothermal bimorph microactuators," *Applied Physics Letters*, vol. 91, 2007.

- 
- [Clever04] Cleaver J. A. S., Tyrrell J. W. G., "The influence of relative humidity on particle adhesion - a review of previous work and the anomalous behaviour of soda-lime glass," *KONA*, pp. 9-22, 2004.
- [Clévy05] Clévy C., Hubert A., Agnus J., Chaillet N., "A micromanipulation cell including a tool changer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 292-301, 2005.
- [Dafflon04] Dafflon M., Wimböck T., Bacher J.-P., Clavel R., "Analyse et caractérisation du système de vision d'une plateforme de micromanipulation," in *3ème Journées du RTP Microrobotique*, Lausanne (Switzerland), 2004.
- [Dafflon06] Dafflon M., Lorent B., Clavel R., "A micromanipulation setup for comparative tests of microgrippers," in *International Symposium on Robotics (ISR)*, Munich (Germany), 2006.
- [De Lit04] De Lit P., Agnus J., Clévy C., Chaillet N., "A four-degree-of-freedom microprehensile microrobot on chip," *Assembly Automation*, vol. 24, pp. 33-42, 2004.
- [Deng03] Deng P., Lee Y.-K., Cheng P., "The growth and collapse of a micro-bubble under pulse heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 4041-4050, 2003.
- [Derjaguin75] Derjaguin B. V., Muller V. M., Toporov Y. P., "Effect of contact deformations on the adhesion of particles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 53, 1975.
- [Dionnet05] Dionnet F., "Télé-micro-manipulation par adhésion," Thesis: Université Paris 6 - Pierre & Marie Curie, 2005.
- [Driesen05] Driesen W., Varidel T., Régnier S., Breguet J.-M., "Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, 2005.
- [Enikov01] Enikov E. T., Lazarov K. V., "Optically transparent gripper for microassembly," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly III*, vol. 4568, pp. 40-49, 2001.
- [Enikov05] Enikov E. T., Minkov L. L., Clark S., "Microassembly experiments with transparent electrostatic gripper under optical and vision-based control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, 2005.
- [Eriksen03] Eriksen R. L., Daria V. R., Rodrigo P. J., Gluckstad J., "Computer-controlled orientation of multiple optically-trapped microscopic particles," *Microelectronic Engineering*, vol. 67-68, pp. 872-878, 2003.
- [Fahlbusch02] Fahlbusch S., Shirinov A., Fatikow S., "Afm-based micro force sensor and haptic interface for a nanohandling robot," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System* pp. 1772-1777, 2002.
- [Fang06] Fang J., Böhringer K.-F., "Parallel micro component-to-substrate assembly with controlled poses and high surface coverage," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 721-730, 2006.
- [Fazenda06] Fazenda N., Lubrano E., Rossopoulos S., Clavel R., "Calibration of the 6 dof high-precision flexure parallel robot "Sigma 6"," in *Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2006*, Chemnitz (Germany), 2006.
- [Fearing95] Fearing R. S., "Survey of sticking effects for micro parts handling," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'*, pp. 212-217, 1995.

- [Feddema99] Feddema J. T., Xavier P., Brown R., "Micro-assembly planning with van der waals force," in *International Symposium on Assembly and Task Planning*, Porto (Portugal), 1999.
- [Gauthier06] Gauthier M., Gibeau E., Heriban D., "Submerged robotic micromanipulation and dielectrophoretic micro-object release," in *Proceedings of IEEE-ICARCV'06*, 2006.
- [Gengenbach00] Gengenbach U., Boole J., "Electrostatic feeder for contactless transport of miniature and microparts," *Proceedings of SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly II*, pp. 75-81, 2000.
- [Gnecco00] Gnecco E., Bennewitz R., Gyalog T., Loppacher C., Bammerlin M., Meyer E., Güntherodt H.-J., "Velocity dependance of atomic friction," *Physical Review Letters*, vol. 84, p. 1172, 2000.
- [Greitmann96] Greitmann G., Buser R. A., "Tactile microgripper for automated handling of microparts," *Sensors and Actuators A: Physical : Proc. of The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, vol. 53, pp. 410-415, 1996.
- [Greminger04] Greminger M. A., Nelson B. J., "Vision-based force measurement," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, pp. 290-298, 2004.
- [Greminger05] Greminger M. A., Nelson B. J., "A deformable object tracking algorithm robust to occlusions and spurious edges," in *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1264-1269, 2005.
- [Haake02] Haake A., Dual J., "Micro-manipulation of small particles by node position control of an ultrasonic standing wave," *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 317-322, 2002.
- [Haliyo02] Haliyo D. S., "Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation," Thesis: Université Pierre et Marie Curie, 2002.
- [Haliyo03] Haliyo D. S., Regnier S., Guinot J.-C., "[mu]mad, the adhesion based dynamic micro-manipulator," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 22, pp. 903-916, 2003.
- [Harsh99] Harsh K. F., Bright V. M., Lee Y. C., "Solder self-assembly for three-dimensional microelectromechanical systems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 77, pp. 237-244, 1999.
- [Heeren07] Heeren A., Luo C. P., Henschel W., Fleischer M., Kern D. P., "Manipulation of micro- and nano-particles by electro-osmosis and dielectrophoresis," *Proc. of the 32nd International Conference on Micro- and Nano-Engineering, Microelectronic Engineering*, vol. 84, pp. 1706-1709, 2007.
- [Helmer06] Helmer P., "Conception systématique de structures cinématiques orthogonales pour la microrobotique," Thèse no 3365: EPF Lausanne, 2006.
- [Henein00] Henein S., "Conception des structures articulées à guidages flexibles de haute précision," Thèse no 2194: EPF Lausanne, 2000.
- [Henein03] Henein S., Thurner M., Steinecker A., "Flexible micro-gripper for micro-factory robots," CSEM 2003.
- [Heriban05] Heriban D., Agnus J., Coudeville J.-R., Gauthier M., Chaillet N., "Design of silicon finger tips for a moc (microrobot on chip) microgripper," in *TMMF 2005, Desktop MMES and Nano Factories*, Tsukuba (Japan), 2005.
- [Hesselbach01] Hesselbach J., Büttgenbach S., Wrege J., Bütetisch S., Graf C., "Centering electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly III*, vol. 4568, pp. 270-277, 2001.

- 
- [Hesselbach07] Hesselbach J., Wrege J., Raatz A., "Micro handling devices supported by electrostatic forces," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, pp. 45-48, 2007.
- [Hong04] Hong Y., Ashgriz N., Andrews J., Parizi H., "Numerical simulation of growth and collapse of a bubble induced by a pulsed microheater," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, pp. 957-869, 2004.
- [Hori03] Hori M., Hashimoto S., "Self-assembly of micro parts by controlling the environmental parameters," in *IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2003.
- [Hosokawa96] Hosokawa K., Shimoyama I., Miura H., "Two-dimensional micro-self-assembly using the surface tension of water," *IEEE*, 1996.
- [Israelachvili97] Israelachvili J., *Intermolecular & surface forces*: Academic Press, 1997.
- [Jenke07] Jenke M., Santschi C., Hoffmann P., "Characterization of electrical fields of buried interdigitated nanoscale ti-electrode arrays by a novel atomic force microscopy measurement procedure and their fabrication by fib milling," *NSTI-Nanotech2007*, vol. 4, pp. 97-100, 2007.
- [Jenke08] Jenke M., Santschi C., Hoffmann P., "Two-dimensional electrostatic force field measurements with simultaneous topography measurement on embedded interdigitated nanoelectrodes using a force distance curve based method," *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008.
- [Johnson71] Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. D., "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, vol. 324, p. 301, 1971.
- [Johnson97] Johnson K. L., "Adhesion and friction between a smooth elastic spherical asperity and a plane surface," *Proc. R. Soc. Lond. A.*, vol. 453, pp. 163-179, 1997.
- [Jones02] Jones R., Pollock H. M., Cleaver J. A. S., Hodges C. S., "Adhesion forces between glass and silicon surfaces in air studied by afm: Effects of relative humidity, particle size, roughness, and surface treatment," *Langmuir*, vol. 18, pp. 8045-8055, 2002.
- [Jones06] Jones J. F. R., Kast B. A., Bailar J. M., Weir N. A., "Toward the fabrication of a micro robot by evolving the art of precision micro-assembly," in *International Advanced Robotic Programms (IARP)*, 2006.
- [Joseph05] Joseph C., "Contribution à l'accroissement des performances du processus de µedm par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision," Thèse no 3281: EPF Lausanne, 2005.
- [Kim03] Kim D.-H., Kim B., Kang H., Ju B.-K., "Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1864-1869, 2003.
- [Kochan97] Kochan A., "European project develops "Ice" Gripper for micro-sized components," *Assembly Automation*, vol. 17, pp. 114-115, 1997.
- [Kohl02] Kohl M., Krevet B., Just E., "Sma microgripper system," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 646-652, 2002.
- [Lambert04] Lambert P., "A contribution to microassembly: A study of capillary forces as a gripping principle," Thesis: Université Libre de Bruxelles, 2004.
- [Lambert05] Lambert P., Delchambre A., "Design rules for a capillary gripper in microassembly," in *the 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing (ISATP)* pp. 67-73, 2005.

- [Lambert06] Lambert P., Seigneur F., Koelemeijer S., Jacot J., "A case study of surface tension gripping : The watch bearing," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 1267-1276, 2006.
- [Lang06] Lang D., Tichem M., Blom S., "The investigation of intermediates for phase changing micro-gripping," in *5th International Workshop on MicroFactories (IWMF)*, Besançon (France), 2006.
- [Lazarou06] Lazarou P., Aspragathos N., Jung E., "Micropart manipulation by electric fields and batch self assembly," in *5th International Workshop on MicroFactories (IWMF)*, Besançon (France), 2006.
- [Lee91] Lee L.-H., *Fundamentals of adhesion*: Plenum Press, New York, 1991.
- [Lee02] Lee J., Moon H., Fowler J., Schoellhammer T., Kim C.-J., "Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 95, pp. 259-268, 2002.
- [Lee03] Lee S. H., Lee K.-C., Lee S. S., Oh H.-S., "Fabrication of an electrothermally actuated electrostatic microgripper," in *12th International Conference on TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 552-555, 2003.
- [López-Walle07] López-Walle B., Gauthier M., Chaillet N., "A submerged freeze microgripper for micromanipulations," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 826-831, 2007.
- [Lorent06] Lorent B., Dafflon M., Joseph C., Clavel R., "In situ micro gripper shaping by electro discharge machining," in *International Symposium on Robotics (ISR)*, München (Germany), 2006.
- [Lowell80] Lowell J., Rose-Innes A. C., "Contact electrification," *Advances in Physics*, vol. 29, pp. 947-1023, 1980.
- [Maugis84] Maugis D., Pollock H. M., "Surface forces, deformation and adherence at metal microcontacts," *Acta Metall.*, vol. 32, pp. 1323-1334, 1984.
- [Maugis92] Maugis D., "Adhesion of spheres: The jkr-dmt transition using a dugdale model," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 150, p. 243, 1992.
- [Mayyas07] Mayyas M., Zhang P., Lee W. H., Shiakolas P. A.-S., P., Popa D. A.-P., D., "Design tradeoffs for electrothermal microgrippers," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 907-912, 2007.
- [Menciassi03] Menciassi A., Eisenberg A., Carrozza M. C., Dario P., "Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, 2003.
- [Millet04] Millet O., Bernardoni P., Régnier S., Bidaud P., Tsitsiris E., Collard D., Buchaillet L., "Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism," *Sensors and Actuators A: Physical, Selected papers from Transducers'03*, vol. 114, pp. 371-378, 2004.
- [Mindlin49] Mindlin R. D., "Compliance of elastic bodies in contact," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 259-268, 1949.
- [Mindlin52] Mindlin R. D., Mason W. R., Osmer J. F., Deresiewicz H., "Effects of an oscillating tangential force on the contact surfaces of elastic spheres," in *Proc. of the 1st National Congress of Applied Mechanics*, pp. 203-208, 1952.
- [Mita03] Mita M., Kawara H., Toshiyoshi H., Ataka M. A.-A., M., Fujita H. A.-F., H., "An electrostatic 2-dimensional micro-gripper for nano structure," in *12th International Con-*

- 
- ference on *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 272-275, 2003.
- [Miyazaki00] Miyazaki H. T., Tomizawa Y., Saito S., Sato T., Shinya N., "Adhesion of micrometer-sized polymer particles under a scanning electron microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, pp. 3330-3340, 2000.
- [Moon06] Moon I., Kim J., "Using ewod (electrowetting-on-dielectric) actuation in a micro conveyor system," *Sensors and Actuators A: Physical, Selected Papers from TRANSDUCERS '05*, vol. 130-131, pp. 537-544, 2006.
- [Nah07] Nah S. K., Zhong Z. W., "A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133, pp. 218-224, 2007.
- [Nienhaus98] Nienhaus M., Ehrfeld W., Michel F., Graeff V., Wolf A., "Automatic microassembly of radar sensors for automotive applications," *Proceedings of SPIE, Micromachining and Microfabrication Process Technology IV*, vol. 3511, 1998.
- [Nogimori97] Nogimori W., Irida K., Ando M., Naruse Y., "A laser-powered micro-gripper," in *Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 267-271, 1997.
- [Onoe03] Onoe H., Matsumoto K., Shimoyama I., "3d micro self-assembly using a hydrophobic interaction controlled by sams," *IEEE*, 2003.
- [Petrovic02] Petrovic D., Popovic G., Chatzitheodoridis E., Del Medico O., Almansa A., Sümezc F., Brenner W., Detter H., "Gripping tools for handling and assembly of microcomponents," in *23rd International Conference on Microelectronics (MIEL 2002)*, Nis (Yugoslavia), pp. 247-250, 2002.
- [PI08] PI, [www.physikinstrument.com](http://www.physikinstrument.com), 2008
- [Pietrement00] Pietrement O., "Imagerie et caractérisation nanomécanique des surfaces par microscopie à force atomique," Thesis: Université de Reims Champagne-Ardenne, 2000.
- [Rabinovich02] Rabinovich Y. I., Adler J. J., Esayanur M. S., Ata A., Singh R. K., Moudgil B. M., "Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 96, p. 213, 2002.
- [Riedo02] Riedo E., Lévy F., Brune H., "Kinetics of capillary condensation in nanoscopic sliding friction," *Physical Review Letters*, vol. 88, 2002.
- [Riedo04] Riedo E., Palaci I., Boragno C., Brune H., "The 2/3 power law dependence of capillary force on normal load in nanoscopic friction," *J. Phys. Chem. B*, vol. 108, p. 5324, 2004.
- [Rohner06] Rohner J., Fournier J. M., Jacquot P., Merenda F., Salathe R. P., "Multiple optical trapping in high gradient interference fringes," *Proc. of SPIE, Optical Trapping and Optical Micromanipulation III*, 2006.
- [Rollot99] Rollot Y., Régnier S., Guinot J.-C., "Simulation of micro-manipulations : Adhesion forces and specific dynamic models," *International Journal of Adhesion and Adhesion*, vol. 19, pp. 35-48, 1999.
- [Rollot00] Rollot Y., Régnier S., Haliyo D. S., L B., Guinot J.-C., Bidaud P., "Experiments on micromanipulation using adhesion forces in unconstrained environment," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000.

- [Saito01] Saito S., Miyazaki H. T., Sato T., Takahashi K., Onzawa T., "Dynamics of micro-object operation considering the adhesive effect under an sem," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly III*, vol. 4568, pp. 12-23, 2001.
- [Saito02] Saito S., Himeno H., Takahashi K., Onzawa T., "Electrostatic detachment of a micro-object from a probe by applied voltage," in *International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 1790-1795, 2002.
- [Sang01] Sang Y., Dubé M., Grant M., "Thermal effects on atomic friction," *Physical Review Letters*, vol. 87, 2001.
- [Sausse-Lhernould07] Sausse-Lhernould M., Delchambre A., Régnier S., Lambert P., "Electrostatic forces in micromanipulations : Review of analytical models and simulations including roughness," *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 6203-6210, 2007.
- [Savkooor92] Savkooor A. R., "Fundamentals of friction: Macroscopic and microscopic processes," Eds. I. L. Singer and H. M. Pollock: Kluwer Academic Publishers, 1992, p. 111.
- [Schlick01] Schlick J., Zühlke D., "Design and application of a gripper for microparts using flexure hinges and pneumatic actuation," *Proceedings of SPIE, Microrobotics and Microassembly III*, vol. 4568, pp. 1-11, 2001.
- [Schlund07] Schlund M., "On-chip liquid/solid chromatography for continuous analysis," Thèse no 3866: EPF Lausanne, 2007.
- [Scussat00] Scussat M., "Assemblage bidimensionnel de composants optiques miniatures," Thèse no 2179: EPF Lausanne, 2000.
- [Seger06] Seger U., "Electrical cell manipulation in microfluidic systems," These no 3610: EPF Lausanne, 2006.
- [Segovia99] Segovia R., Wüthrich R., "Vers la manipulation sans contact de composants mems pour les systèmes de production," in *Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, 11ème édition*, Lausanne (CH), 1999.
- [Seidemann02] Seidemann V., Butefisch S., Buttgenbach S., "Fabrication and investigation of in-plane compliant su8 structures for mems and their application to micro valves and micro grippers," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 457-461, 2002.
- [Seliger00] Seliger G., Stephan J., Lange S., "Hydroadhesive gripping by using the peltier effect," *Proceedings of the ASME "Manufacturing Engineering Division"*, pp. 3-8, 2000.
- [Shibuichi96] Shibuichi S., Onda T., Satoh N., Tsujii K., "Super water-repellent surfaces resulting from fractal structure," *J. Phys. Chem.*, vol. 100, pp. 19512-19517, 1996.
- [Sirghi06] Sirghi L., Szoszkiewicz R., Riedo E., "Volume of a nanoscale water bridge," *Langmuir*, vol. 22, pp. 1093-1098, 2006.
- [Sitti00] Sitti M., Hashimoto H., "Two-dimensional fine particle positioning under an optical microscope using a piezoresistive cantilever as a manipulator," *Journal of Micro-mechatronics*, vol. 1, pp. 25-48, 2000.
- [Sitti04] Sitti M., "Atomic force microscope probe based controlled pushing for nanotribological characterization," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 9, pp. 343-349, 2004.
- [Skidmore03] Skidmore G., Ellis M., Geisberger A., Tsui K., Saini R., Huang T., Randall J., "Parallel assembly of microsystems using si micro electro mechanical systems," *Microelectronic Engineering*, vol. 67-68, pp. 445-452, 2003.
- [Smits91] Smits J. G., Choi W., "The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 38, pp. 256-270, 1991.

- 
- [Srinivasan01] Srinivasan U., Liepmann D., Howe R. T., "Microstructure to substrate self-assembly using capillary forces," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 10, pp. 17-24, 2001.
- [Stolarski89] Stolarski T. A., "Fracture mechanics and the contact between a pair of surface asperities during rolling," *Int. J. Engng Sci.*, vol. 27, pp. 169-179, 1989.
- [Stolarski90] Stolarski T. A., *Tribology in machine design*: Heinemann Newnes, 1990.
- [Subramanian05] Subramanian A., Vikramaditya B., Nelson B. J., Bell D., Dong L., "Dielectrophoretic micro/nanoassembly with microtweezers and nanoelectrodes," in *12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 208-215, 2005.
- [Sun02] Sun Y., Piyabongkarn D., Sezen A., Nelson B., Rajamani R., Schoch R., Potasek D. P., "A novel dual-axis electrostatic microactuation system for micromanipulation," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne (Switzerland), 2002.
- [Sun03] Sun Y., Potasek D. P., Piyabongkarn D., Rajamani R., Nelson B., "Actively servoed multi-axis microforce sensors," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taipei (Taiwan), pp. 294-299, 2003.
- [Szozzkiewicz05] Szozzkiewicz R., Riedo E., "Nucleation time of nanoscale water bridges," *Physical Review Letters*, vol. 95, 2005.
- [Tao07] Tao Z., Bhushan B., "Velocity dependence and rest time effect on nanoscale friction of ultrathin films at high sliding velocities," *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 25, p. 1267, 2007.
- [Valsamis06] Valsamis J.-B., Delchambre A., Lambert P., "An experimental study of prehension parameters during manipulation task," in *5th International Workshop on Microfactories*, Besançon (France), 2006.
- [Vandaele05] Vandaele V., Lambert P., Delchambre A., "Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation," *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 491-505, 2005.
- [Vandaele08] Vandaele V., "Contactless handling for micro-assembly : Acoustic levitation," Thesis: Université Libre de Bruxelles, 2008.
- [Verettas06] Verettas I., "Microfabrique : Méthodologie de conception de systèmes de production miniaturisés et modulaires, disposant d'un environnement salles blanches," Thèse no 3549: EPF Lausanne, 2006.
- [Voegeli00] Voegeli B., von Kanel H., "Afm-study of sticking effects for microparts handling," *Wear*, vol. 238, pp. 20-24, 2000.
- [Volland02] Volland B. E., Heerlein H., Rangelow I. W., "Electrostatically driven microgripper," *Microelectronic Engineering*, vol. 61-62, pp. 1015-1023, 2002.
- [Volland07] Volland B. E., Ivanova K., Ivanov T., Sarov Y., Guliyev E., Persaud A., Zollner J.-P., Klett S., Kostic I., Rangelow I. W., "Duo-action electro thermal micro gripper," in *Proc. of the 32nd International Conference on Micro- and Nano-Engineering, Microelectronic Engineering*, pp. 1329-1332, 2007.
- [Wales08] Wales, <http://www.aber.ac.uk/bioimage/image/uwbl-0623-w.jpg>, 2008
- [Wenzel36] Wenzel R. N., "Resistance of solid surfaces to wetting by water," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, pp. 988-994, 1936.
- [White07] White E. L., Enikov E. T., "Self-aligning electrostatic gripper for assembly of millimeter-sized parts," in *IEEE/ASME international conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1-5, 2007.

- 
- [Xiao00] Xiao X., Qian L., "Investigation of humidity-dependant capillary force," *Langmuir*, vol. 16, p. 8153, 2000.
- [Zäh03] Zäh M. F., Zitzmann A., Schilp M., "Non-contact handling in microfabrication," in *EUSPEN*, Aachen (Germany), 2003.
- [Zesch97] Zesch W., Brunner M., Weber A., "Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot," in *International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque (New Mexico), 1997.
- [Zhang04] Zhang H., Bellouard Y., Burdet E., Clavel R., Poo A.-N., Hutamacher D. W., "Shape memory alloy microgripper for robotic microassembly of tissue engineering scaffolds," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4918-4924 Vol.5, 2004.
- [Zhao00] Zhao Z., Glod S., Pouliakakos D., "Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 281-296, 2000.
- [Zhou04] Zhou J. W. L., Chan H.-Y., To T. K. H., Lai K. W. C., Li W. J., "Polymer mems actuators for underwater micromanipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, pp. 334-342, 2004.
- [Zhou05] Zhou Q., Korhonen P., Chang B., Sariola V., "6 dof dexterous microgripper for inspection of microparts," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey (USA), 2005.
- [Zhou06] Zhou Q., Chang B., "Microhandling using robotic manipulation and capillary self-alignment," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5883-5888, 2006.
- [Zhou07] Zhou Q., "Strategies in automatic microhandling," in *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin (China), 2007.

# CURRICULUM VITAE

---

## **Mélanie DAFFLON**

née le 25 avril 1978  
de nationalité suisse

### **Formation**

- 2004 - 2008 Thèse de doctorat  
Laboratoire de Systèmes Robotiques, EPFL
- 1997 - 2002 Diplôme d'ingénieure en microtechnique EPFL  
Section microtechnique  
Approfondissement en techniques de production
- 1994 - 1997 Maturité type C (Scientifique)  
Collège Ste-Croix, Fribourg

### **Expériences professionnelles**

- 2006 - 2007 Projet CIMENT «Exploratory Nanoscale Systems» : microassemblage robotisé de composants MEMS.
- 2004 - 2006 Projet CTI/TopNano21 «Manipulating microscale objects with nanoscale precision» : étude comparative de principes de micromanipulation, développement d'une installation semi-automatisée de micromanipulation.
- 2003 - 2008 Assistante au Laboratoire de Systèmes Robotiques - EPFL  
Assistante au cours «Composants de la Microtechnique», encadrement de travaux de semestre et de diplôme
- 2002 - 2003 Ingénieure de recherche - Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, USA  
Contribution à différents projets : alimentation d'un module autonome par radio fréquence, design MEMS pour fabrication par DRIE, élaboration d'un modèle mécanique d'une jauge de pression pour une compagnie médicale, analyse d'usure et de fatigue.
- 2000 Stage en entreprise de 2 mois - Sokymat SA, Granges-Veveyse (Suisse)  
Evaluation de procédés de soudure
- 1999 Stage en entreprise de 5 semaines - Posalux SA, Bienne (Suisse)  
Mise en place et suivi de mesures de rigidité et d'échauffement sur une unité de perçage

---

## Publications

Dafflon M., Lorent B., Driesen W., Clavel R., "Characterization of an inertial micro gripper based on adhesion forces", in 5th International Workshop on MicroFactories (IWMF), Besançon, France, 2006

Dafflon M., Lorent B., Clavel R., Beyeler F., Nelson B., "Characterization of micro manipulation tasks operated with various controlled conditions by micro tweezers", in 5th International Workshop on MicroFactories (IWMF), Besançon, France, 2006

Dafflon M., Lorent B. and Clavel R., "A micromanipulation setup for comparative tests of micro-grippers", in International Symposium on Robotics (ISR), München, Germany, 2006

Lorent B., Dafflon M., Joseph C., Clavel R., "In situ micro gripper shapping by electro discharge machining", International Symposium on Robotics (ISR), München, Germany, 2006

Dafflon M., Wimböck T., Bacher J.-P., Clavel R., "Analyse et caractérisation du système de vision d'une plateforme de micromanipulation", 3ème Journées du RTP Microrobotique, Lausanne, Switzerland, 2004