HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

par

Stéphane REGNIER

La manipulation aux échelles microscopiques

Soutenue le 6 juin 2006

JURY

Mr. J. FRENE	Professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
Mr. F. PIERROT	DR CNRS LIRMM Montpellier	Rapporteur
Mr. M. RICHETIN	Professeur à l'Université Blaise Pascal	Rapporteur
Mr. Ph. BIDAUD	Directeur du Laboratoire de Robotique de Paris	
	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examinateur
Mr. N. CHAILLET	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Examinateur
Mr. R. CLAVEL	Professeur à l'EPFL	Examinateur
Mr. C. FRETIGNY	DR CNRS ESPCI	Examinateur
Mr. J.C. GUINOT	Directeur des travaux	
	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examinateur
Mr. H. VAN BRUSSEL	Professeur à l'Université de Louvain	Examinateur
Invités		
Mr. L. BUCHAILLOT	CR (HDR) CNRS à l'IEMN Lille	Examinateur
Mr. V. HAYWARD	Professeur à l'Université de McGill	Examinateur

Table des matières

Ta	ble d	es matières	ii
Li	ste de	es figures	vii
In	trodu	iction et et problématique	1
	1	Préhension et micro-manipulation	1
	2	Analyse de la recherche en micro-manipulation	2
		2.1 Préhenseurs et modes opératoires associés	2
		2.2 Autonomie et automatisation	3
		2.3 Interface avec l'utilisateur	4
	3	Plan du mémoire	6
1	Ana	lyse physique	9
	1.1	Les forces surfaciques	9
		1.1.1 Les forces de Van der Waals	10
		1.1.2 Les forces capillaires	12
		1 1 3 Les forces électrostatiques	13
	12	Les forces de contact	14
		1.2.1 Les théories de la mécanique du contact	14
		1.2.1.1 Le modèle de Hertz	14
		1212 Le modèle JKR	15
		1.2.1.3 Le modèle DMT	15
		1214 Le modèle Dugdale	15
		1 2 2 Transition entre l'énergie de surface et la constante de Hamaker	17
		1.2.2 Prediction charter energie de surface et la constante de Frankaker	17
		1.2.5 Description simplifiee de la metion incroscopique	18
	13	Analyse expérimentale des forces pour la micro-manipulation	19
	1.5	1 3 1 Les forces de <i>pull-off</i> et les forces de Van der Waals	19
		1.3.2 Les forces capillaires	21
		1 3 3 Les forces électrostatiques	21
		134 Quelques phénomènes caractéristiques	$\frac{21}{22}$
	1.4	Conclusion	23
2	Moc	delisation et simulation de la micro-manipulation	25
	2.1	Dualité de la saisie/dépose par adhésion	25
		2.1.1 Description de la tâche de manipulation	26
		2.1.2 Modèle statique des phases de saisie et de dépose	26
		2.1.3 Modèle dynamique des phases de saisie et de dépose	28
		2.1.3.1 Modèle « détaché »	28
		2.1.3.2 Modèle « attaché »	29

		2.1.3.3 Conditions de transition de modèle	9
	2.2	Une tâche de maîtrise des interactions : le roulement	0
		2.2.1 Configuration du système	1
		2.2.2 Conditions de glissement	2
		2.2.3 Condition de roulement	3
		2.2.4 Simulation et analyse	3
	2.3	Conclusion	5
3	Con	ception d'une plate-forme de micro-manipulation par adhésion 3'	7
	3.1	Synthèse d'un préhenseur actif	7
		3.1.1 Le préhenseur	7
		3.1.1.1 Le système mono-digital	7
		3.1.1.2 Modélisation du dispositif de mesure	8
		3.1.1.3 Calibrage statique	9
		3.1.1.4 Validation expérimentale	0
		3.1.2 L'actionneur	1
		3.1.2.1 Choix de la céramique	1
		3.1.2.2 Comportement dynamique de l'actionneur	2
		3.1.3 Description géométrique du préhenseur	2
		3.1.4 Calibrage dynamique du préhenseur actif	3
	3.2	Description du banc expérimental et du prototype	4
		3.2.1 Bloc de déplacement	4
		3.2.2 Retour d'informations et informatique de pilotage	5
	3.3	Conception d'un préhenseur basé sur l'adhésion	6
		3.3.1 Synthèse du préhenseur	7
		3.3.1.1 Principes du préhenseur	7
		3.3.1.2 Dimensionnement relatif à l'adhésion	8
		3.3.2 Réalisation technologique	9
	3.4	Conclusion	1
4	Rob	otisation partielle du site expérimental 53	3
	4.1	Outils d'assistance pour des tâches automatisées	4
		4.1.1 Mise au point assistée	4
		4.1.2 Détection et définition du point de contact	5
		4.1.3 Asservissement visuel 2D	6
		4.1.4 Commande en effort	8
		4.1.5 Schéma de commande du système	1
	4.2	La télé micro-manipulation	2
		4.2.1 Description de la plate-forme expérimentale	2
		4.2.1.1 Organe maître : interface haptique <i>Brigit</i>	2
		4.2.1.2 Organe esclave : micro-manipulateur $[m\ddot{u}]MAD$	3
		4.2.1.3 Architecture globale du système	3
		4.2.2 Etudes de différents couplages	3
		4.2.2.1 Définition des facteurs d'échelle	3
		$4.2.2.2 Le ext{ couplage homothetique } \dots $	4
		4.2.2.3 Le couplage passit	5
		4.2.3 Performances comparees des deux couplages	6
		4.2.3.1 Transparence	b 0
		4.2.3.2 Stabilite	8
		4.2.4 Resultats experimentaux	υ

			4.2.4.1 Le couplage homothétique
		~ 1	4.2.4.2 Le couplage passif
	4.3	Conclu	sion
5	Expe	ériences	75
•	5.1	Stratég	ies de micro-manipulation par adhésion
		5.1.1	Saisie et dépose statiques en milieu sec
		5.1.2	Saisie et dépose statiques avec prédominance capillaire
		5.1.3	Saisie statique et dépose dynamique
		5.1.4	Saisie en vrac et dépose sélective
		5.1.5	Application à un système multi-robots
			5.1.5.1 Saisie sur un substrat à faible adhésion
			5.1.5.2 Transfert par roulement
			5153 Transfert tangentiel
			5154 Transfert par effet inertiel
	52	Une tâo	the complexe · le roulement 84
	0.2	5 2 1	Détermination du point de contact préhenseur/objet
		0.2.1	5211 Analyse vibratoire du contact
			5212 Validation expérimentale
		522	Dénose précise par roulement
		3.2.2	5221 Principe 86
			5222 Observations des différents modes de roulement/glissement 87
			5223 Dépose précise par roulement
	53	La télé	micro-manipulation
	5.5	5 3 1	Description de l'interface Virtuose 89
		532	Commande des micro-translateurs horizontaux 90
		533	Commande de l'axe vertical 91
		0.0.0	5331 Commande du nano-translateur 91
			5332 Commande du micro-translateur vertical 91
			5333 Commande associée des micro- et nano-translateurs
		534	Résultats expérimentaux
	54	Conclu	sion
	5.7	Conciu	501
6	Con	clusion	et perspectives 95
	6.1	La mic	ro-manipulation par adhésion
	6.2	La cara	ctérisation/manipulation d'objets biologiques cellulaires
	6.3	La mic	co/nano-manipulation
	6.4	Retour	haptique pour des interactions moléculaires
	6.5	Interfac	e multi-sensorielle pour la perception de l'échelle micro et nanoscopique 102
	T :		
A	Liste	e des syi	nboles 105
B	Spéc		is techniques 111
	B.1	Préhen	seur
	B.2	Action	neurs
		B.2.1	Micro-translateurs
		B.2.2	Nano-translateur
		B.2.3	Pastille piézo-électrique
	B.3	Capteu	rs
		B.3.1	Dispositif de mesure AFM
		B.3.2	Dispositif optique : microscope, caméra CCD et carte d'acquisition

B.4	L'interface haptique Brigit		113
-----	-----------------------------	--	-----

Table des figures

1.1	Rayons de courbure du ménisque et ménisque aqueux	13
1.2	Courbes de mesures pour des interactions avec un substrat avec (a) le polystyrène et (b) le	
	verre	19
1.3	Courbe de mesure pour une interaction entre la pointe et un substrat en verre dans l'eau	20
1.4	Courbes de mesures des interactions avec une goutte d'eau sur un substrat en (a) polystyrène	
	et en (b) verre.	21
1.5	Courbes de mesures pour des interactions avec (a) un substrat en or et (b) avec un substrat	
	conducteur à la masse.	22
1.6	Courbes de mesures pour des interactions avec (a) le polystyrène (b) après nettoyage du	
	substrat avec de l'eau distillée.	22
1.7	Courbes de mesures pour une interaction avec (a) le verre et (b) le cuivre initialement chargé	
	par l'application d'une différence de potentiel de 2 V entre ces deux éléments.	23
2.1	Décomposition de la tâche de manipulation	26
2.2	Etude statique de la tâche de manipulation	27
2.3	Etude dynamique de la tâche de manipulation : (a) modèle 'détaché' (b) modèle 'attaché'	28
2.4	(a) Résultats de simulation en fonction de l'accélération (b) Limite d'accélération minimum néces-	
	saire pour effectuer la dépose en fonction du rayon de l'objet manipulé et de l'inclinaison	30
2.5	Configuration du système pour l'étude de la dépose par roulement	31
2.6	Bilan des forces appliquées au système	32
2.7	Étude de l'influence de plusieurs paramètres sur l'étendue des plages de roulement et de	
	glissement de l'objet en fonction de la force normale appliquée par le préhenseur	35
2.8	Composant logiciel de simulation de la micro-manipulation par adhésion et son interface	36
0.1		20
3.1	Pointe piezoresistive et phase de metallisation	38
3.2	(a) Modele du prehenseur (b) Procedure de calibrage	39
3.3	(a) Calibrage du dispositif de mesure du préhenseur par relevé tension/position (b) Mesure	40
2.4	de <i>pull-off</i> pour un contact plan préhenseur/substrat en verre	40
3.4	Schématisation de l'ensemble céramique-pointe	41
3.5	Mesures de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser	42
	(a) Signal	42
	(b) Zoom	42
3.6	Le préhenseur actif réalisé	43
3.7	Caractérisation dynamique du préhenseur	43
	(a) Signal	43
	(b) Zoom	43
3.8	Comportement à phase non minimale de la poutre	44
3.9	Vue générale du système de micro-manipulation (a) et du préhenseur (b)	45
3.10	Configuration cinématique du dispositif expérimental	46
3.11	Architecture globale du micro-manipulateur µMAD	46

3.12	Interface graphique
3.13	Principe du préhenseur à surface de contact variable
	(a) Configuration « lames détachées »
	(b) Configuration « lames attachées »
3.14	Coupe verticale passant par deux pointes antagonistes du système en configuration « lames
	attachées »
3.15	Photos de pointes 5 à 6 µm de hauteur après gravures et oxydations
3.16	Pointes et électrodes
3.17	Photos du prototype final
4.1	Mesure du critère de mise au point avec le filtre de Sobel
4.2	Extraction de contours
	(a) Image originale
	(b) Carte de contours
4.3	Prétraitement en vue de la détection du préhenseur 56
4.4	Schéma bloc de l'asservissement visuel 2D
4.5	Positionnement et suivi de trajectoire du préhenseur dans l'image
4.6	Schéma bloc de l'asservissement en effort simple
4.7	Influence de la position du point de contact sur la réponse indicielle du système asservi en
	effort
4.8	Réponse du système asservi en effort à des échelons
4.9	Schéma bloc de l'asservissement en effort avec boucle secondaire
4.10	Mise en contact du préhenseur avec un objet par asservissement en effort avec une boucle
	secondaire
4.11	Schéma de commande du système $[m\ddot{u}]$ MAD
4.12	Modélisation de l'interface haptique <i>Brigit</i>
	(a) Organe maître : $Brigit$
	(b) Schéma bloc simplifié
	(c) Schéma bloc logique
4.13	Architecture globale du système
4.14	Principe général du couplage entre le maître et l'esclave
4.15	Principe du couplage homothétique
4.16	Principe du couplage passif
4.17	Influence du gain K_n sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur en
	mode libre
4.18	Influence du gain K_i sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur en
	mode contact
4.19	Influence du réglage des gains K_p , K_i et K_n sur la passivité du système couplé
4.20	Résultats expérimentaux ((a) Position (c) Efforts) de télé-opération par couplage homothé-
	tique (b) Détails du suivi de position en mode libre (d) Détails du suivi de position en mode
4.01	
4.21	Resultats experimentaux de tele-operation par couplage homothetique (details)
4.22	(a) (c) Resultats experimentaux de tele-operation par couplage passif (b) Suivi de position en
4.00	basse frequence (d) Suivi de position en haute frequence
4.23	Resultats experimentaux de tele-operation par couplage passif (détails)
51	Manipulation par saisie et dénose statique
52	Saisie à partir d'une goutte d'eau 76
53	Dénose du disque sur le substrat métallique
5.5 5.4	Saisie statique d'une micro-sphère
5.7	Suble surgre d'une miero sphere

Dépose dynamique d'une micro-sphère		
. 79		
. 79		
. 80		
. 80		
. 81		
. 82		
. 82		
. 82		
. 83		
. 84		
. 84		
. 84		
. 84		
. 85		
. 86		
. 87		
. 88		
. 90		
. 90		
. 90		
. 90		
. 90		
. 91		
. 92		
. 97		
. 97		
(a) Mesures expérimentales de la photo-diode pour l'échantillon biologique <i>EpH</i> et une sur-		
. 98		
. 100		
Illustration du retour haptique pour des interactions moléculaires		
•		

Introduction et problématique

Le 29 décembre 1959, le physicien Richard Feynman proposa un discours novateur pour le monde scientifique de l'époque. Cet exposé fit sensation par les perspectives de recherche qu'il définissait [Fey59]. Il invitait en effet les chercheurs à entrer dans de nouveaux champs de la physique : selon lui, la possibilité de tendre vers le « tout petit » n'admettait aucune barrière avant d'atteindre la taille atomique. Les conclusions présentées dans cette conférence sont reprises lors d'un second discours prononcé vingt ans plus tard et intitulé "Infinitesimal Machinery" [Fey93]. Ainsi, les lois fondamentales de la physique sont applicables jusqu'à des dimensions atomiques et peuvent être exploitées pour modéliser l'échelle microscopique. La différence essentielle entre les mondes macroscopique et microscopique ne réside pas dans l'application de ces modèles mais dans une balance modifiée des phénomènes mis en jeu. La problématique de la micro-manipulation est intrinsèquement liée à ce monde microscopique mais aussi à la robotique avec le thème plus général de la préhension.

1 Préhension et micro-manipulation

La manipulation d'objets est nécessaire à de nombreux procédés techniques et scientifiques. D'une manière générale, une manipulation repose sur des actions de saisie, de transfert, de positionnement, d'assemblage, ... La préhension d'objets macroscopiques se caractérise par la génération d'efforts de serrage de module proportionnel à l'accélération développée et au poids de l'objet manipulé pour la réalisation de la tâche. Ces efforts permettent de le solidariser avec le préhenseur afin de procéder à son déplacement. Le système de manipulation dans son ensemble possède des dimensions appartenant à la même échelle que celle de l'objet. Lorsque l'on considère la micro-préhension et la manipulation n'existe plus. Les déplacements mis en jeu appartiennent à une plage très large allant de la dizaine de nanomètres à une dizaine de millimètres, et peuvent être produits par des systèmes de dimensions très supérieures. Seul le préhenseur doit posséder des dimensions comparables à celles de l'objet. Les efforts mis en œuvre (de manière passive ou active) afin d'effectuer la tâche sont très supérieurs au poids de l'objet, négligeable à cette échelle. Un cadre formel pour la micro-manipulation peut ainsi être proposé pour sa définition.

La micro-manipulation peut être définie comme la manipulation d'objets d'une taille de l'ordre de $10 \sim 10^4 \,\mu m^3$ (ou ayant dans leur plus grande dimension des tailles variant entre quelques dizaines et quelques centaines de microns $10 \sim 100 \,\mu m$). Cette manipulation engendre des déplacements et des distances d'interaction micrométriques et nanométriques.

L'environnement de travail est adapté à cette problématique. Des moyens de microscopie optique ou électronique sont en effet nécessaires pour observer et percevoir les objets dans la scène. Ceux-ci imposent alors des contraintes spécifiques, par exemple d'encombrement, pour le système de micro-manipulation et ses outils de perception associés. D'autre part, certains paramètres comme le degré d'hygrométrie ou la température ont une influence majeure pour le module des efforts mis en jeu. Une manipulation dans un environnement atmosphérique impose ainsi des difficultés supplémentaires pour la résolution de la tâche.

Les applications potentielles appartiennent principalement à deux différents domaines. Le premier concerne le micro-assemblage industriel pour des petites séries. Le coût d'une machine dédiée est trop élevé pour ce simple cadre applicatif. Le second est spécifique aux problèmes liés à différents domaines transverses de recherche qui nécessitent la manipulation d'objets microscopiques (géologie, physique, micro-électronique, sciences de la vie...). Pour ces différents champs, une solution robotique et flexible pourrait représenter une source d'innovation importante.

Un système capable de manipuler des micro-objets en environnement atmosphérique et présentant des facultés d'adaptation a ainsi été l'objectif de notre recherche.

2 Analyse de la recherche en micro-manipulation

Les objets de recherche liés à la thématique générale de la micro-manipulation peuvent se décomposer selon les différentes échelles du problème [Sit01] :

- l'échelle *microscopique* : de nombreuses études se sont focalisées sur les propriétés propres de cette échelle. Les forces volumiques sont négligeables par rapport aux efforts surfaciques et de nombreuses études s'intéressent à cette balance modifiée des efforts [VvKH00, KPKK02, ZdCE⁺02] ainsi qu'aux phénomènes physiques associés aux outils de micro-préhension [AF96, Gau02, Lam04]. De la même façon, l'instrumentation nécessaire à la mesure et à l'application de micro-efforts [ZN98, FF01] et de micro-déplacements [Bre98, BDVB03] fait l'objet de nombreuses recherches.
- l'échelle *macroscopique* : des réflexions importantes sont proposées sur les outils d'assistance à la tâche. Par exemple, des problèmes spécifiques liés à l'emploi de systèmes de microscopie ont nécessité des recherches pour s'affranchir de la vision partielle ou occultée de la scène [SKMH95,SNE⁺98]. Ces outils sont ainsi conçus pour favoriser la perception inhabituelle du micro-monde et assister l'utilisateur dans la résolution de la tâche [SMT⁺03, MKW⁺04].
- l'interface entre les macro- et micro-mondes : des recherches sont menées pour résoudre des problèmes de couplage bilatéral d'un monde vers l'autre et de transfert d'échelle [AVN98]. Les facteurs d'échelles considérables en déplacement et en effort rendent complexes la définition de couplages transparents et stables. La téléopération est ainsi un thème important de cette communauté [AKH01,KKC01,Sit03].

Cette décomposition a pour but de percevoir le spectre de ce thème de recherche. Elle reflète les différents constituants d'un système de micro-manipulation qui ont guidé notre recherche : le système de préhension, l'assistance à la tâche et l'interface avec l'utilisateur.

2.1 Préhenseurs et modes opératoires associés

La prédominance des effets surfaciques sur les effets volumiques fait apparaître le micro-monde comme beaucoup plus riche en phénomènes physiques exploitables pour manipuler des micro-objets. L'effet physique utilisé conditionne le choix du composant essentiel du système, le préhenseur, ainsi que les stratégies à mettre en œuvre pour saisir et/ou déposer des objets microscopiques. Deux approches complémentaires sont exploitées.

La première repose sur une micro-manipulation *sans contact*. La maîtrise des mouvements d'un objet est effectuée sans qu'aucun contact avec un préhenseur ne soit nécessaire. Différentes techniques comme l'exploitation de la pression lumineuse, l'utilisation des forces de coulomb ou la diélectrophorèse ont été proposées. Celles-ci sont principalement dédiées à la manipulation d'objets biologiques pour s'affranchir des conditions environnementales particulières. Par contre, la méconnaissance ou la connaissance partielle de l'effort d'interaction ne permet pas d'étendre le champ de cette technologie à la caractérisation/étude d'ob-

jets individuels.

L'alternative est de réaliser une micro-manipulation avec contact. Il s'agit cette fois de techniques de manipulation nécessitant un ou plusieurs points de contact entre le système de préhension et l'objet. De nombreuses recherches se sont intéressées à cette thématique avec des approches diamétralement différentes, l'approche macroscopique ou microscopique. Le premier champ s'intéresse à des préhenseurs classiques (utilisant les forces de serrage pour saisir un objet) actionnés par différents moyens technologiques. Il existe de nombreux travaux sur ces préhenseurs, à la fois dans la communauté de la micro-robotique et dans celle des micro-systèmes. Deux approches principales peuvent être mises en avant parce qu'elles intégrent un projet générique de micro-manipulation. L'objectif du Korean Institute of Science and Technology est de proposer un préhenseur capable de mesurer des informations d'efforts et de déplacements des pinces. Leur choix s'est alors orienté vers une pince électromagnétique avec l'utilisation d'un mécanisme compliant pour contrôler le déplacement [KKS+02]. Dans la continuité de ses travaux sur les micro-pinces, le Laboratoire d'Automatique de Besançon s'est orienté vers la conception et la réalisation de micro-pinces à deux doigts de serrage [Agn03]. Le principal problème avec les préhenseurs de cette nature apparaît au moment de la dépose de l'objet. En effet, les effets d'adhésion sont prépondérants à l'échelle considérée. L'objet peut ainsi rester collé sur l'un des doigts de la pince ou subir des effets électrostatiques à distance de manière non prévisible. La reproductibilité est alors non garantie.

Au regard de la taille des objets et des particularités propres de l'échelle, l'approche microscopique s'est concentrée sur la recherche d'effets physiques pour la manipulation [AF96] :

- préhension par succion : l'exploitation de cet effet a été initialement proposée par [AF97] et [ZBW97].
 Cette technique est aujourd'hui parfaitement maitrisée. Les résultats expérimentaux montrent que les objets manipulés sont relativement grands, avec des dimensions de l'ordre de 250 µm. Cette exploitation est aussi particulièrement adaptée à la manipulation d'objets biologiques souvent peu rigides, qui se déforment pour épouser la forme de la cavité de la pipette.
- exploitation de la force capillaire : un autre phénomène physique spécifique à l'échelle microscopique semble représenter une solution pour la micro-manipulation, l'effet capillaire. Un objet peut être saisi par un préhenseur mono-digital en utilisant la force exercée par un ménisque aqueux présent à l'interface entre les deux corps. À partir de simulations dynamiques de l'évolution temporelle d'un ménisque aqueux, la conception d'un préhenseur capable d'exploiter cet effet pour saisir l'objet et de s'en affranchir pour le relâcher a été proposé par [LLD03]. De nombreuses stratégies ont été envisagées pour la relâche, comme l'utilisation de l'instabilité du ménisque, son évacuation, le changement des propriétés des paramètres capillaires, Cette solution semble représenter une voie nouvelle pour des objets de taille supérieure à 100 µm.
- utilisation des forces magnétiques : une autre voie proposée dans ce domaine est l'utilisation des forces électromagnétiques. Un système de manipulation utilisant un aimant mobile placé sous une plaque de verre a été proposé par [Gau02]. L'aimant crée un champ magnétique qui permet de mouvoir et d'orienter un pousseur qui lui-même est utilisé pour déplacer des objets microscopiques. Ces caractéristiques font de ce robot un système particulièrement adapté à la manipulation de corps biologiques.

Cette étude bibliographique sur le préhenseur et les modes de préhension montre qu'il existe un nombre important de solutions. Si la barre dimensionnelle des 100μ m est en effet franchie, les forces surfaciques induisent un nombre de difficultés supplémentaires telles qu'il n'existe aujourd'hui aucune solution générale permettant de saisir et de déposer un objet de façon reproductible et précise. Notre approche découle de cette analyse et notre démarche cherche à proposer un outil de préhension dédié à la problématique des objets microscopiques.

2.2 Autonomie et automatisation

La micro-manipulation diffère de la manipulation classique à l'échelle macroscopique pour l'autonomie de la tâche pour deux raisons essentielles [ZN00] [FXB01] :

- la balance des efforts est modifiée et les effets des forces surfaciques sont peu prévisibles et difficilement maîtrisables;
- la résolution requise en termes de positionnement et de mesure est extrêmement fine.

Il est ainsi nécessaire, pour garantir une manipulation robuste et fiable d'objets microscopiques, de doter l'ensemble d'un système de perception et de commandes évoluées. Une caractéristique commune à la plupart des systèmes de micro-manipulation est l'utilisation d'un microscope optique. Celui-ci, couplé à une caméra, fournit une vue partielle en deux dimensions de l'espace de travail. En effet, un microscope, du fait de sa faible profondeur de champ, ne permet de visualiser correctement qu'une tranche de la zone observée, les éléments de part et d'autre apparaissant flous selon l'axe vertical. Malgré cette limitation, le microscope optique peut être utilisé comme un capteur permettant de guider la manipulation, par exemple par une commande référencée vision [LKK⁺02]. Cette solution a représenté un champ d'investigation important ces dernières années, les principaux points abordés étant des problèmes classiques de vision par ordinateur, de microscopie et de commande, par exemple [MKW⁺04] :

- la mise au point automatisée (*autofocus*) sur les divers éléments du système de micro-manipulation basée sur des mesures du flou;
- les informations de profondeur qui peuvent être extraites de la focalisation ;
- la reconnaissance de forme et le suivi (*tracking*) d'objets afin de permettre la mise en place d'asservissements visuels;
- le couplage des informations visuelles avec des informations d'une autre nature, par exemple des mesures d'effort;
- l'emploi d'un microscope stéréoscopique ou d'un microscope électronique à balayage [FKK+04].

L'utilisation de la vision est particulièrement adaptée pour positionner le préhenseur au voisinage de l'objet manipulé. Cependant, la fragilité à la fois du préhenseur et des objets manipulés rend critique la phase de mise en contact du préhenseur avec l'objet, la vision atteignant alors souvent ses limites. Une commande en effort apparaît alors cruciale afin de maîtriser les forces d'impact et de contact. La plage de mesure et la résolution recherchée peuvent représenter des problèmes importants. En effet, la précision des capteurs basés sur des technologies classiques n'est souvent pas assez importante [GYN02].

Une autre solution apparaît avec l'utilisation de techniques issues de la microscopie à force atomique. Cet outil peut être utilisé comme un capteur d'effort. En effet, connaissant la raideur d'un doigt d'un préhenseur et mesurant de façon indirecte sa déflexion à partir de la réflexion d'un laser, une mesure de l'effort d'interaction peut ainsi être effectuée [ZN00]. Cette alternative est d'autant plus utilisée que la taille des objets est petite. Néanmoins, des problèmes de calibration de la raideur mécanique et d'encombrement sont au centre des difficultés pour leur exploitation.

Un nouveau problème apparaît alors au niveau de la transition entre les commandes vision/effort. Plusieurs travaux se sont intéressés à cette phase de transition [ZNV97, YN03] et l'utilisation alternative d'objectifs différents semble être une solution intéressante. Dans tous les cas, il s'agit d'une étape cruciale pour garantir de façon robuste la saisie de l'objet.

L'autonomie et l'automatisation d'une tâche de micro-manipulation nécessitent la définition de systèmes de perception adaptés et de commandes référencées capteur pour atteindre ces objectifs. De nombreux travaux se sont focalisés sur cette problématique mais l'exploitation de ces commandes n'est pour l'instant pas complète. En effet, elle est souvent disjointe de l'outil de préhénsion, de son principe actif et des stratégies de manipulation. Notre objectif est de proposer des outils d'assistance dans le prolongement direct du système de manipulation, dans une vision globale de la thématique générale de la micro-manipulation.

2.3 Interface avec l'utilisateur

La faible prédictibilité du micro-monde, ainsi que les difficultés rencontrées dans la modélisation et la calibration, limitent actuellement les performances des systèmes de micro-manipulation totalement automatisés [KKC01]. Les techniques de téléopération apparaissent appropriées pour lier les micro- et macro-mondes et permettre à un opérateur humain d'interagir directement avec l'environnement microscopique. Elles ont donné lieu à différents champs de recherche [KTTK97] :

- l'interface graphique et visuelle;
- l'aide à la tâche;
- le couplage entre le micro- et le macro-monde;
- l'interface haptique.

Les différences fondamentales de perception entre le micro- et la macro-monde ont entraîné des recherches importantes sur l'interface graphique et visuelle [HSH99]. Des études se sont concentrées sur une interface utilisateur dédiée à la problématique de la micro-manipulation ainsi que sur des rendus multi-sensoriels [ASH01, AOH00]. De la même façon, pour tenir compte des difficultés liées à la vision partielle de la scène, de nombreuses études concernent la reconstruction 3D de l'environnement, par exemple à base de techniques de réalité virtualisée [AF03]. En effet, l'utilisation de la vision pour rafraîchir une scène virtuelle reconstruite et des techniques d'immersion virtuelle permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants pour l'utilisateur dans le cadre de la télé micro-manipulation. Ces études sont aussi importantes pour les microscopes à force atomique [LXYF03] [FLW05]. En effet, le problème central de l'utilisation de ce type de système comme outil de manipulation est le manque de retour visuel si celui-ci est utilisé comme capteur d'efforts [RMA⁺01]. Des techniques de réalité augmentée sont alors utilisées pour donner à l'utilisateur le retour visuel : celles-ci sont néanmoins basées sur une modélisation physique incertaine de l'échelle rendant leur exploitation encore difficile.

Dans le couplage entre les deux mondes, de nombreuses études concernent principalement l'interface entre une microscope à force atomique et un organe haptique [GCH⁺01,Sit01]. L'idée principale est à la fois d'aider l'utilisateur dans la manipulation de micro/nano-objets en lui permettant de ressentir, via un changement d'échelle, les déplacements effectués et les efforts mesurés dans le micro-monde. L'autre propriété recherchée dans ce couplage est la mise en évidence de phénomènes assez mal perçus à l'échelle macroscopique comme les phénomènes d'attraction. Il s'agit de pouvoir aider à la compréhension et à la modélisation de ces phénomènes. Le couplage est ainsi résolu dans les différentes approches avec l'utilisation d'une commande homothétique en effort et en déplacement. Cette commande produit des résultats satisfaisants sans répondre à l'ensemble des besoins de perception.

Il n'existe aucune analyse unifiée de la télé micro-manipulation, complexifiant les comparaisons des différents couplages proposés. Une approche globale et unifiée de la problématique de la micro-manipulation, de l'outil de manipulation au couplage des mondes microscopique et macroscopique, apparaît commme un axe pertinent de recherche.

La micro-manipulation a connu un essor important ces dernières années. De nombreux thèmes de recherche ont ainsi été associés à cette thématique plus générale. Un axe central s'est initialement dégagé des recherches menées au Laboratoire de Robotique de Paris : la modélisation de la micro-manipulation est déduite des théorèmes généraux de la mécanique, montrant une prédominence différente des effets physiques. Cette vision de l'échelle microcopique a été associée à l'expérience acquise au laboratoire. En effet, la préhension au sens macroscopique du terme a longtemps été un champ d'investigation majeur. La convergence de cette hypothèse et de cette expérience a donné naissance à l'équipe micro-manipulation et à son approche microscopique de ce domaine de recherche. De nombreuses collaborations avec des chercheurs de l'ESPCI¹ (DR M. Barquins, DR C. Frétigny), de l'IEMN² (Dr L. Buchaillot), du LAB³ (Prof. N. Chaillet) et du LIST/CEA (Dr A. Micaelli) sont aussi au centre de cette analyse.

Le dessein de ce document est de proposer un panorama de l'ensemble des travaux effectués dans le domaine de la micro-manipulation au cours de ces dernières années dans notre équipe. En particulier, un fil

¹Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris

²Institut d'Electronique et de Microélectronique et de Nanotechnologie

³Laboratoire d'Automatique de Besançon

conducteur autour des différents postulats précédemments décrits est introduit pour comprendre les différents cheminements qui ont guidé à la production de trois thèses et d'une dizaine de stages dans ce domaine. Seuls les éléments novateurs et originaux sont présentés dans ce document. L'ensemble de ce mémoire est, de notre point de vue, une approche relativement complète des problèmes de la micro-manipulation en mode contact dans un environnement athmosphérique.

3 Plan du mémoire

Le premier chapitre se concentre sur une analyse physique de l'échelle microscopique. Une exploration de l'ensemble des phénomènes mis en jeu est réalisée autour des forces à distance (forces de Van der Waals, capillaires et électrostatiques) et des forces de contact. Cette volonté d'analyser précisément ces modèles (de façon non-exhaustive du point de vue des démonstrations des différentes formulations), uniquement dans le cadre de la micro-manipulation, a été un point de focalisation essentiel de notre équipe au cours de ces années. L'approche expérimentale trouve aussi son rôle dans ce premier chapitre pour affiner la connaissance physique de cette échelle. Sa lecture permet à la fois de comprendre les phénomènes mis en jeu, d'appréhender les formules théoriques associées et d'apprécier leurs propriétés dans un contexte expérimental.

Les aspects modélisation des différentes tâches et simulations forment le cœur du deuxième chapitre. La première partie se concentre sur une tâche canonique de manipulation en mode contact. Un modèle dynamique est ainsi présenté pour simuler la saisie et la relâche d'un objet adhérent. Celui-ci utilise deux sous-modèles supplétifs ainsi que des conditions géométriques de transition simplement exploitables. Des simulations permettent d'extraire des fenêtres technologiques pour la manipulation statique par adhésion et la dépose par effet inertiel. Une méthodologie pour modéliser une tâche plus complexe est ensuite retracée autour d'un exemple, la maîtrise des interactions de contact avec un objet sphérique. Les simulations de cette stratégie de roulement montrent l'importance des outils d'assistance pour le volet expérimental. Un composant logiciel entièrement dédié à la micro-manipulation par adhésion et incorporant l'ensemble des modèles présentés dans les deux premiers chapitres se présente comme un outil d'exploration pour notre thème de recherche.

Le troisième chapitre s'intéresse aux développements technologiques de notre plate-forme expérimentale, baptisée [*mü*]MAD. L'élément central de ce dispositif, le préhenseur actif, est particulièrement détaillé. La description technologique de ce préhenseur, la modélisation du dispositif de mesure, sa calibration statique en effort et dynamique pour les effets inertiels sont abordées. Ce prototype reste encore le noyau central de toutes nos manipulations. L'ensemble restant du banc expérimental (le microscope optique, le bloc de positionnement, ...) est ensuite présenté pour percevoir la complexité de l'intégration technologique du système expérimental. Enfin, une approche originale est apparue dernièrement autour d'un préhenseur bilame. Ses caractéristiques fonctionnelles sont la saisie par adhésion et son affranchissement en mode statique par modification de la surface de contact. Les éléments de dimensionnement de ce préhenseur sont exposés pour valider le concept et montrer l'intérêt de la phase d'analyse des phénomènes micro-physiques.

Cette plate-forme expérimentale a été complétée par un ensemble d'outils d'assistance. La description des éléments pertinents de ces outils fait l'objet du quatrième chapitre. L'automatisation est le premier but recherché. Elle permet de s'affranchir de phases astreignantes manuelles et d'effectuer des tâches évoluées comme la dépose par roulement. Les techniques développées concernent la gestion de la profondeur de champ, la détection, le positionnement et le suivi de trajectoire dans l'image et la mise en contact du préhenseur avec son environnement. Les différentes méthodes sont analysées dans un cadre plus général de micro-manipulation en mode contact. Le second volet recherché est l'intervention de l'utilisateur dans les différentes tâches. Le choix de la télé-opération provient d'un double objectif, faire percevoir à l'utilisateur l'échelle microscopique et définir un mode alternatif de manipulation. La deuxième partie de ce chapitre

est consacrée à cette problématique, du choix d'une interface haptique simplifiée aux différents modes de couplages. Une comparaison en terme de transparence et de stabilité des deux couplages est détaillée pour appréhender les problèmes liés à la télé-opération. Ce chapitre dépasse notre simple cadre applicatif et présente un ensemble d'outils exploitables sur une plate-forme de micro-manipulation avec une approche unifiée des solutions proposées.

Le cinquième chapitre est entièrement dédié aux différentes expérimentations. L'aspect chronologique est conservé pour percevoir l'évolution importante de notre plate-forme. Les premières manipulations en mode manuel montrent l'ensemble des stratégies définies par notre équipe au cours de ces années, de la manipulation statique à la dépose dynamique. L'application de ces stratégies est aussi proposée sur le site expérimental de l'EPFL, mettant en avant la simplicité et la modularité de cette approche. Une tâche complexe est ensuite décrite en détails, la dépose par roulement. Celle-ci intègre l'ensemble des complexités rencontrées à cette échelle et une approche originale est présentée autour des outils d'assistance et d'une modélisation dynamique du préhenseur. La dernière partie de ce chapitre se concentre sur une application de télé-opération avec une interface haptique industrielle. Les résultats sont très prometteurs et ouvrent des voies de recherche dans le domaine de la télé micro-manipulation.

Une conclusion rappelle enfin les éléments pertinents de cette recherche. Elle est complétee par de nombreuses perspectives classées selon les thèmes d'applications. La caractérisation d'objets biologiques représente une première perspective de ce travail avec l'établissement d'une nouvelle plate-forme entièrement dédiée à cet environnement particulier. Un autre thème se concentre autour de la micro/nano-manipulation. Les connexions avec cette recherche semblent plus fortes mais ce champ de recherche dépasse la simple extension de notre activité avec un saut d'échelle entraînant des complexités nouvelles. Une approche alternative est aussi apparue dans notre équipe, le retour haptique d'interactions moléculaires. Il s'agit d'appréhender les outils de la modélisation moléculaire pour des applications dans le domaine de la biologie, par exemple la simulation de l'insertion d'un ligand dans une protéine. Enfin, les différents travaux menés nous ont conduit à envisager la définition d'une interface multi-sensorielle pour la perception des échelle micro et nanoscopique. _____

Chapitre 1 Analyse physique

L'échelle physique de la micro-manipulation se trouve proche de la limite inférieure de la mécanique classique. En général, les lois de la physique newtonienne sont toujours valables et les effets quantiques négligés : l'échelle considérée se situe donc à la lisière des deux espaces classiques dont les limites sont mal connues. La différence majeure avec l'échelle macroscopique est due aux origines des forces considérées. La valeur de L^3 étant plus petite que celle de L^2 dans l'intervalle [0, 1], les forces volumiques deviennent négligeables devant les forces surfaciques pour les objets de dimensions microscopiques. Ainsi, ces forces surfaciques, dont les effets sont négligeables à l'échelle macroscopique, modifient de façon drastique la mécanique du contact et les interactions entre les différents médias. L'état d'adhérence entre deux corps microscopiques apparaît prédominant à cette échelle, engendré par les différents phénomènes d'adhésion.

De nombreuses études se sont intéressées à ces particularités [Bow88] [Isr91] [Fea95] et l'objectif de ce premier chapitre est de proposer une approche microscopique de cette problématique pour des applications de micro-manipulation. Il est en effet apparu fondamental d'affiner la connaissance théorique de cette échelle pour ce domaine applicatif particulier. Ces études ont fait l'objet de nombreuses recherches dans l'équipe micro-manipulation et principalement de l'axe central de la thèse d'Yves Rollot [Rol00]. Le choix s'est orienté pour simplifier l'analyse dans le contexte de la micro-manipulation de discriminer les différentes forces mises en jeu par le paramètre de distance interfaciale et de considérer ainsi deux classes, les forces à distance et les forces de contact. Cette connaissance théorique s'est enrichie au cours de ces années de l'expérience acquise, des discussions scientifiques avec des chercheurs dans des domaines transverses et du développement de travaux similaires dans d'autres équipes [ZKA⁺99] [Lam04]. Cette analyse a ensuite été couplée à une phase expérimentale de validation des phénomènes et des concepts. Notre objectif n'est pas métrologique au sens strict du terme mais cherche plutôt à qualifier les modèles de ces efforts en regard de notre cadre applicatif. Le dessein final est ainsi une connaissance suffisante de cette échelle pour extraire les phénomènes pertinents et les modèles adaptés à notre problèmatique.

Une description des forces surfaciques à distance puis des forces de contact est proposée dans une première partie. Une seconde partie explore les différentes mesures effectuées pour une analyse expérimentale des phénomènes et propose de décrire les particularités propres de cette échelle, extraites des mesures et de la littérature de ce domaine, pour notre domaine d'application.

1.1 Les forces surfaciques

Trois grandes classes de forces d'adhésion sont prépondérantes à l'échelle microscopique. Ces forces sont [Isr91] :

- les forces de Van der Waals, forces d'interaction entre les molécules de deux corps en présence ;

Distance d'interaction	Force
Jusqu'à l'infini	gravité
De quelques nm à 1 mm	force capillaire
> 0.3nm	force électrostatique
> 0.3nm	force de Van Der Waals
< 0.3nm	interactions moléculaires
0.1 - 0.2nm	interactions chimiques

Tableau 1.1 – Forces en présence à l'échelle microscopique

- les forces *électrostatiques*, forces de Coulomb classiques qui dépendent des charges acquises par les surfaces¹;
- les forces *capillaires*, dont l'existence est déterminée par les conditions d'humidité de l'environnement.

Une classification des forces en fonction de la distance de séparation est proposée par [Lee91] et est presentée dans la table 1.1. D'une manière générale, l'adhésion entre solides implique tous les phénomènes de liaisons chimiques qui contribuent à la cohésion des solides comme les liaisons hydrogènes, métalliques, covalentes ou ioniques. Bien que l'énergie de ces liaisons ne soit pas négligeable, leurs effets ne sont pas considérés [Kru67]. En effet, en dehors de lieux extrêmement contraints (ultra-vide), les liaisons chimiques à la surface des objets ont tendance à être saturées par des substances contaminantes (oxydation, etc.). Elles ne peuvent alors plus créer de liaisons lorsque les corps entrent en contact. Ainsi, les forces considérées sont celles mentionnées précédemment, et utilisées dans quelques travaux de références [Bow88], [Hec90], [Fea95].

1.1.1 Les forces de Van der Waals

En toute généralité, le potentiel d'interaction moléculaire w est obtenu par sommation de toutes les contributions attractives et répulsives. Sa forme générale en fonction de la distance d'interaction r entre les corps considérés est :

$$w(r) = \frac{A}{r^n} - \frac{B}{r^m} \tag{1.1}$$

avec n et m deux nombres entiers. Le premier terme représente la partie répulsive de l'interaction alors que le second correspond à la partie attractive. La forme la plus connue de ce potentiel est celle de Lennard-Jones [FLW05] :

$$w(r) = 4\varepsilon \left\{ \left(\frac{\xi_0}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\xi_0}{r}\right)^6 \right\}$$
(1.2)

avec ε la profondeur du potentiel à son minimum et ξ_0 la distance interatomique d'équilibre. Ainsi, à l'échelle de quelques angströms, il apparaît une force de répulsion non considérée dans ce document. Les forces attractives sont principalement composées des forces de Van der Waals. Ainsi, pour deux molécules polaires interagissant dans le vide, le potentiel d'interaction s'exprime par [RD01] :

$$w(r) = -\frac{C_{\rm i} + C_{\rm o} + C_{\rm d}}{r^6}$$
(1.3)

où les termes C_i , C_o et C_d représentent respectivement les contributions des phénomènes d'induction, d'orientation et de dispersion. Ce potentiel d'interaction est plus généralement noté² :

¹Il est à noter que, les dimensions réduites des objets considérés impliquant de faibles charges surfaciques, les phénomènes de triboélectrification ne sont pas négligeables.

²Les effets retardés ne sont pas considérés dans cette analyse.

$$w(r) = -\frac{C_{\rm vdw}}{r^6} = -\frac{C}{r^6}.$$
(1.4)

L'énergie d'interaction entre une molécule et une surface composée des mêmes molécules sera ainsi la somme des interactions entre la molécule et chaque molécule du second corps. Pour des surfaces conventionnelles et des hypothèses données³ (par exemple, la distance de séparation est très petite devant le rayon de l'objet), il est possible d'intégrer ce potentiel d'interaction et de déterminer sa formulation pour différentes géométries. Un résumé de ces différents potentiels est proposé dans la table 1.2.

Géométrie	Potentiel d'interaction W		
plans infinis parallèles	$-\frac{A}{12\pi D^2}$	avec D la distance de séparation	
sphère/plan infini	$-\frac{AR}{6D}$	avec $\begin{cases} D & \text{la distance de séparation} \\ R & \text{le rayon de la sphère} \end{cases}$	
sphère/sphère	$-\frac{A}{6D}\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$	avec $\begin{cases} D & \text{la distance de séparation} \\ R_1 & \text{le rayon de la sphère 1} \\ R_2 & \text{le rayon de la sphère 2} \end{cases}$	
cylindres parallèles	$-\frac{AL}{12\sqrt{2D^3}}\sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}$	avec $\begin{cases} D & \text{la distance de séparation} \\ L & \text{la longueur des cylindres} \\ R_1 & \text{le rayon du cylindre 1} \\ R_2 & \text{le rayon du cylindre 2} \end{cases}$	

Tableau 1.2 – Potentiels d'interaction pour différentes géométries

Les forces de VdW produites entre surfaces dérivent de l'expression de ce potentiel et s'expriment par :

$$F(D) = -\frac{dW(D)}{dD}$$
(1.5)

avec *D* la distance de contact. Quand la géométrie devient plus complexe, l'intégration ne peut plus être effectuée analytiquement [FXB01]. Des méthodes d'intégration numérique fondées par exemple sur la méthode de Gauss [SZK04] ou l'identité de Green [LD03] doivent être utilisées pour étudier l'influence des forces de VdW.

La constante A qui apparaît dans ces potentiels est appelée **constante de Hamaker**. Elle est essentielle dans le calcul des efforts de VdW entre surfaces. Cette constante dépend des matériaux et des conditions expérimentales. Elle est généralement obtenue expérimentalement, mais peut également être estimée. Deux théories existent à ce sujet. Hamaker [Ham37] proposait de l'exprimer, pour deux solides, sous la forme :

$$A_{12} = \pi^2 C \rho_1 \rho_2 \tag{1.6}$$

où ρ_1 et ρ_2 représentent le nombre d'atomes par unité de volume des corps 1 et 2 et C est le coefficient dans le potentiel atome-atome [Isr91]. Cette méthode fournit de bonnes approximations de la constante lors d'interactions entre matériaux faiblement polaires, puisqu'elle ne tient compte que de l'effet de dispersion et est obtenue en supposant une additivité des forces de dispersion. Dans le cas contraire, elle sous-estime sa valeur.

Lifshitz [Lif56] a développé une théorie plus réaliste qui intègre l'influence des atomes voisins à la paire considérée. Par cette théorie, les effets "retardés", dûs aux forces de dispersion, sont moins sensibles. L'estimation de la constante de Hamaker est cependant plus complexe. Elle peut s'exprimer, pour des milieux 1 et

³Pour comprendre plus en détails le mode d'intégration et ses hypothèses, il est possible de se référer à [FXB99] et [LLD03].

2 interagissant au travers d'un milieu 3 (1-3-2), sous la forme :

$$A_{132} \approx \frac{3}{4} kT \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}\right) \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}\right) + \frac{3h\nu_e}{8\sqrt{2}} \frac{(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{\sqrt{(n_1^2 + n_3^2)}\sqrt{(n_2^2 + n_3^2)}[\sqrt{(n_1^2 + n_3^2)} + \sqrt{(n_2^2 + n_3^2)}]}$$
(1.7)

avec :

- k constante de Boltzmann $(1, 381 \times 10^{-23} J/^{o} K)$; h constante de Planck ;T température (^{o}K) ;

- ν_e principale fréquence électronique d'absorption (typiquement de l'ordre de $3 \times 10^{15} s^{-1}$);

 $-\varepsilon_i$ permittivité diélectrique ; n_i indice de réfraction du milieu *i*.

Cette expression complexe se simplifie lors d'interactions plus simples (par exemple pour des interactions de type 1-3-1, 1-2 ou 1-1). Dans certains cas, il est possible d'obtenir des valeurs approchées des constantes de Hamaker en utilisant des relations de combinaison [McL64]. Ainsi, pour deux matériaux 1 et 2 interagissant au travers du vide, il est possible d'obtenir A_{12} en fonction des constantes A_{ii} de chaque matériau :

$$A_{12} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}} \tag{1.8}$$

De même, la constante A_{132} , pour deux matériaux 1 et 2 interagissant au travers d'un troisième 3, est approchée par :

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

Ces relations de combinaison donnent de très bonnes approximations de A, sauf dans le cas où les milieux sont fortement polaires (avec une valeur de ε élevé), telle que l'eau. Dans ces conditions, l'expression (1.7) donne un résultat plus proche de la valeur expérimentale.

Quelques travaux comme [ZN98] expriment les forces de VdW à l'aide d'une constante dite de Lifshitz-Van der Waals notée H. Elle s'exprime en électron-Volt (eV) et peut être simplement reliée à la constante de Hamaker. Par exemple, la force de VdW liant une sphère de rayon R à une surface plane s'exprime par [Lee91] [Cha99] :

$$F_{VdW} = \frac{HR}{8\pi D^2}$$
 avec $H = \frac{4\pi A}{3}$

1.1.2 Les forces capillaires

Les forces capillaires apparaissent selon deux modes : soit une goutte de liquide est posée entre deux solides en contact, soit un pont capillaire apparaît à partir de l'humidité ambiante. En effet, lorsque l'environnement dans lequel s'effectue la manipulation possède un degré d'hygrométrie supérieur à 5%, un phénomène de condensation de la vapeur apparaît. Un film aqueux prend place sur les surfaces des matériaux. Seule cette dernière hypothèse est considérée dans notre réflexion. Lorsque deux surfaces sont mises en contact, deux effets sont à considérer :

- le changement des constantes de Hamaker des interfaces [OSR75],
- l'apparition d'une nouvelle force d'adhésion, nommée force capillaire [AP63].

La pression de Laplace qui existe au sein de ce ménisque est à l'origine de cette force [Mas93]. Cette pression dépend de la tension de surface du liquide γ_l , et des rayons de courbure du ménisque, r_1 et r_2 (figure 1.1).

Les rayons de courbure sont reliés à l'humidité relative p/p_{sat} par l'équation de Kelvin [Ada90] :

$$\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)^{-1} = \frac{\gamma_l V}{kT \ln(p/p_{sat})}$$

où γ_l représente la tension de surface de l'eau et V son volume molaire. En considérant un ménisque torique concave ($r_1 = r_2 = r_{menisc}$), il est possible de déterminer ce rayon. [Isr91] en donne quelques valeurs pour différents rapports p/p_{sat} . Par exemple, pour $p/p_{sat} = 0, 9$ et $p/p_{sat} = 0, 1$, les rayons ont respectivement pour valeur $r \approx 10 nm$ et $r \approx 0, 5 nm$.



Figure 1.1 – Rayons de courbure du ménisque et ménisque aqueux

A partir de certaines hypothèses⁴ (volume constant, rayons égaux), l'expression de la force capillaire pour une interaction plan-sphère peut alors être définie par [OSR75] (voir figure 1.1) :

$$F_{cap} = \frac{4\pi R \gamma_l \cos \theta}{(1+D/d)} \begin{cases} \theta \text{ angle de contact du liquide sur la surface} \\ d \text{ hauteur d'immersion} \\ D \text{ distance du contact} \quad R \text{ rayon de l'objet} \end{cases}$$
(1.9)

Cette force est maximale au contact et l'expression classique la plus utilisée est alors :

$$F_{cap} = 4\pi R \gamma_l \cos\theta \tag{1.10}$$

1.1.3 Les forces électrostatiques

Les forces électrostatiques apparaissent selon deux cas précis [Hay91a] :

- 1. par l'interaction de Coulomb, lorsque des particules chargées sont en présence,
- 2. par interaction de Coulomb dûe à l'apparition de charges générées par triboélectrification.

Dans le cas d'une particule chargée interagissant avec une surface chargée, la force d'interaction s'exprime par la loi de Coulomb. La surface crée un champ $E = \sigma/(2\epsilon\epsilon_0)$, où σ est la densité de charge surfacique, ϵ la densité diélectrique du milieu et ϵ_0 la permittivité de l'air. La force électrostatique, indépendante de la distance de séparation, s'exprime par :

$$F = qE \tag{1.11}$$

avec q la charge électrique. Pour des interactions entre particules chargées, la force d'interaction est égale à :

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon D^2} \tag{1.12}$$

avec D la distance séparant la charge et la surface. [Hay91b] exprime la charge maximale admissible par une particule en fonction de son rayon R par :

$$\sigma = 30 \times (100R)^{-0.3} \ \mu C.m^{-2} \tag{1.13}$$

Lorsqu'une sphère de rayon R avec une charge uniforme q approche une surface non chargée, la force d'interaction s'exprime, en utilisant la méthode de la particule image, par [RD01] :

$$F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{(R+D)^2}$$
(1.14)

Il existe différentes interactions selon la nature, conducteur ou isolant, des matériaux. Le contact le plus maîtrisé au niveau de sa formulation est l'interaction conducteur/conducteur. D'autres élements peuvent être

⁴Une étude de l'ensemble des hypothèses et des formulations dérivées est proposée dans [Lam04].

trouvés dans la thèse d'Yves Rollot [Rol00]. Pour cette classe de contact, le transfert de charges entre la particule et la surface réduit la force d'adhésion [Bow88]. Ainsi, quand deux matériaux conducteurs différents sont mis en contact, un phénomène de transfert d'électrons se produit si la distance de séparation est faible. Ce transfert amène les matériaux dans un équilibre thermodynamique qui tend à égaliser leurs potentiels électrochimiques. La différence de potentiel entre les surfaces des matériaux 1 et 2, nommée *potentiel de contact* s'écrit sous la forme [Lee94] :

$$V_c = \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{e}$$
(1.15)

avec ϕ_1 et ϕ_2 les fonctions de travail des deux surfaces. La charge acquise par chacun des matériaux est déterminée par la condition qu'à l'équilibre, les niveaux de Fermi des deux matériaux viennent en coïncidence. Donc, après séparation des deux matériaux, la charge q de chaque matériau peut être approchée par [LRI80, Har67] :

$$q = C_o V_c \tag{1.16}$$

avec C_0 la capacité à la distance z_0 . La charge q est généralement de l'ordre de $q \approx 10^{-13}C$. Cette capacité est égale à :

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A_{ire}}{z_0} \tag{1.17}$$

avec A_{ire} l'aire de contact. z_0 représente la distance de séparation à partir de laquelle il n'existe plus de transfert d'électrons entre les surfaces. La charge acquise après séparation est donc celle correspondant à l'équilibre thermodynamique à la distance z_0 . Les expériences menées par Lowell et Harper [LA75, Har67] prouvent que cette valeur maximise la charge acquise par les métaux. Une valeur plus proche de la réalité est obtenue en prenant pour z_0 la moyenne des rugosités des deux surfaces. Ces données n'étant pas particulièrement évidentes à déterminer, une valeur moyenne de z_0 est utilisée soit $z_0 = 100 nm$ [LA75].

1.2 Les forces de contact

Lorsqu'un objet est en contact avec un substrat, ses caractéristiques intrinsèques doivent être connues pour estimer la force nécessaire, appelée force de *pull-off*, pour détacher l'objet du contact. De la même façon, la friction microscopique joue un rôle prépondérant pour les stratégies futures de micro-manipulation.

1.2.1 Les théories de la mécanique du contact

Cette partie se consacre à l'étude du contact entre une sphère de rayon R exerçant une force de module F sur une surface plane. Il existe différents modèles permettant de déduire la hauteur d'écrasement δ et le rayon de l'aire de contact a.

1.2.1.1 Le modèle de Hertz

Le modèle le plus ancien est le modèle de Hertz. Il considère un contact élastique en l'absence d'adhésion. Sous l'effet de la force normale F, les paramètres du contact sont donnés par les relations suivantes :

$$a^{3} = \frac{RF}{K}$$
 avec $\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \nu_{1}^{2}}{E_{1}} + \frac{1 - \nu_{2}^{2}}{E_{2}} \right)$ (1.18)

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{F}{Ka} \tag{1.19}$$

où K est le module de Young effectif pour le couple de matériaux, E_1 et E_2 les modules de Young des deux corps et ν_1 et ν_2 les coefficients de Poisson. Ce modèle n'est toutefois pas adapté à la description des déformations à l'échelle microscopique puisqu'il n'intègre aucun effet d'adhésion. Il a néanmoins servi de guide pour l'élaboration des modèles postérieurs.

1.2.1.2 Le modèle JKR

En 1971, Johnson, Kendall et Roberts ont proposé la théorie JKR [JKR71] qui exprime les paramètres du contact par :

$$a^{3} = \frac{R}{K} \left(F + 3\pi RW + \sqrt{6\pi RWF + (3\pi WR)^{2}} \right)$$
(1.20)

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi Wa}{3K}} \tag{1.21}$$

Ces deux relations font clairement apparaître l'influence de l'adhésion au travers du travail d'adhésion W entre les deux corps. Lorsque ce dernier est nul, ce modèle coïncide avec la théorie de Hertz. La surface de contact engendre des efforts d'adhésion qu'il est nécessaire de vaincre pour séparer les deux objets en contact. Toujours d'après cette théorie, il est nécessaire d'appliquer dans ce but une charge P appelée force de décollement, ou *pull-off*, donnée par :

$$P = \frac{3}{2}\pi R W \tag{1.22}$$

La théorie JKR s'applique particulièrement pour les fortes énergies d'adhésion, les matériaux souples ainsi que les grands rayons de courbure. Néanmoins, cette méthode sous-estime la charge en surface et présente cependant, d'un point de vue théorique, une anomalie, puisqu'elle prévoit une tension infinie au bord de la zone de contact.

1.2.1.3 Le modèle DMT

En 1975, Derjaguin, Muller et Toporov ont proposé une théorie à mi-chemin entre les deux précédentes, la théorie DMT [DMT75] pour éviter cette tension infinie, en considérant une déformation Hertzienne de la zone de contact et une adhésion due aux forces de surface agissant en dehors de cette dernière. Le rayon de contact est alors donné par :

$$a^3 = \frac{R}{K} \left(F + 2\pi WR \right) \tag{1.23}$$

Sous charge nulle, ce rayon vaut :

$$a_0^3 = \frac{2\pi W R^2}{K}$$
(1.24)

Cette théorie prévoit qu'il est nécessaire de fournir une force P pour séparer les solides exprimée par :

$$P = 2\pi R W \tag{1.25}$$

Ce modèle s'applique surtout pour de faibles énergies d'adhésion ainsi que pour de faibles rayons de courbures. Néanmoins, cette théorie sous-estime la valeur du rayon de contact, du fait de la considération d'une géométrie hertzienne.

1.2.1.4 Le modèle Dugdale

[Tab81] a montré que les deux modélisations sont deux cas limites d'un modèle plus large. La transition entre les modèles DMT et JKR a été étudiée analytiquement par [Mau92]. Un paramètre λ appelé *paramètre d'élasticité* est introduit :

$$\lambda = 2\sigma_0 \left(\frac{R}{\pi W K^2}\right)^{1/3} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = \frac{W}{h} \text{ et } h \approx 1\text{ \AA}$$
(1.26)

Il est à noter qu'un rapport pertinent apparaît pour qualifier à la fois l'adhésion et la rigidité du solide. Il est égal à [Fré03] :

$$r = \frac{W}{E} \tag{1.27}$$

La force de pull-off s'écrit alors :

$$P = 2\sigma_0 a^2 \left(m^2 \arctan \sqrt{m^2 - 1} + \sqrt{m^2 - 1} \right)$$
(1.28)

Les paramètres du contact, a et δ , ainsi que le coefficient m sont déterminés par la résolution du système suivant de trois équations à trois inconnues :

$$\frac{\lambda a^2}{2} \left(\frac{K}{\pi W R^2}\right)^{\frac{2}{3}} \left((m^2 - 2) \arctan \sqrt{m^2 - 1} + \sqrt{m^2 - 1}\right) + \frac{4\lambda^2 a}{3} \left(\frac{K}{\pi W R^2}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\sqrt{m^2 - 1} \arctan \sqrt{m^2 - 1} - m + 1\right) = 1$$

$$F = \frac{Ka^3}{R} - \lambda a^2 \left(\frac{K}{\pi W R^2}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\sqrt{m^2 - 1} + m^2 \arctan\sqrt{m^2 - 1}\right)$$
(1.29)

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \frac{4\lambda a}{3} \left(\frac{\pi W}{KR}\right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{m^2 - 1}$$
(1.30)

Ce système se révèle assez délicat à résoudre [Pie00]. Une formulation généralisée et simplifiée de ces équations a ainsi été donnée [COS99]. Elle exprime la force de *pull-off* et le rayon de contact par :

$$P = \frac{1}{4} \left(7 - \frac{4,04\lambda^{\frac{1}{4}} - 1}{4,04\lambda^{\frac{1}{4}} + 1} \right) \pi W R$$
(1.31)

$$a = a_0 \left(\frac{\alpha + \sqrt{1 + F/P}}{1 + \alpha}\right)^{2/3} \tag{1.32}$$

avec $a_0 = \left(1, 54+0, 279 \frac{2,28\lambda^{\frac{1}{3}}-1}{2,28\lambda^{\frac{1}{3}}+1}\right) \left(\frac{\pi W R^2}{K}\right)^{\frac{1}{3}}$ et $\lambda(\alpha) = -0,924 \ln(1-1,02\alpha).$

Ces équations empiriques constituent une solution plus pratique que la solution de Maugis avec moins de 1% d'erreur et pourront ainsi être exploitées dans des modèles de micro-manipulation. Les différents choix de modèles peuvent alors être résumés sur le tableau synthétique 1.3.

Modèles	Hypothèses	Cas applicables
Hertz	Contact élastique sans adhésion	
JKR	Déformation due à l'adhésion	Forte énergie d'adhésion, matériau souple
$\lambda > 5$		et grand rayon de courbure
DMT	Déformation Hertzienne du contact	Faible énergie d'adhésion, matériau rigide
$\lambda < 0.1$	+ adhésion	et faible rayon de courbure
Dugdale	La force d'adhésion est une force attractive	Transition entre les
$0.1 < \lambda < 5$	en dehors de la zone de contact	modèles JKR et DMT

Tableau 1.3 – Les modèles de contact et les hypothèses associées

Ces formules font apparaître l'énergie de surface et le travail d'adhésion qui sont reliés par les équations [Isr91] :

$$W_{ij} \approx 2\sqrt{\gamma_i \gamma_j}$$
 (1.33)

$$W_{ikj} = W_{ii} + W_{jj} - W_{ik} - W_{jk} = \gamma_{ik} + \gamma_{jk} - \gamma_{ij}$$
(1.34)

1.2.2 Transition entre l'énergie de surface et la constante de Hamaker

L'énergie d'interaction de Van der Waals entre deux plans parallèles, en fonction de la distance D de séparation, s'écrit [DMT75] :

$$W_p(D) = -\frac{A}{12\pi D^2}$$
(1.35)

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

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

Or, si l'énergie de surface vaut la moitié de l'énergie nécessaire pour écarter deux milieux du contact à l'infini, il est possible de déduire :

$$\Delta W = -W_p(D_0) = 2\gamma \Rightarrow \gamma = \frac{A}{24\pi D_0^2}$$
(1.36)

Cette équation fournit un moyen de relier l'énergie de surface à la constante de Hamaker et vice versa. Il reste alors à déterminer la valeur de D_0 . A première vue, il paraît judicieux de prendre la distance moyenne entre les atomes, 0.4 nm. Néanmoins, les expériences ont démontré que ce choix sous-estime largement γ . La raison principale de cette erreur est que l'expression de $W_p(D)$ est obtenue par une approche de milieu continu, tandis qu'à la distance de contact, de même ordre de grandeur que les dimensions moléculaires, une approche quantique est plus appropriée.

Il suffit alors d'effectuer une "correction" de D_0 en le divisant par un coefficient de correction, déterminé empiriquement, égal à 2.5, amenant à remplacer D_0 par 0.165 nm [Isr91]. Le choix de cette valeur permet la bonne corrélation entre les valeurs théoriques et expérimentales de γ et A ainsi qu'une estimation de la force de Van der Waals au contact [SF03] :

$$\gamma = \frac{A}{24\pi (0, 165\ 10^{-9})^2} \tag{1.37}$$

1.2.3 Description simplifiée de la friction microscopique

La friction apparaît également comme un phénomène physique important lors de la micro-manipulation. A l'échelle macroscopique, la friction donne naissance à une force de frottement f qui s'oppose au mouvement. Son expression, selon un modèle classique et coulombien, est de la forme pour un contact glissant :

$$f = \mu F_{\rm N} \tag{1.38}$$

où μ est le coefficient de friction et $F_{\rm N}$ la force normale appliquée.

A l'échelle microscopique, il est important de connaître l'implication des phénomènes de friction entre des surfaces en contact statique ou glissant en présence ou non de lubrifiant. [Tab81] dresse un état des connaissances des processus de friction à l'échelle considérée, en absence de lubrification. Il note trois points critiques :

- 1. Le premier concerne la notion de surface de contact réelle, qui dépend de la topographie des surfaces et des caractéristiques des matériaux en contact.
- 2. L'action des liaisons interfaciales, comme les forces de Van der Waals, ou les liaisons métalliques (par échanges d'électrons) augmentent localement le coefficient de frottement μ jusqu'à des valeurs élevées (plusieurs fois l'unité). Cet effet est toutefois compensé par les phénomènes d'oxydation qui donnent naissance à des films de surface, diminuant ainsi considérablement ce coefficient de frottement ($\mu \approx 0, 1$).

3. Les déformations au cours du glissement créent un labourage des surfaces qui augmentent le coefficient de frottement.

Il apparaît donc clairement que l'action des forces d'adhésion et la présence ou non de lubrifiant sont des facteurs prépondérants pour la quantification des efforts de friction. De nombreuses mesures effectuées par AFM concernent les propriétés frictionnelles des différents matériaux. Ces études conduisent à la caractérisation de ces propriétés par la mesure, soit de la contrainte de cisaillement τ , soit du coefficient de friction μ . La faible dimension des surfaces favorise a priori un contact mono-aspérité, c'est à dire que la force de friction f est proportionnelle au rayon de l'aire de contact a. Ainsi la force de frottement s'écrit [VvKH00] :

$$f = \tau \pi a^2. \tag{1.39}$$

L'aire de contact peut être déduite des théories précédentes de type JKR, Dugdale ou DMT. Une estimation de la force de friction peut ainsi être effectuée.

L'approche macroscopique peut aussi être appliquée à ces forces d'adhésion pour déterminer algébriquement la force de frottement. En effet, elles peuvent être considérées comme des forces extérieures puisque ce sont des forces à distance qui caractérisent l'influence d'une surface sur l'autre. Dans ce cadre, cette force de frottement s'exprime par [AI97] :

$$f = \mu \left(F_{\text{adh}} + F_{\text{N}} \right) \tag{1.40}$$

avec μ le coefficient de frottement. Cette expression est également vraie pour $F_N < 0$ [SG72].

1.2.4 Quelques paramètres pertinents

Dans l'ensemble de ces études sur les forces de contact, quelques paramètres modifient les conditions du contact. Ces paramètres sont par exemple :

- la rugosité des surfaces de contact,
- le temps de contact et son influence sur la force de pull-off,
- la cinétique du décollement,
- l'oxydation des surfaces de contact.

Par exemple pour la rugosité, [AF96] relate une série d'expériences menées dans le cadre de l'élaboration d'un micro-préhenseur par une augmentation de la rugosité en utilisant une surface composée de petites pyramides. Si D est la distance séparant une sphère "idéalement lisse" et une surface de rugosité b, la force de VdW s'exprime par :

$$F_{VdWb} = \left(\frac{D}{D+\frac{b}{2}}\right)^2 F_{VdW} \tag{1.41}$$

où F_{VdW} est la force de VdW dans le cas idéal. Les résultats expérimentaux obtenus par centrifugation prouvent que la réduction des forces d'adhésion est effective. De nombreux autres modèles existent comme [VvKH00] [LD03] et montrent la rugosité comme un paramètre pertinent pour diminuer l'adhésion.

Des études montrent l'influence du temps de contact entre un outil et un objet microscopique sur l'adhésion dans un environnement confiné [SMS99]. Des recherches complémentaires plus récentes soulignent ce paramètre comme un indice de variation importante pour la force de *pull-off* [WZ04].

Quelques recherches, principalement dans le domaine de la tribologie, ont aussi été consacrées à la cinétique de l'adhérence [RVB98] [BSM97]. Les investigations ont été menées en utilisant des cylindres rigides de quelques millimètres de diamètre mis en contact avec des surfaces élastiques en élastomère. Les cylindres étaient préalablement pressés contre la surface élastique. Une charge négative était ensuite appliquée sur le cylindre, et l'évolution de l'aire de contact observée. La remarque principale est que la diminution de cette surface n'est pas linéaire. Si cette évolution est décrite par la vitesse de propagation de la fissure à l'interface, une diminution de la vitesse est visible jusqu'à un minimum, puis une augmentation apparaît jusqu'a la rupture du contact. Ces observations macroscopiques ne semblent pourtant pas avoir d'incidence sur la valeur de l'effort de *pull-off*.

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de détailler l'ensemble des recherches menées dans ces domaines mais de montrer qu'il est pertinent de garder en mémoire certains paramétres qui sont souvent ignorés. Ils sont néanmoins essentiels pour une observation fine des phénomènes à cette échelle et peuvent expliquer certains comportements même si leur modélisation, trop complexe et mal maîtrisée, n'est pas prise en compte dans cette synthèse.

1.3 Analyse expérimentale des forces pour la micro-manipulation

L'une des difficultés majeures rencontrées par ces différentes modèles est leur validation et leur limite d'utilisation. A partir de la définition de leur formulation analytique, seule l'approche expérimentale pouvait qualifier leur conformité. L'action spécifique AMOS, dont sont extraits partiellement quelques résultats majeurs, avait pour but de vérifier la validité de ces modélisations. Pour répondre à cette volonté, nous avons utilisé un microscope à force atomique (système AMIS du Laboratoire d'Automatique de Besançon) dans l'esprit de comprendre certains phénomènes inhérents à cette échelle [RRC05b]. Quelques propriétés essentielles sont présentées dans la suite de ce document ⁵

1.3.1 Les forces de *pull-off* et les forces de Van der Waals

La première étude concerne des courbes de mesure de la force de Van der Waals (attraction en phase d'approche de la pointe d'AFM) et de la force de *pull-off* (force de décollement lors du retrait de la pointe d'AFM). Les deux premières expérimentations proposées sont respectivement effectuées avec un substrat en polystyrène et un substrat en verre.



Figure 1.2 – Courbes de mesures pour des interactions avec un substrat avec (a) le polystyrène et (b) le verre.

A partir de ces courbes (figure 1.2)⁶, il est possible d'en déduire une mesure des forces de *pull-off* pour ces deux interactions (distances numérotées 1 sur ces figures). L'utilisation des équations (1.25), (1.22) et (1.28)

⁵Les mesures décrites dans ce document permettent de qualifier certains modèles sans études approfondies au niveau métrologique, proposées par de nombreux chercheurs du thème de recherche de la microscopie à champ proche ambiant. Les mesures proposées sont néanmoins reproductibles.

⁶Le système de mesure est composé de deux unités de positionnement, un tube piézoélectrique déplaçant la sonde AFM avec une résolution nanométrique (déplacement initial flêché de la gauche vers la droite sur les courbes) et une plate-forme de positionnement du substrat avec une résolution de 100 nm (déplacement flêché de la droite vers la gauche sur les courbes).

permet d'obtenir des résultats très satisfaisants pour obtenir une valeur approchée de cette force :

- interaction silicium-polystyrène : $P^{\text{mesurée}} = 26, 2 \ nN$ $P^{\text{théorique}} = 28, 2 \ nN$,
- interaction silicium-verre : $P^{\text{mesurée}} = 34,7 \ nN$ $P^{\text{théorique}} = 39,4 \ nN$.

Les théories surfaciques proposées permettent d'obtenir des valeurs très proches de la réalité. La force de *pull-off* peut donc être estimée de façon très satisfaisante dans un environnement de laboratoire non contrôlé (température, humidité, etc.).

Les forces à distances peuvent également être estimées à partir des courbes de la figure 1.2 (distance numérotée 2 sur la figure). L'attraction est due au fait que le gradient des forces à distance est supérieur à la raideur du levier utilisé. A cette échelle, de nombreuses études se sont intéressées à vérifier les forces en présence [VvKH00] [OIO01]. Une approximation usuelle considère cette interaction comme une interaction simple de Van der Waals. Les modèles peuvent être utilisées pour déterminer la distance du saut notée D_s et la distance d'équilibre D_e . Il faut alors résoudre simultanément le système d'équations pour obtenir une valeur approchée de la distance du saut de contact :

$$F = F_{afm} + F_{vdw} = k(D_s - D_e) - \frac{AR}{6D_e^2} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial D_e} = -k + \frac{AR}{3D_e^3} = 0$$

$$\} \Longrightarrow D_s = \frac{3}{2}D_e = \frac{3}{2}\left(\frac{AR}{3k}\right)^{\frac{1}{3}}$$
 (1.42)

Des écarts importants entre les mesures et l'estimation théoriques apparaissent pour la distance du saut de contact (la valeur théorique est environ le double de la valeur mesurée [RRC05a]). Ils sont dus à la difficulté de déterminer précisément les différents phénomènes à l'origine des interactions [Sit04]. Cette estimation semble néanmoins donner une « valeur réaliste » pour pouvoir estimer la force de Van der Waals.

Une remarque importante apparaît avec la portée des forces de Van der Waals qui est de l'ordre, pour toutes les expérimentations effectuées, **d'une centaine de nanomètres** (distance numérotée 3 sur la figure 1.2). Cette distance semble donc être relativement faible par rapport à la taille microscopque des objets.

Des mesures complémentaires ont été effectuées dans l'eau pour pouvoir estimer l'influence de l'environnement. Il s'agit alors d'étudier une interaction avec le verre en étant complètement immergé dans un environnement aqueux.



Figure 1.3 – Courbe de mesure pour une interaction entre la pointe et un substrat en verre dans l'eau

La force de *pull-off* est ainsi égale à (distance numérotée 1 sur la figure 1.3) :

- interaction silicium-eau-verre : $P^{\text{mesurée}} = 5,5 \ nN$ $P^{\text{théorique}} = 8,1 \ nN$

L'estimation est donnée avec une faible précision. De plus, il est à noter que son module est fortement diminué. Cet environnement aqueux peut représenter une solution intéressante pour s'affranchir de ces effets [GBC05]. La force de Van der Waals est tellement modifiée que son interaction n'est presque plus perceptible par notre système. Son influence dans l'eau semble donc négligeable.

1.3.2 Les forces capillaires

Pour la micro-manipulation, les forces capillaires peuvent représenter un paramètre clef. Deux interactions sont présentées pour comprendre ce phénomène en positionnant une goutte d'eau sur un substrat en polystyrène puis en verre et en approchant la pointe AFM de cette goutte.



Figure 1.4 – Courbes de mesures des interactions avec une goutte d'eau sur un substrat en (a) polystyrène et en (b) verre.

La force capillaire est dépendante de l'inverse de la distance de séparation au contact de la goutte (relation (1.9)). Les forces théoriques peuvent ainsi être calculées à partir de la relation (1.9) et sont comparées aux forces mesurées :

- interaction silicium-eau-polystyrène : $F^{\text{mesurée}} = 71 \ nN$ $F^{\text{théorique}} = 73, 3 \ nN$,

- interaction silicium-eau-verre : $F^{\text{mesurée}} = 35,9 \ nN$ $F^{\text{théorique}} = 42,8 \ nN$.

Les modèles capillaires semblent donc représenter de façon convenable l'interaction capillaire. Des remarques importantes peuvent être formulées :

- lorsqu'elles existent, les forces capillaires sont les plus importantes (leur module est le plus important),
- elles existent toujours dans un environnement de type laboratoire, par exemple via une couche d'oxydation de l'ordre d'une dizaine de nanomètres sur des métaux [VvKH00] qui semble négligeable par rapport à la taille de l'objet microcopique considéré. Elles sont donc estimées en partie avec la force de *pull-off* d'autant plus si le contact est maintenu suffisamment longtemps pour vaincre le pont capillaire [ZN98].
- il existe peu d'études montrant son importance dans des taux d'humidité standard. Busnaina [BE00] a observé ces effets sur des particules en latex sur un wafer en silicium. Il montre une augmentation significative de la force de détachement pour un taux d'humidité supérieur à 80 %. Ces travaux semblent justifier que, mis à part des environnements spécifiques, ces forces pourront, en première approximation, ne pas être utilisées dans nos modèles [CZK03].

De la même façon, la force de *pull-off* disparaît. Elle est remplacée par une force visco-élastique de rappel, nécessaire pour vaincre la force capillaire. Cette remarque fera l'objet d'une stratégie de micro-manipulation développée dans le dernier chapitre de ce document.

1.3.3 Les forces électrostatiques

La dernière partie de cette étude concerne les forces électrostatiques et principalement les contacts avec des conducteurs et des isolants. La pointe AFM est en silicium et est reliée à la masse. La première expérience concerne un contact avec un substrat en or.

Les forces électrostatiques apparaissent à une distance très importante (figure 1.5(a)) par rapport aux autres forces (une dizaine de microns). Pour éviter cette force, le substrat peut être relié à la masse, comme le montre la figure 1.5(b). Il est ici à noter que, le mouvement étant effectué par la plate-forme, la force de Van der Waals n'est pas mesurée (sa portée est de l'ordre de la résolution de positionnement).



Figure 1.5 – Courbes de mesures pour des interactions avec (a) un substrat en or et (b) avec un substrat conducteur à la masse.

Une deuxième étude est menée relativement à un isolant, le polystyrène. Les résultats sont présentés sur la figure 1.6(a). L'interaction est du même type. Pour éviter cette force, le subtrat est nettoyé avec de l'eau distillée. La courbe obtenue est alors représentée sur la figure 1.6(b).



Figure 1.6 – Courbes de mesures pour des interactions avec (a) le polystyrène (b) après nettoyage du substrat avec de l'eau distillée.

A partir de cette étude, quelques observations importantes peuvent être effectuées :

- les forces électrostatiques sont des forces à portée très importante, de l'ordre d'une dizaine de microns.
 Les charges locales mises en jeu ainsi que les forces produites entraînent des problèmes importants pour la micro-manipulation. En effet, les modules de ces forces sont très supérieurs au poids, l'objet peut ainsi être attiré entraînant une mauvaise répétabilité de la tâche,
- ces forces peuvent être évitées lorsque quelques précautions sont prises mais ont toujours tendance à être présentes, par exemple, pour des contacts avec des isolants [Hay91b].

1.3.4 Quelques phénomènes caractéristiques

Finalement, pour illustrer cette étude, deux expérimentations complémentaires sont proposées. La première concerne une interaction avec un substrat en verre. Sur cette première courbe (figure 1.7a), il est possible d'observer à la fois l'apparition de la force électrostatique (force répulsive avec le verre) à proximité du contact et l'apparition de la force de Van der Waals. L'amplitude de ces forces semble comparable.

La deuxième étude concerne l'approche de la pointe AFM et d'un substrat en cuivre initialement chargé par l'application d'une différence de potentiel de 2 V entre ces éléments. La courbe d'approche de la pointe AFM est alors drastiquement modifiée (figure 1.7b). Des phases d'attraction/relâche apparaissent, dues à des phases de décharge de la pointe AFM. De même, des effets de pointe peuvent être observés, rendant



Figure 1.7 – Courbes de mesures pour une interaction avec (a) le verre et (b) le cuivre initialement chargé par l'application d'une différence de potentiel de 2 V entre ces deux éléments.

difficile toute identification. Le seul moyen d'effectuer une analyse plus fine passe par l'utilisation de leviers conducteurs sans pointes (dits "tipless"). De même, ce phénomène disparaît dès que le substrat est mis à la masse. L'importance des forces électrostatiques comme élément perturbateur semble ainsi démontrée par toute cette étude.

1.4 Conclusion

La première partie de ce document propose une synthèse des travaux menés par notre équipe dans le domaine de l'analyse théorique et expérimentale des effets micro-physiques dans le contexte de la micromanipulation. Ce premier chapitre s'est attaché à définir les propriétés principales des phénomènes microscopiques. En particulier, l'analyse s'est construite sur une différenciation des forces à distance et des forces de contact. Dans un premier temps, les forces de Van der Waals, capillaires et électrostatiques sont présentées. Les différents modèles de contact sont décrits pour percevoir leur influence pour les modèles de micro-manipulation. La complexité forte de cette échelle a entraîné quelques incompréhensions dans le choix de certains phénomènes pertinents. La constante de Hamaker apparaît dans différentes études comme un paramètre majeur alors que les outils théoriques ou expérimentaux ne permettent pas de la définir avec précision. Cette analyse bibliographique transverse à plusieurs domaines d'études permet de mieux cerner les outils théoriques dans notre cadre applicatif. Elle a ensuite été complétée par une phase expérimentale pour affiner le rôle des différentes forces en présence. Des phénomènes sont ainsi apparus pertinents (force de *pull-off*), majorés (forces électrostatiques) ou minorés (force de Van der Waals à distance) par cette étude.

L'ensemble de ce chapitre constitue un guide pour le développement d'outils de simulation et de stratégies de micro-manipulation.

Chapitre 2

Modélisation et simulation de la micro-manipulation

Les phénomènes principaux mis en jeu à l'échelle microscopique sont fondamentalement différents de l'échelle macroscopique. L'approche proposée par l'équipe micro-manipulation du Laboratoire de Robotique de Paris est basée sur une analyse a priori des phénomènes mis en jeu. Ce chapitre utilise ainsi l'ensemble des propriétés intrinsèques établies dans le précédent chapitre pour définir des modèles réalistes des phases caractéristiques (approche, saisie d'un objet, relâche, ...) de la micro-manipulation. Le dessein recherché par cette modélisation est la définition d'un ensemble pertinent de spécificités pour la synthèse d'un site expérimental de micro-manipulation.

En particulier, ce chapitre s'attache à mieux comprendre les phénomènes d'adhésion dans le cadre de la manipulation. Une hypothèse forte formulée par les analyses menées concerne le choix de l'adhésion comme principe actif de la manipulation, par un simple contact avec un outil mono-digital, une poutre. Ce choix a conduit à proposer des études théoriques permettant à la fois de valider cette hypothèse et d'analyser les propriétés spécifiques engendrées.

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la manipulation en mode contact et au paradigme sous-jacent par ce choix, la dualité de la saisie/dépose par adhésion dans le cadre de la thèse de Sinan Haliyo [Hal02]. Une approche originale basée sur l'inertie du système de préhension est proposée pour vaincre ce problème. Les étapes originales de cette modélisation, basée sur des conditions de transition entre les différentes phases, sont décrites dans ce chapitre.

Nous nous sommes ensuite penchés sur une tâche d'interactions complexes entre un objet, le préhenseur mono-digital et le substrat pour percevoir les outils nécessaires à sa réussite. L'imprécision de la dépose inertielle représente un handicap pour son exploitation. Le choix s'est ainsi orienté vers la dépose prédictive d'un objet par roulement/glissement. Ce problème introduit un ensemble de complexités dont la principale est la nécessité de contrôler les interactions de contact pour réussir cette tâche. Des éléments méthodologiques sont présentés pour résoudre simplement les différentes étapes de cette opération de dépose. Les propriétés déterminées par les simulations sont un guide essentiel pour la définition des composantes d'un site de micro-manipulation par adhésion ainsi que pour les outils d'assistance associés.

2.1 Dualité de la saisie/dépose par adhésion

Pour comprendre la faisabilité de la manipulation par adhésion, une tâche particulière de saisie et de dépose d'un objet microscopique a été choisie. Une approche intégrant les effets dynamiques, peu exploitées dans des travaux similaires précédents [AF96] [SMS99], est apparue essentielle pour inclure l'inertie du système.

Dans le but d'explorer l'influence de ces effets, un modèle dynamique complet avec une hypothèse d'objets rigides a été développé et ses éléments majeurs sont retracés dans cette partie.

2.1.1 Description de la tâche de manipulation

L'utilisation des forces d'adhésion pour la micro-manipulation nécessite une bonne connaissance de cellesci. Il s'agit de déterminer avec une précision importante les conditions nécessaires pour saisir l'objet, le maintenir pendant la phase de mouvement du préhenseur, puis finalement assurer sa dépose en s'affranchissant de l'effet d'adhésion. Une tâche canonique est proposée pour appréhender cette problématique. Dans une première phase, le préhenseur est mis en contact avec l'objet, initialement au repos sur un substrat plan. Dans une deuxième phase, le préhenseur est retiré verticalement avec l'objet adhéré sur celui-ci. Il faut donc préserver la liaison « adhésive » préhenseur/objet et casser cette même liaison substrat/objet. L'opération de dépose se déroule de façon similaire. Par contre, cette fois, il faut conserver la liaison substrat/objet et casser la liaison préhenseur/objet. La figure 2.1 décrit le déroulement de la tâche choisie.

Il semble clair qu'il est impossible de réussir ces deux opérations de la même façon. Leur dualité impose de réfléchir à la phase de dépose. Ainsi, un angle θ , inclinaison du préhenseur selon un axe perpendiculaire au plan de saisie/dépose, est introduit entre le préhenseur et le plan horizontal. Cet angle permet la réduction du module de la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet en projection sur l'axe vertical d'un facteur de $\cos \theta^{-1}$. Cette inclinaison peut être utilisée, en retirant le préhenseur verticalement, pour faciliter la tâche de dépose.



Figure 2.1 – Décomposition de la tâche de manipulation

Pour évaluer dans un premier temps la faisabilité et par la suite les différents facteurs qui influencent le déroulement et la commande de la tâche de manipulation décrite, **un modèle paramétré** est déterminé. Il faut d'abord déterminer les différentes variables et grandeurs physiques du problème. Une fonction F_{adh} est déterminée utilisant l'ensemble des formulations décrites dans le chapitre précédent. Elle discrimine deux états caractéristiques :

- le contact avec l'utilisation des forces de contact
- l'interaction à distance avec l'utilisation des forces de Van der Waals et le cas échéant des forces capillaires paramétrées en fonction de l'environnement et des forces électrostatiques pour le contact conducteur conducteur

Ce choix est décrit en détails dans la thèse d'Yves Rollot [Rol00].

2.1.2 Modèle statique des phases de saisie et de dépose

Dans un premier temps, un simple bilan des forces est effectué pour avoir un aperçu statique du problème. La simplicité de cette étude est contre balançée par la difficulté de bien perçevoir les différentes phases mises en jeu. Il s'agit de déterminer les forces influant sur chaque composant du système et de comprendre les différents états de cette tâche. La figure 2.2 décrit le système avec les différentes notations.

¹L'influence de cet angle est étudiée dans le paragraphe 2.1.3


Figure 2.2 – Etude statique de la tâche de manipulation

Les forces qui apparaissent dans le modèle statique sont \vec{F}_{po}^{adh} et \vec{F}_{so}^{adh} , forces d'adhésion respectivement entre le préhenseur et l'objet manipulé et entre le substrat et l'objet manipulé, \vec{P}_o , poids de l'objet et \vec{F}_{ext} , la force extérieure appliquée au préhenseur. Il faut définir, à partir de l'application d'une force extérieure sur le préhenseur, le comportement du système. Néanmoins, il semble difficile de déterminer avec exactitude l'état qui sera associé au système. Le résultat dépend du rapport entre F_{so}^{adh} et F_{so}^{adh} et peut s'interpréter de la façon suivante : quelle interface cédera la première ? Les différentes évolutions possibles peuvent être examinées. Il suffit alors de distinguer différents cas en fonction des forces d'adhésion et de l'évolution de la force extérieure.

1.
$$F_{po}^{adh} > F_{so}^{adh} + P_o$$

- $F_{po}^{adh} > F_{so}^{adh} + P_o > F_{ext}$

La force extérieure n'est pas suffisante pour modifier le système 2 .

 $-F_{po}^{adh} > F_{ext} > F_{so}^{adh} + P_{o}$ Dans ce cas, la force extérieure est suffisante pour arracher l'objet du substrat mais l'adhésion entre l'objet et la pointe est maintenue. Cette phase est appelée **saisie statique**. $-F_{ext} > F_{po}^{adh} > F_{so}^{adh} + P_{o}$

La force extérieure est supérieure aux forces d'adhésion. Il est alors difficile de déterminer quelle interface cédera la première. Seule une étude dynamique prenant en compte les inerties et les accé-lérations est susceptible de fournir une solution.

2.
$$F_{so}^{adh} + P_o > F_{po}^{adh}$$

$$-F_{po}^{adh} > F_{so}^{adh} + P_o > F_{es}$$

La force extérieure n'est pas suffisante pour modifier le système.

- F_{so}^{adh} + P_o > F_{ext} > F_{po}^{adh}
 Dans ce cas l'adhésion au niveau de l'interface objet - pointe est brisée avant celle de l'interface objet - substrat. Cette phase est appelée dépose statique.

$$-F_{ext} > F_{so}^{adh} + P_o > F_{po}^{ad}$$

Il est encore difficile de déterminer le comportement du système dans ce cas sans prendre en compte les paramètres dynamiques.

Ce raisonnement permet de déterminer les conditions statiques de la saisie par adhésion : l'énergie de surface du préhenseur, donc la force d'adhésion produite par celui-ci, doit être impérativement supérieure à la somme de la force d'adhésion objet-substrat et du poids de l'objet. Par contre, cette condition interdit de re-déposer sur le même substrat dans le cadre d'une approche statique. Une solution simple apparaît en introduisant

²Le poids du préhenseur est supposé équilibré.

une inclinaison θ (voir fig. 2.1-c). Celle-ci réduit la force verticale d'adhésion entre la pointe et l'objet d'un facteur de $\cos \theta$. La dépose pourrait alors être maîtrisée indépendamment des valeurs relatives des surfaces d'énergie.

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

Ce mode de manipulation, basé sur les cas de saisie et de dépose statique, nécessite une condition forte pour sa fiabilité. La force extérieure doit appartenir à l'intervalle borné par les deux forces d'adhésion. L'ordre de grandeur de ces forces est de $\sim 10\mu N$ [Ada90] [Bow88]. Ces valeurs varient rapidement en fonction des facteurs liés à l'environnement. Il est donc très difficile de produire et de commander une force extérieure conforme à cette condition [Hay91b]. L'extension de cette étude au cas dynamique a ainsi été proposée dans la thèse de Sinan Haliyo [Hal02].

2.1.3 Modèle dynamique des phases de saisie et de dépose

La modélisation statique de la tâche de manipulation, constituée d'un simple bilan des forces, ne permet pas de déterminer le comportement global du système. L'approche simplifiée constituée par l'équilibre de l'objet et du préhenseur n'est plus suffisante pour décrire complètement le système. Il faut donc distinguer deux sous-modèles. Dans le premier, la pointe et l'objet manipulés sont considérés comme deux systèmes différents (modèle « **détaché** »). Une fois la saisie effectuée, l'objet étant "collé" à la pointe, ils forment un seul et unique système (modèle « **attaché** »). Pour simplifier l'écriture des équations dynamiques, tous les vecteurs et grandeurs sont projetés sur l'axe \vec{k} , verticale orientée vers le haut dans le repère R attaché au substrat et supposé galiléen.



Figure 2.3 – Etude dynamique de la tâche de manipulation : (a) modèle 'détaché' (b) modèle 'attaché'

2.1.3.1 Modèle « détaché »

Ce modèle est composé par application du principe fondamental de la dynamique aux deux systèmes matériels distincts, l'objet et la pointe. m_p désigne la masse du préhenseur, m_o celle de l'objet, R_o le rayon de l'objet; les autres notations sont conservées et les notations des distances sont conformes à la figure 2.3. Des conditions géométriques, dites de réaction, garantissent une intersection nulle entre les corps en limitant la distance de contact à une valeur minimale. Cette distance est prise égale à la distance de séparation atomique, 0, 4 nm [Isr91].

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

$$m_{p}\ddot{Z}_{p} = F_{ext} - F_{po}^{adh}(D_{2})\cos\theta - m_{p}g
 m_{o}\ddot{D}_{1} = F_{po}^{adh}(D_{2})\cos\theta - F_{so}^{adh}(D_{1}) - m_{o}g
 Z_{p} = D_{1} + 2R_{o} + D_{2}$$
(2.1)

Les conditions géométriques de réaction sont ajoutées au système :

$$D_1 \ge 0, 4\,nm \qquad D_2 \ge 0, 4\,nm$$

2.1.3.2 Modèle « attaché »

Dans ce cas, l'objet et le préhenseur forment un système unique noté « po », de masse $m_{po} = m_p + m_o$. Cette condition représente un cas particulier du modèle détaché, où D_2 = Constante = 0, 4nm, et donc $D_2 = 0$.

$$\begin{cases} m_{po}\ddot{Z}_p = F_{ext} - F_{so}^{adh} - (m_p + m_o) g \\ Z_p = D_1 + 2R_o + 0, 4 nm \qquad \ddot{D}_1 = \ddot{Z}_p \end{cases}$$
(2.2)

La condition géométrique de réaction poutre objet existe seulement pour D_1 :

$$D_1 \ge 0, 4 nm$$

2.1.3.3 Conditions de transition de modèle

Pour déterminer le comportement exact du système, il est primordial de connaître le (ou les) moment(s) de transition, qui traduit (sent) le détachement de l'objet du préhenseur. D'une façon algébrique, cette transition existe si la distance objet - préhenseur est égale à la distance interatomique, $D_2 = 0, 4 nm$. Dans ce cas, le modèle attaché est validé sous réserve d'une vérification d'une séparation entre l'objet et le substrat.

Pour cette vérification, le bilan des forces s'appliquant sur l'objet dans le cas « attaché » (donc $D_2 = 0, 4 nm$) doit être écrit. Il est à noter que ce bilan des forces se fait par rapport à un repère attaché au système préhenseur - objet, donc **non galiléen**. L'accélération de l'objet dans le repère R est donnée par la somme de l'accélération relative dans le repère R' et de l'accélération du repère R' par rapport à R.

$$\gamma_{objet} = \tilde{D}_2 + \tilde{Z}_p$$

Or, dans ce cas précis, l'objet étant attaché au préhenseur, D_2 est constant, donc \ddot{D}_2 est nulle. Le premier terme du principe fondamental de la dynamique devient ainsi $m_o \ddot{Z}_p$. Ce terme est aussi appelé **la force d'inertie d'entraînement**. Les autres forces s'appliquant sur l'objet sont les forces d'adhésion du substrat et du préhenseur et son poids. La condition de transition peut donc s'exprimer en combinant la condition sur la distance objet - préhenseur D_2 et une condition sur la force d'inertie d'entraînement :

Si
$$D_2 = 0, 4 nm$$
 et si $F_{po}^{adh}(D_2) \cos \theta > F_{so}^{adh}(D_1) + m_o(g + \tilde{Z}_p) \implies$ modèle attaché
Sinon \implies modèle détaché

Parmi toutes les grandeurs qui apparaissent dans cette condition, seuls l'angle θ , dû à l'inclinaison du préhenseur, et la force d'inertie, donc implicitement l'accélération \ddot{Z}_p du préhenseur, sont des facteurs extérieurs au problème. La transition de modèle, plus précisément la dualité saisie/dépose, peut donc être

(2.3)

conditionnée exclusivement en modifiant ces deux termes. Pour atteindre cette accélération, le processus expérimental choisi priviligiera de baisser puis de relever le préhenseur mono-digital. Cette configuration sera décrite en détails dans le cinquième chapitre.

De nombreuses simulations ont été entreprises et seuls les résultats essentiels sont décrits dans ce paragraphe. Les résultats proposés se concentrent sur la manipulation d'une bille en verre par un préhenseur en silicium en contact sur un substrat en polystyrène. Les valeurs des constantes de Hamaker correspondantes sont évaluées à partir des descriptions du premier chapitre et détaillées dans [RRG99].

	A_{Verre}	$A_{VerrePS}$	$A_{VerreSi}$	A_{Si}	A_{SiPS}
Sec (×10 ⁻²⁰ J)	6,2	7,17	10,1	25,8	13,2
Humide ($\times 10^{-20}J$)	4,72	9,85	4,72	13,8	0,27

Tableau 2.1 – Les constantes de Hamaker pour différentes interactions simulées

Pour l'opération de saisie, il suffit que l'adhésion à l'interface objet/préhenseur soit supérieure à la somme de la force d'adhésion à l'interface objet/substrat et du poids de l'objet. Pour l'opération de dépose, une forte accélération, au dessus d'une valeur seuil, appelée « accélération limite », imposée au préhenseur, crée une force d'inertie sur l'objet supérieure à la force d'adhésion du préhenseur et provoque la séparation.



Figure 2.4 – (a) Résultats de simulation en fonction de l'accélération (b) Limite d'accélération minimum nécessaire pour effectuer la dépose en fonction du rayon de l'objet manipulé et de l'inclinaison

La figure 2.4(a) résume les différentes phases possibles en fonction de l'accélération instantanée appliquée à t = 0 au préhenseur, pour un objet de rayon $50\mu m$ avec une inclinaison de préhenseur nulle et la figure 2.4(b) utilise cette fois l'inclinaison du préhenseur comme paramètre de simulation.

Cette « accélération limite » est d'autant plus élevée que l'objet est petit et dans les cas extrêmes, atteint des valeurs aussi élevées que $10^7 m/s^2$. Ce résultat introduit des stratégies innovantes de manipulation comme la dépose par effet inertiel.

2.2 Une tâche de maîtrise des interactions : le roulement

L'approche inertielle est apparue durant ces années comme une voie nouvelle et originale mais ne peut résoudre le problème de la dépose précise d'un objet saisi par adhésion. Une autre solution est ainsi apparue à partir de la maîtrise des interactions de contact entre les corps. Cette tâche de roulement/glissement proposée par notre équipe apparaît comme une autre solution novatrice pour résoudre la dualité saisie dépose. Cette

partie propose un résumé des éléments essentiels de cette modélisation, l'ensemble des deux tâches décrites dans ce chapitre représentant un volet important des différentes phases caractéristiques apparaissant à cette échelle.

2.2.1 Configuration du système

Le système étudié est illustré par la figure 2.5. Un objet sphérique \mathcal{O} de rayon R est en contact avec deux plans, le substrat \mathcal{S} fixe et le préhenseur \mathcal{P} mobile en translation. Ces deux surfaces forment un angle θ qui prend en compte l'incertitude sur l'inclinaison du préhenseur.



Figure 2.5 – Configuration du système pour l'étude de la dépose par roulement

La figure 2.6 page suivante permet de dresser le bilan des forces qui s'appliquent aux systèmes obtenus en isolant successivement l'objet \mathcal{O} et le préhenseur \mathcal{P} . Ainsi, pour chacune des interfaces, \mathcal{I}_{os} entre \mathcal{O} et \mathcal{S} et \mathcal{I}_{op} entre \mathcal{O} et \mathcal{P} , apparaissent :

- des forces d'adhésion, \vec{F}_{ij}^{adh} exercée par le corps *i* sur le corps *j* et \vec{F}_{ji}^{adh} exercée par le corps *j* sur le corps *i*, normales à la surface de contact, de directions opposées et de modules identiques $|F_{ij}^{adh}| = |F_{ji}^{adh}|$;
- des forces normales, \vec{F}_{ij}^{N} exercée par le corps *i* sur le corps *j* et \vec{F}_{ji}^{N} exercée par le corps *j* sur le corps *i*, de directions opposées et de modules identiques $|F_{ij}^{N}| = |F_{ji}^{N}|$;
- des forces de frottement, \vec{f}_{ij} pour le frottement du corps j sur le corps i et \vec{f}_{ji} pour le frottement du corps i sur le corps j, de directions opposées tangentielles au contact et de modules identiques $|f_{ij}| = |f_{ji}|$.
- des moments de résistances au roulement M_{so} et M_{po} induits par l'asymétrie des déformations au niveau du contact lors du mouvement.

En outre, \mathcal{P} est mis en mouvement sous l'effet d'une force extérieure notée \vec{F}_{ext} . Enfin, les paramètres μ_{so} et μ_{po} représentent les coefficients de friction aux deux interfaces [Sit04].

Sous l'hypothèse des forces d'inertie négligées face à l'adhésion³ [SHTO02], l'équilibre de l'objet est donné par :

$$\begin{pmatrix} F_{\rm so}^{\rm N} - F_{\rm so}^{\rm adh} - F_{\rm po}^{\rm N}\cos\theta + F_{\rm po}^{\rm adh}\cos\theta + f_{\rm po}\sin\theta = 0 \\ -F_{\rm po}^{\rm N}\sin\theta + F_{\rm po}^{\rm adh}\sin\theta + f_{\rm so} - f_{\rm po}\cos\theta = 0 \\ M_{\rm so} + M_{\rm po} - R\left(f_{\rm so} + f_{\rm po}\right) = 0$$

$$(2.4)$$

La force extérieure \vec{F}_{ext} appliquée à la poutre peut être projetée selon deux directions, l'axe de la poutre (force tangentielle) et l'axe perpendiculaire de la poutre (force normale). L'équilibre de la poutre permet de

³Comme la simulation précédente l'a démontrée, les forces inertielles peuvent être négligées par rapport à l'adhésion si l'accélération du préhenseur est inférieure à $10^6 m s^{-2}$.



Figure 2.6 – Bilan des forces appliquées au système

déterminer ses composantes $F_{\text{ext}}^{\text{T}}$ et $F_{\text{ext}}^{\text{N}}$ à partir des autres forces en présence, adhésion, friction et forces normales :

$$\begin{cases} f_{\rm op} - F_{\rm ext}^{\rm T} = 0, \\ F_{\rm op}^{\rm N} - F_{\rm op}^{\rm adh} - F_{\rm ext}^{\rm N} = 0 \end{cases}$$
(2.5)

Les forces d'adhésion F_{ij}^{adh} utilisent des modèles de contact et sont calculées à partir des forces de pull-off établies dans le premier chapitre. La résistance maximale au roulement peut être estimée par une fonction linéaire de l'aire de contact [Bha98, HBPB99]. Elle vaut donc dans le cas général [BP99]

$$M_{ij}^{max} = c_{ij} W_{ij} a_{ij} \tag{2.6}$$

avec a_{ij} le rayon de l'aire de contact entre les corps *i* et *j* et c_{ij} le coefficient maximal de résistance au roulement pour un couple de matériaux *ij* donné. Ce coefficient sera considéré en première approximation comme une constante. Le rayon a_{ij} est déterminé par la même analyse que la force de pull-off selon la valeur du paramètre d'élasticité λ_{ij} par

$$a_{ij}^{3} = \begin{cases} \frac{R}{K} \left(F_{ij}^{N} + P_{ij} \right) & \text{pour } \lambda_{ij} < 0, 1 \\ a_{0}^{3} \left(\frac{\alpha + \sqrt{1 + F_{ij}^{N}/P_{ij}}}{1 + \alpha} \right)^{3} & \text{pour } 0, 1 < \lambda_{ij} < 5 \\ \frac{R}{K} \left(\sqrt{F_{ij}^{N} + P_{ij}} + \sqrt{P_{ij}} \right)^{2} & \text{pour } \lambda_{ij} > 5 \end{cases}$$

$$(2.7)$$

avec⁴

$$\lambda_{ij} = -0,924\ln(1-1,02\alpha) \quad \text{et} \quad a_0^3 = \left(1,54+0,279\frac{2,28\lambda_{ij}^{\frac{1}{3}}-1}{2,28\lambda_{ij}^{\frac{1}{3}}+1}\right)^3 \frac{\pi W_{ij}R^2}{K} \tag{2.8}$$

2.2.2 Conditions de glissement

Quand la pointe est en contact avec l'objet, les conditions instantanées de glissement sont données respectivement par la condition suivante

$$f_{\rm so} = \mu_{\rm so} F_{\rm so}^{\rm N} \tag{2.9}$$

3

pour un glissement à l'interface \mathcal{I}_{os} , et

$$f_{\rm po} = \mu_{\rm po} F_{\rm po}^{\rm N} \tag{2.10}$$

⁴Les paramètres sont décrits dans la partie 1.2.1 page 14.

pour un glissement à l'interface \mathcal{I}_{op} .

Les systèmes (2.4) et (2.5) peuvent être combinés pour déterminer les forces de frottement et les forces normales qui apparaissent dans (2.9) et (2.10),

$$\begin{cases} f_{\rm so} = -F_{\rm ext}^{\rm N} \sin \theta - F_{\rm ext}^{\rm T} \cos \theta \\ F_{\rm so}^{\rm N} = F_{\rm os}^{\rm adh} + F_{\rm ext}^{\rm N} \cos \theta - F_{\rm ext}^{\rm T} \sin \theta \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} f_{\rm po} = F_{\rm ext}^{\rm T} \\ F_{\rm po}^{\rm N} = F_{\rm ext}^{\rm N} + F_{\rm op}^{\rm adh} \end{cases}$$
(2.11)

Ce calcul permet d'établir les conditions sur la force extérieure appliquée à la poutre qui engendrent, soit le glissement à l'interface \mathcal{I}_{os} , d'après (2.9),

$$F_{\text{ext}}^{\text{T}} = \frac{\mu_{\text{so}}F_{\text{so}}^{\text{adh}} + (\mu_{\text{so}}\cos\theta - \sin\theta)F_{\text{ext}}^{\text{N}}}{\cos\theta + \mu_{\text{so}}\sin\theta} = F_{\text{cs}}$$
(2.12)

soit le glissement à l'interface \mathcal{I}_{op} , d'après (2.10),

$$F_{\rm ext}^{\rm T} = \mu_{\rm po}(F_{\rm ext}^{\rm N} + F_{\rm po}^{\rm adh}) = F_{\rm cp}$$
 (2.13)

Les valeurs seuils des conditions de glissement sont notées F_{cs} et F_{cp} .

2.2.3 Condition de roulement

Pour permettre le roulement, le moment de roulement doit être supérieur ou égal au moment maximal de roulement de chaque interface de contact. Le moment de roulement peut être considéré comme proportionnel au rayon de contact [HBPB99]. Donc, d'après la troisième relation du système (2.4), ces deux moments sont exprimés par :

$$M_{\rm so} = \frac{a_{\rm so}}{a_{\rm so} + a_{\rm po}} R(f_{\rm so} + f_{\rm po}) \quad \text{et} \quad M_{\rm po} = \frac{a_{\rm po}}{a_{\rm so} + a_{\rm po}} R(f_{\rm so} + f_{\rm po})$$
(2.14)

La condition pour que l'object roule entre le préhenseur et le substrat est donc représentée par deux inégalités qui doivent être simultanément vérifiées :

$$\begin{cases} M_{\rm so} \ge M_{\rm so}^{\rm max} = c_{\rm so} W_{\rm so} a_{\rm so} \\ M_{\rm po} \ge M_{\rm po}^{\rm max} = c_{\rm po} W_{\rm po} a_{\rm po} \end{cases}$$
(2.15)

d'après (2.6). À l'aide de (2.11), ces relations deviennent

$$\begin{cases} F_{\text{ext}}^{\text{T}} \geq \frac{c_{\text{so}} \left(a_{\text{so}} + a_{\text{po}}\right) W_{\text{so}} - RF_{\text{ext}}^{\text{N}} \sin \theta}{R \left(1 + \cos \theta\right)} \\ F_{\text{ext}}^{\text{T}} \geq \frac{c_{\text{po}} \left(a_{\text{so}} + a_{\text{po}}\right) W_{\text{po}} - RF_{\text{ext}}^{\text{N}} \sin \theta}{R \left(1 + \cos \theta\right)} \end{cases}$$
(2.16)

soit, sous forme condensée au premier instant où la condition suivante est vérifiée :

$$F_{\text{ext}}^{\text{T}} = \frac{\left(a_{\text{so}} + a_{\text{po}}\right) \max\{c_{\text{so}}W_{\text{so}}, c_{\text{po}}W_{\text{po}}\} + RF_{\text{ext}}^{\text{N}}\sin\theta}{R\left(1 + \cos\theta\right)} = F_{\text{cr}}$$
(2.17)

où la valeur seuil est notée F_{cr} .

2.2.4 Simulation et analyse

Les conditions (2.12), (2.13) et (2.17) permettent de classer le comportement théorique de l'objet lors de la mise en mouvement du préhenseur sous l'action d'une force extérieure selon trois modes parfaits :

- mode A : glissement parfait de \mathcal{O} sur \mathcal{S} si le seuil instantané correspondant est franchi,

$$F_{\text{ext}}^{\text{T}} = F_{\text{cs}} = \min\left\{F_{\text{cs}}, F_{\text{cp}}, F_{\text{cr}}\right\}$$
(2.18)

– mode B : glissement parfait de \mathcal{P} sur \mathcal{O} si de même,

$$F_{\text{ext}}^{\text{T}} = F_{\text{cp}} = \min\left\{F_{\text{cs}}, F_{\text{cp}}, F_{\text{cr}}\right\}$$
(2.19)

- mode C : roulement parfait de \mathcal{O} entre \mathcal{P} et \mathcal{S} si la condition suivante est respectée

$$F_{\text{ext}}^{\text{T}} = F_{\text{cr}} = \min\left\{F_{\text{cs}}, F_{\text{cp}}, F_{\text{cr}}\right\}$$
(2.20)

Il existe en théorie un quatrième comportement possible si aucun de ces seuils n'est franchi. Dans ce cas, la force extérieure tangentielle ne permet pas de vaincre l'adhésion et le préhenseur ne bouge pas. En pratique, le module des forces d'adhésion est bien entendu suffisamment faible pour qu'elles n'aient aucune influence sur le mouvement de translation du préhenseur.

Pour appréhender ces résultats, un exemple est proposé autour du système suivant : un substrat en Téflon, un bille de rayon 20 μm en polystyrène et un préhenseur en silicium (Si). Le Tableau 2.2 donne les valeurs numériques des différentes grandeurs physiques pour les matériaux utilisés.

			Matériau		
Paramètre		Si	PS	PTFE	
E	Module de Young	[GPa]	140	3,4	0,5
ν	Coefficient de Poisson		0,17	0,39	0,46
γ	Energie de surface	$[mJ \cdot m^{-2}]$	1 400	35,5	18
μ	Coefficient de friction maximal		0,25	0,1	0,1

Tableau 2.2 – Paramètres d'analyse des conditions de roulement/glissement

Les résultats numériques obtenus sont décrits en détails dans la thèse de Fabien Dionnet [Dio05]. Les graphes 2.7 page suivante permettent d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement du système : l'orientation du préhenseur, le coefficient de roulement maximal et l'énergie de surface du substrat. On peut extraire de ces courbes quelques enseignements importants.

- 1. Le mode de glissement du préhenseur sur l'objet ne peut être observé. En effet, les relations (2.12), (2.13) montrent que le rapport entre les seuils F_{cs} et F_{cp} est essentiellement conditionné par le rapport des forces d'adhésion F_{so}^{adh} et F_{po}^{adh} . En d'autres termes, les conditions favorisant la saisie statique par rapport à la dépose statique favorisent le glissement à l'interface objet/substrat par rapport au glissement à l'interface préhenseur/objet, et réciproquement.
- la force normale appliquée par le préhenseur sur l'objet doit dépasser une valeur seuil pour que l'objet ne glisse pas. Pour favoriser le roulement, donc la dépose, il faut exercer une force normale importante. Cette force doit être maintenue constante afin de garantir la non-transition d'un mode à l'autre.
- 3. Le paramètre de roulement maximal *c*, dont l'influence sur le seuil de la force normale est importante, est mal connu.
- 4. L'orientation du préhenseur a une influence non négligeable sur le comportement du système. Le passage de 5° à 10° entraîne une diminution importante de la plage de roulement. Il faut donc veiller au bon parallélisme du préhenseur avec le substrat.
- 5. Si le rayon de l'objet diminue, seul le paramètre limite F_{cr} (éq 2.20) est modifié. Il est inversement proportionnel au rayon de l'objet R. La plage de glissement devient alors plus importante.



Figure 2.7 – Étude de l'influence de plusieurs paramètres sur l'étendue des plages de roulement et de glissement de l'objet en fonction de la force normale appliquée par le préhenseur

2.3 Conclusion

Ce chapitre s'est attaché à décrire deux modèles caractéristiques des étapes de la micro-manipulation. Le premier modéle introduit la dynamique (et l'inertie du système) dans les étapes de saisie par simple contact adhérent et de dépose par effet inertiel d'un micro-objet. La dynamique est une idée originale, proposée et explorée par l'équipe micro-manipulation [HRR01]. De nombreuses simulations ont été effectuées avec différents environnements [RRG99] et seuls quelques résultats essentiels sont décrits. Il apparaît que l'accé-lération minimale pour détacher un objet adhérent atteint une valeur importante de $10^6 ms^{-2}$ pour un objet de rayon $20\mu m$. Des conditions technologiques sont ainsi extraites pour concevoir un système actif de préhension capable d'effectuer les modes de manipulation choisis. Ce modèle fait aussi l'objet d'un composant logiciel de micro-manipulation unique par ses spécificités, permettant de simuler les étapes de manipulation et de choisir l'ensemble des couples de caractéristiques mis en jeu (figure 2.8).

Une difficulté majeure est ensuite apparue dans l'analyse fine des travaux du domaine. Des tâches plus complexe de contact sont souvent rencontrées et il existe peu d'études dans ce domaine pour la maîtrise des interactions de contact. Il a semblé pertinent de définir un modèle d'une tâche de roulement/glissement. Les simulations entreprises montrent que la complexité de cette tâche implique la nécessité de se doter d'un système de mesure du point de contact, de l'effort d'interaction, d'outils d'assistance et de commandes référencées capteur. Il est à noter que d'autres modèles peuvent être simplement dérivés et exploités en suivant la



Figure 2.8 – Composant logiciel de simulation de la micro-manipulation par adhésion et son interface

méthodologie proposée comme par exemple le transfert tangentiel [DVRB04]. Celui-ci sera décrit en détails dans le paragraphe 5.1.5.

L'ensemble de ces modèles élaborés au cours de ces années représente une base essentielle pour la synthèse technologique d'un site et de ses outils d'assistance de micro-manipulation. La connaissance de ces modèles et de ses propriétés dérivées est aussi le cœur des différentes stratégies développées et présentées dans le cinquième chapitre.

Chapitre 3

Conception d'une plate-forme de micro-manipulation par adhésion

Les deux premiers chapitres de ce mémoire proposaient une analyse à la fois des phénomènes à cette échelle mais aussi des phases caractéristiques de la manipulation d'objets microscopiques par adhésion. Ces études ont permis de définir les contraintes technologiques lors de la synthèse d'une plate-forme de micro-manipulation. Ce site, baptisé [*mü*]MAD, a été et reste l'élément fondamental de ce travail et de notre équipe tout au long de ces années.

Il s'agit dans ce chapitre de résumer et de justifier les choix technologiques effectués pour mener à bien ce dispositif. Les premiers éléments ont été définis dans la thèse d'Yves Rollot [Rol00] pour valider le choix de l'adhésion comme mode alternatif de manipulation. La plate-forme [*mü*]MAD a bénéficié du soutien du programme « micro-systèmes » du CNRS/SPI en tant que démonstrateur principal du thème « Micro-préhension et micro-assemblage » pendant la période 1998-2001 [HRR+00]. L'utilisation d'une sonde piézo-résistive est apparue comme une solution originale pour cette plate-forme expérimentale. Ce site a ensuité été progressivement complété pour répondre aux besoins et aux innovations sucessifs. Le soutien du programme ROBEA avec le projet « Micro Télé Manipulation » s'est révélé décisif dans la période 2002-2004 [RMB+05].

La première partie de ce chapitre est consacrée à la définition du préhenseur actif et de ses composantes. L'accent est mis sur son calibrage pour effectuer la dépose dynamique de micro-objets et pour maîtriser les efforts de contact. Les autres éléments de ce site sont ensuite décrits dans une deuxième partie pour percevoir la complexité et les contraintes inhérentes à ces manipulations. Enfin, une nouvelle approche issue de collaborations fortes avec les micro-technologies (l'IEMN) est présentée pour la conception d'un nouveau préhenseur. Sa particularité principale est de s'affranchir statiquement de l'adhésion par un système bilame. Ce préhenseur représente pour l'équipe micro-manipulation une étape importante et nouvelle dans son approche de la manipulation par adhésion.

3.1 Synthèse d'un préhenseur actif

3.1.1 Le préhenseur

3.1.1.1 Le système mono-digital

Le préhenseur est la partie centrale du prototype expérimental. Le mode de manipulation proposé repose entièrement sur ses propriétés. Il doit être capable d'effectuer séparement les tâches de saisie et les différents modes de dépose. Les investigations menées dans la thèse d'Yves Rollot [Rol00] ont conduit au choix de

micro-poutres piézorésistives issues des technologies à champ proche. Celles-ci présentent plusieurs avantages :

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

Ces systèmes intègrent un pont de Wheatstone dont les éléments résistifs, gravés au niveau de l'encastrement, permettent de quantifier de très faibles déformations de flexion de la poutre. L'élément retenu est présenté sur la figure 3.1(a). C'est une poutre de silicium mono-cristallin d'orientation < 100 >, de dimensions $600x140x10\mu m^D 3$. L'ensemble poutre-pont de Wheaststone est fixé à un support en alumine (5x8 mm^2) sur lequel sont gravées les bornes de connection du pont. L'ensemble poutre-support possède une masse $m_p \approx 0, 1 g$.



Figure 3.1 – Pointe piézorésistive et phase de métallisation

Afin de disposer d'une surface plane sur le préhenseur, le choix s'est orienté vers des pointes "tipless". Dans le but d'obtenir une surface à constante de Hamaker élevée, il est possible de faire subir à cette dernière un traitement de surface. Un dépôt d'une pellicule d'or de 50 nm d'épaisseur garantit ainsi une forte adhésion à l'interface objet-préhenseur. Les étapes de traitement et de dépôt ont été effectuées à l'IEMN et consistent en un double dépôt par évaporation : un dépôt de 25 nm de Titane (couche d'accroche) puis un dépôt de 50 nm d'or. La figure 3.1(b) illustre la poutre en fin de phase de métallisation. Une étude dynamique de la poutre a permis de calibrer la valeur de sa raideur à 21,06 N/m.

3.1.1.2 Modélisation du dispositif de mesure

Le préhenseur peut être modélisé comme une poutre encastrée/libre en flexion.

Dans le cas général où le point de contact est inconnu, une force normale F_{ℓ} est appliquée à la poutre de longueur L au point ℓ , avec $0 \leq \ell \leq L$, comme représenté sur la figure 3.2 page ci-contre (a). L'hypothèse d'Euler-Bernoulli, reliant la flèche v_{ℓ} au moment de flexion M_{ℓ} permet d'écrire

$$\frac{\mathrm{d}^2 v_\ell}{\mathrm{d}x^2} = \frac{M_\ell(x)}{EI} = \begin{cases} (\ell - x) \frac{F_\ell}{EI}, & \text{pour } 0 \le x \le \ell, \\ 0, & \text{pour } \ell \le x \le L, \end{cases}$$
(3.1)

où E est le module de Young de la poutre, et I son moment quadratique. En intégrant deux fois la relation (3.1) et en introduisant les conditions limites¹ imposées par l'encastrement et les conditions de continuité²

$${}^{1}\omega_{\ell}(0) = 0 \quad \text{et} \quad v_{\ell}(0) = 0$$

$${}^{2}\lim_{\epsilon \to 0} \omega_{\ell}(\ell - \epsilon) = \lim_{\epsilon \to 0} \omega_{\ell}(\ell + \epsilon) \quad \text{et} \quad \lim_{\epsilon \to 0} v_{\ell}(\ell - \epsilon) = \lim_{\epsilon \to 0} v_{\ell}(\ell - \epsilon)$$



Figure 3.2 – (a) Modèle du préhenseur (b) Procédure de calibrage

au point d'application de la force, la rotation ω_{ℓ} et la flèche v_{ℓ} de la poutre peuvent être déduites :

$$\omega_{\ell}(x) = \frac{\mathrm{d}v_{\ell}}{\mathrm{d}x} = \begin{cases} \left(\ell x - \frac{x^2}{2}\right) \frac{F_{\ell}}{EI} \\ \frac{\ell^2}{2} \frac{F_{\ell}}{EI} \end{cases} \quad v_{\ell}(x) = \begin{cases} \left(\ell \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) \frac{F_{\ell}}{EI}, & \text{pour } 0 \le x \le \ell, \\ \left(x \frac{\ell^2}{2} - \frac{\ell^3}{6}\right) \frac{F_{\ell}}{EI}, & \text{pour } \ell \le x \le L. \end{cases}$$
(3.2)

La différence de potentiel mesurée à la sortie du pont de Wheatstone est directement proportionnelle à la déformation ou à la rotation $\omega_{\ell}(\delta)$ de la première section, située à la distance δ de l'encastrement, avec $\delta \ll \ell$ [TYBQ91]. Celle-ci est ensuite amplifiée pour produire un signal U dont l'amplitude est mesurable. En approximant (3.2) au premier ordre, la valeur de U peut être déduite :

$$\bar{U} = U - U_0 = A_U \left(\ell \delta \frac{F_\ell}{EI} \right), \tag{3.3}$$

avec A_U et U_0 , respectivement, le gain et l'offset d'amplification.

3.1.1.3 Calibrage statique

Le calibrage du système peut être réalisée en plaçant l'extrémité du préhenseur en appui sur le bord du substrat, fixe et rigide, comme le montre la figure 3.2. Le préhenseur est ensuite déplacé verticalement. Il est à noter que la flèche en bout de poutre $v_L(L)$ équivaut directement à la différence entre la position verticale du translateur au moment du contact initial, z_0 , et sa position courante, z. En $\ell = L$, le relevé de la tension \overline{U} en fonction de la position z du nano-translateur doit satisfaire la relation suivante :

$$\bar{U}(t) = K_u (z_0 - z(t))$$
 avec $K_u = \frac{3A_U\delta}{L^2}$. (3.4)

Une fois les coefficients K_u et U_0 déterminés expérimentalement, la mesure de la tension U fournit alors la flèche en bout de poutre, $v_L(L)$, ainsi que la force appliquée à son l'extrémité,

$$v_L(L) = \frac{U}{K_u} \quad \text{et} \quad F_L = \frac{K_L}{K_u} \bar{U}. \tag{3.5}$$

Exprimer (3.3) dans les configurations réelle (contact en ℓ) et idéale (contact en L), produisant la même mesure U, permet de déduire la force F_{ℓ} réellement appliquée en ℓ ainsi que la flèche réelle $v_{\ell}(\ell)$

$$F_{\ell} = \frac{L}{\ell} F_L = K_L \left(\frac{L}{\ell}\right) \frac{\bar{U}}{K_u}$$
(3.6)

$$v_{\ell}(\ell) = \left(\frac{\ell}{L}\right)^2 v_L(L) = \left(\frac{\ell}{L}\right)^2 \frac{U}{K_u}$$
(3.7)

Les variations de la raideur équivalente K_{ℓ} s'écrivent alors :

$$K_{\ell} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^3 K_L \tag{3.8}$$

3.1.1.4 Validation expérimentale

Le calibrage du dispositif est réalisée conformément au processus décrit par la figure 3.2 page précédente. L'extrémité du préhenseur est mise en contact avec le bord du substrat. La figure 3.3 montre le relevé des mesures de tension et de position du nano-translateur. La méthode des moindres carrés permet d'établir les termes K_u et z_0 de la relation (3.4),

$$K_{u} = \frac{\sum z_{i} \sum u_{i} - N \sum z_{i} u_{i}}{N \sum z_{i}^{2} - \left(\sum z_{i}\right)^{2}} \quad \text{et} \quad z_{0} = \frac{\sum z_{i}^{2} \sum u_{i} - \sum z_{i} \sum z_{i} u_{i}}{\sum z_{i} \sum u_{i} - N \sum z_{i} u_{i}},$$
(3.9)

avec des sommes portant sur les N couples de points (z_i, u_i) . Cette procédure, réalisée sur la portion de courbe correspondant au contact, permet de déterminer un coefficient :

$$K_u = 0,396 \, V/m \tag{3.10}$$

L'écart observé sur la tension entre la montée et la descente du préhenseur provient d'un léger jeu dans le montage de ce dernier.



Figure 3.3 – (a) Calibrage du dispositif de mesure du préhenseur par relevé tension/position (b) Mesure de pull-off pour un contact plan préhenseur/substrat en verre

La courbe de calibrage 3.3(a) démontre qu'il existe bien une relation linéaire entre la tension mesurée et la déflexion, donc la force appliquée en un point fixe. Cette procédure a été réitérée pour divers points de contact ℓ afin de valider expérimentalement la relation $\frac{K_u(\ell)}{K_u(L)} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^2$. Les résultats, consignés dans le tableau 3.1 confirment le modèle.

	Position du contact ℓ [µm]			
	300	400	500	600
$(L/\ell)^2$	4,000	2,250	1,440	1,000
$K_u(\ell)$ [V/µm]	1,589	0,888	0,573	0,396
$K_u(\ell)/K_u(L)$	4,023	2,242	1,447	1,000

Tableau 3.1 – Validation expérimentale du modèle de mesure d'effort

Le dispositif de mesure intégré à la pointe AFM constitue finalement un capteur d'effort précis. Il est ainsi possible de mesurer des phénomènes microscopiques très fins tels que la force de *pull-off*. La figure 3.3 page précédente(b) montre la force mesurée par le dispositif en contact avec un substrat en verre pour une translation du préhenseur selon l'axe vertical ascendant à une vitesse de 2 μ m/s. La force appliquée par le substrat, initialement de 100 μ N, décroît et s'annule lorsque la flexion de la poutre devient nulle. Elle est ensuite négative, signe que le préhenseur est attiré par le substrat et fléchit vers le bas pour maintenir le contact. Lorsque la force de rappel du préhenseur atteint la valeur du *pull-off*, le contact est rompu.

3.1.2 L'actionneur

3.1.2.1 Choix de la céramique

Afin de pouvoir vérifier et valider expérimentalement l'existence d'une plage d'accélération du préhenseur permettant la manipulation par adhésion, un actionneur piézoélectrique a été choisi. Il répond en effet à trois contraintes essentielles : il est capable de produire des accélérations entre $10 \text{ et } 10^8 \text{ } m.s^{-2}$, il est d'encombrement réduit et produit un déplacement de plus de 100 nanomètres afin d'amener la pointe en dehors de la zone d'influence des forces d'adhésion. Afin de procéder à l'élaboration du modèle de comportement, le système préhenseur-céramique est modélisé selon la figure 3.4.



Figure 3.4 – Schématisation de l'ensemble céramique-pointe

Son modèle de comportement peut être déterminé par une méthode mono-dimensionnelle, en supposant que la déformation suivant l'axe vertical (\vec{z}) soit indépendante des coordonnées x et y du point considéré. z(t) désigne le déplacement de la face inférieure de la céramique, et \vec{F} la force due au préhenseur agissant sur cette face. Dans l'hypothèse où \vec{F} est la seule force extérieure agissant sur la surface, le tenseur des contraintes T(t) se réduit à une seule composante non nulle suivant l'axe vertical (T_3) . L'accélération à l'instant t de la face libre de la céramique s'exprime par :

$$\ddot{u}_z(t) = (d_{33}v(t) - z(t))\frac{A}{m_p.e.s_{33}} \Longrightarrow \ddot{u}_z(0) = \frac{Ad_{33}}{m_p.e.s_{33}}v(0)$$

L'accélération initiale de la céramique dépend donc directement de ses paramètres géométriques (surface libre A et épaisseur e), du type de matériau (d_{33} et s_{33}), ainsi que de la tension initiale (v(0)). Afin d'obtenir des déplacements importants de la céramique, il est essentiel de choisir un matériau à coefficient d_{33} élevé. Il doit également posséder un rapport d_{33}/s_{33} important. De plus, les céramiques piézoélectriques sont limitées en terme de champ électrique. Les investigations effectuées ont permis de choisir un céramique PZT de type PI-89 dont les caractéristiques sont données en annexe. La tolérance électrique de la céramique étant de 400V/mm, une épaisseur d'au moins 1mm est nécessaire. Son épaisseur est donc fixée à cette valeur. Sa surface est directement proportionnelle à la performance dynamique de l'actionneur. Elle est donc de même dimension que le circuit AFM collé sur sa face inférieure, soit 8mmx5mm.

3.1.2.2 Comportement dynamique de l'actionneur

Dans un premier temps, l'actionneur seul est étudié. Ces expériences ont été réalisées à l'IEMN de Lille et au Laboratoire d'Ondes et Acoustique de l'ESPCI. La méthode utilisée est l'interférométrie par laser hétérodyne [PKSD98]. Cette méthode consiste à focaliser un rayon laser, de caractéristiques parfaitement connues sur la surface étudiée. L'observation du rayon réfléchi permet de déduire la variation de distance entre la source du rayon et la surface cible. Cependant, ce système de mesure possède une particularité très importante : le signal de sortie est soumis à un filtre passe-haut de 20kHz en post-traitement. Ce filtre élimine la visualisation de la composante continue du signal. Néanmoins, le signal filtré est suffisant pour déduire assez précisement le mouvement de l'actionneur. De plus, l'information la plus importante est préservée : la valeur de l'accélération initiale. Cette valeur peut être obtenue en observant le début du signal, de haute fréquence, donc non filtrée et conforme aux déplacements de l'actionneur.



Figure 3.5 – Mesures de l'actionneur piézoélectrique par interférométrie laser

Plusieurs essais ont été effectués de manière à appréhender la dynamique du système et sont décrits dans la thèse de Sinan Haliyo [Hal02]. Pour l'essai présenté dans ce document, le signal utilisé est décomposé en une montée en 1 μs de 0 à 300 V, une tension de 300 V pendant 100 μs et une descente de 300 à 0 V en 50 μs . La figure 3.5(a) montre le signal de commande et le signal de mesure. Pour une meilleure visualisation, la figure 3.5(b) est un agrandissement du début du signal afin de bien appréhender la réponse initiale de la céramique. La réponse est une tension directement proportionnelle au déplacement selon une relation linéaire 10 nm/V.

Selon la courbe 3.5(b), le déplacement relatif peut être déduit. Sous l'hypothèse que la fréquence du premier pic est supérieure à la fréquence de coupure du filtre et que la figure décrit parfaitement le déplacement de l'actionneur, la valeur de l'accélération initiale (fig. 3.5, entre les points "A" et "B") est estimée à $50 \cdot 10^{-9}/(2 \cdot 10^{-6})^2 = 2, 5 \cdot 10^4 m/s^2$. Ces expériences démontrent la capacité de l'actionneur piézoélectrique à produire la gamme d'accélérations nécessaires pour les expérimentations de la dépose dynamique.

3.1.3 Description géométrique du préhenseur

La géométrie de l'organe terminal du manipulateur est ainsi fixée avec une céramique piézoélectrique comme actionneur et une poutre piézorésistive comme préhenseur. Pour la dépose statique, il suffit d'incliner le préhenseur par rapport au substrat. Cette inclinaison, d'un angle θ , réduit les forces d'adhésion entre le préhenseur et l'objet manipulé d'un facteur $cos\theta$ en projection sur l'axe verticale. Il suffit donc d'ajouter un degré de liberté au préhenseur, permettant ainsi un mouvement de liaison pivot. Celui-ci est placé à l'amont du préhenseur pour faciliter la mise en oeuvre. L'axe de rotation a été choisi horizontal et perpendiculaire à la

poutre afin de bien visualiser l'angle d'inclinaison.

La figure 3.6 montre l'état final du préhenseur. La céramique est collée sur sa face supérieure à un axe rectangulaire, monté directement sur le bloc déplacement par une liaison pivot glissant. Le dispositif AFM est collé à la surface inférieure de la céramique.



Figure 3.6 – Le préhenseur actif réalisé

3.1.4 Calibrage dynamique du préhenseur actif

La détermination du comportement dynamique du préhenseur est effectuée en fonction de la caractérisation flexion/tension (éq. (3.10)) du dispositif AFM. L'actionneur piézoélectrique est excité par différents profils de signaux en observant simultanément la tension de flexion. Un profil de pente 'lente' a été utilisé pour précompresser l'actionneur. L'objectif est de pouvoir produire une très grande accélération initiale à l'extrémité de la poutre. Le profil le plus adapté à cette objectif est un signal de type Dirac. Une impulsion dont l'amplitude est 80 V est ainsi envoyée. La figure 3.7 montre les courbes obtenues.



Figure 3.7 – Caractérisation dynamique du préhenseur

La tension du pont de Wheatstone donne, après calibrage, la déformation de la poutre. Un grand pic est tout d'abord observé en réponse à l'impulsion de l'actionneur. Après un bref régime transitoire, la poutre oscille sur sa fréquence propre. Les simulations par éléments finis de la thèse de Sinan Haliyo ont prédit un comportement à phase non minimale. De plus, l'essai de caractérisation réalisé préalablement a montré qu'une flèche vers l'axe \vec{z} (donc une flexion positive) créait une tension négative. Conformément à cette prédiction, on peut en déduire que ce pic correspond à un abaissement de l'extrémité de la poutre. Ce comportement est explicité sur la figure 3.8.



Figure 3.8 – Comportement à phase non minimale de la poutre

L'accélération nécessaire pour détacher l'objet doit être dirigée vers le haut. Il faut donc calculer l'accélération à l'extrémité de la poutre quand cette dernière commence à remonter, autour de $t = 2, 8 \ \mu s$. L'amplitude du pic est de $0, 5 \ V$, donc la flèche au bout de la poutre est sensiblement $-0, 4 \ \mu m$. La valeur minimale de cette flèche est atteinte à $t = 2, 8 \ \mu s$. La variation entre les moments $t = 2 \ \mu s$ et $t = 2, 8 \ \mu s$ étant quasiment linéaire, la vitesse de déplacement est supposée constante, égale à $\frac{-4 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-7}} = -0, 5 \ m/s$. Cette vitesse semble identique pour la phase de descente de tension (soit montée de la flèche), entre les instants $t = 2, 8 \ \mu s$.

La vitesse passe donc de -0.5 m/s à 0.5 m/s. En considérant que ce changement de vitesse intervient dans une intervalle de $1 \mu s$ autour du maxima du pic de tension, une valeur approximative de l'accélération peut être obtenue :

$$\ddot{z} \simeq \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1 \ m/s}{1 \ \mu s} = 10^6 \ m/s^2$$
 (3.11)

Cette valeur est nettement supérieure à l'accélération fournie par l'actionneur seul. Le comportement à phase non minimale, dû à la flexibilité de la poutre, permet donc d'amplifier considérablement cette dernière. Des expériences complémentaires sont décrites dans la thèse de Sinan Haliyo [Hal02] et elles définissent une relation linéaire entre le signal d'entrée et l'accélération induite :

$$\ddot{z} = A \cdot K_a \quad \text{avec } K_a = 12500 \ m/Vs^2 \tag{3.12}$$

avec \ddot{z} l'accélération initiale à l'extrémité de la poutre (m/s^2) , A l'amplitude du Dirac (V), et K_a appelée la constante d'accélération.

Ces expériences montrent que le préhenseur actif réalisé est bien capable de produire la gamme d'accélération désirée. De plus, une relation permettant d'obtenir la valeur de l'accélération en fonction de l'impulsion envoyée à l'actionneur est déduite de cette étude. Cette information est précieuse puisqu'elle permet de prévoir et de produire précisément l'accélération désirée par l'utilisateur.

3.2 Description du banc expérimental et du prototype

Le préhenseur actif est l'élément clef du dispositif [*mü*]MAD. Il est complété par des technologies disponibles pour le bloc déplacement, le porte-échantillon et les capteurs visuels. La partie logicielle est développée autour de ces éléments avec l'intégration des pilotes fournis par leurs constructeurs respectifs. Schématiquement, ce dispositif est composé d'un préhenseur mono-digital, d'un bloc de déplacement, d'un dispositif de mesure et d'une informatique de pilotage. L'ensemble est placé dans un environnement contrôlé garantissant les conditions expérimentales les plus favorables pour mener à bien les opérations de micro-manipulation.

3.2.1 Bloc de déplacement

Compte tenu des stratégies de saisie et de dépose mises en place, les actionneurs doivent garantir une large gamme de déplacements, allant du centimètre au nanomètre, ainsi qu'une large gamme de dynamiques (jus-



Figure 3.9 – Vue générale du système de micro-manipulation (a) et du préhenseur (b)

qu'à $10^5 m/s^2$). La solution choisie utilise des actionneurs de natures différentes en série. Ceux-ci possédent des propriétés complémentaires couvrant les exigences souhaitées. Il s'agit de :

- trois micro-translateurs;
- un nano-translateur;
- un actionneur piézo-électrique.

Les micro-translateurs permettent de larges déplacements pour l'échelle considérée dans tout l'espace de travail. Il s'agit de vérins motorisés dotés d'une course de 2,5 cm pour une résolution de 50 nm et disposés en série de manière à permettre un déplacement cartésien. Le nano-translateur est placé en série avec l'axe de translation vertical du micro-translateur. Une platine de translation piézo-électrique permet un positionnement vertical avec une très bonne résolution de 1,83 nm, sur une course en revanche peu importante de 12 µm. L'effecteur actif peut ainsi évoluer dans un espace de travail étendu, avec une bonne précision locale et une grande dynamique. La configuration cinématique a en outre été choisie de manière à pouvoir commander le système de manière totalement découplée en alignant les axes de translation x_m , y_m , z_m , z_n et z_e avec les axes du repère lié au préhenseur, \mathcal{R}_p , comme l'indique la figure 3.10 page suivante.

3.2.2 Retour d'informations et informatique de pilotage

Dans le cadre d'une procédure manuelle ou automatique, la taille des éléments considérés impose l'utilisation d'informations issues de capteurs adaptés à l'échelle macroscopique. La grande majorité des systèmes de micro-manipulation fournissent à l'opérateur un retour visuel par l'intermédiaire d'un microscope optique. Afin de laisser la possibilité d'utiliser des substrats de natures diverses, le microscope employé est situé au dessus de l'espace de travail. Celui-ci est couplé à une caméra CCD qui permet d'acquérir des images en temps réel. La configuration du système est telle que le plan image du dispositif optique soit parallèle au plan de translation vertical du système et que leurs axes soient alignés, toujours dans un souci de découplage de la commande du dispositif.

Le système de micro-manipulation est agencé autour d'un PC fonctionnant avec RTLinux. Ce système d'exploitation en temps réel est particulièrement adapté à l'implémentation d'asservissements numériques grâce



Figure 3.10 – Configuration cinématique du dispositif expérimental

tout d'abord à ses performances du point de vue du temps réel, mais aussi à sa simplicité d'utilisation. La figure 3.11 illustre schématiquement le principe de fonctionnement du dispositif.



Figure 3.11 – Architecture globale du micro-manipulateur μ MAD

Schématiquement, le logiciel repose sur deux boucles en temps réel principales permettant, pour l'une, la commande des micro-translateurs à la cadence vidéo de 25 Hz par l'intermédiaire d'une liaison série, et pour l'autre, la commande du nano-translateur. Une interface graphique basée sur la librairie graphique Xforms³ a été développée pour faire à la fois le réglage des paramètres des commandes bas niveau, la centralisation des commandes haut niveau accessibles de manière claire et intuitive, ainsi que l'enregistrement et l'exploitation des données. La figure 3.12 page ci-contre présente une copie d'écran de cette interface dédiée.

3.3 Conception d'un préhenseur basé sur l'adhésion

Il existe une contradiction entre les tâches de saisie et de dépose statiques avec le préhenseur mono-digital et le principe de la manipulation par adhésion. Au cours de ces tâches, les objets interagissent avec deux corps, le préhenseur et le substrat. Lorsqu'un objet est saisi, le rapport des interactions aux interfaces objetpréhenseur et objet-substrat est tel que la saisie statique est possible et la dépose impossible ou réciproquement. Il apparaît que le seul organe sur lequel peut porter une modification de ce rapport est le préhenseur.

³http://www.public.iastate.edu/~xforms/homepage.html



Figure 3.12 – Interface graphique

La seconde partie de ce chapitre à vocation technologique est dédiée à cette problématique et résulte d'un travail mené en étroite collaboration avec l'IEMN.

3.3.1 Synthèse du préhenseur

3.3.1.1 Principes du préhenseur

Le préhenseur imaginé est constitué de deux lames, l'une munie de cinq pointes, l'autre munie de cinq trous en correspondance deux à deux⁴. Ce préhenseur possède deux configurations comme le montre la figure 3.13.



Figure 3.13 – Principe du préhenseur à surface de contact variable : (a) configuration « lames détachées » favorable à la saisie statique et (b) configuration « lames attachées » favorable à la dépose statique

En configuration « lames détachées », les deux lames sont séparées par un interstice suffisamment grand pour que les pointes ne dépassent pas des trous, comme le montre l'image de gauche. Cette configuration est tout à fait similaire au cas du levier AFM utilisé jusqu'à présent. Elle semble être propice à la saisie statique. En configuration « lames attachées », les deux lames sont solidaires. Les pointes dépassent alors des trous, comme l'illustre l'image de droite. La surface de contact est réduite aux interfaces entre l'objet et les quatre pointes. La hauteur des pointes doit être suffisamment grande par rapport à l'épaisseur de la lame inférieure pour que l'interaction entre celle-ci et l'objet soit négligeable face à l'interaction aux contacts. Cette configuration, à surface de contact réduite doit permettre la dépose statique.

⁴La cinquième pointe était conçue pour positionner l'objet et n'intervient pas dans l'étude du dimensionnement.

3.3.1.2 Dimensionnement relatif à l'adhésion

Afin de tester la pertinence d'un tel système, il convient de déterminer l'influence de la configuration sur l'adhésion en calculant le rapport entre les forces d'adhésion objet/préhenseur pour chaque cas. Considérons donc un objet sphérique \mathcal{O} de rayon R en contact avec le préhenseur. Cette analyse se focalise sur l'influence respective des forces de Van der Waals et capillaires et privilégie, dans ce sens, l'utilisation des expressions de ces forces plutôt que celle de la force de pull-off.

En configuration « lames détachées », l'objet est en contact avec la lame inférieure \mathcal{P} du préhenseur. Il s'agit donc d'un contact sphère/plan. Le module de la force de Van der Waals qui maintient les deux corps en contact est :

$$F_{\rm po}^{\rm vdw} = \frac{A_{\rm po}R}{6D_0^2}$$
(3.13)

où A_{po} est la constante de Hamacker de l'interface préhenseur/objet, R le rayon de l'objet et d la distance de séparation des corps, réduite au contact à la distance inter-atomique corrigée de 1.65 Å (cf équation (1.37)). En configuration « lames attachées », l'objet est en contact avec les quatre pointes de la lame supérieure \mathcal{P}' du préhenseur (cf. Fig. 3.14). En pratique, les techniques de fabrication des pointes ne permettent pas de réaliser des cônes parfaits aux dimensions rigoureusement identiques. En conséquence, l'extrémité des pointes peut être modélisée par une demi-sphère de rayon r. Dans l'hypothèse probable où $r \ll R$, l'objet peut par ailleurs être localement assimilé à un plan. Dans le cas d'un contact parfait avec les quatre pointes, la projection des forces de Van der Waals aux différentes interfaces sur l'axe \vec{z} vaut :

$$F_{p'o}^{vdw} = 4\frac{A_{p'o}r}{6d^2}\cos\theta + \frac{A_{po}R}{6D^2} = 4\frac{A_{p'o}r}{6d^2}\cos\theta \left[1 + \frac{1}{4\cos\theta}\frac{A_{po}R}{A_{p'o}r}\left(\frac{d}{D}\right)^2\right]$$
(3.14)

où θ est l'angle formé par le plan normal à l'objet au point de contact avec la verticale et *D* la distance qui sépare l'objet de la lame inférieure. L'angle θ est lié à la longueur *a* de l'arrête du carré formé par les quatre pointes par :

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \frac{a^2}{2R^2}} \tag{3.15}$$

Cette relation fournit la contrainte géométrique $2R > a\sqrt{2}$, qui assure le contact entre l'objet et les pointes. À l'inverse, la distance inter-pointes ne doit pas être trop petite par rapport au rayon de l'objet afin d'assurer que celui se trouve bien entre les pointes en configuration « lames attachées ». La distance *a* est par conséquent déterminée par la gamme d'objets à manipuler.



Figure 3.14 – Coupe verticale passant par deux pointes antagonistes du système en configuration « lames attachées »

L'atténuation de la force de Van der Waals, α_{vdw} , au passage de la configuration « lames détachées » à la configuration « lames attachées » est obtenue en combinant (3.13) et (3.14) :

$$\frac{1}{\alpha_{\rm vdw}} = \frac{F_{\rm p'o}^{\rm vdw}}{F_{\rm po}^{\rm vdw}} = 4\frac{A_{\rm p'o}r}{A_{\rm po}R}\cos\theta + \frac{d^2}{D^2} = 4\frac{A_{\rm p'o}r}{A_{\rm po}R}\cos\theta \left[1 + \frac{1}{4\cos\theta}\frac{A_{\rm po}R}{A_{\rm p'o}r}\left(\frac{d}{D}\right)^2\right]$$
(3.16)

Pour illustrer ce rapport, un exemple réaliste est choisi. Il consiste à manipuler une micro-bille en silicium. La distance inter-pointes est fixée à 15 µm. Les techniques de fabrication actuelles permettent de réaliser des cônes de silicium dont l'extrémité possède un rayon de l'ordre de 20 nm. La hauteur des pointes qui émerge de la lame inférieure est choisie égale à 5 µm. L'atténuation α_{vdw} tend rapidement vers une asymptote en R/(4r) et atteint une valeur de 300 pour un rayon $R = 20\mu m$.

La dépose statique n'est cependant possible que si l'objet se situe correctement entre les pointes. Pour garantir un bon positionnement, il est possible de doper la zone concernée, qui peut être rendue hydrophile ou hydrophobe. Dans le cas « hydrophobe », la seule force qui contribue à l'adhésion est la force de Van der Waals. En revanche, le cas « hydrophile » tend à favoriser la formation d'une pellicule d'eau, qui entraîne l'apparition d'une force capillaire et modifie l'environnement de l'interaction. Il est donc nécessaire d'estimer les modules des forces en présence dans chacun des cas pour déterminer la nature du dopage.

Considérons pour cela l'exemple suivant, où l'objet à saisir et la lame inférieure du préhenseur sont en silicium. La force d'adhésion est donnée dans chacun des cas par

$$F_{\rm po}^{\rm adh} = \begin{cases} 4\pi R \gamma_{\ell} + \frac{A_{\rm Si/H_2O/Si}R}{6d^2} & \text{pour un dopage hydrophile} \\ \frac{A_{\rm Si/Si}R}{6D_0^2} & \text{pour un dopage hydrophobe} \end{cases}$$
(3.17)

20 -

Les rapport de ces deux expressions vaut dans ce cas

$$\frac{24\pi D_0^2 \gamma_{\ell} + A_{\text{Si/H}_2\text{O/Si}}}{A_{\text{Si/Si}}} = 3,94 \text{ avec} \begin{cases} A_{\text{Si/H}_2\text{O/Si}} = 13,8 \cdot 10^{-20} \text{ J} \\ A_{\text{Si/Si}} = 25,8 \cdot 10^{-20} \text{ J} \\ \gamma_{\ell} = 72,75 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2} \\ D_0 = 1,65 \text{ Å} \end{cases}$$
(3.18)

1.

Ce résultat indique que le dopage doit rendre la zone de contact hydrophile, la rendant ainsi près de quatre fois plus attractive que la surface en dehors des pointes. Ce traitement permet donc un positionnement optimal de l'objet. L'atténuation espérée par ce principe original peut atteindre le coefficient 1000, valeur nécessaire pour réussir la dépose statique [SF03]. L'actionnement prévu est de type électrostatique dans la thèse de Fabien Dionnet [Dio05].

3.3.2 Réalisation technologique

La phase de réalisation a été confiée à l'équipe Microsystèmes Silicium de l'IEMN. La réalisation d'une telle structure constitue un véritable défi technologique puisqu'elle nécessite pas moins de 53 étapes de micro-fabrication. Les pointes sont réalisées par la gravure d'un substrat en silicium au travers d'un masque circulaire en oxyde de silicium (SiO₂). A la fin de cette étape, la géométrie des pointes est encore grossière. Elles sont alors affinées lors d'une phase d'oxydation sèche pour atteindre les dimensions souhaitées, de l'ordre de 5 μ m de hauteur pour une base de 4 μ m de diamètre et une extrémité de rayon 20 nm comme le montre la figure 3.15 page suivante.

Depuis deux ans, la réalisation de nombreux prototypes a permis d'affiner la procédure afin d'aboutir à un préhenseur performant. Les deux électrodes sont disposées sur la face interne de la lame supérieure supportant les pointes. Elles sont réalisées par dépôts successifs de couches de Si_xN_y et de polysilicium dopé sur toute la surface du substrat et par gravure au travers d'un masque de résine définissant leur géométrie. Le résultat est proposé sur la figure 3.16 page suivante.

Des prototypes à différentes étapes de fabrication de la lame inférieure sont illustrés sur la figure 3.17. La première série d'images présente des préhenseurs lors du dépôt de la couche sacrificielle. La seconde témoigne de la libération de la structure. On peut remarquer un relief sur le pourtour des trous. Il s'agit d'un



Figure 3.15 – Photos de pointes 5 à 6 µm de hauteur après gravures et oxydations



Figure 3.16 – Pointes et électrodes



(a) Lames inférieures de différentes dimensions (les pointe sont noyées dans la couche sacrificielle))





(b) Libération de la structure



(c) Planarisation de la surface de contact par Focus Ion Beam (FIB) Figure 3.17 – Photos du prototype final

résidu de SiO_2 dont le dépôt épouse le relief. Les dernières images dévoilent enfin un prototype entièrement réalisé, avant et après gravure de ce résidu.

Après un long processus d'affinage du procédé de fabrication, les derniers prototypes de préhenseur à surface de contact adaptative sont en phase finale de conception. Des tests sont actuellement en cours afin de caractériser le préhenseur et de déterminer les tensions de *pull-in* et de *pull-out*, paramètres essentiels de la capacité d'actionnement du préhenseur. Les premiers résultats font actuellement apparaître des seuils de l'ordre de 70 V pour la mise en contact des deux lames et de l'ordre de 10 V pour le retour en mode lames séparées. Une fois les paramètres d'actionnement connus et maîtrisés, les premières manipulations d'objets microscopiques seront entreprises au sein du système de micro-manipulation [*mü*]MAD.

3.4 Conclusion

Ce chapitre avait pour vocation de décrire les élements technologiques de la plate-forme dédiée à la micromanipulation par adhésion.

Un préhenseur actif mono-digital est plus particulièrement décrit car il représente l'outil central de ces années de recherche. Il incorpore des propriétés de mesures de l'effort normal et un actionneur piézo-élétrique pour la dépose par effet inertiel. Les autres éléments de la plate-forme sont décrits en privilégiant l'utilisation de solutions existantes commerciales. Enfin, une reflexion particulière est menée sur un préhenseur bilame entièrement basé sur la maîtrise de l'adhésion dans les interactions statiques objet/préhenseur et objet/substrat. Le dispositif expérimental [*mü*]MAD a entiérement été assemblé par les membres de l'équipe micro-manipulation. En particulier, cette connaissance acquise et l'ouverture matérielle implicite des systèmes utilisés vont entraîner la mise en place d'outils d'assistance entièrement dédiés aux besoins des manipulations ainsi que la définition d'une nouvelle plate-forme dédiée à l'environnement biologique décrite dans le sixième chapitre.

La plate-forme [*mü*]MAD [HRG03] représente un outil unique, par l'ensemble des spécificités qu'elle intègre, pour tester des outils d'assistance ou des stratégies expérimentales dans le cadre d'applications de manipulations d'objets rigides en environnement athmosphérique.

Chapitre 4

Robotisation partielle du site expérimental

Les précédents chapitres explicitaient les différents éléments nécessaires pour réussir à manipuler des objets par contact adhérent. Cette simple tâche peut être réussie manuellement avec les composants de la plateforme. Pour éviter la réalisation d'étapes fastidieuses (mises au point successives, choix d'un objet, approche et retrait du préhenseur, ...), un ensemble d'outils d'assistance a été proposé. L'exploitation commune de ces techniques induit la définition de stratégies complexes et évoluées décrites dans le cinquième chapitre.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description et la mise en œuvre des commandes associées permettant d'assister l'opérateur en automatisant à des degrés divers certaines opérations récurrentes. Ces techniques garantissent ainsi une manipulation fiable, robuste et sûre. Les différentes tâches recherchées sont la mise au point du dispositif optique sur les divers éléments de l'espace de travail, le positionnement horizontal du préhenseur et la gestion du contact de ce dernier avec son environnement microscopique. Un résumé des outils développés est proposé dans ce mémoire et des descriptions détaillées peuvent être trouvées dans la thèse de Fabien Dionnet [Dio05]. Les travaux proposés dans ce chapitre sont appliqués à la micro-manipulation par adhésion, mais présentent par certains aspects une portée plus large commune à tous les systèmes de micro-manipulation avec contact d'objets rigides.

L'exploitation des potentialités des systèmes de télé-opération est ensuite proposée à travers la collaboration de l'équipe micro-manipulation avec le CEA/LIST [VHRM05]. Les interactions usuelles entre l'opérateur et le système de micro-manipulation en mode assistée se réduisent en effet à une simple interface graphique. Le retour d'informations sur l'état du système est également et uniquement de nature graphique. Il semble donc particulièrement important d'impliquer l'opérateur dans la commande du micro-manipulateur. L'une des interactions qui présente le plus d'intérêt, en terme de perception pour l'utilisateur, concerne le sens du toucher. Cet aspect est d'autant plus fondamental que les forces dominantes dans le micro-monde sont totalement différentes de celles perçues par un opérateur humain dans le macro-monde.

La deuxième partie de ce chapitre traite de l'interaction entre un opérateur humain et le monde microscopique au travers du système de micro-manipulation [*mü*]MAD avec une interface haptique. Les travaux présentés se concentrent sur le couplage bilatéral entre la plate-forme et une interface haptique à un degré de liberté, nommée *Brigit*, sur l'axe vertical de mesure de l'effort de contact. Celle-ci permet à la fois de piloter le système tout en retranscrivant des informations issues du micro-monde sous forme d'efforts. Deux schémas de commande ont été développés pour répondre à cette problèmatique et une comparaison des propriétés intrinsèques de ces deux couplages est ainsi effectuée et résumée dans ce chapitre.

4.1 Outils d'assistance pour des tâches automatisées

4.1.1 Mise au point assistée

La mise au point est un outil essentiel pour guider l'outil vers l'objet à manipuler. Il existe de nombreuses méthodes pour répondre à cette problématique pour une image donnée. La bonne ou mauvaise mise au point d'une image introduit en effet des répercussions multiples qui peuvent se traduire par plusieurs phénomènes quantifiables, comme par exemple la localisation ou la dispersion de l'histogramme, l'écart type des pixels par rapport au niveau moyen de l'image ou la répartition fréquentielle spatiale. De nombreux critères ont été étudiés [GYL85, Kro87], les plus courants mesurant les hautes fréquences de l'image. La méthode retenue, pour le bon rapport entre ses performances et son coût en terme de temps de calcul, est basée sur l'estimation du gradient, en utilisant le principe selon lequel une image nette possède plus de hautes fréquences qu'une image floue.

Pour une image discrète I de dimension $M \times N$, le critère d'optimisation retenu, fonction de la position de la caméra z_c , s'écrit de la façon suivante :

$$f(z_c) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} H(m, n)$$
(4.1)

avec

$$H(m,n) = \begin{cases} |S_u * I(u,v)| + |S_v * I(u,v)| & \text{si } |S_u * I(u,v)| + |S_v * I(u,v)| > G_0\\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
(4.2)

Le seuil G_0 est réglé expérimentalement afin d'éliminer au mieux le bruit et de donner au critère un profil respectant les conditions d'unimodalité, de précision et de reproductibilité. Cette mesure utilise le filtre de Sobel car l'amplitude du gradient est très sensible au bruit. Les gradients sont ainsi estimés par la convolution de l'image I par les masques suivants :

$$\boldsymbol{S}_{u} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{S}_{v} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & k \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.3)

Le graphe de la figure 4.1 page suivante représente des mesures du critère de mise au point sur une série d'images du préhenseur acquises par le dispositif optique pour différentes positions de ce dernier. La courbe rouge résulte d'une mesure sur l'image complète, tandis que la courbe bleue provient d'une mesure sur une « imagette » ne contenant que l'extrémité du préhenseur. Le critère proposé semble pertinent en vue d'une optimisation puisque dans les deux cas, il ne possède qu'un maximum et présente un pic relativement marqué correspondant à une image ou une imagette nette.

Pour un algorithme de mise au point assistée, la première étape consiste à détecter un optimum pour l'image complète. Il faut ensuite choisir une zone d'intérêt pour effectuer une mise au point fine. Cette imagette peut être choisie par l'opérateur ou résulter d'une détection d'imagettes de référence pré-enregistrées. Ce dernier point, particulièrement adapté à la détection de préhenseur qui ne varie pas d'une manipulation à la suivante, est traité dans la partie suivante.

La mise au point successive sur un objet puis sur le préhenseur permet d'estimer leurs altitudes relatives. En considérant l'incertitude de la mesure, l'épaisseur des corps et les erreurs d'inclinaison entre l'axe optique et les axes de translations verticaux, il est possible de positionner le préhenseur en toute sécurité sur un plan horizontal situé à moins d'une centaine de microns au dessus de l'objet à manipuler. L'étape suivante consiste à le déplacer au dessus de l'objet, avant d'entamer une translation verticale jusqu'au contact. Ce positionnement est relatif car la position de l'objet n'est pas connue de manière absolue puisque variable d'une expérience à une autre.



Figure 4.1 – Mesure du critère de mise au point avec le filtre de Sobel

4.1.2 Détection et définition du point de contact

La méthode d'extraction de contours utilisée repose sur l'utilisation des filtres de Sobel décrits lors de la définition du critère de mise au point (éq. 4.1). Les contours sont des zones de fort gradient. La carte des contours C d'une image I peut être obtenue à partir d'une image binaire seuillée définie par :

$$C(m,n) = \begin{cases} 1 & \text{si } H(m,n) \ge H_0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{H} = |\boldsymbol{S}_u * \boldsymbol{I}| + |\boldsymbol{S}_v * \boldsymbol{I}| \tag{4.4}$$

La figure 4.2 représente les contours d'une prise de vue du préhenseur pour un seuil H_0 éliminant correctement le bruit. Le résultat de cette étape peut produire des contours relativement épais, discontinus et inclure des artefacts. Une extraction de contours précise nécessiterait encore l'élimination des points aberrants et la fermeture des chaînes. En revanche, pour l'application considérée, ce résultat est suffisant pour les différents tests effectués.



Figure 4.2 – Extraction de contours

Pour mettre en contact le préhenseur mobile avec l'objet à manipuler en un point défini, il est nécessaire de connaître la position du point de contact dans chaque image acquise. Or, ce point devant se situer sur l'axe de symétrie principal du préhenseur, il ne correspond pas à un point du contour et ne peut donc être détecté directement. La procédure mise en place, décrite par la figure 4.3 page suivante, consiste dans un premier temps à sélectionner une imagette contenant l'ensemble du préhenseur et ensuite à en extraire les contours. L'axe principal de symétrie du préhenseur (droite bleue) est déterminé en calculant le barycentre des points de contour sur des portions du préhenseur (rectangles rouges). L'angle algébrique formé avec l'axe u de l'image est noté θ . Il n'est pas possible de trouver la position de la base du préhenseur car celle-ci est occultée par son support. En revanche, la position de son extrémité E ainsi que sa largeur en pixel w_p sont

déterminées en balayant l'imagette par une droite orthogonale à l'axe de symétrie. Enfin, une sous-imagette de dimensions $M' \times N'$ contenant l'extrémité du préhenseur est sélectionnée pour servir de modèle pour la détection. Cette zone est choisie car elle produit un contour relativement caractéristique.

En notant (u_e, v_e) les coordonnées en pixel de l'extrémité du préhenseur dans le repère image lié au modèle, un point de contact situé à la distance réelle ℓ de la base aura pour coordonnées image u_c et v_c telles que :

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_t} = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_t} - (L-\ell) \frac{w_p}{w} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$$
(4.5)

avec L la longueur de la poutre, l la position du point de contact et w la largeur de la poutre.



Figure 4.3 – Prétraitement en vue de la détection du préhenseur : (a) sélection d'une imagette,
(b) extraction de contours, (c) détermination de son axe principal de symétrie, (d) détermination de sa largeur et de son extrémité, (e) sélection d'un modèle

La détection d'un objet connu dans une image repose sur l'utilisation de l'algorithme de *template matching*, qui consiste à balayer une image I de dimensions $M \times N$ avec un modèle T de dimensions $M' \times N'$ afin de rechercher la position pour laquelle le modèle est en coïncidence avec l'image. En notant (u_g, v_g) les coordonnées du coin supérieur gauche du modèle correspondant à la plus forte probabilité, les points de contact à mettre en correspondance ont des coordonnées dans l'image totale égales à :

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} = \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} + \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_t} - (L-\ell) \frac{w_p}{w} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$$
(4.6)

dans le cas du préhenseur, et

$$\begin{bmatrix} u_o \\ v_o \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} = \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} + \begin{bmatrix} u_o \\ v_o \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_t}$$
(4.7)

dans le cas d'un objet¹. Positionner le préhenseur dans l'image revient donc à mettre en correspondance ces deux points.

4.1.3 Asservissement visuel 2D

Les techniques d'asservissement visuel 2D utilisent généralement des informations visuelles 2D extraites d'images fournies à la cadence vidéo par une caméra. Les lois de commande mises en œuvre servent alors à contrôler le mouvement de la caméra afin que les mesures dans l'image s(t) atteignent une valeur désirée

¹en notant (u_o, v_o) les coordonnées en pixels du point de contact de l'objet dans le repère image lié au modèle.

 s^* ou suivent une trajectoire spécifiée $s^*(t)$. Afin d'élaborer une loi de commande en boucle fermée sur des mesures s(t), il est nécessaire d'estimer ou d'approcher la relation qui lie la variation de s aux variables de contrôle. Dans le cas d'informations visuelles géométriques (telles par exemple les coordonnées 2D d'un point) contrôlées à l'aide des six degrés de liberté d'une caméra, cette relation est définie par :

$$\dot{s} = JT \tag{4.8}$$

où T est le torseur cinématique de la caméra et J la matrice d'interaction, ou jacobienne image, associée à s. Cette matrice dépend de la valeur courante de s, mais aussi en général de la profondeur de l'objet considéré. L'asservissement visuel 2D consiste alors schématiquement à réguler l'erreur suivante :

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{J}_{a}^{+} \left(\boldsymbol{s} - \boldsymbol{s}^{*} \right), \quad \text{avec} \quad \boldsymbol{J}_{a}^{+} = \left(\boldsymbol{J}_{a}^{t} \boldsymbol{J}_{a} \right)^{-1} \boldsymbol{J}_{a}^{t}$$
(4.9)

où J_a est une approximation de la matrice d'interaction J et J_a^+ est sa pseudo-inverse. Pour assurer la stabilité et la convergence de e, le produit J_a^+J doit être une matrice définie positive à chaque instant.

La configuration du système simplifie le problème dans notre cas. Le positionnement dans l'image utilise seulement deux micro-translateurs horizontaux. La matrice d'interaction J ne possède donc que deux colonnes et l'asservissement visuel ne nécessite au minimum que deux mesures, les coordonnées du point de contact (u_c, v_c) étant tout à fait adaptées.

La relation qui lie les coordonnées images dans le repère \mathcal{R}_i aux coordonnées réelles dans le repère \mathcal{R}_o est donnée par :

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} - \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_i} = \frac{G}{p} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \beta \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_0} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_0} \right) \quad \text{avec} \quad J = \frac{G}{p} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \beta \end{bmatrix}$$
(4.10)

où G représente le grossissement de l'objectif du microscope, p la taille réelle couverte par un pixel², (u_0, v_0) et (x_0, y_0) les coordonnées image et réelle d'un point quelconque du plan, et enfin α et β les angles algébriques formés respectivement par les axes du repère image u et v avec les projections dans le plan image des axes de translation x et y. La matrice d'interaction est carrée, donc inversible en dehors des singularités. Deux approches sont alors envisageables.

Il est tout d'abord possible de mesurer les angles α et β , par exemple en détectant le préhenseur en différentes positions. La matrice inverse s'écrit alors :

$$\boldsymbol{J}^{-1} = \frac{p}{G\cos(\alpha - \beta)} \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad \text{pour} \quad \alpha - \beta \neq \pm \frac{\pi}{2}$$
(4.11)

Il existe une singularité si les axes de translations x et y sont alignés. Cependant, les translateurs sont placés de manière à avoir α et β les plus faibles possibles, donc loin de la singularité.

La seconde approche consiste à considérer α et β idéalement nuls. Dans ce cas, la matrice d'interaction et son inverse sont approchées par :

$$\boldsymbol{J}_{a} = \frac{G}{p} \boldsymbol{I}_{2} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{J}_{a}^{-1} = \frac{p}{G} \boldsymbol{I}_{2} \tag{4.12}$$

avec I_2 la matrice identité de dimension 2. La condition de convergence impose que le produit $J_a^{-1}J$ soit une matrice définie positive, soit pour tout couple (x, y) réel :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}^{t} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = x^{2} \cos \alpha + y^{2} \cos \beta \ge 0$$
(4.13)

²La calibration n'a pas été abordée dans notre travail car les résultats étaient satisfaisants avec des positionnements relatifs dans l'image.

La convergence est assurée pour des conditions triviales :

$$-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}$$
 et $-\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}$ (4.14)

L'avantage de cette méthode sur la précédente est qu'il n'est pas nécessaire de calibrer le dispositif en mesurant les angles α et β . En revanche, la trajectoire convergente n'est pas rectiligne. Cette particularité soulève des difficultés pour de grands angles en conduisant le préhenseur en dehors du champ de vision du dispositif optique. Celles-ci sont résolues en spécifiant non pas une consigne (u_c^*, v_c^*) constante, mais une variation temporelle de cette consigne sur la trajectoire rectiligne souhaitée.

Le schéma de commande est donné par la figure 4.4. Le gain λ est réglé expérimentalement afin d'obtenir une convergence sans oscillation. Les vitesses de commande sont saturées.



Figure 4.4 – Schéma bloc de l'asservissement visuel 2D

La figure 4.5 page suivante présente les résultats obtenus. Elle permet de comparer les trajectoires du préhenseur dans l'image pour un positionnement en un point de son axe principal avec un asservissement visuel basé sur une matrice d'interaction approchée, puis exacte. Conformément aux attentes, la trajectoire décrite par le préhenseur est parfaitement rectiligne lorsque la matrice d'interaction est exacte alors qu'elle est courbe pour une matrice approchée. Cette courbure peut cependant être corrigée en spécifiant, non pas la position finale du préhenseur, mais la trajectoire rectiligne pas à pas.

4.1.4 Commande en effort

La mise en contact du préhenseur avec l'environnement microscopique est sans aucun doute la phase la plus critique parmi les opérations de micro-manipulation. L'asservissement choisi pour répondre à cette problématique est décrit par la figure 4.6 page ci-contre avec l'hypothèse d'un objet rigide. Le système asservi est constitué des éléments suivants :

- la poutre modélisée par un ressort de raideur K_{ℓ} , selon la position du point d'application ℓ de l'effort F_{ℓ} (cf 3.1.1.3 page 39).
- le correcteur, un simple gain proportionnel K_n .
- le nano-translateur commandé en position sur une course de 12 μ m, avec comme fonction de transfert N(s) (cf 4.2.1.2 page 63).

La commande issue du correcteur, homogène à une vitesse, doit être préalablement intégrée. Le réglage du correcteur proportionnel K_n peut être réalisé par l'étude du lieu des racines ou *lieu d'Evans* du système continu en boucle ouverte :

$$G(s) = K_n \frac{1}{s} N(s) K_{\ell} = \frac{k}{s(s-p_1)(s-p_2)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} k = p_1 p_2 K_n K_{\ell} \\ p_1 = -741,64 \\ p_2 = -1766,4 \\ K_{\ell} = (L/\ell)^3 K_L \end{cases}$$
(4.15)



(a) Position initiale (470, 440) et
définition de la position finale (307, 423) sur l'axe principal du
préhenseur



(b) Positionnement avec matrice d'interaction approchée





(c) Positionnement avec matrice(d) Suivi de trajectoire rectiligned'interaction exacteavec matrice d'interaction approchéeFigure 4.5 – Positionnement et suivi de trajectoire du préhenseur dans l'image



Figure 4.6 – Schéma bloc de l'asservissement en effort simple

Cette étude permet de calculer les gains limites K_1 et K_2 , fonctions du rapport ℓ/L :

$$K_1(\ell) = 7, 1 \times (\ell/L)^3$$
 et $K_2(\ell) = 119 \times (\ell/L)^3$ (4.16)

Le comportement du système en réponse à une consigne de type échelon est alors :

- − si $K_n \le K_1$, la réponse indicielle est de type amortie (sans dépassement) puisque le système correspond à la mise en cascade de trois passe-bas du premier ordre.
- si $K_1 \le K_n \le K_2$, le système est assimilable à un passe-bas du second ordre à deux pôles complexes conjugués. Le pôle réel est en effet suffisamment faible pour être dominé par les autres.

- si $K_n \ge K_2$, le système est instable puisque la partie réelle des pôles complexes devient positive.

La figure 4.7 page suivante montre la réponse du système à un échelon, le gain proportionnel étant réglé à la limite du comportement oscillatoire pour un contact situé en $\ell = 0, 7 \times L$. L'allure de cette réponse est considérablement modifiée lorsque le point de contact varie. Il convient donc d'adapter K_n en fonction du point de contact ℓ pour chaque manipulation afin d'obtenir un comportement satisfaisant s'il est amené à varier fortement. Dans le cas contraire, le système peut tendre vers l'instabilité lorsque le contact se rapproche de la base de la poutre.

En pratique, cet asservissement est implémenté numériquement à la période d'échantillonnage de 2 ms. La sortie de l'intégrateur est saturée. La figure 4.8 page suivante montre la réponse réelle du système soumis



Figure 4.7 – Influence de la position du point de contact sur la réponse indicielle du système asservi en effort

à plusieurs échelons d'effort. L'allure de la réponse est très satisfaisante, mais la gamme d'efforts applicables est cependant limitée par la faible course du nano-translateur. Pour des consignes de 100 et 150 μ N, celui-ci est en effet en butée et l'effort appliqué est très incertain. Une dérive apparaît alors. Celle-ci est en revanche parfaitement corrigée lorsque le préhenseur est hors de la butée. Cette particularité démontre un intérêt supplémentaire à la mise en place de cet asservissement.



Figure 4.8 – Réponse du système asservi en effort à des échelons

La course du nano-translateur étant relativement faible, il faudrait que le préhenseur soit initialement positionné à seulement quelques microns au dessus de l'objet pour pouvoir établir le contact. La solution envisagée est de profiter de la redondance cinématique de l'axe vertical de translation et d'utiliser dans la boucle d'asservissement en effort décrite par la figure 4.6 page précédente, une boucle secondaire. Celleci vise à asservir la position du nano-translateur au point médian de sa course, par des déplacements du micro-translateur vertical, selon le principe donné par la figure 4.9.



Figure 4.9 – Schéma bloc de l'asservissement en effort avec boucle secondaire

Afin d'éviter un phénomène de pompage dû aux différences de résolution des deux translateurs, il est nécessaire de définir une « zone morte » autour de la position désirée du nano-translateur pour laquelle la boucle interne ne produit aucun mouvement du micro-translateur. Pour éviter toute discontinuité, cette zone morte est lissée, son profil étant donné par la fonction impaire f définie par :

$$f(z_n) = -f(-z_n) = \begin{cases} 0, & \text{pour } 0 \le z_n \le 2, \\ -\frac{z_n^3}{96} + \frac{z_n^2}{6} - \frac{13}{24}z_n + \frac{1}{2}, & \text{pour } z_n \ge 2 \end{cases}$$
(4.17)

La taille de la zone est fixée à 4 μ m. Le gain K_m permet de régler la vitesse maximale du micro-translateur lorsque le nano-translateur est en butée. Ce réglage résulte d'un compromis entre temps de réponse et amplitude de dépassement.

Le graphe de la figure 4.10 montre l'effort appliqué au préhenseur lors de la mise en contact du préhenseur avec un objet utilisant l'asservissement en effort à boucle secondaire. Le préhenseur est initialement situé à plusieurs dizaines de microns de l'objet. Lorsqu'une consigne non nulle est demandée, le nanotranslateur est mis en mouvement. Puisque l'effort mesuré est nul, il sort de la zone morte et atteint sa butée basse, induisant la mise en mouvement du micro-translateur. Lorsque le préhenseur entre en contact avec l'objet, le nano-translateur remonte. Le système se stabilise alors en une position pour laquelle l'effort mesuré correspond à sa consigne et le nano-translateur est dans la zone morte.



Figure 4.10 – Mise en contact du préhenseur avec un objet par asservissement en effort avec une boucle secondaire

4.1.5 Schéma de commande du système

La différence de profondeur entre les objets et le préhenseur peut être estimée à partir de la mise au point automatisée. La poutre peut ainsi être positionnée au voisinage du substrat en toute sécurité. Ensuite, sous couvert d'une bonne mise au point du dispositif optique, le positionnement horizontal précis du préhenseur au dessus de l'objet à manipuler peut être résolu avec l'asservissement visuel. Enfin, moyennant un positionnement horizontal précis, l'asservissement en effort peut mettre en contact le préhenseur et l'objet de manière sécurisée, en maîtrisant précisément les efforts d'interaction. Le schéma résultant de commande du dispositif est donné par la figure 4.11 page suivante.



Figure 4.11 – Schéma de commande du système [mü]MAD

4.2 La télé micro-manipulation

4.2.1 Description de la plate-forme expérimentale

4.2.1.1 Organe maître : interface haptique Brigit

En mode télé-opération, l'opérateur utilise un organe maître, une interface haptique, pour contrôler les mouvements d'un système esclave, tout en ressentant les efforts qui lui sont appliqués par l'environnement. Un système haptique, baptisé *Brigit*, a ainsi été réalisé (cf. Fig. 4.12(a)) pour le problème de la télé micromanipulation et installé sur la plate-forme [*mü*]MAD. Cette interface se compose d'un moteur à courant continu pouvant fournir un couple maximal de 0, 1Nm, sur l'axe duquel sont montés un codeur optique à haute résolution, ainsi qu'un volant qui permet la manipulation par un opérateur. Le choix, a priori peu adapté, de commander la translation de l'esclave par une interface haptique possédant un degré de liberté en rotation s'explique par la simplicité de mise en œuvre d'un tel dispositif pour un travail exploratoire. Contrairement à certains bras-maîtres, *Brigit* n'a aucune butée de position, laissant envisager une large gamme d'utilisations. L'ensemble des propriétés de *Brigit* est décrit dans l'annexe B page 111.



Figure 4.12 – Modélisation de l'interface haptique Brigit

A partir de l'application du principe fondamental de la dynamique, la fonction de transfert de Brigit peut être
établie :

$$V_b = B(s)(F_o + F_b^*) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} B(s) = \frac{R_b^2}{\mu_b + J_b s} = \frac{B_0}{1 + \tau s}, \quad B_0 = \frac{R_b^2}{\mu_b}, \quad \tau = \frac{J_b}{\mu_b} \\ F_b^* = \frac{K_b}{R_b} I_b^* \end{cases}$$
(4.18)

Ce système possède deux entrées, l'une mécanique, F_o , force tangentielle appliquée par l'opérateur, l'autre d'origine électrique, F_b^* , force tangentielle au volant correspondant à l'utilisation d'un courant I_b^* , et une sortie, V_b , vitesse linéaire tangentielle de *Brigit*. R_b représente le rayon du volant. L'inertie totale J_b et le coefficient de frottement visqueux μ_b sont identifiés expérimentalement, ainsi que la constante caractéristique K_b liant le couple moteur au courant.

Pour un courant nul, la force requise pour mettre *Brigit* en mouvement est très faible. L'opérateur ne ressent pas d'autre résistance que la faible inertie de *Brigit*. En revanche, l'entrée en courant peut être utilisée pour favoriser ou interdire un déplacement et faire ressentir un effort à l'utilisateur.

4.2.1.2 Organe esclave : micro-manipulateur [mü]MAD

Le nano-translateur est commandé en position sur une course de 12 μ m. L'identification de sa fonction de transfert en continu permet de l'assimiler à un passe-bas du second ordre à pôles réels négatifs et de gain statique unité. Il possède ainsi pour fonction de transfert :

$$N(s) = \frac{Z_n}{Z_n^*} = \frac{V_n}{V_n^*} = \frac{1}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tau_1 = 1,35 \text{ ms} \\ \tau_2 = 0,57 \text{ ms} \end{cases}$$
(4.19)

La poutre peut être modélisée par un simple ressort de raideur K_{ℓ} dépendant de la position du point de contact ℓ par la relation suivante :

$$K_{\ell} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^{3} K_{L} \quad \text{avec} \quad 0 \le \ell \le L \tag{4.20}$$

où $K_L = 21,06$ Nm représente la raideur équivalente en bout de poutre, de longueur L. En cas de contact, la force extérieure, F_e , correspond à la force exercée par l'environnement microscopique sur le préhenseur et est égale à :

$$F_e = F_l = -K_\ell Z_n = -\frac{K_\ell}{s} V_n \tag{4.21}$$

4.2.1.3 Architecture globale du système

L'architecture globale du système est illustrée par la figure 4.13. Le PC de commande de *Brigit* gère uniquement l'asservissement en courant et communique par liaison Ethernet avec le PC du système de micromanipulation. Celui-ci s'occupe de la partie esclave et du couplage bilatéral. La période d'échantillonnage est fixée à 2 ms à cause des limites intrinsèques de la connexion.

4.2.2 Etudes de différents couplages

4.2.2.1 Définition des facteurs d'échelle

L'interface *Brigit* est conçue pour être manipulée par un opérateur humain sur une course choisie par l'utilisateur. L'esclave est en revanche dimensionné pour manipuler des objets d'une taille de l'ordre de quelques dizaines de microns sur des distances analogues. Cette interaction met en jeu des efforts de l'ordre du micronewton. La figure 4.14 montre la principe général du couplage bilatéral à réaliser entre le maître et l'esclave en fonction du dispositif choisi et de la modélisation adoptée. Il est préalablement nécessaire d'établir des



Figure 4.13 – Architecture globale du système



Figure 4.14 – Principe général du couplage entre le maître et l'esclave

facteurs d'échelle permettant de transcrire les efforts et les vitesses macroscopiques en grandeurs microscopiques et réciproquement.

Dans la mesure où le maître ne possède pas de butée, il est possible de choisir librement sa course, en correspondance avec celle du nano-translateur de 12 μ m. Par un compromis entre précision et confort, la course choisie est de 2 rad. L'opérateur peut ainsi manipuler le maître sans lâcher le volant et sans passer par des positions inconfortables tout en gardant une bonne précision de positionnement. Cette course angulaire est équivalente à une course linéaire tangentielle au volant de 7 cm. La constante d'homothétie en déplacement entre le maître et l'esclave peut alors être calculée :

$$A_d = \frac{7 \times 10^{-2}}{12 \times 10^{-6}} = 5,83 \times 10^3 \tag{4.22}$$

En considérant que la poutre peut fléchir de 12 µm, l'effort maximal appliqué à son extrémité est de 252 µN. *Brigit* peut exercer un couple maximal de 0,1 Nm, soit une force tangentielle de 2,86 N. La constante d'homothétie en effort A_f vaut alors :

$$A_f = \frac{2,86}{252 \times 10^{-6}} = 1,13 \times 10^4 \tag{4.23}$$

4.2.2.2 Le couplage homothétique

Le premier raisonnement pour coupler l'esclave et le maître consiste à copier directement les déplacements de *Brigit* sur le nano-translateur et de transcrire l'effort mesuré par la poutre AFM au niveau de *Brigit* par l'intermédiaire de la commande en courant. Le schéma de fonctionnement est donné par la figure 4.15.

Le bloc de couplage se résume à un simple couplage homothétique. Celui-ci transpose les grandeurs d'un environnement à l'autre selon :

$$F_b^* = A_f F_e \tag{4.24}$$

$$V_n^* = \frac{1}{A_d} V_b \tag{4.25}$$



Figure 4.15 – Principe du couplage homothétique

En pratique, le nano-translateur est commandé en position, la consigne Z_n^* résultant de l'intégration de la consigne en vitesse V_n^* issue du couplage. De même, *Brigit* est commandé en courant, la consigne valant d'après (4.18) :

$$I_b^* = \frac{R_b}{K_b} F_b^* \tag{4.26}$$

Avec ce type de couplage, les butées du nano-translateur ne sont pas prises en compte. Elles sont par exemple³ traitées artificiellement en saturant la consigne en position du nano-translateur et en imposant au maître un courant d'intensité limite de $\pm 1,907$ A. Cette valeur correspond au couple maximal admissible, de manière à opposer une forte résistance à l'opérateur.

4.2.2.3 Le couplage passif

Une autre approche consiste à asservir le nano-translateur en effort et l'interface *Brigit* en vitesse, les consignes respectives étant issues de l'environnement opposé par rapport au schéma précédent, permettant ainsi de rendre le couplage passif [AS89]. Le schéma de fonctionnement est donné sur la figure 4.16. Le bloc de couplage est constitué de trois sous-blocs, détaillés dans la suite :

- un couplage homothétique dont la fonction est similaire au cas précédent ;
- un contrôleur maître;
- un contrôleur esclave.

Le contrôleur maître C(s) réalise l'asservissement de la vitesse de *Brigit*, V_b , dont la consigne est à l'échelle près la commande de l'esclave, V_n^* . Le correcteur employé est de type proportionnel-intégral (PI) avec des coefficients notés K_p et K_i selon :

$$F_b^* = C(s)(A_d V_n^* - V_b)$$
 avec $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ (4.27)

Le contrôleur esclave reprend l'asservissement en effort utilisant un simple gain proportionnel K_n décrit dans la section 4.1.4 page 58. Il permet en outre de calculer une consigne en vitesse pour le maître :

$$V_n^* = K_n \left(F_e - \frac{1}{A_f} F_b^* \right) \tag{4.28}$$

³Il existe néanmoins des méthodes plus complexes conservant des propriétés de continuité pour traiter ces butées.



Figure 4.16 – Principe du couplage passif

Il est à noter que F_e représente la force exercée par l'environnement sur le préhenseur, les signes du comparateur sont donc adaptés en conséquence. Les butées sont traitées en annulant la consigne V_n^* . Ce choix a pour effet de saturer la consigne en position Z_n^* et de modifier la consigne du contrôleur maître plutôt que directement la commande en courant.

4.2.3 Performances comparées des deux couplages

Cette partie s'attache à comparer les deux couplages présentés en terme de deux critères essentiels dans les couplages bilatéraux, la transparence et la stabilité [Mic02].

4.2.3.1 Transparence

Lorsque le préhenseur est en contact avec son environnement, il existe une relation qui lie la force F_e exercée par l'environnement microscopique sur le préhenseur à la vitesse V_n du nano-translateur :

$$F_e = Z_e(V_n) \tag{4.29}$$

où Z_e représente l'impédance transmise par l'environnement microscopique à l'esclave. De la même manière, il existe une relation entre la force F_o exercée par l'opérateur sur *Brigit* et sa vitesse V_b , mettant en jeu l'impédance Z_o :

$$F_o = Z_o(V_b) \tag{4.30}$$

La condition pour que l'opérateur ressente exactement les interactions du préhenseur avec le monde microscopique implique que ces deux impédances soient identiques, au signe et au facteur d'homothétie près :

$$Z_o = -\frac{A_f}{A_d} Z_e \tag{4.31}$$

La transparence est un critère essentiel pour l'application de micro-manipulation. L'intérêt de la mise en place d'un tel système repose en effet sur la capacité de l'opérateur à ressentir les phénomènes particuliers de l'échelle microscopique. Deux cas représentatifs sont étudiés. Si le préhenseur est libre, aucune force n'est mesurée et l'impédance désirée du côté opérateur doit être nulle :

$$Z_h^* = 0$$
 (4.32)

Si le préhenseur est en contact avec l'environnement, l'impédance désirée doit être égale d'après (4.21) :

$$Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s} \tag{4.33}$$

Les expressions des calculs des impédances Z_h et Z_c pour les deux couplages ne sont pas développées dans ce document et sont décrites dans la thèse de Fabien Dionnet [Dio05]. Elles sont résumées dans le tableau 4.1. Seules les conclusions principales de ces études sont détaillées pour percevoir les propriétés de ces couplages.

	Préhenseur hors contact	Préhenseur en contact
Couplage Homothétique	$Z_{h1} = \frac{1}{B_0} (1 + \tau s)$	$Z_{c1} = \frac{1}{H_1(s)} Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s} \left(N(s) + \frac{A_d}{A_f K_\ell} \frac{s}{B(s)} \right)$
Couplage Passif	$Z_{h2} = Z_{h1} + \frac{A_f C(s)}{A_f + A_d K_n C(s)}$	$Z_{c2} = \frac{1}{H_2(s)} Z_c^* = -\frac{A_f}{A_d} \frac{K_\ell}{s} \left(\frac{A_d s}{A_f K_\ell B(s)} + \frac{A_d s C(s)}{K_\ell (A_f + A_d K_n C(s))} + \frac{A_d^2 K_n^2 s C^2(s) N(s)}{(A_f + A_d K_n C(s))(A_f s + A_d K_n s C(s) + A_f K_n K_\ell N(s))} \right)$

Tableau 4.1 – Impédance hors et en contact pour les deux couplages

Dans le cas hors contact, l'opérateur ne devrait idéalement ressentir aucune résistance. Pour le couplage homothétique, l'impédance ressentie Z_{h1} est en pratique minimale en basse fréquence et commence à augmenter pour des pulsations de l'ordre de $1/\tau$. Pour le couplage position/position, l'impédance Z_{h2} est minimale en basse fréquence si la condition suivante est respectée :

$$\frac{1}{K_i K_n} \ll \frac{A_d}{A_f} \frac{1}{K_i B_0} \implies K_n \gg \frac{A_f}{A_d} B_0 = 385$$
(4.34)

Si cette condition est vérifiée alors l'impédance Z_{h2} est égale à :

$$Z_{h2} \approx \frac{1}{B_0} (1 + \tau s) = Z_{h1} \tag{4.35}$$

La figure 4.17 montre l'influence du gain proportionnel K_n de la commande en effort sur la transparence lorsque le préhenseur est hors contact. Lorsque K_n croît, Z_{h2} converge en effet vers Z_{h1} qui représente l'impédance la plus faible atteignable.



Figure 4.17 – Influence du gain K_n sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur $Z_h(j\omega)$ en mode libre ($K_p = 4$ à 4000, $K_p = 2$, $K_i = 400$)

Dans le cas du contact, la transparence est parfaite si (voir tab. 4.1):

$$H_i(s) = 1 \tag{4.36}$$

Pour le couplage homothétique, l'expression de H_1 peut être simplifiée en considérant que la constante de temps τ est très nettement supérieure aux constantes du nano-translateur τ_1 et τ_2 . Dans ce cas la fonction $H_1(s)$ s'apparente alors à un transfert du second ordre :

$$H_1(s) \approx \frac{1}{1 + A\tau_p s + A\tau\tau_p s^2} \tag{4.37}$$

à pôles complexes conjugués, de pulsation caractéristique $\omega_0 = \sqrt{\frac{A_f B_0 K_\ell}{A_d \tau}} \ge \sqrt{\frac{A_f B_0 K_L}{A_d \tau}} = 27,7$ rad/s. Il est possible d'étendre la plage de transparence ω_0 en jouant sur les facteurs d'homothétie A_f et A_d .

Pour le couplage passif, l'expression brute de $H_2(s)$ est difficilement exploitable en dehors des considérations sur le gain statique. Plusieurs simplifications permettent cependant d'alléger sa forme en considérant que la constante τ est très nettement supérieure aux constantes du nano-translateur et que la condition 4.34 est vérifiée. Pour obtenir un gain statique le plus proche de l'unité en basse fréquence, il faut alors que :

$$K_i \gg \frac{A_f}{A_d} K_\ell > \frac{A_f}{A_d} K_L = 40,9 \tag{4.38}$$

Avec cette hypothèse,

$$H_2(s) \approx H_1(s) \tag{4.39}$$

La figure 4.18 montre l'influence de K_i sur la transparence en mode contact. Lorsque K_i croît, Z_{c2} converge en effet vers Z_{c1} qui représente l'impédance la plus réaliste possible.



Figure 4.18 – Influence du gain K_i sur le diagramme de Bode de l'impédance ressentie par l'opérateur $Z_c(j\omega)$ en mode contact ($K_n = 4000, K_p = 4, K_i = 0.4$ à 400)

Globalement, le couplage homothétique peut sembler le plus performant en terme de transparence. Il est cependant possible d'atteindre un niveau de transparence similaire avec le couplage passif en réglant judicieusement les gains des correcteurs maître et esclave.

4.2.3.2 Stabilité

Il est en général difficile d'établir une condition nécessaire et suffisante de stabilité pour les systèmes de téléopération dans la mesure où il s'agit de systèmes multi-variables en interaction avec des environnements dont le comportement est a priori inconnu. En télé-opération, le critère requis est plutôt la stabilité inconditionnelle qui garantit la passivité du système de télé-opération du point de vue de l'opérateur si l'environnement distant est passif et vice versa [Mic02]. Pour déterminer si le système de télé micro-manipulation est inconditionnellement stable, il est nécessaire d'écrire les schémas de couplage sous la forme admittance [HZS01] :

$$\begin{bmatrix} V_b \\ V_n \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} F_o \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_o \\ F_e \end{bmatrix}$$
(4.40)

Le système ainsi décrit est alors inconditionnellement stable en mode couplé si et seulement si le critère de Llewelyn [Lle52], composé de trois inégalités, est vérifié :

$$\begin{cases} C_{1}(\omega) = \Re \left[Y_{11}(j\omega) \right] \ge 0 \\ C_{2}(\omega) = \Re \left[Y_{22}(j\omega) \right] \ge 0 \\ C_{3}(\omega) = 2\Re \left[Y_{11}(j\omega) \right] \Re \left[Y_{22}(j\omega) \right] - \Re \left[Y_{12}(j\omega) Y_{21}(j\omega) \right] - |Y_{12}(j\omega) Y_{21}(j\omega)| \ge 0 \end{cases}$$

$$(4.41)$$

Dans le cas contraire, le système est alors dit actif, et peut être potentiellement instable pour certaines entrées.

Les relations (4.18), (4.19), (4.24), (4.25), (4.27) et (4.28) permettent de trouver les coefficients de la matrice admittance pour les deux couplages. Ils sont décrits dans le tableau 4.2.

	$Y_{11}(s) = B(s) = \frac{B_0}{1+\tau s}$ $Y_{12}(s) = A_f B(s) = \frac{A_f B_0}{1+\tau s}$
Couplage homothétique	$Y_{21}(s) = \frac{1}{A_d} N(s) B(s) = \frac{B_0/A_d}{(1+\tau s)(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)}$
nomoneuque	$Y_{22}(s) = \frac{A_f}{A_d} N(s) B(s) = \frac{A_f B_0 / A_d}{(1 + \tau s)(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$
	$Y_{11}(s) = \frac{B(s)(A_f + A_d K_n C(s))}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
Couplage passif	$Y_{12}(s) = \frac{A_f A_d K_n B(s) C(s)}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
Couplage passi	$Y_{21}(s) = \frac{K_n B(s) C(s) N(s)}{A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)}$
	$Y_{22}(s) = \frac{A_f K_n N(s)}{A_f + A_d K_n C(s)} + \frac{A_f A_d K_n^2 B(s) C^2(s) N(s)}{\left[A_f + A_d K_n C(s)\right] \left[A_f + A_d K_n C(s) + A_f B(s) C(s)\right]}$

Tableau 4.2 – Coefficients de la matrice d'admittance pour les deux couplages

Pour le couplage homothétique, le dernier critère est toujours négatif, son calcul aboutissant aux conditions antagonistes :

$$\begin{pmatrix} \left(1 - \tau_1 \tau_2 \omega^2\right) \left(1 + \tau^2 \omega^2\right) \ge 0 & \text{pour } \omega \ge \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}, \\ \left(-\left(\tau_1 + \tau_2\right)^2 \left(1 + \tau^2 \omega^2\right)^2 \omega^2 \ge 0 & \text{pour } \omega \le \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}} \end{cases}$$

$$(4.42)$$

En théorie, le couplage homothétique peut donc se révéler potentiellement instable.

Pour le couplage passif, l'objectif est de définir des conditions sur les gains K_i , K_p et K_n garantissant si possible la stabilité inconditionnelle du système couplé. Le premier critère de Llewelyn est toujours vérifié. Il apparaît que pour un réglage des gains favorisant uniquement la transparence, le système n'est jamais inconditionnellement stable, le troisième critère n'étant jamais positif, comme le montre la figure 4.19 page suivante. Il est cependant possible de rendre ce couplage inconditionnellement stable. La forme des termes de la matrice admittance conduit en effet à étudier le cas particulier :

$$K_p = \frac{1}{B_0}$$
 et $K_i = \frac{1}{B_0 \tau}$ (4.43)

Dans ce cas, le second critère est alors vérifié pour :

$$\omega \le \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}} = 1145 \text{ rad/s} \tag{4.44}$$

Le gain K_n peut ainsi être estimé pour que le troisième critère soit positif sur la plage fréquentielle la plus large possible. Celle-ci est définie par les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \left(1 - \tau_{1}\tau_{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau\left(3\tau + 4\frac{A_{d}}{K_{i}K_{n}A_{f}}\right)\omega^{2}\right) + 2\tau\left(\tau_{1} + \tau_{2}\right)\omega^{2} \ge 0, \\ \left[\left(1 - \tau_{1}\tau_{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau\left(3\tau + 4\frac{A_{d}}{K_{i}K_{n}A_{f}}\right)\omega^{2}\right) + 2\tau\left(\tau_{1} + \tau_{2}\right)\omega^{2}\right]^{2} \ge \left(1 + \tau_{1}^{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau_{2}^{2}\omega^{2}\right)\left(1 + \tau_{2}^{2}\omega^{2}\right$$

Ainsi, le couplage passif peut simplement être réglé pour être passif sur une large gamme de fréquence. La figure 4.19 montre l'allure des seconds et troisièmes critères de Llewelyn pour des réglages de gains favorisant la transparence ou la stabilité. Il est par ailleurs possible d'accroître la plage de passivité au delà de la fréquence d'échantillonnage en ajustant les gains K_p , K_i , puis K_n , tout en conservant une bonne transparence.



Figure 4.19 – Influence du réglage des gains K_p , K_i et K_n sur la passivité du système couplé

Si le couplage homothétique est aisé à mettre en œuvre et parfaitement transparent, il peut en théorie conduire à des instabilités, le critère de Llewelyn sur la stabilité inconditionnelle en mode couplé n'étant jamais vérifié. Il est possible, par le réglage des gains des correcteurs maître et esclave du couplage passif de rendre le système inconditionnellement stable en conservant une bonne transparence. Le choix du couplage sera donc fonction de l'objet de la manipulation. Pour un rendu fin des effets microscopiques tels que le *pull-off*, le couplage homothétique semble le plus adapté. Pour une manipulation sécurisée, la stabilité inconditionnelle du couplage passif est la meilleure solution comme le montrent les expérimentations du chapitre 5.

4.2.4 Résultats expérimentaux

4.2.4.1 Le couplage homothétique

Les deux couplages proposés ont été implémentés sur le système expérimental. La figure 4.20 page ci-contre (a) et (c) présente les résultats en positions et efforts obtenus pour la commande du nano-translateur avec le couplage homothétique. Le préhenseur se situe initialement à environ 2,6 µm au dessus du substrat puis est mis en mouvement par l'opérateur par l'intermédiaire de l'interface haptique *Brigit*.



Figure 4.20 – Résultats expérimentaux ((a) Position (c) Efforts) de télé-opération par couplage homothétique (b) Détails du suivi de position en mode libre (d) Détails du suivi de position en mode contact

Le suivi du nano-translateur est très bon, incluant les mouvements de grande fréquence comme le montrent les détails de la figure 4.20 (b) et (d). La perception de l'opérateur est également très bonne, la différence entre les modes contact et libre étant très claire. Le principal problème de ce couplage provient de la gestion des butées. La discontinuité de la commande en courant impose à l'opérateur de tenir très fermement l'interface, sous peine de la lâcher. Le comportement instable en cas de lâcher a été observé mais doit être évité autant que possible pour ne pas endommager le dispositif. Toutefois, sans aller jusqu'au lâcher, il peut apparaître un phénomène d'oscillations lorsque le nano-translateur arrive en butée (cf. Fig. 4.21 page suivante). La commande en courant oscille alors brutalement entre sa valeur normale, proportionnelle à l'effort mesuré du côté esclave, à sa valeur maximale signe que le nano-translateur est en butée, et vice versa. Ce comportement est désagréable pour l'opérateur et peut entraîner le lâcher de l'interface.

4.2.4.2 Le couplage passif

Ce défaut est parfaitement corrigé par le couplage passif dont les résultats en positions et en efforts sont donnés par les figures 4.22 (a) et(c). Le réglage des gains des correcteurs maître et esclave favorisent dans ce cas la transparence au détriment de la stabilité inconditionnelle afin de privilégier la perception de l'opérateur.

Le suivi du nano-translateur est meilleur en mode libre qu'en mode contact, pour lequel un léger écart est observé (cf. Fig. 4.22 page suivante). Malgré cette écart, la perception des modes contact et libre par l'opérateur est bonne. L'avantage significatif apporté par le couplage passif provient du comportement du système en butée et lors du lâcher. Lorsque le nano-translateur arrive en butée, l'opérateur ressent un « cran »



Figure 4.21 – Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage homothétique (détails)



Figure 4.22 – (a) (c) Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage passif (b) Suivi de position en basse fréquence (d) Suivi de position en haute fréquence

dû à l'annulation de la consigne en vitesse et perçoit ainsi nettement les butées. La commande en courant dans *Brigit* étant continue, le système est netement plus confortable. La figure 4.23 page suivante montre la réponse du système lorsque l'opérateur lâche *Brigit* alors que le nano-translateur est en butée ou le préhenseur en contact. Cette propriété se traduit par une variation brusque de position. Dans tous les cas, le maître et l'esclave se stabilisent en une position pour laquelle aucun effort n'est mesuré.

Il apparaît au terme de cette étude que le couplage passif présente des avantages par rapport au couplage homothétique. Ce dernier présente pourtant les meilleures performances en terme de transparence. Il est



Figure 4.23 – Résultats expérimentaux de télé-opération par couplage passif (détails)

en effet possible de régler le couplage passif pour être inconditionnellement stable tout en conservant une bonne forme de transparence. Il est aussi possible de modifier les valeurs des facteurs d'échelle sans perdre la propriété de stabilité [Nie96] [HHPR03]. Ce couplage sera donc utilisé pour réaliser une télé micromanipulation réaliste et sécurisée avec une interface haptique conventionnelle comme démontrée dans le chapitre 5.3 page 89.

4.3 Conclusion

Les outils d'assistance décrits dans ce chapitre permettent un positionnement précis du préhenseur relativement à son environnement et donc une manipulation d'objets microscopiques robuste et rapide [DRG04]. La mise en œuvre de ces techniques permet d'envisager des utilisations avancées du dispositif [mü]MAD, notamment pour la dépose, tâche délicate compte tenu des effets d'adhésion. De nombreuses expérimentations feront l'objet du chapitre suivant.

Par ailleurs, le développement d'une plate-forme de télé micro-manipulation présente plusieurs intérêts. L'opérateur peut piloter le dispositif expérimental pour réaliser des tâches complexes de micro-manipulation. Le couplage entre le macro-monde et l'environnement microscopique doit également permettre à l'opérateur de percevoir les effets propres à l'échelle microscopique. À cette fin, une interface haptique à un degré de liberté, nommée *Brigit*, a été réalisée et deux couplages ont été proposés, un couplage homothétique et un couplage passif. Le premier schéma de couplage, un couplage homothétique, possède de bonnes performances en terme de transparence mais peut se révéler instable notamment si l'opérateur lâche l'interface haptique. Le second, un couplage passif, possède des propriétés plus complétès. Ses différents gains peuvent en effet être réglés pour assurer une bonne transparence et une stabilité inconditionnelle sur une large gamme fréquentielle. Du point de vue expérimentale, les résultats atteints par ce couplage sont très concluants.

L'ensemble de ces travaux réalisés compléte idéalement la plate-forme [*mü*]MAD. **Celle-ci peut alors** être utilisée en mode manuel (extraction d'une mesure locale par mode vibratoire par exemple [DHR03]), semi-automatisée (exploitation de stratégies complexes pour la manipulation/caractérisation mécanique d'objets microscopiques) ou téléopérée (perception de l'utilisateur d'un environnement inconnu à l'échelle macroscopique). Ces potentialites ouvrent un ensemble de perspectives très importantes qui seront développées dans le dernier chapitre de ce mémoire.

Chapitre 5 Expériences

Le propos de ce chapitre est de montrer l'énsemble des résultats expérimentaux. L'historique des différentes expérimentations est conservée pour percevoir l'évolution du site expérimental [*mü*]MAD. En particulier, les premiers expérimentations sont effectuées en mode manuel et prouvent principalement la faisabilité de la micro-manipulation par adhésion d'objets rigides en environnement athmosphérique [RRG01]. La dualité induite par ce choix a rendu nécessaire l'étude de stratégies dynamiques adaptées. La première partie de ce chapitre est entièrement consacrée à ce panorama, des manipulations statiques aux expérimentations dynamiques [HRG02].

Les outils d'assistance ont permis l'établissement d'approches plus complexes avec l'utilisation de commandes référencées capteur. L'accent est principalement mis sur le roulement. Ce mode introduit en effet l'ensemble des complexités rencontrées à cette échelle et nécessite la mise en place et l'utilisation d'outils d'assistance évolués pour répondre au problème [DHR04].

Enfin, l'utilisateur est inclus dans la boucle de manipulation d'objets microscopiques avec des résultats prometteurs dans le domaine de la télé micro-manipulation avec une interface standard. En particulier, l'exploitation des schémas de commande décrits dans le précédent chapitre permet de valider le concept de la télé micro-manipulation par des utilisateurs novices et ouvre des perspectives importantes.

L'ensemble des résultats de ce chapitre est en partie extrait des différentes thèses, de la manipulation manuelle [Rol00] à la manipulation dynamique [Hal02] en passant par le roulement assisté et la télé-opération [Dio05].

5.1 Stratégies de micro-manipulation par adhésion

5.1.1 Saisie et dépose statiques en milieu sec

La première expérience proposée cherche à justifier l'utilisation des forces d'adhésion pour la micro-manipulation. L'objectif est de réussir la saisie par un simple contact d'un objet préalablement placé sur un substrat. Puis, cet objet sera relâché sur le même substrat. Le préhenseur est incliné pour réduire la force d'adhésion en projection entre l'objet et le préhenseur sur l'axe vertical pour la phase de dépose.

Le substrat choisi est en plexiglas. L'objet à manipuler est une sphère en verre, de diamètre $\sim 40 \mu m$. La figure 5.1 représente le déroulement de l'opération, obtenue sur notre site expérimental :

- Le préhenseur, parallèle au substrat, est placé au dessus de l'objet à saisir (a).
- Le préhenseur est mis en contact avec l'objet (b).
- L'objet adhère au préhenseur et est saisi en retirant verticalement le préhenseur (c). La mise en contact de l'objet avec le substrat sans incliner la préhenseur ne permet pas la dépose.



Figure 5.1 – Manipulation par saisie et dépose statique

- Le préhenseur est incliné d'un angle de 40^o (d).
- L'objet est mis en contact avec le substrat (e).
- La dépose est effectuée en retirant verticalement le préhenseur (f).

5.1.2 Saisie et dépose statiques avec prédominance capillaire

Une deuxième classe de tâche est proposée pour répondre à l'étude avec prédominance capillaire. Cette deuxième expérience manuelle correspond à une application industrielle. Il s'agit de manipuler des disques en étain d'un diamètre de $300\mu m$, utilisés pour le soudage de micro-diodes par la société Thomson. Le substrat cible est une pièce métallique (*covar*) où l'emplacement prévu pour les diodes doit être préalablement couvert de disques.

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

Il est à noter que cette solution change radicalement les conditions de saisie. En effet, il ne s'agit plus d'une adhésion entre l'objet et le substrat mais entre l'objet et l'eau. Dans ce type d'interface, les force capillaires et l'effet visqueux sont dominants. De plus, la formation d'un ménisque aqueux sous l'objet est un autre facteur clef pour la saisie. Le déroulement de la phase de saisie est présenté sur la figure 5.2.



Figure 5.2 – Saisie à partir d'une goutte d'eau

Sur la figure 5.2(a), l'objet flotte sur la goutte d'eau. Néanmoins, un nouveau paramètre apparaît : en effet, à partir d'une vitesse de montée très lente, l'objet reste accroché à la pointe et la formation d'un ménisque aqueux sous la pointe est observée (b). Dans cette phase, pour réussir complètement la saisie, il faut pouvoir « casser » ce ménisque. Les facteurs cinétiques et dynamiques, qui entrent en jeu dans la formation et l'évolution du ménisque, sont mal connus. Par contre, l'effet dominant semble être la force visqueuse à l'intérieur du ménisque et de la goutte d'eau. Cette force étant directement proportionnelle à la vitesse, il suffit de continuer à lever le préhenseur en restant en dessous d'une vitesse de déplacement minime, déterminée empiriquement. La dépose s'effectue, comme décrit ci-dessous, sur un substrat en *covar*, donc métallique. La force d'adhésion entre l'objet et ce substrat, en prenant aussi en compte la supériorité de l'aire de la zone de contact, est supérieure à l'adhésion préhenseur/objet. La figure 5.3 montre le déroulement de la phase de dépose.



Figure 5.3 – Dépose du disque sur le substrat métallique

Le préhenseur est placé au dessus de l'emplacement choisi pour la dépose (*a*). Le préhenseur est baissé jusqu'à la mise en contact de l'objet avec le substrat (*b*). Pour empêcher l'apparition du problème lié au défaut d'orientation, le disque est appuyé fortement contre le substrat. La souplesse de la pointe, la grandeur relative de la surface de contact substrat/objet et la forte adhésion à l'interface sont suffisants pour effectuer la dépose (*c*).

La réussite de cette expérience montre la validité du mode de manipulation proposé pour une application industrielle. La difficulté majeure, garantir un contact parfait entre un objet plat et le préhenseur, est surmontée avec l'utilisation d'une goutte d'eau comme coussinet passif. D'autre part, ce choix a permis d'étudier le problème de saisie avec une interface aqueuse.

5.1.3 Saisie statique et dépose dynamique

Les expériences de manipulation précédentes avaient pour objectif d'évaluer la faisabilité des tâches de saisie et de dépose en utilisant uniquement les forces d'adhésion. Or, un apport important du mode de manipulation proposé est l'utilisation de la dynamique du système, notamment pour la phase de dépose. Pour tester le fonctionnement du manipulateur pour une tâche de dépose, une expérience de tâche canonique est choisie. Il s'agit de saisir un objet sphérique à partir d'un substrat et de le déposer sur ce dernier. L'objet est une sphère en verre de 40 à $50\mu m$ de diamètre et le substrat est en plexiglas.

La figure 5.4 montre le déroulement de l'opération de saisie. La condition statique au niveau de l'adhésion préhenseur/objet étant satisfaite (a), la saisie s'effectue facilement en mettant le préhenseur en contact avec l'objet (b) puis en le retirant verticalement (c).

Pour montrer la difficulté de la dépose, le préhenseur est baissé jusqu'au contact entre le substrat et l'objet. La micro-sphère reste accrochée à la pointe même après des contacts objets/substrat répétés (figure 5.5-a). Il est donc impossible d'effectuer la dépose statique, comme prévue par l'étude théorique, sans incliner le préhenseur. Pour expérimenter le mode de dépose dynamique, et surtout afin de quantifier la valeur de l'accélération limite permettant la dépose, le préhenseur est excité par des signaux de différentes amplitudes.



Figure 5.4 – Saisie statique d'une micro-sphère



Figure 5.5 – Dépose dynamique d'une micro-sphère

Préalablement à l'excitation, le préhenseur, avec l'objet collé à son extrémité libre, est positionné légèrement au-dessus du substrat. Cette manoeuvre a pour but d'empêcher l'endommagement de la poutre dans le cas d'un choc avec le substrat : l'étude du comportement dynamique de la pointe AFM avait prédit une comportement à phase non minimale, qui se traduit par un abaissement de la pointe juste après l'impulsion. Ce comportement a aussi été observé pendant la caractérisation dynamique du préhenseur.

Trois expérimentations sont réalisées. Le même type d'excitation est utilisé pour ces trois cas. L'excitation qui produit l'accélération est l'impulsion de Dirac qui se déclenche à $t = 90 \ \mu s$. Puis, la céramique est décompressée lentement jusqu'à sa forme initiale (de t = 180 à $280 \ \mu s$). Un autre facteur important pour la bonne interprétation du comportement du préhenseur est la connaissance de la fréquence propre du système. Sur les courbes de tension du pont de Wheatstone, plusieurs fréquences superposées sont apparentes. Le premier mode de résonance de la pointe du préhenseur est de $40 \ kHz$. Le deuxième mode se situe aux environs de 200kHz. Si l'on considère le système complet formé de la pointe avec l'objet accroché à l'extrémité, le premier mode de résonance se situe aux environs de $\sim 25 \ kHz$. Il est donc possible de détecter immédiatement la réussite de l'opération de dépose par simple observation de la fréquence du signal de retour du dispositif AFM.

Dans le premier cas, l'amplitude du signal est de 40 V. L'accélération résultante, en utilisant la relation 3.12, est estimée à $5 \sim 10^5 m/s^2$. Cette valeur est en dessous de l'accélération limite estimée par simulation, à $\sim 7 \ 10^5 m/s^2$. Le signal de flexion de la pointe ainsi que le signal de commande sont représentés sur la figure 5.6.

Pour cette valeur, le décollement n'a pas lieu et la dépose n'est donc pas effectuée : la force d'inertie créée par cette accélération n'est pas suffisante pour vaincre la force d'adhésion. L'oscillation résultant de cette impulsion est composée de plusieurs modes de flexion. A basse fréquence, la fréquence d'oscillation observée est celle du premier mode de flexion du système poutre+objet. Cette fréquence confirme l'échec de la dépose.



Figure 5.6 – Comportement dynamique du préhenseur pour la lère excitation.

Dans le deuxième cas, l'impulsion de Dirac est amplifiée pour atteindre 80 V (fig. 5.7). L'accélération résultante est estimée à $\sim 1 \ 10^6 \ m/s^2$. Cette valeur est juste au-dessus de la limite de dépose. Comme prévue, l'opération est réussie et le décollement est effectif. L'observation de la sortie du dispositif AFM montre que le système oscille d'abord sur la fréquence propre de flexion du système "poutre+objet". Ces vibrations causent la dépose à $t = 140 \mu s$. Puis, le système oscille sur la fréquence du premier mode de flexion de la poutre seule, affirmant ainsi le succès de l'opération.



Figure 5.7 – Comportement dynamique du préhenseur pour la 2ème excitation.

Pour le troisième cas, l'impulsion de Dirac est de 120 V (fig. 5.8). L'accélération résultante est estimée à $\sim 1,5 \ 10^6 \ m/s^2$. Après un bref régime transitoire, le système oscille sur la fréquence poutre seule. Le dépose est donc effectuée immédiatement après l'impulsion.

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

5.1.4 Saisie en vrac et dépose sélective

Pour explorer les avantages de cette situation, une expérience, visant à travailler avec des sphères de pollen de diamètre de 10 a $20\mu m$, est proposée autour de la vibration propre de la poutre. Ces objets existent



Figure 5.8 – Comportement dynamique du préhenseur pour la 3ème excitation.

commercialement sous forme d'une poudre, dont les particules ont été calibrées par filtrage pour respecter la gamme de dimension désirée. Cette poudre est versée directement sur le substrat. Comme le montre la figure 5.9a, une distribution très concentrée plus ou moins homogène des billes est obtenue. A cause de la densité et de la proximité des objets, il est impossible d'isoler un seul objet pour le saisir séparément. Le préhenseur saisit ainsi plusieurs objets par adhésion (figure 5.9b).



(a) (b) Figure 5.9 – (a) Un amas de billes sur le substrat et (b) saisie de deux billes

Le préhenseur est mené dans une position haute, légèrement au dessus du substrat. La céramique piézoélectrique est excitée par un signal sinusoïdal d'une amplitude d'une dizaine de volts dont la fréquence est augmentée progressivement. Au fur et à meure que cette fréquence d'excitation est amplifiée, les billes sont arrachées **une par une** pour des valeurs spécifiques. Quand la valeur atteinte est de 40kHz, la fréquence propre de la poutre seule, tous les objet sont relâchés.

Ce phénomène est sans doute dû au comportement dynamique du système poutre+objet(s). En effet, l'ajout d'une masse à l'extrémité libre d'une poutre encastrée baisse la fréquence de son premier mode de flexion. Donc le système pointe + 2 sphères possède une fréquence propre plus basse que le système pointe +1 sphères. Quand la résonance du système est approchée par augmentation de la fréquence d'excitation de la céramique, l'amplitude des oscillations de la poutre devient de plus en plus importante. Au moment où ces amplitudes engendrent une force inertielle plus importante que l'adhésion, l'arrachement d'une bille est observée. Cette amplitude est typiquement maximale à la fréquence de résonance du système. Il est à noter que la force d'inertie créée est d'autant plus forte qu'elle se situe proche de l'extrémité libre de la poutre. Pour cette raison, la bille déposée est invariablement la plus proche de l'extrémité. Le décollement de cette bille réduit ainsi la masse du système, entraînant une augmentation de la fréquence propre. Le dynamique



Figure 5.10 – Dépose sélective des micro-sphères

du système semble être suffisamment rapide pour réduire les oscillations sans qu'une deuxième bille soit arrachée immédiatement après la première. Pour pouvoir déposer l'objet suivant, il faut donc augmenter la fréquence d'excitation jusqu'à la nouvelle valeur de la résonance. En utilisant la méthode décrite ci-dessus, la dépose de chaque objet **un par un**, initialement saisi en vrac, est possible.

5.1.5 Application à un système multi-robots

Dans le cadre d'un séjour de trois mois à l'EPFL de Lausanne (Suisse), j'ai participé au projet MICRON. Ce projet européen consiste en la collaboration de quelques robots autonomes de petites dimensions (dans un volume de $1cm^3$) pour différentes opérations comme la manipulation. Le dessein de cette collaboration était l'application des nouvelles stratégies développées par l'équipe micro-manipulation pour valider les fonctionnalités des micro-robots développés par l'EPFL. Chaque robot intègre une électronique embarquée, un module de locomotion et un module outil. Ce dernier de type bimorphe à deux doigts a été utilisé dans le cadre de ces manipulations comme une simple poutre sans capteur d'effort. Chaque robot dispose de quatre degrés de liberté : trois degrés avec le module de locomotion (déplacement et rotation dans le plan de travail) et un degré en rotation pour l'outil. Pour ces 4 degrés de liberté, les effets piézo-électriques de type bimorphe ou de type stick and slip sont utilisés.

La configuation de l'ensemble du système est proposée dans la figure 5.11. Elle intègre deux robots et deux microscopes optiques permettant les vues latérales et frontales de la scène. L'ensemble est piloté par un simple joystick.

Les stratégies de micro-manipulation par adhésion ont été appliquées pour transférer un micro-objet du susbstrat à un outil puis d'un outil à un autre. Quatre différentes stratégies de saisie et de transfert ont été étudiées. Toutes ces stratégies ont été validées expérimentalement et sont décrites dans la suite.



Figure 5.11 – Configuration du système et détails de chaque robot

5.1.5.1 Saisie sur un substrat à faible adhésion

Comme le travail d'adhésion est dépendant des matériaux, le micro objet choisi, une bille de pollen, peut être simplement transféré d'un substrat à faible énergie d'adhésion à un outil à forte énergie d'adhésion. La figure 5.12 montre la simple saisie par contact, sans capteur d'effort, d'un objet (de rayon approximatif 20μ m) sur un substrat en téflon avec un outil à base de silicium collé sur le préhenseur bimorphe du robot.



Figure 5.12 – Saisie d'un micro-objet de pollen initialement posé sur un substrat en téflon

Pour pouvoir passer cet objet d'un micro-robot à un autre, il est nécessaire d'utiliser des stratégies alternatives. Deux stratégies de contact sont utilisées dans la suite, le roulement et le raclement décrits dans les figures 5.13(a) et 5.13(b).



Figure 5.13 – Principe du transfert par roulement (a) tangentiel (b)

5.1.5.2 Transfert par roulement

L'opération de transfert est effectuée en l'approchant du coin du deuxième outil (ici considére comme le substrat). Comme les deux outils sont du même matériau, une symétrie totale des efforts apparaît. Dans ce



cas le comportement du micro-objet peut simplement être modélisé [DVRB04] et prédit.

Figure 5.14 - Transfert d'un micro-objet par roulement

La figure 5.14 montre ce transfert d'un outil à un autre par un simple roulement. Il est à noter que le cadre expérimental n'est pas complétement adapté à cette technique. Pour réussir cette opération de roulement, il faut être capable de garantir le contact et l'effort entre les deux outils comme la partie suivante de ce chapitre l'explicitera. Cette contrainte est très difficile à respecter sans capteur. Cette remarque née d'expérimentations montre la nécessité de se doter de systèmes actifs pour réussir et fiabiliser ces opérations.

5.1.5.3 Transfert tangentiel

Une autre stratégie a été développée en utilisant la modularité du système, le raclement. La figure 5.13(b)) présente les modalités de ce transfert. Durant celui-ci, le roulement de l'objet doit être évité car l'objet roulerait autour du coin sans être transféré. Les équations montrent que pour deux contacts identiques, cette condition est respectée [DVRB05].

La figure 5.15 illustre ce transfert entre les deux outils. Les expériences ont montré que si l'outil était trop loin du bord, l'objet roulait toujours et montait sur le bord opposé de l'outil. Un contrôle en effort de cette phase garantira le transfert de l'objet.

5.1.5.4 Transfert par effet inertiel

L'une des solutions les plus originales pour pouvoir relâcher et transferer un objet est l'utilisation des forces inertielles. Les préhenseurs utilisés sont des bimorphes piézoélectriques dont les fortes capacités d'accélération sont utilisées pour relâcher le grain de pollen.

La figure 5.16 montre qu'un micro-objet est relâché d'un outil et est « transféré » sur un second. Cette technique est aussi utilisée pour des transferts bidirectionnels du micro-objet d'un préhenseur vers l'autre et réciproquement. L'ensemble de ces résultats montre que les stratégies développées peuvent être simplement adaptées à d'autres systèmes de manipulation.



Figure 5.15 – Transfert d'un micro-objet en pollen par raclement



(a) Grain de pollen adhérant à un outil



(b) Grain de pollen relâché

Figure 5.16 – Transfert d'un micro-objet de pollen par effet inertiel

5.2 Une tâche complexe : le roulement

5.2.1 Détermination du point de contact préhenseur/objet

Lors de la phase de roulement, la connaissance à tout instant du point de contact entre la poutre et l'objet est nécessaire. Il convient donc dans un premier temps de déterminer ce point de contact à l'instant initial. Deux méthodes de détermination préliminaire de la position du point de contact ont été étudiées, une méthode visuelle et une méthode par étude dynamique.

La méthode visuelle consiste à estimer le rapport ℓ/L dans l'image. Elle repose sur la connaissance de la position du point de contact et suppose que le contact a effectivement été réalisé en ce point. En pratique, il peut arriver qu'à l'approche du préhenseur, l'objet, sous l'effet de perturbations, se déplace légèrement du point de contact défini. Ce mouvement ne peut être détecté visuellement puisque l'objet est occulté par le préhenseur. Cette méthode fournit donc en général une bonne estimation du point de contact, mais devrait être affinée afin de fournir une mesure plus précise.

La seconde voie repose sur une analyse vibratoire du problème. De nombreuses études dynamiques ont été entreprises durant ces années pour par exemple, caractériser mécaniquement un objet, calibrer la pointe,... Elles reposent toutes sur la même démarche illustrée dans ce mémoire par la détermination du point de contact entre l'objet et le préhenseur.

5.2.1.1 Analyse vibratoire du contact

Dans la configuration étudiée, le préhenseur peut être modélisé par une poutre encastrée/libre de longueur L. Le contact est supposé ponctuel au point ℓ . L'objet est modélisé par un ressort de raideur k, comme le



Figure 5.17 – Modélisation du préhenseur en appui sur un objet

montre la figure 5.17. Il s'agit alors de résoudre l'équation d'onde en flexion, fonction du temps t et de la position sur la poutre x:

$$\rho S \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + E I \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \tag{5.1}$$

où v représente la flèche, E le module de Young, I le moment quadratique, ρ la masse volumique et S = hw la section de la poutre. Avec les conditions limites imposées par l'encastrement et par le bord libre et les conditions de continuité au point d'appui, les solutions générales sont données par :

$$v_1(x_1, t) = f(t)g_1(x_1) = \sin(\omega t + \phi) \left(A_1 \cos\beta x_1 + B_1 \sin\beta x_1 + C_1 \cosh\beta x_1 + D_1 \sinh\beta x_1\right) \quad (5.2)$$

avec $0 \le x_1 \le \ell$ pour la portion de poutre en amont de l'articulation, et par :

$$v_2(x_2,t) = f(t)g_2(x_2) = \sin(\omega t + \phi) \left(A_2 \cos\beta x_2 + B_2 \sin\beta x_2 + C_2 \cosh\beta x_2 + D_2 \sinh\beta x_2\right)$$
(5.3)

avec $0 \le x_2 \le L - \ell$ pour la portion de poutre en aval de l'articulation. A partir des conditions limites, les quatre relations de continuité peuvent être rassemblées pour former la relation matricielle suivante :

$$\boldsymbol{M} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & A_2 & B_2 \end{bmatrix}^T = \boldsymbol{0}$$
 (5.4)

où M est une matrice de dimensions 4×4 dont l'expression générale est la suivante (avec \cos noté c, \sin noté s) :

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} c\beta\ell - ch\beta\ell & c\beta\ell - sh\beta\ell & c\beta(L-\ell) + ch\beta(L-\ell) & c\beta(L-\ell) + sh\beta(L-\ell) \\ -c\beta\ell - sh\beta\ell & c\beta\ell - ch\beta\ell & c\beta(L-\ell) - sh\beta(L-\ell) & -c\beta(L-\ell) - ch\beta(L-\ell) \\ -c\beta\ell - ch\beta\ell & -c\beta\ell - sh\beta\ell & -c\beta(L-\ell) + ch\beta(L-\ell) & -c\beta(L-\ell) + sh\beta(L-\ell) \\ c\beta\ell - sh\beta\ell \dots & -c\beta\ell - ch\beta\ell \dots & -c\beta(L-\ell) - sh\beta(L-\ell) & c\beta(L-\ell) - ch\beta(L-\ell) \\ + \frac{k}{EI\beta^3} (c\beta\ell - ch\beta\ell) & + \frac{k}{EI\beta^3} (c\beta\ell - sh\beta\ell) \end{bmatrix}$$

Cette relation n'admet de solutions non triviales que si le déterminant de M est nul. Résoudre la relation det M = 0 permet de déterminer une ou plusieurs valeurs du paramètre β , chacune étant associée à une pulsation propre ω . La complexité de l'expression de M ne permet pas de résoudre le problème analytiquement. Pour le cas particulier d'un objet raide traité dans notre configuration expérimentale (par exemple, une bille en verre), $k \gg EI\beta^3$ et la flèche au point d'articulation reste nulle à tout instant :

$$v_1(\ell, t) = v_2(L - \ell, t) = 0 \quad \iff \quad g_1(\ell) = g_2(L - \ell) = 0$$
 (5.5)

La relation cherchée se réduit alors à :

$$\begin{bmatrix} 1 + \cos\beta(L-\ell)\cosh\beta(L-\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta\ell\sinh\beta\ell - \sin\beta\ell\cosh\beta\ell \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \cos\beta\ell\cosh\beta\ell - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta(L-\ell)\sinh\beta(L-\ell) - \sin\beta(L-\ell)\cosh\beta(L-\ell) \end{bmatrix}$$
(5.6)

Cette équation établit une relation entre la fréquence propre et la position du point de contact.

5.2.1.2 Validation expérimentale

En pratique, la poutre en contact avec un objet est excitée par l'intermédiaire de la céramique piézoélectrique avec un signal sinusoïdal de faible amplitude et de fréquence croissante. L'amplitude du signal de sortie correspondant est recueillie. La première fréquence pour laquelle l'amplitude de flexion atteint un maximum correspond au premier mode propre du système donné par la relation (5.6).

La figure 5.18 permet de comparer les méthodes théoriques et vibratoire en divers points de contact. Les résultats expérimentaux et théoriques concordent et montrent l'intérêt de cette méthode pour trouver le point de contact. L'étude dynamique se fonde en effet sur une hypothèse de contact ponctuel avec un objet, hypothèse sans doute loin de décrire la réalité du contact à l'échelle microscopique.



Figure 5.18 – Comparaison de la condition théorique de l'équation 5.6 et des résultats expérimentaux

5.2.2 Dépose précise par roulement

5.2.2.1 Principe

Il est aisé de savoir si l'objet a bougé ou non au cours du roulement, puisqu'il suffit de comparer ses positions initiale et finale. Il est cependant intéressant de connaître son comportement à chaque instant de l'expérience pour étudier les conditions de passage d'un mode à l'autre par exemple. Les deux méthodes de mesure décrites précédemment ne peuvent être mises en œuvre dans ce cas. La solution proposée se base sur la modélisation du dispositif de mesure (cf. § 3.1.1.2 page 38) et l'asservissement en effort (cf. § 4.1.4 page 58) mis en place pour la gestion de la mise en contact du préhenseur et de l'objet. Cette commande en effort consiste en réalité à asservir le signal mesuré par la poutre. L'expression de cette différence de potentiel \overline{U} , à l'offset de mesure près, est pour mémoire :

$$\bar{U} = U - U_0 \propto \ell F_\ell \propto \frac{v_\ell}{\ell^2} \tag{5.7}$$

Elle dépend notamment de la force F_{ℓ} appliquée au point de contact ℓ . Il est alors possible d'estimer cette force ainsi que la flèche de la poutre v_{ℓ} au point de contact par :

$$v_{\ell} = \left(\frac{\ell}{L}\right)^2 \frac{\bar{U}}{K_u} \quad \text{et} \quad F_{\ell} = K_L \left(\frac{L}{\ell}\right) \frac{\bar{U}}{K_u} \tag{5.8}$$

Dans le cas où le rapport ℓ/L reste constant, asservir la tension revient bien à asservir la flèche ou la force. En revanche, dans le cas du roulement, le rapport ℓ/L est implicitement modifiée. L'équation (5.8) relative à la flèche s'écrit sous une forme explicitement dépendante du temps :

$$\bar{U}(t) = K_u \left(\frac{L}{\ell(t)}\right)^2 v_\ell(t)$$
(5.9)

Ainsi, si \overline{U} est maintenue constante par l'asservissement « en effort », toute variation de ℓ doit être compensée par une variation de la flèche au point de contact v_{ℓ} . Or, la valeur de la flèche peut être déterminée en estimant la différence entre la position courante de la base du préhenseur z(t) et la position au moment de la mise en contact z_c :

$$v_{\ell}(t) = z_0 - z(t). \tag{5.10}$$

La position du point de contact $\ell(t)$ au cours du temps est donc donnée, en combinant (5.9) et (5.10) par :

$$\ell(t) = L \sqrt{K_u \left(\frac{z_0 - z(t)}{\bar{U}(t)}\right)}$$
(5.11)

La force réellement appliquée au contact vaut :

$$F_{\ell}(t) = K_r \left(\frac{\bar{U}(t)}{K_u}\right)^{\frac{3}{2}} (z_0 - z(t))^{-\frac{1}{2}}.$$
(5.12)

5.2.2.2 Observations des différents modes de roulement/glissement

De nombreuses expériences de roulement/glissement ont été entreprises. Conformément aux conclusions tirées de la modélisation (cf. § 2.2.4 page 33), le mode de glissement du préhenseur sur l'objet n'est jamais observé pour une configuration du système favorable à la saisie statique. Il est en revanche très aisé de provoquer le roulement de l'objet. Les figures 5.19 et 5.20 page suivante rendent compte d'une expérience de roulement à tension constante.



Figure 5.19 – Expérience de roulement

L'objet est une bille en verre de diamètre 20 µm. Le point de contact initial se situe à la position $\ell = 370$ µm sur la poutre de longueur L = 600 µm. La flèche initale au point de contact, mesurée par le déplacement du nano-translateur entre la position en début de contact et la position courante est de $v_{370} = 1.1$ µm, correspondant à une force appliquée d'environ 100 µN. Le préhenseur est ensuite mis en translation selon son axe principal grâce à l'asservissement visuel décrit dans la partie 4.1.3 page 56 avec des vitesses linéaires saturées à 40 µm/s. Le mouvement de l'objet durant cette phase semble très régulier. Au cours du mouvement, la tension issue du dispositif de mesure est maintenue constante à -1,3 V. La sensibilité du dispositif au bruit semble décroitre au fur et à mesure que l'objet s'approche de l'extrémité de la poutre. Ce constat est conforme à la relation 5.8 page ci-contre. Des vibrations d'amplitude Δz transmises au préhenseur par la table de manipulation au travers du substrat et de l'objet provoquent une déflexion de la poutre au point de contact $\Delta v_{\ell} = \Delta z$ et une variation de la tension ΔU_{ℓ} selon le point de contact ℓ :

$$\frac{\Delta U_{\ell}}{\Delta U_{L}} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^{2} \frac{\Delta v_{\ell}}{\Delta v_{L}} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^{2} \frac{\Delta z}{\Delta z} = \left(\frac{L}{\ell}\right)^{2}.$$
(5.13)



Figure 5.20 – Variations de la position du nano-translateur et de la tension mesurée au cours d'une expérience de roulement

Au cours du roulement, le nano-translateur effectue un mouvement vertical selon l'axe $-\vec{z}$ déstiné à maintenir la tension mesurée constante. Ce déplacement est imputable à trois facteurs :

- compensation du déplacement du point de contact ;
- compensation des différences d'inclinaison entre le substrat, le préhenseur et les axes de translation ;
- compensation des irrégularités de surface de l'objet et du préhenseur.

Le premier point peut être vérifié à partir de la mesure des flèches au point de contact. Celle-ci a été mesurée pour l'instant initial du roulement. Elle peut également être précisément mesurée à l'instant final du roulement pour lequel le point de contact est parfaitement connu ($\ell = L$) et la configuration initiale au cas similaire de la calibration. La flèche est alors de $v_{600} = 2,86 \,\mu\text{m}$ pour un effort mesuré de 60 μ N. La relation 3.6 page 39 est ainsi vérifiée :

$$v_{370} = \frac{1.1}{2.86} v_{600} = 0.385 v_{600} \approx \left(\frac{370}{600}\right)^2 v_{600}$$
(5.14)

Le second point apparaît clairement dans la mesure où la position verticale de transition contact/non-contact sur la course semble varier au cours du roulement :

$$z_{370} + v_{370} \neq z_{600} + v_{600}. \tag{5.15}$$

Cette constatation justifie l'emploi de l'asservisement de la tension. Sans cette utilisation, le mouvement du préhenseur pourrait facilement produire une perte de contact ou bien l'application d'un effort très important selon les inclinaisons.

Le troisième point s'explique par la variation non-régulière de la position du nano-translateur au cours du roulement. Les trois premières irrégularités, au profil identique, semblent se produire périodiquement toutes les 3.35 s. Cette observation semble montrer que l'objet n'est pas parfaitement sphérique¹. La dernière irrégularité, observée lors d'expériences effectuées avec différents objets et substrats, semble indiquer la présence d'impuretés sous l'extrémité du préhenseur. En fin de roulement, le préhenseur suit la courbure de l'objet, puis le contact ponctuel objet/préhenseur se rompt et l'objet est déposé.

¹La relation 5.18 page ci-contre permet par ailleurs d'estimer le rayon de l'objet à 11.14 μ m pour une calibration annoncée par la fabriquant à 10 μ m.

L'utilisation de l'asservissement de la tension permet donc un roulement relativement parfait, de manière fortement reproductible. En revanche, le glissement à l'interface objet/substrat est plus difficile à obtenir. Il nécessite en effet l'application d'une force extrêmement faible que la précision du dispositif actuel ne permet pas d'obtenir.

5.2.2.3 Dépose précise par roulement

Le mode roulement de l'objet est exploité pour la dépose. En outre, si le roulement observé est proche du roulement sans glissement, cette dépose peut être effectuée avec une grande précision. En effet, pour un roulement parfait, le mouvement de l'objet peut être assimilé instantanément à une rotation autour du point de contact objet/substrat, la vitesse du point de contact objet/préhenseur étant égale à la vitesse du préhenseur lui-même, v_p . Par conséquent, la vitesse instantanée v_o du centre de l'objet est donnée par :

$$v_{\rm o} = \frac{v_{\rm p}}{2}.\tag{5.16}$$

L'intégration de cette relation permet d'établir que, pour une translation δx_p du préhenseur, le déplacement horizontal δx_o (translation apparente) de l'objet vaut :

$$\delta x_{\rm o} = \frac{\delta x_{\rm p}}{2}.\tag{5.17}$$

Ce résultat est indépendant du rayon de l'objet R. En revanche, l'angle de rotation vaut :

$$\delta\theta_{\rm o} = \frac{\delta x_{\rm p}}{2R}.\tag{5.18}$$

Pour un contact initial situé en ℓ_0 , une translation du préhenseur sur un distance $2(L - \ell_0)$ doit en théorie amener l'objet en bout de poutre. À cet instant, le contact poutre/objet est réduit à un point puisque l'extrémité de cette dernière est biseautée. L'adhésion doit alors être suffisamment réduite à cette interface pour que l'objet adhère à nouveau au substrat et soit donc déposé.

Pour être déposé au point de coordonnées (u_d, v_d) dans l'image, l'objet doit être mis en contact avec le substrat au point de coordonnées (u_0, v_0) :

$$u_0 = u_d + \frac{2G}{s_u} (L - \ell_0) \cos \alpha \quad \text{et} \quad v_0 = v_d + \frac{2G}{s_v} (L - \ell_0) \sin \alpha, \tag{5.19}$$

où G représente le grossissement total du microscope, $s_u \times s_v$ la surface réelle couverte par un pixel et α l'angle que forme l'axe principal du préhenseur avec la verticale dans l'image, conformément aux notations déjà introduites. Ensuite, une translation du préhenseur le long de son axe principal sur une trajectoire suivie par l'asservissement visuel décrit par la partie 4.1.3 page 56 permet de déposer l'objet à l'endroit souhaité comme le montre la figure 5.21 page suivante.

5.3 La télé micro-manipulation

L'objet de cette partie est d'intégrer la commande passive au sein d'un système plus vaste permettant la téléopération complète du dispositif de micro-manipulation [*mü*]MAD, les trois axes micrométriques et le nano-translateur avec une interface standard.

5.3.1 Description de l'interface Virtuose

Virtuose est une gamme de bras maîtres réalisés par la société Haption². Ils se déclinent principalement en deux séries :

²http://www.haption.com





- le Virtuose 3D, à trois articulations rotoïdes permettant à l'opérateur de décrire des mouvements de translations dans l'espace opérationnel;
- le Virtuose 6D, à six articulations rotoïdes permettant à l'opérateur de décrire des mouvements de translations et de rotation.

Les deux types de bras sont utilisés (cf. Fig. 5.22). Un Virtuose 3D a été implanté dans la salle blanche, mais le Virtuose 6D de la salle de réalité virtuelle du Commissariat à l'Énergie Atomique de Fontenay-aux-Roses peut également être utilisé. Dans ce dernier cas, seuls les trois premiers degrés de liberté sont exploités, le poignet étant laissé libre.



(a) Structure cinématique





(c) Virtuose 6D

Figure 5.22 – Bras maîtres Virtuoses

Les caractéristiques de ces deux bras sont identiques. Ils peuvent développer un effort maximal de 35 N pour une course verticale de 45 cm. Ils se commandent à partir d'un PC industriel et la consigne est un vecteur à plusieurs dimensions contenant les composantes cartésiennes de l'effort que le bras doit produire sur l'opérateur. Le protocole de communication développé pour la commande du nano-translateur (cf chapitre 4.2 page 62) et la commande passive sont utilisés en adaptant simplement les facteurs d'échelle en position et en effort et les gains des contrôleurs.

5.3.2 Commande des micro-translateurs horizontaux

Le capteur d'effort équipant le système de micro-manipulation est unidirectionnel selon l'axe vertical. La commande des axes horizontaux ne fait pas intervenir de retour d'effort dans le plan horizontal. Un asservissement de la position de l'esclave sur celle du maître n'apparaît pas comme une solution judicieuse car, pour couvrir une part importante de la course du micro-translateur et garder une précision satisfaisante pour le positionnement du préhenseur au voisinage de l'objet manipulé, la course requise pour le maître serait trop importante.

La solution choisie est d'asservir le maître en position et les vitesses des micro-tranlateurs sur la position du maître, en ménageant une zone morte au sein de laquelle aucun mouvement n'est produit. L'effort horizontal ressenti par l'opérateur est alors proportionnel à l'écart de position du maître par rapport à la zone morte, donc à la vitesse des micro-translateurs. La figure 5.23 donne le principe de cette commande, où $B_i(s)$ représente le transfert du bras maître selon la direction *i*.



Figure 5.23 – Schéma bloc de la commande des axes horizontaux par un bras maître Virtuose

En fixant la course utile du maître à 25 cm et la zone morte à 5 cm, il est possible de calculer la constante d'homothétie K_v entre la position du maître et la consigne en vitesse du micro-translateur :

$$K_v = \frac{125 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-2}} = 1,25 \times 10^{-3}.$$
(5.20)

En retour, une consigne en effort F_i^* est appliquée au bras maître de manière à produire un effort qui s'oppose au mouvement de l'opérateur, provoquant un rappel vers la zone morte et donc une vitesse nulle. Le gain se calcule de la façon suivante :

$$K_f = \frac{35}{10 \times 10^{-2}} = 350. \tag{5.21}$$

5.3.3 Commande de l'axe vertical

5.3.3.1 Commande du nano-translateur

La commande du nano-translateur reprend la commande passive décrite dans la partie 4.2.1 page 62. Il convient cependant d'adapter les facteurs d'échelle. La course utile verticale de l'interface est choisie égale à 25 cm. Ainsi le facteur d'homothétie en déplacement vaut :

$$A_d = \frac{25 \times 10^{-2}}{12 \times 10^{-6}} = 20\ 833 \tag{5.22}$$

Le facteur d'homothétie en effort³ est égal à :

$$A_f = \frac{35}{252 \times 10^{-6}} = 138\ 890\tag{5.23}$$

5.3.3.2 Commande du micro-translateur vertical

Le micro-translateur vertical est utilisé pour positionner le préhenseur au voisinage d'un objet ou pour transporter cet objet en différents points du substrat. Ses mouvements interviennent donc lorsqu'aucun effort n'est mesuré par le dispositif. En conséquence, le micro-translateur est commandé selon le principe de la figure 5.23.

³Il est calculé par rapport à l'effort maximal mesuré en bout de poutre ($252 \mu N$) et l'effort maximal admissible par l'interface (35 N).

5.3.3.3 Commande associée des micro- et nano-translateurs

La manipulation en mode découplé des micro- et nano-translateurs exige de l'opérateur une grande attention. En effet, il n'existe aucun retour d'effort lors de la manipulation du micro-translateur. En outre, il n'est pas toujours aisé de savoir à quelle distance du contact se situe la poutre AFM sur la vue latérale. La seule information disponible permettant de déterminer la position du préhenseur par rapport aux objets ou au substrat est l'effort de contact mesuré par le système. Un mode de commande couplé tenant compte de ces informations et basé sur les modes découplés est alors à envisager.

Le mode couplé doit permettre de manipuler verticalement la poutre AFM. Lorsque le contact entre la poutre et le substrat ou les objets à manipuler n'est pas établi, l'effort de contact mesuré est nul. Dans ce cas, le micro-translateur est actionné. Lorsque l'effort de contact n'est pas nul, il faut manipuler l'esclave avec précaution. Le nano-translateur est alors actionné. Ainsi l'opérateur utilise la même interface haptique pour maîtriser l'effort appliqué sur l'objet à saisir et les déplacements à « grande » échelle. Le passage du mode « micro » au mode « nano » s'opère lorsqu'une force est mesurée. Le seuil est fixé pour que la force ressentie par l'opérateur soit continue lors de la transition. Le retour en mode « micro » s'effectue lorsque le nano-translateur arrive en butée haute. Par ailleurs, le recalage des positions de référence du maître et de l'esclave, micro- et nano-translateurs, à chaque transition doit ainsi permettre à l'opérateur de piloter l'ensemble du dispositif de manière totalement intuitive.

5.3.4 Résultats expérimentaux





(c) Saisie statique Figure 5.24 – Télé-manipulation d'un grain de pollen

Le système de télé micro-manipulation présenté a pu être testé au cours de plusieurs démonstrations publiques organisées en salle de réalité virtuelle par de nombreux utilisateurs inexpérimentés. Ceux-ci ont tous réussi en quelques minutes à saisir, à faire rouler et à déposer des objets microscopiques comme des grains de pollen d'un diamètre d'environ 20 µm.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre dédié à la partie expérimentale de notre recherche, un panorama de l'ensemble des résultats est proposé. Dans un premier temps, de nombreuses stratégies sont validées pour saisir/relâcher un objet par simple contact adhérent. Des saisies par maîtrise d'un contact adhérent ou d'un effet capillaire sont décrits. La relâche par effet inertiel est aussi validée expérimentalement. Une analyse de la fréquence propre du système permet de vérifier le résultat de cette dépose. De nombreuses stratégies basées sur l'adhésion sont aussi proposés sur le site expérimental de nos partenaires de l'EPFL, montrant une forme particulière de flexibilité de cette approche.

Des opérations plus complexes induisant des commandes référencées capteurs sont ensuite expérimentées comme le roulement ou le raclement. Enfin, en introduisant l'opérateur dans la boucle de commande, des télé micro-manipulations sont expérimentées avec succès.

De nombreuses solutions innovantes sont proposées pour des tâches de manipulations d'objets rigides microscopiques. L'ensemble de ces résultats probants ouvrent la voie à un nombre important de perspectives développées dans le chapitre suivant.

Chapitre 6 Conclusion et perspectives

Le dernier chapitre de ce mémoire propose un rappel des différents résultats originaux obtenus dans le domaine de la micro-manipulation par adhésion. Des perspectives font déjà l'objet de plusieurs projets de recherche.

6.1 La micro-manipulation par adhésion

La recherche menée a permis l'émergence d'une approche différente pour la manipulation d'objets microscopiques. Celle-ci était basée sur une analyse a priori des différentes interactions à cette échelle et sur l'utilisation d'un phénomène physique prédominant, l'adhésion, comme principe actif.

La première partie de ce document est ainsi dédiée à une synthèse des différents travaux afférents à cette échelle. La particularité forte du contexte et l'originalité dimensionnelle des objets ont nécessité cette bibliographie très importante. Celle-ci s'est rapidement éloignée des travaux du domaine pour s'étendre à des domaines connexes comme la microscopie à champ proche ou les forces de surfaces. Cette analyse bibliographique transverse et appliquée à notre problématique s'est avérée un ciment pour nos recherches, enrichie tout au long de ces années. L'étude des forces surfaciques et de contact apparaît comme essentielle dans ce domaine pour percevoir les difficultés et les propriétés intrinsèques du projet. L'élaboration de formulations analytiques des phénomènes micro physiques s'est ensuite heurtée à la barrière expérimentale, classique mais amplifiée dans notre contexte. Des expérimentations engendrées par l'initiation de nombreuses collaborations ont validé, amplifié ou minoré l'influence de certaines propriétés physiques au détriment d'autres. L'ensemble de ce travail, très exploratoire dans sa phase initiale, représente un acquis spécifique de notre équipe par rapport aux différents travaux de la communauté scientifique.

L'exploitation de cette analyse pour la modélisation de tâches caractéristiques est décrite dans le deuxième chapitre. En particulier, nous nous sommes concentrés sur une tâche canonique de manipulation par simple contact adhérent. Le choix d'un modèle dynamique, avec une hypothèse de corps rigide et des conditions de transition, s'est avéré très pertinent pour valider le choix de ce principe physique. De plus, la dualité, saisie-dépose, introduite par cette stratégie a pu être résolue par l'utilisation d'effets inertiels pour s'affranchir de l'adhésion. Au cours de ces différentes années, il est apparu que cette tâche simplifiée réduisait le problème de façon mono-dimensionnelle en négligeant les forces tangentielles des différentes interactions objets/préhenseur ou substrat. Une tâche de roulement/glissement a été modélisée au travers des différentes interactions qu'elle entraîne. Le cheminement pour parvenir à ce modèle ainsi que les outils employés dépassent le simple cadre de cette application et peuvent être utilisés pour la modélisation de nombreuses tâches à cette échelle comme la poussée ou le raclement [DVRB05]. L'ensemble des outils et des modèles

ont ensuite été introduits dans un composant logiciel intégrant l'ensemble des fonctionnalités décrites.

Les différentes conclusions produites par les simulations ont défini un cahier des charges pour un site expérimental. Celui-ci, nommé [*mü*]MAD, est le cœur du troisième chapitre. La partie centrale de ce mémoire s'est essentiellement concentrée sur une description détaillée du préhenseur actif. Le système mono-digital choisi, issu des technologies à microscopie à champ proche, possède des propriétes de mesure de l'effort de contact et intègre un actionneur piézo-électrique pour atteindre d'importantes performances dynamiques. Sa calibration statique et dynamique ont aussi été au centre de nos préoccupations. L'ensemble du banc expérimental a ensuite été conçu en privilégiant l'utilisation principale de composants commercialisés classiques. Enfin, une approche originale pour un préhenseur entièrement basé sur l'adhésion et initiée à partir d'une collaboration avec des partenaires du champ de recherche des micro-technologies a été proposée. Le site expérimental se présente comme une plate-forme de démonstration pour valider expérimentalement des objets de recherche du domaine de la micro-manipulation.

La simple exploitation de ce site ne permet pas d'atteindre soit une automatisation de la tâche, soit une complexification de celle-ci. De nombreux outils d'assistance ont ainsi été développés et sont introduits dans le quatrième chapitre. La gestion de la profondeur de champ, le suivi de trajectoire, la mise en contact sont ainsi décrits dans le cadre d'une application générique de manipulation en mode contact. Ces commandes référencées capteur dépassent le cadre de notre application et forment des briques de base nécessaires à tout système évolué de micro-manipulation. Une approche différente et complémentaire autour de la téléoperation a ensuite été présentée pour procurer à l'utilisateur une interaction directe avec la tâche. A partir d'une interface simplifiée, un simple bouton rotatif, deux couplages sont explicités et comparés à partir de propriétés essentielles, la transparence et la stabilité. Le volume des outils d'assistance proposés, l'approche unifiée et l'analyse détaillée de la télé micro-manipulation montrent l'apport significatif des outils méthodologiques de la robotique dans ce champ de recherche.

De nombreux résultats expérimentaux ont été acquis au cours de ces années et sont retracés dans le cinquième chapitre. Des stratégies innovantes, saisie statique par simple contact adhérent, dépose statique par oriention du préhenseur et dépose dynamique par effet inertiel représentent des modes intrinsèques de la manipulation par adhésion. Des actions coordonnées plus complexes ont ensuite été élaborées avec l'utilisation d'outils d'assistance : le roulement est ainsi finement décrit pour percevoir les potentialités propres de notre plate-forme et de ses outils associés. Par exemple, l'exploitation de la fréquence propre du préhenseur monodigital en vibration transverse est une solution originale pour trouver la position du point de contact. Enfin, des démonstrations de télé micro-manipulation avec une interface haptique industrielle ont été proposées pour prouver la flexibilité d'utilisation de cette plate-forme. L'ensemble des résultats ouvre des perspectives très larges.

6.2 La caractérisation/manipulation d'objets biologiques cellulaires

L'une des principales perspectives engendrées par ce travail est l'étude d'objets individuels biologiques, comme les cellules. L'analyse mécanique de ces objets se décline principalement en deux champs de recherche complémentaires. Le premier concerne l'identification et l'analyse de la réponse cellulaire à des stimuli externes de différentes natures, par exemple d'origine thermique ou électrique. Le second transverse au premier s'intéresse à l'étude des effets des stimuli mecaniques sur les propriétés intra ou extracellulaires et à l'évolution temporelle de la vie cellulaire dans un environnement contrôlé. Les objectifs de cette recherche sont très importants dans le domaine des sciences du vivant. Il n'existe en effet pas, à ce jour, de dispositif permettant d'effectuer ces mesures de manière « in vitro ». Les thèmes classiques de la micro-manipulation s'enrichissent en effet de difficultés propres liées à la caractérisation/manipulation d'objets déformables ainsi que des problèmes de bio-compatibilité. Les techniques classiques, basées sur des méthodes directes comme les microscopes à force atomique ou indirectes comme la diélectrophorèse ou les pièges optiques, résolvent partiellement les problèmes inhérents à ce thème de recherche.

La connaissance et le savoir-faire de l'équipe micro-manipulation sont des éléments majeurs pour répondre à cette demande croissante. L'idée récurrente était la définition d'un nouveau site expérimental intégrant l'ensemble des outils et des connaissances technologiques. Cette plate-forme est maintenant opérationnelle et est présentée sur la figure 6.1. Elle est d'une complexité forte puisqu'elle incorpore l'ensemble des éléments classiques adaptés à notre champ de recherche (microscope inversé, translateurs cartésien permettant le déplacement du support de l'échantillon, pointe de type « tipless » AFM avec une mesure indirecte par interférométrie laser). Des composants nouveaux et essentiels sont cependant ajoutés. D'une part, les études sont accomplies dans un environnement liquide pour répondre aux conditions spécifiques de l'environnement biologique. L'ensemble du dispositif est ainsi encapsulé dans un incubateur engendrant des contraintes de miniaturisation importantes dans la synthèse de la plate-forme. D'autre part, la gamme d'effort atteinte est de l'ordre de 10 nN, induisant un saut technologique par rapport à la précision du dispositif actuel.



Figure 6.1 – (a) La plate-forme de caractérisation (b) Le dipositif de mesure de l'effort par laser

De nombreux outils d'assistance basés sur les travaux présentés dans le quatrième chapitre ont été intégrés sur cette plate-forme. Quelques éléments expérimentaux sur la commande référencée vision et effort sont succintement présentés pour comprendre l'état d'avancement de ce projet sur la figure 6.2. Ils illustrent les acquis de notre équipe dans le domaine du développement de plate-forme et d'outils associés à l'échelle microscopique.



Figure 6.2 – Résultats expérimentaux avec les contrôles référencés effort (a) et vision (b) et photo de la cellule (c)

Des premières expérimentations sur la caractérisation mécanique de cellules adhérentes de type Epithelial Hela (*EpH*) ont été réalisées et sont décrites sur la figure 6.3. Le préhenseur est approché au contact de la cellule puis l'interaction entre la poutre et la cellule est évaluée. La première courbe s'intéresse à la mesure de la tension de la photo-diode par rapport au déplacement vertical du support et montre le comportement élastique non-linéaire de cette cellule. La seconde peut être comparée à une courbe classique d'approche et de retrait d'une pointe AFM à différents instants de mesure. Elle présente la force mesurée par rapport au déplacement de l'échantillon. Une différence dans les pentes entre les courbes aller et retour apparaît. Une dissimilitude de comportement entre les phases de de compression décompression pourrait expliquer ce comportement. Les deux dernières expérimentations exhibent l'intérêt du système pour les mesures « in vitro » puisque la réponse de la cellule est totalement différente lorsque l'incubateur n'est pas activé, faussant l'ensemble des mesures et des conclusions associées. De nombreuses expériences sont actuellement menées pour confirmer ces premières constatations.



Figure 6.3 – (a) Mesures expérimentales de la photo-diode pour l'échantillon biologique EpH et une surface dure (b) Courbe d'approche/retrait de la poutre à différents instants (c) Comparaison des mesures après arrêt de l'incubateur

L'ensemble de ce dispositif est une base essentielle pour l'équipe micro-manipulation et son implication dans des projets de caractérisation mécanique d'objets cellulaires. En particulier, ces premières courbes ne sont que les premiers pas dans ce thème. De nombreuses perspectives apparaissent pour étendre les recherches actuelles sur les différents axes suivants :

- la mesure et la modélisation mécanique d'une cellule adhérente pour quantifier son état mécanique : l'hypothèse centrale est l'utilisation des formulations de la mécanique du contact déjà développées dans le premier chapitre pour appréhender le comportement visco-élastique de la cellule. Des campagnes de mesures seront effectuées pour identifier les caractéristiques mécaniques (module de Young, coefficient de Poisson, ...) des cellules. Cette partie sera développée en partenariat avec l'UMR de Physiologie et Physiopathologie et fait l'objet d'un financement BQR Equipement de l'Université Pierre et Marie Curie en 2005.
- la reproduction de cycles de contraintes mécaniques et l'évaluation des conséquences de l'induction mécanique : ce projet vise l'étude de cellules de cartilage, les chondrocytes. Il s'agit de reproduire l'état de pompage des os (action asservie de compression uniaxiale à effort constant et de relâche sur plusieurs heures) et d'observer ainsi leur comportement. Ce projet fait l'objet d'une collaboration avec l'hôpital de la Pitié Salpétrière et le Laboratoire d'Informatique de Polytechnique.
- l'utilisation des vibrations transverses et des modes propres pour la calibration en effort du dispositif
de mesure et l'exploitation de la dynamique de la poutre pour enrichir la précision de la mesure : dans la continuité des travaux de notre équipe, l'emploi d'un actionneur piézo-électrique est conservé à la base de la pointe. Des mesures dynamiques de vibrations transverses seront entreprises pour calibrer ce dispositif en effort. De même, l'exploitation de ce mode dynamique en environnement aqueux est une solution originale pour s'affranchir des bruits parasites, enrichir la précision des mesures et déterminer les propriétés visqueuses de la cellule.

- l'évaluation des conséquences de sollicitations externes : la contrainte considérée est thermique (de source laser). Il s'agit de positionner le système avec une grande précision, d'irradier le noyau de la cellule sur une plage temporelle précise et d'évaluer les conséquences du point de vue mécanique et morphologique. Ce projet est soutenu par un financement ARC (Association de Recherche contre le Cancer) en partenariat avec le Laboratoire de Génétique de la Radiosensibilité du CEA/DSV et a débuté en septembre 2005.

Ce thème de recherche est le cœur de la thèse de Maxime Girot débutée en octobre 2003.

6.3 La micro/nano-manipulation

Les perspectives en micro-manipulation sont importantes et s'enrichissent toujours de recherches dans notre équipe. En effet, à notre connaissance, il n'existe encore aucun système complet de micro-manipulation exploitable et automatique à cette échelle. La micro manipulation par adhésion représente une solution originale. La complexité de la relâche et la maîtrise des efforts d'interaction sont encore au centre de nos préoccupations actuelles. Le préhenseur à surface de contact variable est une véritable alternative à ces difficultés. Cependant, des thématiques plus larges, indépendantes du principe physique choisi, doivent compléter le champ d'études de la micro-manipulation selon différents axes :

- le préhenseur et son effet physique actif : le choix d'un préhenseur mono-digital a permis l'utilisation d'un capteur d'effort pour mesurer l'interaction objet préhenseur. D'autres phénomènes actifs existent sans que pour l'instant une solution unifiée n'émerge. Les effets capillaires seront par exemple abordés dans le cadre du projet « MOMIE »¹. La synthèse d'un préhenseur multi-digital n'est pas exclue de notre point de vue mais le problème du capteur d'efforts reste toujours présent et très pénalisant à cette échelle.
- l'environnement : durant ces années, l'environnement de manipulation n'est pas apparu comme un élément central de notre recherche même si indirectement, il l'était. Son implication est aussi étroitement liée au choix du préhenseur. Une voie originale apparaît avec l'utilisation de l'environnement aqueux pour les opérations de micro-assemblage. Cette approche initiée par notre partenaire du LAB fait l'objet d'un projet² ANR blanc accepté en 2005. L'utilisation du capteur d'effort et de l'environnement dédié et contrôlé présentés dans la partie précédente peut aussi représenter une voie originale pour une exploitation plus fine des phénomènes spécifiques au contexte environnemental.

Dans la continuité de ce thème de recherche, une voie nouvelle, apparue depuis cette année, est une exploration de la descente d'échelle, la nano-manipulation. Ce thème s'inscrit dans le cadre d'un projet Européen NANORAC³ de type STREP. L'objectif est la manipulation et la caractérisation de nano-tubes (de

¹Ce projet (Méthodes et Outils pour le MIcro-assemblagE) accepté au Programme d'Action Intégrée Tournesol est une collaboration avec l'ULB (Université Libre de Bruxelles Belgique - CAD/CAM Département - Prof A. Delchambre, Dr P. Lambert.

²Ce projet intitulé PRONOMIA a pour partenaire le LAB (Prof. Nicolas Chaillet, coordinateur du projet et Dr Mickaël Gauthier) et l'équipe micro-manipulation du LRP.

³Les différents partenaires sont AMIR (Division of Microrobotics and Control Engineering - Université d'Oldenburg - Allemagne - Prof. Fatikow) - UCAM (Engineering Department - Université de Cambridge - Angleterre - Prof. W.I. Milne, Dr K. Teo)- MIC (Department of Micro and Nano Technology - Université de Copenhague - Danemark - Dr P. Boggild) - société Nascatec (compagnie spécialisée dans le développement de micro-préhenseurs - Dr T. Debski)

dimension cylindrique 500 $nm \times 20 nm$). Cette application reste intrinsèquement liée à l'échelle microscopique puisque les phénomènes physiques sont similaires avec une amplification de certains paramètres négligés à l'échelle microscopique. Les effets de capillarité, dus à l'environnement, ne pourront, par exemple, plus être négligés. La complexité du problème est par contre fortement modifiée par des problèmes de vision puisque la taille des objets est en dessous du domaine perceptible par un microscope optique. Le choix de ne plus pouvoir utiliser de dispositifs optiques impose de nouvelles solutions pour la vision. L'issue retenue par nos partenaires est l'utilisation d'un microscope électronique. Ce choix est crucial puisqu'il entraîne un traitement d'images assez lent (aujourd'hui de quelques dizaines de secondes) pour pouvoir détecter le positionnement du préhenseur et de l'objet manipulé. Pour réussir des opérations de nano-manipulations, l'un des points sensibles est ainsi la définition d'un environnement virtuel, le plus proche de la réalité [LXYF03]. Ce simulateur dédié à notre application intégrera les phénomènes nanoscopiques. Pour corréler l'approche théorique et expérimentale, des campagnes de mesure avec un microscope à force atomique en environnement athmosphérique et contraint (sous microscope électronique) sont programmées. Des simulations réalistes de courbes d'approche/retrait d'une pointe AFM sont déjà développées. Ainsi des outils de simulation recalée sur les images différées pour des géométries complexes seront au centre de nos futures préoccupations pour des opérations de télé nano-manipulation.

Une voie parallèle peut aussi être exploitée au laboratoire. Il s'agit de la nano-manipulation par maîtrise des efforts d'interaction entre une pointe AFM et l'objet. Cette technique est inspirée des objets de recherche de la microscopie à champ proche et utilise l'ensemble des outils et méthodes développés dans le cadre de la micro-manipulation. Ainsi, la nano-manipulation par contact adhérent ou par poussée contrôlée est le prolon-gement intuitif de nos travaux actuels. Aujourd'hui, seuls des problèmes de résolution sur le capteur d'effort et sur les translateurs latéraux sont des freins à cette application. Néanmoins, la modélisation de phases caractéristiques de manipulations d'objets nanoscopiques est déjà avancée au sein de notre équipe, utilisant les méthodologies explicitées dans le deuxième chapitre. Cette approche représente une voie nouvelle, limitée encore par de nombreux aspects de modélisation, de perception et de contrôle.



Figure 6.4 – Perspectives dans le domaine de la nano-manipulation

La thèse de Julien Vitard débutée en octobre 2004 est dédiée à cette thèmatique de recherche.

6.4 Retour haptique pour des interactions moléculaires

Une application transverse nous a été proposée par la société SANOFI/AVENTIS à partir d'un partenariat avec le CEA/LIST. Il s'agissait de percevoir les différents efforts d'interactions lors d'opérations moléculaires, par exemple l'insertion d'un ligand dans une protéine de type récepteur. Les différents efforts mis en jeu dépendent de leur position relative et de leur configuration instantanée. L'objectif est de déterminer une position stable, une conformation, permettant la création de nouvelles molécules pour le marché pharmaceutique. Cette position désirée est recherchée à partir de l'utilisation de logiciels de simulation moléculaire. L'idée proposée est d'inclure l'utilisateur dans ce processus de sélection et de convergence. Par exemple, pouvoir modifier la géométrie de la scène, en ressentant l'effort d'interaction, ou comparer deux solutions candidates représentent des voies privilégiées par nos partenaires.



Figure 6.5 – Illustration du retour haptique pour des interactions moléculaires

L'objectif de la simulation moléculaire est de prévoir les propriétés macroscopiques d'une substance à partir de la modélisation de ces constituants à l'échelle microscopique. Les classes d'effort sont ainsi les mêmes que celles présentées dans le premier chapitre, incluant les effets chimiques. Le paramétrage est par contre fortement différent puisqu'il s'agit de considérer molécule par molécule de façon discrète. Les étapes ultérieures d'intégration pour définir des formulations continues ne sont pas utilisées dans ce type d'application. Trois classes de modèles coexistent, les modèles basés sur les principes de la mécanique quantique, les modéles semi-empiriques et les modèles de la dynamique newtonienne. Des méthodes de résolution numérique par optimisation permettent alors de trouver une solution (un état stable où les protéines mises en jeu minimisent la fonction choisie, par exemple l'énergie d'interaction). Les temps de résolution sont par contre très longs et représentent un frein à la résolution du problème. D'autre part, la multiplicité des solutions numériques et des hypothèses associées est très complexe pour qualifier l'état de la solution. La première partie de ce thème de recherche s'est concentrée sur cette difficulté.

Il s'agissait de synthétiser et d'analyser l'ensemble des outils de simulations numériques développés. Deux voies priviligiées ont été dégagées par cette étude, les simulations dynamiques moléculaires basées sur les techniques énergétiques et les outils basés sur une assimilation de la protéine à un système dynamique multicorps, permettant l'utilisation d'outils classiques de la robotique. La pertinence des solutions proposées par ces techniques a fait l'objet d'études complémentaires par nos partenaires. Ceux-ci priviligient ainsi les techniques numériques et des études complémentaires sur l'optimisation des temps de simulations sont en cours. Ce choix est très important pour notre équipe et son désir central de modéliser l'échelle nanoscopique et ses phénomènes. L'approche proposée par ces outils peut représenter une véritable alternative aux méthodes classiques par le volume des outils numériques spécifiques développés. D'autre part, cette modélisation est le point central de l'implication de notre équipe dans un projet Européen accepté de type STREP intitulé Golem⁴ et s'intéressant aux processus bio-inspirés d'auto-assemblages pour les nano-composants. Son objectif est d'investir des méthodes alternatives de manipulation pour l'échelle micro et nanoscopiques en prenant la

⁴ Les différents acteurs de ce projet sont l'Université d'Eindhoven (Dr Yves Bellouard, coordinateur), l'EPFL (Dr

nature comme modèle.

La complexité des outils logiciels et les temps de calcul sont au centre d'autres difficultés pour ce thème de recherche. Les temps d'échantillonnage nécessaires pour la stabilité du couplage bidirectionnel (de l'ordre de la milliseconde) ne sont pas respectés. Parmi deux solutions envisagées, la première priviligie une solution asynchrone avec un recalage sur les différentes positions d'équilibre alors que la seconde piste propose de rejouer la scène hors ligne avec néanmoins un volume de points indexés très important. Une autre complexité apparaît avec le changement d'échelles. Des fortes dynamiques en amplitude d'effort sont observées dans les simulations et peuvent rapidement poser des problèmes dans la commande de l'interface haptique. Un simple couplage homothétique ne peut pas répondre à cette difficulté et une évolution du couplage passif développé dans le cadre de notre recherche, appliquée cette fois dans un espace tridimensionnel des efforts, est une alternative intéressante pour répondre à ce besoin.

Ce thème de recherche est très nouveau pour notre équipe et tourné vers un domaine applicatif dont les enjeux sont extrémement précis. Ils représentent, néanmoins, par l'originalité et les problèmatiques liés à la simulation de phénomènes moléculaires et au retour haptique avec des changments d'échelle à grande dynamique, un axe prometteur de notre équipe. La thèse de Bruno Daunay débutée en octobre 2004 intègre les différents travaux proposés dans ce contexte.

6.5 Interface multi-sensorielle pour la perception de l'échelle micro et nanoscopique

L'échelle nanoscopique possède encore un grand nombre d'hypothèses et d'inconnues pour la modélisation et la compréhension des phénomènes physiques. L'objectif central de cet axe de recherche est de proposer une perception multi-sensorielle de cette échelle à partir d'une télé nano-manipulation, d'un organe haptique et d'une salle d'immersion. Il existe quelques résultats en télé-opération mais le dessein avoué de ce thème dépasse ce simple cadre et introduit la perception fine des phénomènes à l'échelle micro et nanoscopique.

En effet, l'haptique désigne au sens large la science du touché, par analogie avec acoustique ou optique. Tout un ensemble de connaissances en robotique mais aussi sur les mécanismes sensitifs de perception et de contrôle des efforts sont nécessaires à l'élaboration de systèmes d'aide à la perception de l'espace. La recherche proposée par notre équipe abordera ainsi les fondements de la conception et de la commande des interfaces haptiques et de la perception visuo-tactile dans le contexte particulier de l'utilisation d'un microscope à force atomique. Une démarche expérimentale très importante est proposée et est liée aux précédents outils de recherche. Il s'agit de réfléchir comment percevoir et réfléchir des efforts dans la gamme du micro/nano newton vers le monde macroscopique.

Pour l'ensemble des expérimentations à cette échelle, un organe maître, un bras robotisé à plusieurs degrés de liberté, est utilisé. Cet organe est souvent conçu pour des systèmes macroscopiques et la difficulté majeure est de proposer un système dédié à cette échelle et à ces particularités (grande dynamique, rigidité faible, ...). De plus, le couplage bilatéral de cette classe de système est délicat puisqu'il s'agit de définir une commande qui conserve au maximum les propriétés de transparence tout en assurant la stabilité du système. Les premiers éléments proposés et décrits dans le quatrième chapitre représentent une base essentielle pour ce travail. En effet, la perception de cette échelle est un problème très souvent peu traité. De simples rapports homothétiques sont ainsi utilisés comme une projection d'un monde vers l'autre, rendant encore difficile le ressenti multi-sensoriel. Il s'agit de comprendre et d'analyser la perception de différents utilisateurs d'un ensemble d'expérimentations tests comme par exemple la courbe d'approche retrait d'une pointe AFM sur différentes surfaces dures ou molles. Un protocole expérimental sera proposé pour répondre à cette difficulté majeure.

Jean-Marc Breguet), l'Université de Stuttgart (Dr S. Kornenko), le National Physical Laboratory (Dr A. Cuenat), le CEA/LIST (Dr M. Hafez), les sociétés Delong Instrument, Octax et Quintenz.

Les perspectives de cette recherche sont nouvelles et abordent des thèmes nouveaux pour notre équipe. Elles feront l'objet de collaborations fortes avec une co-direction de thèse du Professeur Marc Maier (Action NeuroImagerie Modélisation - UMR 742 Inserm/UPMC) et d'une coopération avec l'équipe SIAMES (Synthèse d'Image, Animation, Modèlisation et Simulation, Anatole Lecuyer CR INRIA). Cette thèse fait l'objet d'une allocation ministérielle dans le contingent UPMC depuis octobre 2005.

L'ensemble de ces perspectives regroupées autour de quatres thématiques déja amorcées est en lien direct avec les différents acquis et le savoir-faire expérimental très important de l'équipe. Elles représentent chacune d'elles un champ de recherche vaste qui nécessitera un ensemble de collaborations fortes déja initiées avec les sciences du vivant, les nanosciences, la micro-robotique, La multi-disciplinarité de cette thématique a peut être seulement débuté

Annexe A

Liste des symboles

Cette annexe recense l'ensemble des symboles¹ utilisés dans ce mémoire.

Symbole	Description	Unités
α, β	Angles de l'image dans le plan cartésien	rad
ξ_0	Distance interatomique d'équilibre	m
δ	Hauteur d'écrasement	m
ϵ	Permittivité relative -constante diélectrique	_
	Profondeur du potentiel de Lennard-Jones	_
ϵ_0	Pemittivité de l'espace $(8.854 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1})$	${\rm Fm}^{-1}$
γ	Energie de surface	$\rm Jm^{-2}$
γ_l	Tension de surface du liquide	$\rm Nm^{-1}$
Γ_o	Couple opérateur	Nm
λ	Paramètre d'élasticité	_
	Gain de l'asservissement visuel	_
μ	Coefficient de friction	_
μ_b	Coefficient de frottement visqueux de Brigit	Nms
ν	Fréquence	Hz
	Coefficient de Poisson	_
$ u_e $	Fréquence électronique	Hz
ω	Rotation de la poutre	rad
ϕ	Fonction de travail des niveaux de Fermi	eV
ρ	Masse volumique	$\rm kgm^{-3}$
	Densité volumique moléculaire du matériau	$molm^{-3}$
σ	Densité de charge surfacique	$\rm Cm^{-1}$
au	Contrainte de cisaillement	_
	Constante de temps de Brigit	s
$ au_1, au_2$	Constantes de temps du nano-translateur	s
θ	Angle d'inclinaison du préhenseur	rad

¹* désigne la valeur désirée associée au symbole

Angle de contact du liquide sur le substrat rad

Tableau A.1 – Symboles grecs

Symbole	Description	Unités
a	Rayon de l'aire de contact	m
a_0	Rayon de l'aire de contact sans effort	m
A	Constante de Hamaker	J
	Amplitude du Dirac	V
A_d	Constante d'homothétie en déplacement	—
A_f	Constante d'homothétie en effort	—
A_{ikj}	Constante de Hamaker (entre un corps i et un corps j séparé par un milieu k)	J
b	Rugosité	m
	Interface haptique Brigit	—
B_0	Constante de Brigit $\frac{R_b^2}{\mu_b}$	m^2
C	Coefficient maximal de résistance au roulement	—
C_0	Capacité électrique de deux solides	\mathbf{F}
C_i	Constante d'induction de l'interaction	$\rm Jm^6 mol^{-2}$
C_o	Constante d'orientation de l'interaction	$\mathrm{Jm^6mol^{-2}}$
C_d	Constante de dispersion de l'interaction	$\mathrm{Jm^6mol^{-2}}$
C_{VdW}	Constante de l'interaction de Van der Waals (toutes les contributions)	$\mathrm{Jm^6mol^{-2}}$
d	Hauteur d'immersion	m
D	Distance de séparation entre deux corps	m
D_0	Distance interatomique $(0.4 \times 10^{-9} \text{m})$	m
D_1	Distance objet substrat	m
D_2	Distance objet préhenseur	m
D_e	Distance d'équilibre entre les forces d'attraction et la force de rappel	m
D_s	Distance du saut de la poutre	m
e	Charge d'un électron $(1.602 \times 10^{-19} \text{C})$	С
E	Module de Young	GPa
	Champ électrique	${\rm Vm^{-1}}$
	Extrémité de la poutre	—
F, F_N	Force normale	Ν
F_{so}^{adh}	Force d'adhésion substrat objet	Ν
F_{po}^{adh}	Force d'adhésion préhenseur objet	Ν
F_b	Force appliquée par l'opérateur sur Brigit	Ν
F_{cap}	Force capillaire	Ν
F^{cp}	Force limite pour le glissement à l'interface objet/préhenseur	Ν
F^{cs}	Force limite pour le glissement à l'interface objet/substrat	Ν
F^{cr}	Force limite pour le roulement de l'objet	Ν
F_e	Force exercée par l'environement microcopique	Ν
F_o	Force appliquée par l'opérateur sur l'interface haptique	Ν
F_l	Force mesurée au point de contact l	Ν

F_L	Force mesurée à l'extrémité de la poutre	Ν
f_{so}	Force de frottement à l'interface substrat objet	Ν
f_{po}	Force de frottement à l'interface préhenseur objet	Ν
F_T	Force tangentielle	Ν
F_{VdW}	Force de Van Der Waals	Ν
g	Gravité	$9.81 { m ms}^{-2}$
G	Grossissement du microscope	_
h	Constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{m}^2 \text{kgs}^{-1}$)	$\rm m^2 kg s^{-1}$
	Hauteur de la poutre	m
H	Constante de Lifshitz-Van Der Waals	J
H(m, n)	Image après traitement des filtres	_
H_0	Valeur seuil	_
Ι	Matrice image	_
	Moment d'inertie	m^4
I_b	Courant à l'entrée de Brigit	А
J	Matrice d'interaction	_
J_a	Matrice d'interaction approchée	_
J_b	Inertie totale de Brigit	$\rm km^2$
k	Constante de Boltzmann $(1.381 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1})$	$\rm JK^{-1}$
K	Rigidité relative ou module de Young effectif	GPa
K_1, K_2	Gains limites de la commande en effort	_
K_a	Constante d'accélération du préhenseur	$\rm mVs^2$
K_b	Constante caractéristique reliant le couple au courant	NmA^{-1}
K_i	Correcteur intégral du couplage passif	_
K_l	Raideur équivalente la poutre au point de contact	${\rm Nm^{-1}}$
K_L	Raideur équivalente la poutre en son extrémité	$\rm Nm^{-1}$
K_m	Correcteur proportionnel de la commande en effort du micro-translateur	_
K_n	Correcteur proportionnel de la commande en effort du nano-translateur	_
K_p	Correcteur proportionnel du couplage passif	_
K_U	Coefficient de calibration de la poutre tension/déplacement	$\rm Vm^{-1}$
l	Distance du point de contact par rapport à la base	m
L	Longueur de la poutre	m
m	Micro-translateur	_
M_c	Fonction de transfert en vitesse de l'axe motorisé du microcope	_
M_{xy}	Fonction de transfert en vitesse des axes horizontaux du micro-translateur	_
M_z	Fonction de transfert en vitesse de l'axe vertical du micro-translateur	_
M, N	Dimensions de l'image (768×576)	_
$M_l(x)$	Moment de flexion au point de coordonnée x	Nm
M_{po}	Moment de résistance au roulement à l'interface préhenseur objet	Nm

M_{so}	Moment de résistance au roulement à l'interface substrat objet	Nm
m, n	Coordonnées d'un point de l'image	_
m_o	Masse de l'objet	kg
m_p	Masse de la poutre	kg
n	Nano-translateur	_
	Indice de réfraction	_
0	Objet	_
P	Force de pull-off	Ν
P_o	Poids de l'objet	N
p	Poutre	_
p'	Poutre modifiée	_
q	Charge électrique	С
r	Distance entre deux molécules	m
r_1, r_2	Rayons de courbure	m
R	Rayon de l'objet sphérique	m
	Constante des gaz molaires $(8.314 \text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1})$	$\mathrm{JK}^{-1}\mathrm{mol}^{-1}$
R_b	Rayon de Brigit	m
R_p	Réaction du préhenseur	Ν
R_s	Réaction du substrat	Ν
\mathcal{R}_0	Repère global	_
\mathcal{R}_i	Repère lié à l'image	_
\mathcal{R}_p	Repère lié à la poutre	_
\mathcal{R}_s	Repère lié au substrat	_
s	Opérateur de Laplace	_
	Substrat	_
T	Température absolue	К
u_c, v_c	Position du point de contact en pixels	_
u_e, v_e	Position de l'extrémité en pixels	_
u_g, v_g	Position du coin gauche de la poutre	_
U	Tension mesurée par le pont de Wheastone	V
ΔU	Potentiel	eV
v	Volume molaire	$\mathrm{m}^{3}\mathrm{mol}^{-1}$
	Flèche de la poutre	m
V	Volume du liquide	m^3
	Potentiel électrique	V
V_b	Vitesse de Brigit	ms^{-1}
V_C	Potentiel de contact	V
V_n	Vitesse du nano-translateur	ms-1
w	Potentiel d'interaction moléculaire	$Jmol^{-2}$

	Vitesse angulaire	$rads^{-1}$
	Largeur de la poutre	m
w_p	Largeur de la poutre en pixel	_
W	Travail d'adhésion ou travail de cohésion	J
	potentiel d'interaction entre deux corps macroscopiques	J
W_p	Energie d'interaction entre deux plans	J
x_m, y_m, z_m	Coordonnées du micro-translateur	m
x_n, y_n, z_n	Coordonnées du nano-translateur	m
z_0	Position verticale du translateur au contact	m
	Distance de séparation sans transfert d'électron	m
z_b	Position de Brigit	m
z_c	Position verticale de la caméra	m
Z_o	Impédance transmise par la force opérateur	$\rm ks^{-1}$
Z_e	Impédance transmise par l'environnement microscopique	$\rm ks^{-1}$
Z_n	Position verticale du nano-translateur	m
Z_p	Position verticale du préhenseur pour les modèles	m

Tableau A.2 – Symboles latins

Annexe B

Spécifications techniques

Cette annexe recense les principales caractéristiques techniques des éléments constitutifs du dispositif expérimental µMAD.

B.1 Préhenseur

La sonde utilisée est fabriquée par la société Nanosensors¹ Il s'agit d'un parallélépipède rectangle en silicium mono-cristallin, biseauté à son extrémité libre. Ces principaux paramètres géométriques et mécaniques sont consignés dans le tableau B.1.

Paramètre	Valeur numérique
Hauteur	10 µm
Largeur	140 µm
Longueur	600 µm
Masse volumique	$2 \ 330 \ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Module de Young	47 GPa
Moment quadratique	$1,116 \cdot 10^{-20} \text{ m}^4$
Raideur apparente en bout de poutre	$21,06 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

Tableau B.1 – Spécifications de la micro-poutre AFM

B.2 Actionneurs

B.2.1 Micro-translateurs

Il s'agit de vérins motorisés (cf. Tab. B.2 page suivante) CMA-25CCCL produits par la société Newport². Ils sont pilotés par une carte PCI, qui permet une commande en boucle fermée avec un contrôleur PID réglable, nécessairement installée sur un PC tournant sous Windows. Le PC envoie des consignes en position ou en vitesse au boîtier de puissance qui gère les asservissements.

¹http://www.nanosansors.com

²http://www.newport.com/

Paramètre	Valeur numérique
Capacité de charge axiale	90 N
Course	25 mm
Incrément Minimum	0,2 μm
Masse	0,1 kg
Pas de la vis d'entraînement	0,5 mm
Réducteur	256 :1
Résolution	49 nm
Résolution codeur	40 pt/tr
Vitesse maximale	$\pm 400 \ \mu m \cdot s^{-1}$

Tableau B.2 – Spécifications des micro-translateurs CMA-25CCCL

B.2.2 Nano-translateur

Le nano-translateur (cf. Tab. B.3) est une platine de translation piézo-électrique P-732.ZC, associée à un boîtier de puissance E-610.CO, de la société Physik Instrument³, commandée en position. L'ensemble est commandé par une carte d'acquisition DAQ-3606E de la société National Instrument⁴, installée sur un PC tournant sous RTLinux, et utilisant des drivers temps réel et *open source* du projet Comedi⁵.

Paramètre	Valeur numérique
Course	12 µm
Ratio	$1,2 \ \mu m \cdot V^{-1}$
Résolution	2,8 nm
Tension de commande	de 0 à 10 V
Tension de mesure	de 0 à 10 V

Tableau B.3 – Spécifications du nano-translateur P-732.ZC

B.2.3 Pastille piézo-électrique

Il s'agit d'une céramique piézo-électrique, de dimensions $8 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$, commandée par GBF. Elles est capable de produire des oscillations d'amplitude d'une centaine de nanomètres à des fréquences de plusieurs dizaines de kilohertz, de l'ordre de grandeurs des fréquences propres de flexion du préhenseur.

B.3 Capteurs

B.3.1 Dispositif de mesure AFM

La sonde AFM intègre à sa base des micro-jauges qui forment un pont de Wheatstone. Lorsque la poutre fléchit les jauges se déforment et le pont est en déséquilibre. Le signal produit est amplifié, puis mesuré en temps réel par la carte DAQ. En mode quasi-statique, ce signal est proportionnel à la flèche en bout de poutre, le gain valant $0.5 \text{ V} \cdot \mu m^{-1}$.

³http://www.physikinstrumente.com/

⁴http://www.ni.com/

⁵http://www.comedi.org/

B.3.2 Dispositif optique : microscope, caméra CCD et carte d'acquisition

La caméra CCD couplée au microscope est une caméra Sony XC-711P. L'acquisition d'images se fait en temps-réel à l'aide d'une carte d'acquisition vidéo Arvoo Picasso⁶ PCI-3C pilotée par des drivers RTLinux. La caméra CCD couplée au microscope est une caméra Sony XC-711P. L'acquisition d'images se fait en temps-réel à l'aide d'une carte d'acquisition vidéo Arvoo Picasso⁷ PCI-3C pilotée par des drivers RTLinux.

	Valeur numérique		
Paramètres	MPL5X	mpl10x	slmpl20x
Grandissement	5	10	20
Ouverture numérique	0,1	0,25	0,35
Distance focale	36 mm	18 mm	9 mm

Tableau B.4 -	- Spécifications	des objectifs Olympus
---------------	------------------	-----------------------

Paramètre	Valeur numérique
Format du capteur	2/3 in
Nombre de cellules	756 × 581
Surface sensible	$8,8 \times 6,6 \text{ mm}^2$
Taille d'une cellule	$11 imes 11 \ \mu m^2$

Tableau B.5 – Spécifications de la caméra CCD XC-711P

Paramètre	Valeur numérique
Cadence d'acquisition	25 Hz
Nombre de pixels	768×576

Tableau B.6 – Spécifications de la carte Picasso PCI-3C

B.4 L'interface haptique Brigit

Brigit est une interface haptique à un axe en rotation composée d'un moteur à courant continu sur l'axe duquel sont montés un codeur optique à haute résolution et un volant permettant la manipulation par un opérateur.

[]

Paramètre	Valeur numérique
Courant maximal	1,905 A
Constante caractéristique	$0,0525 \text{ Nm} \cdot \text{A}^{-1}$
Couple maximal	0,1 Nm
Course angulaire logicielle	2 rad
Course angulaire matérielle	∞
Course linéaire logicielle	7 cm
Force tangentielle maximale	2,86 N
Inertie totale	$6,523 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Coefficient de frottement	6,192 Nms
Rayon du volant	3,5 cm
Résolution angulaire	1/5000 tr
Résolution codeur	5000 pt/tr (4 fronts)

Tableau B.7 – Spécifications de l'interface haptique Brigit

Bibliographie

[Ada90]	A.W. ADAMSON. Physical chemistry of surfaces, fifth edition. Wiley Interscience publication, 1990.
[AF96]	F. ARAI and T. FUKUDA. « Microrobotics Based on Micro Physics-Design and Control Strategy Based on Attractive Force Reduction ». In <i>Proceedings of SPIE Conference on Microrobotics : Components and Applications</i> , volume 2906, pages 184–195, 1996.
[AF97]	F. ARAI and T. FUKUDA. « A new pick up and release method by heating for micromanipulation ». In <i>Tenth Annual International IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems</i> , pages 383–388, Nagoya, Japon, 1997.
[AF03]	M. AMMI and A. FERREIRA. « Involving the Operator in the Control Strategy for Intelligent Telemicro- manipulation ». In <i>IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics</i> , pages 868–873, 2003.
[Agn03]	J. AGNUS. « <i>Contribution à la micromanipulation. Étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropince piézoélectrique</i> ». PhD thesis, Université de Franche-Comté, November 2003.
[AH98]	R. ADAMS and B. HANNAFORD. « A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces ». In <i>Proceedings of IROS</i> , pages 1254–1259, 1998.
[AI97]	Y. ANDO and J. INO. « The effect of asperity array geometry on friction and pull-off force ». <i>Journal of tribology</i> , 119 :1–7, 1997.
[AKH01]	N. ANDO, P. KORONDI and H HIDEKI. « Development of Micromanipulator and Haptic Interface for Networked Micromanipulation ». <i>IEEE/ASME Transaction on Mechatronics</i> , 6(4):417–427, December 2001.
[AOH00]	N. ANDO, M. OHTA and H « Micro Teleoperation with Haptic Interface ». In <i>IEEE Internatio-nal Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation</i> , pages 13–18, Nagoya, Japon, October 2000.
[AOI91]	Y. ANDO, H. OGAWA and Y. ISHIKAWA. « Estimation of attractive force between approached surfaces ». In <i>proc. of the 2nd International Symposium on Micromachine and Human Science</i> , pages 133–138, 1991.
[AP63]	M.J. ADAMS and V. PERCHARD. « The cohesive forces between particles with interstitial liquid ». In <i>Inter. Chem. E. Symposium series No. 91</i> , pages 147–160, 1963.
[AS89]	R.J ANDERSON and M.W. SPONG. « Bilateral control of teleoperators with time delay ». <i>IEEE Trans.</i> on Automatic Control, 34(5):494–501, 1989.
[ASH01]	B. ARUK, M. SITTI and H. HASHIMOTO. « Human-Machine Interface for Nanomanipulation with AFM Probe ». In <i>IEEE Conference on Nanotechnology</i> , pages 151–156, Maui, Hawaii, États-Unis, November 2001.
[Att00]	P. ATTARD. « Interaction and Deformation of Elastic Bodies : Origin of Adhesion Hysteresis ». <i>J. Phys. Chem. B</i> , 104 :10635–10641, 2000.
[AVN98]	J. ALEX, B. VIKRAMADITYA and B. J. NELSON. « Teleoperated Micromanipulation whithin a VRML Environment Using Java ». In <i>IROS'98 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , pages 1747–1752, Victoria, Canada, October 1998.
[BDVB03]	A BERGANDER, W. DRIESEN, T. VARIDEL and J.M. BREGUET. « Development of Miniature Ma- nipulators for Applications in Biology and Nanotechnology ». In <i>Microrobotics for Biomanipulation</i> , <i>IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , 2003.
[BE00]	A.A. BUSNAINA and T. ELSAWY. « The effect of relative humidity on particle adhesion and removal

». J. Adhes., 74:391–409, 2000.

[Ber03]	A. BERGANDER. « <i>Control, wear testing and integration of stick-slip positionning</i> ». PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.			
[BFS91]	A. BANERJEA, J. FERRANTE and J.R. SMITH. Adhesion at Metal Interfaces, in Fundamentals of Adhesion, pp 325-348. Edited by Lieng-Huang Lee, Plenum Press, 1991.			
[Bha98]	B. BHARAT. Tribology Issues ans Opportunities in MEMS. Kluwer Academic Publishers, 1998.			
[Bow88]	R. BOWLING. « A Theoretical Review of Particle Adhesion ». In <i>Particules on surface 1 : Detection, Adhesion and Removal</i> , pages 129–142. Edited by K.L. Mittal, Plenum Press, 1988.			
[BP99]	N. BRILLIANTOV and T. PÖSCHEL. « Rolling as a cuntinuing collision ». <i>The European Physical Journal B</i> , 12:299–301, 1999.			
[Bre98]	J.M. BREGUET. « Actionneurs "'stick and slip"' pour micro-manipulateurs ». PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.			
[BSM97]	M. BARQUINS and E.R. SHANAHAN-MARTIN. « Effect of surface cavities on static and dynamic adhesion to an elastomer ». <i>International Journal of adhesion and adhesives</i> , 17(4):313–317, 1997.			
[Cha99]	N. CHAILLET. « Contribution à la modélisation, la commande et la réalisation de microactionneurs et de composants pour la microrobotique ». <i>Habilitation à Diriger des Recherches</i> , Université de Franche-Comté 1999.			
[COS99]	R. W. CARPICK, D. F. OGLETREE and M. SALMERON. « A general equation for fitting contact area and friction vs load measurements ». <i>Journal of Colloid and Interface Science</i> , 211:395–400, 1999.			
[CRP97]	A. CODOUREY, M. RODRIGUEZ and I. PAPPAS. « A Task-oriented Teleoperation System for Assembly in the Microworld ». In <i>IEEE International Conference on Advanced Robotics</i> , pages 235–240, Monterey, Californie, États-Unis, July 1997.			
[Cue03]	S. CUENOT. « <i>Measurement using AFM-based methods</i> ». PhD thesis, Université catholique de Louvain, Belgique, 2003.			
[CZK03]	B. CHANG, Q. ZHOU and H. KOIVO. « Experimental Study of Microforces in a Controlled Environment ». pages 89–94. Proc. of the 2nd VDE World Microtechnologies Congress, 2003.			
[dGBWQ02]	P-G. de GENNES, F. BROCHARD-WYART and D. QUÉRÉ. Gouttes, bulles, perles et ondes. belin, 2002.			
[DHR03]	F. DIONNET, D.S. HALIYO and S. RÉGNIER. « Advanced micro-manipulation applications ». In <i>IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , pages 1870–1875, Las Vegas, Etats-Unis, 2003.			
[DHR04]	F. DIONNET, D.S. HALIYO and S. RÉGNIER. « Autonomous Manipulation using a new strategy of accurate release by rolling ». In <i>IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 5019–5024, Mai 2004.			
[Dio05]	F. DIONNET. « <i>Télé-micro-manipulation par adhésion</i> ». PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2005.			
[DMT75]	B. V. DERJAGUIN, V.M. MULLER and YU. P. TOPOROV. « Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles ». <i>Journal of Colloid and interface science</i> , 53, No. 2 :314–326, 1975.			
[DRG04]	F. DIONNET, S. RÉGNIER and J.C. GUINOT. « Vision and force based autonomous micromanipulation ». In 15th CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Juin 2004.			
[DVRB04]	W. DRIESEN, T. VARIDEL, S. RÉGNIER and J.M. BREGUET. « Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots ». In <i>Proceedings of Internationam Workshop on Microfactories</i> , pages 184–195, 2004.			
[DVRB05]	W. DRIESEN, T. VARIDEL, S. RÉGNIER and J.M. BREGUET. « Micromanipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots ». <i>Journal of Micromechanics and Microengineering</i> , A paraître, 2005.			
[ERERYT05]	K. EL RIFAI, O. EL RIFAI and K. YOUCEF-TOUMI. « Modeling and Control of AFM-based Nano- manipulation Systems ». In <i>Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 158–163, April 2005.			
[Fea95]	R.S. FEARING. « Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling ». In proc. of the IEEE/RSJ Intelligent Robots System, pages 212–217, 1995.			
[Fer03]	A. FERREIRA. « Strategies of Human-Robot Interaction for Automatic Microassembly ». In ICRA'03 :			

[Fer03]A. FERREIRA. « Strategies of Human-Robot Interaction for Automatic Microassembly ». In ICRA'03 :
IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September 2003.

[Fey59]	R.P. FEYNMAN. « There's Plenty of Room at the Bottom ». <i>Talk at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology (Caltech), December 29th</i> , 1959.			
[Fey93]	R. FEYNMAN. « Infinitesimal Machinery ». <i>Journal of Microelectromechanical Systems</i> , 2, No 1 :4–14, 1993.			
[FF01]	S. FAHLBUSCH and S. FATIKOW. « Micro Force Sensing in a Micro Robotic System ». In <i>ICRA'01 IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 3435–3440, Séoul, Corée du Sud May 2001.			
[FKK ⁺ 04]	S. FATIKOW, M. KEMPER, T. KORTSCHACK, T. SIEVERS, J. ZENKE, A. SHIRINOV and S. HOHN. Versatile Nanohandling Robot Cell in a Scanning Electron Microscope ». In <i>Proc. of the 12th Medite ranean Conference on Control and Automation</i> , Kusadasi, Turquie, June 2004.			
[FLW05]	L.M. FOK, Y.H. LIU and J.L. WEN. « Modeling of Haptic Sensing of Nanolithography with an Atomic Force Microscope ». In <i>Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 2457–2462, April 2005.			
[Fré03]	C. FRÉTIGNY. « Quelques éléments de mécaniques du contact ». Cours de l'Ecole Thématique Sondes Locales, Montpellier, 2003.			
[FTC ⁺ 03]	X. FAN, P. TEN, C. CLARKE, A. BRAMLEY and Z. ZHANG. « Direct measurement of the adhesive force between ice particles by micromanipulation ». <i>Powder Technology</i> , 131:105–110, 2003.			
[FXB99]	J.T. FEDDEMA, P. XAVIER and R. BROWN. « Micro-Assembly Planning with Van Der Waals Force ». In <i>Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning</i> , pages 32–38, July 1999.			
[FXB01]	J. FEDDEMA, P. XAVIER and R. BROWN. « Micro-assembly planning with van der Waals force ». Journal of Micromechatronics, 1(2):139–153, 2001.			
[Gau02]	M. GAUTHIER. « Conception et commande d'un dispositif magnétique de micromanipulation par pous sée ». PhD thesis, Université de Franche-Compté, December 2002.			
[GBC05]	M. GAUTHIER, B. Lopez-Walle B. and C. CLEVY. « Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums ». In <i>Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation</i> , June 2005.			
[GCH ⁺ 01]	S. GRANGE, F. CONTI, P. HELMER, P. ROUILLER and C. BAUR. « The Delta Haptic Device as a Nanomanipulator ». In <i>SPIE Microrobotics and Microassembly III</i> , Boston, États-Unis, October 2001.			
[GN04]	M.A. GREMINGER and B.J. NELSON. « Vision-based Force Measurement ». <i>IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence</i> , 26(3):290–298, 2004.			
[GYL85]	F. GROEN, I. YOUNG and G. LIGTHARD. « A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithm ». <i>Cytometry</i> , 6:81–91, 1985.			
[GYN02]	M. A. GREMINGER, Ge YANG and B. J. NELSON. « Sensing Nanonewton Level Forces by Visually Tracking Structural Deformations ». In <i>ICRA'02 : IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 1943–1948, Washington, DC, États-Unis, May 2002.			
[Hal02]	D.S. HALIYO. « Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation ». PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2002.			
[Ham37]	H.C. HAMAKER. « The London Van der Waals attraction between spherical particles ». <i>Physica</i> , 10:1058–1072, 1937.			
[Har67]	W.R HARPER. Contact and frictional electrification. Oxford at the Clarenton Press, 1967.			
[Hay91a]	D.A HAYS. « Electrostatic adhesion of non-uniformly charged dielectric sphere ». <i>Int. Phys. Conf. ser. No. 118 : section 4</i> , pages 223–228, 1991.			
[Hay91b]	D.A HAYS. <i>Role of Electrostatics in Adhesion, in Fundamentals of Adhesion, pp 249-278.</i> Edited by Lieng-Huang Lee, PLENUM PRESS, 1991.			
[HBPB99]	L. HEIM, J. BLUM, M. PRESS and H. BUTT. « Adhesion and friction forces between spherical micrometer-sized particles ». <i>Physical Review Letters</i> , 83(16):3328–3331, 1999.			
[Hec90]	L. HECHT. « An Introductory Review of Particle Adhesion to Solid Surfaces ». <i>Journal of the IES</i> , March/April :33–37, 1990.			
[HHPR03]	B HANNAFORD, G. HIRZINGER, C. PREUSCH and J.H. RYU. « Time domain passivity control with reference energy behavior ». In <i>IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , 2003.			

[HRG02]	D.S. HALIYO, S. RÉGNIER and J.C. GUINOT. « Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects ». In <i>IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 1949–1954, Washington DC, Etats-Unis, 2002.
[HRG03]	D.S. HALIYO, S. RÉGNIER and J.C. GUINOT. « MuMAD, the adhesion based dynamic micro- manipulator ». <i>European Journal of Mechanics A - Solids</i> , 22(6) :903–916, 2003.
[HRR+00]	D.S. HALIYO, Y. ROLLOT, S. RÉGNIER, P. BIDAUD and J.C. GUINOT. « Development of the adhesion based micromanipulation demonstrator at LRP ». In <i>Actes du 5ème Congrès Franco-Japonais de Mécatronique</i> , pages 417–425, Besançon, France, 2000.
[HRR01]	D.S. HALIYO, Yves ROLLOT and Stéphane RÉGNIER. « Dynamical Strategies for the Micro-Manipulation by Adhesion ». In <i>SPIE Microrobotics and Micromanipulation</i> , volume 4568, pages 261–269, Newton, USA, 2001.
[HRRG00]	D.S. HALIYO, Y. ROLLOT, Stéphane RÉGNIER and Jean-Claude GUINOT. « Simulation and conception of a micromanipulator taking advantage of micro-scale specificities ». In <i>13th CISM-IFTOMM Symposium on Robots and Manipulators</i> , pages 265–273, Zakopane, Pologne, 2000.
[HS92]	R.G. HORN and D.T. SMITH. « Contact Electrification and Adhesion Between Dissimilar Materials ». <i>Science</i> , 256 :362–364, 1992.
[HSH98]	S. HORIGUCHI, M. SITTI and H. HASHIMOTO. « Virtual Reality User Interface for Teleoperated Nanometer Scale Object Manipulation ». In <i>IEEE International Workshop on Robot and Human Communication</i> , pages 142–147, Takamatsu, Japon, September 1998.
[HSH99]	S. HORIGUCHI, M. SITTI and H. HASHIMOTO. « Visualization Interface for AFM-Based Nano-Manipulation ». In <i>IEEE International Symposium on Industrial Electronics</i> , pages 310–315, Bled, Slovénie, July 1999.
[HZS01]	K. HASHTRUDI-ZAAD and S.E. SALCUDEAN. « Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators ». <i>Int. Jour. Robotic Reseach</i> , 6(20) :419–445, 2001.
[Isr91]	J. ISRAELACHVILI. Intermolecular and Surface Forces. ACADEMIC PRESS, 1991.
[JKR71]	K. L. JOHNSON, K. KENDALL and A. D. ROBERTS. « Surface energy and the contact of elastic solids ». <i>Proc. R. Soc. Lond.</i> , A 324 :301–313, 1971.
[KKC01]	D. KIM, K. KIM and S. CHA. « Dextereous Teleoperation for Micro Parts Handling Based on Hap- tic/Visual Interface ». In <i>IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science</i> , pages 211–217, 2001.
[KKKP01]	D. KIM, K. KIM, K. KIM and J. PARK. « A Micro Manipulation System based on Teleoperation Techniques ». In <i>Proc. of Int. Symp. on Robotics</i> , Séoul, Corée du Sud, April 2001.
[KKS ⁺ 02]	S. KIM, K. KIM, J. SHIM, D. KIM and C. CHUNG. « Position and Force Control of a Sensorized Microgripper ». In <i>ICCAS'02 : International Conference on Control, Automation and Systems</i> , pages 319–322, Joenbuk, Corée du Sud, October 2002.
[KPKK02]	D. KIM, J. PARK, B. KIM and K. KIM. « Modeling and Simulation of Nanorobotic Manipulation with an AFM Probe ». In <i>ICCAS'02 : International Conference on Control, Automation and Systems</i> , Joenbuk, Corée du Sud, October 2002.
[Kro87]	E. KROTKOV. « Focusing ». International Journal of Computer Vision, 1:223-237, 1987.
[Kru67]	H. KRUPP. « Particle adhesion : theory and experiments ». <i>Journal of Advances in Colloid</i> , 1 :111–140, 1967.
[KTTK97]	K. KANEKO, H. TOKASHIKI, K. TANIE and K. KOMORIYA. « Impedance Shaping based on Force Feedback Bilateral Control in Macro-Micro Teleoperation System ». In <i>ICRA'97 : IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 710–717, Albuquerque, Nouveau-Mexique, États-Unis, April 1997.
[LA75]	J. LOWELL and A. AKANDE. « Contact electrification of metals ». <i>Journal of Physics D : Applied Physics</i> , 8:53–63, 1975.
[Lam04]	P. LAMBERT. « A Contribution to Microassembly : a Study of Capitallary Forces as a gripping Principle ». PhD thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2004.

[LD03]	P. LAMBERT and A. DELCHAMBRE. « Forces Acting on Microparts : towards a numerical approach for gripper design and manipulation strategies in micro-assembly ». In <i>Proceedings of the 1st International Precision Assembly Seminar</i> , Bad Hofgastein (Austria), 17-19 March 2003.
[Lee91]	L.H. LEE. <i>The Chemistry and Physics of Solid Adhesion, in Fundamentals of Adhesion, pp 1-86.</i> Edited by Lieng-Huang Lee, Plenum Press, 1991.
[Lee94]	L. LEE. « Dual mechanism for metal-polymer contact electrification ». <i>Journal of Electrostatics</i> , 32 :1–29, 1994.
[Lif56]	E. LIFSHITZ. « The theory of molecular attractive forces between solids ». <i>Soviet Physics</i> , 2 :73–83, 1956.
[LKK+01]	S. LEE, K. KIM, D. KIM, J. PARK and G. PARK. « Recognizing and Tracking of 3D-Shaped Micro Parts Using Multiple Visions for Micromanipulation ». In <i>IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science</i> , pages 203–210, Nagoya, Japon, April 2001.
[LKK ⁺ 02]	S. LEE, K. KIM, D. KIM, Park J. and G. PARK. « Vision Based Micromanipulation ». In <i>Third International Workshop on Microfactories</i> , Minneapolis, Minnesota, États-Unis, December 2002.
[LLD03]	P. LAMBERT, P. LETIER and A. DELCHAMBRE. « Capillary and surface tension forces in the manipulation of small parts ». pages 54–59. Proc. of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 2003.
[Lle52]	F.B. LLEWELLYN. « Some Fundamental Properties of Transmission Systems ». In <i>Proc.of IRE</i> , volume 40, pages 271–283, 1952.
[LRI80]	J. LOWELL and A.C. ROSE-INNES. « Contact electrification ». <i>Advances in Physics</i> , 29, No. 6 :947–1023, 1980.
[LXYF03]	G. LI, N. XI, M. YU and W. FUNG. « 3D Nanomanipulation Using Force Microscopy ». In <i>Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 3642–3647, September 2003.
[LXYF04]	G. LI, N. XI, M. YU and W. FUNG. « Development of Augmented Reality System for AFM-based Nanomanipulation ». <i>IEEE/ASME Transactions on Mechatronics</i> , 9(2):358–369, 2004.
[Mas93]	C. MASTRANGELO. « Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces - Part I : Basic theory ». <i>Journal of Microelectromechanical Systems</i> , 2(1) :33–43, 1993.
[Mau92]	D. MAUGIS. « Adhesion of spheres : the J.K.R-D.M.T transition using a dugdale model ». <i>Journal of Colloid and Interface Science</i> , 150, No. 1 :243–269, 1992.
[McL64]	A. MCLACHLAN. « Three-body dispersion forces ». Mol. Phys., 7:423-427, 1964.
[Mic02]	A. MICAELLI. « <i>Téléopération et télérobotique, Traité IC2</i> », Chapitre 6 Asservissement et loi de couplage en téléopération. Hermès, 2002.
[MKW ⁺ 04]	D. MISAKI, S. KAYANO, Y. WAKAKAIDO, O. FUCHIWAKI and H. AOYAMA. « Precise automatic Guiding and Positionning of Micro Robots with a Fine Tool for Microscopic Operations ». In <i>IROS'04 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , pages 218–223, Sendai, Japon, October 2004.
[Nie96]	G. NIEMEYER. « <i>Using Wave Variables in Time Delayed Force Reflection Teleoperation</i> ». PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, September 1996.
[OIO01]	Q. OUYANG, K. ISHIDA and K. OKADA. « Investigation of micro-adhesion by atomic force microscopy ». <i>Applied Surface Science</i> , 169:644–648, 2001.
[OSR75]	F.M. ORR, L.E. SCRIVEN and A.P. RIVAS. « Pendular rings between solids : meniscus properties and capillary force ». <i>Journal of Fluid Mechanics</i> , 67, No. 4 :723–742, 1975.
[PE01]	L. PANNO and E. ECKARD. « Virtual Nano Reality Interface Between an Atomic Force Microscope and the Delta Haptic Device ». Technical Report, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, October 2001.
[Pie00]	O. PIETREMENT. « Imagerie et caractérisation nanomécanique des surfaces par microscope à force atomique, Thèse soutenue en Décembre 2000, Université de Reims Champagne Ardenne », 2000.
[PKSD98]	B. F. POUET, Ing R. K., Krishnaswamy S. and Royer D « Adaptive heterodyne interferometer for ultrasonic NDE ». In <i>Review of Progress in QNDE</i> , pages 1937–1942, 1998.
[Plu88]	M. PLUTA. Advanced Light Microscopy, volume 1. Elsevier, Amsterdam, 1988.

[RD01]	D.S. RIMAI and Quesnel D.J	Fundamentals of Particle	Adhesion.	Polymer Surfaces a	nd Interfaces
	Series, Global Press, 2001.				

- [RHR^{+00]} Y. ROLLOT, S. HALIYO, S. RÉGNIER, L. BUCHAILLOT, J.C. GUINOT and P. BIDAUD. « Experimentation on micromanipulation using adhesion forces in unconstrained environment ». In proc. of the IEEE/RSJ International Coference on Intelligent Robots and Systems (IROS2000), Japon, october 2000, pages 653–658, 2000.
- [RMA⁺01] A. A. G. REQUICHA, S. MELTZER, F. P. Terán ARCE, J. H. MAKALIWE, H. SIKÉN, S. HSIEH, D. LE-WIS, B. E. KOEL and M. E. THOMPSON. « Manipulation of Nanoscale Components with the AFM : Principles and Applications ». Technical Report, Laboratory for Molecular Robotics, University of Southern California, 2001.
- [RMB⁺05] S. RÉGNIER, A. MICAELLI, L. BUCHAILLOT, C. FRÉTIGNY and P. BIDAUD. « Techniques et méthodes pour la micro télé manipulation ». In *Les journées bilan ROBEA*, Mars 2005.
- [Rol00] Y. ROLLOT. « Micro-manipulations par adhésion : Modélisations dynamiques et expérimentation ».
 PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2000.
- [RRC05a] S. RÉGNIER, P. ROUGEOT and N. CHAILLET. « Forces Analysis for Micro-manipulation ». In Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, June 2005.
- [RRC05b] S. RÉGNIER, N. ROUGEOT and N. CHAILLET. « Modélisation et analyse des forces surfaciques pour la micro-manipulation ». *Journal de Nano et Micro Technologies*, A paraître, 2005.
- [RRG98a] Y. ROLLOT, S. RÉGNIER and J-C. GUINOT. « Micro-robotics : A dynamical model of micromanipulation by adhesion ». In Proc. of the Twelfth CISM-IFToMM Symposium, Theory and Practice of robots and manipulators, Paris, France, july, pages 111–118, 1998.
- [RRG98b] Y. ROLLOT, S. REGNIER and J-C. GUINOT. « Microrobotique : modèle dynamique et loi horaire pour une micromanipulation par adhésion ». *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 326, Série II b :469–474, 1998.
- [RRG99] Y. ROLLOT, S. RÉGNIER and J-C. GUINOT. « Simulation of micro-manipulations : Adhesion forces and specific dynamic models ». *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 19:35–48, 1999.
- [RRG01] Y. ROLLOT, S RÉGNIER and J.C. GUINOT. « Confirmation expérimentale d'une micromanipulation par adhésion ». *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 329, Série II-b :1–6, 2001.
- [RRG02] Y. ROLLOT, S. RÉGNIER and J.C. GUINOT. « Dynamical Model for the Micromanipulation by Adhesion : Experimental Validations for Determined Conditions ». *International Journal of Micromechatro*nics, 1(4) :273–297, 2002.
- [RVB98] F. ROBBE-VALLOIRE and M. BARQUINS. « Adhesive contact and kinematics of adherence between a rigid cylinder and an elastomeric solid ». *International Journal of adhesion and adhesives*, 18(1):29– 34, 1998.
- [SF03] M. SITTI and R. FEARING. « Synthetic gecko foot-hair micro-nano-structures as dry adhesives ». Journal of Adhesion Science Technology, 17(8):1055–1073, 2003.
- [SG72] J. SKINNER and N. GANE. « Sliding friction under a negative load ». *Journal of Physics D : Applied Physics*, 5 :2087–2094, 1972.
- [SHTO02] S. SAITO, H. HIMENO, K. TAKAHASHI and T. ONZAWA. « Electrostatic detachment of a micro-object from a probe by applied voltage ». pages 1790–1795. Proc. of the IEEE/RSJ Int. conf on Intelligent robots and systems, 2002.
- [Sit01] M. SITTI. « A survey of Nanomanipulation Systems ». pages 75–80. Proc. of the IEEE Nano 2001, 2001.
- [Sit03] M. SITTI. « Teleoperated and Automatic Nanomanipulation Systems using Atomic Force Microscope Probes ». pages 2118–2123. Proc. of the 42nd IEEE Conference and Decision and Control, 2003.
- [Sit04] M. SITTI. « Atomic force microcope probe based controlled pushing for nanotribological characterization ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(2) :343–349, 2004.
- [SJK96] A. STEMMER, H. JACOBS and H.F. KNAPP. « Approaching the Nanoworld ». In *Proc. Microrobotics : Components and Applications*, pages 80–85. SPIE, 1996.
- [SKMH95] T. SATO, T. KAMEYA, H. MIYASAKI and Y. HATAMURA. « Hand-Eye System in Nano Manipulation World ». In ICRA'95 : IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 59–66, Nagoya, Japon, May 1995.

[SMS99]	S. SAITO, H. MIYAZAKI and T. SATO. « Pick and Place Operation of a Micro Object with High Reliability and Precision based on Micro Physics under SEM ». In <i>Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 2736–2743, May 1999.		
[SMST02]	S. SAITO, H. MIYAZAKI, T. SATO and K. TAKAHASHI. « Kinematics of mechanical and adhesional micromanipulation under a scanning electron microscope ». <i>Journal of applied physics</i> , 92(9) :5140–5149, 2002.		
[SMT ⁺ 03]	A. SUSZUKI, Y. MAE, T. TANIKAWA, T. ARAI and K. INOUE. « Automated Micro Handling ». In <i>IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation</i> , pages 348–353, kobe, Japon, July 2003.		
[SNE ⁺ 98]	T. SANO, H. NAGAHATA, H. ENDO, T. SUMIMOTO, T. KUNISHI and H. YAMAMOTO. « A Visual Feedback System for Micromanipulation with Stereoscopic Microscope ». In <i>IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference</i> , pages 1127–1132, St. Paul, Minnesota, États-Unis, May 1998.		
[SZK04]	M. SAVIAA, Q. ZHOU and H. KOIVO. « Simulating adhesion forces between arbitrarily shaped objects in micro/nano-handling operations ». pages 1722–1727. Proc. of the IEEE/RSJ Int. conf on Intelligent robots and systems, 2004.		
[Tab81]	D. TABOR. « Friction - the present state of our understanding ». <i>Journal of Lubrification Technology</i> , 103 :169–179, 1981.		
[TAM96]	T. TANIKAWA, T. ARAI and T. MASUDA. « Development of Micro Manipulation System with Two- Finger Micro Hand ». In <i>Proc. of the International Conference on Intelligent Robotics Systems</i> , pages 850–855, 1996.		
[TYBQ91]	M. TORTONESE, H. YAMADA, R.C. BARRETT and C.F. QUATE. « Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever ». In <i>proc. of Int. Conf. IEEE</i> , pages 448–451, 1991.		
[VHRM05]	G. VENTURE, D.S. HALIYO, S. RÉGNIER and A. MICAELLI. « Force-feedback micromanipulation with inconditionnally stable coupling ». In <i>IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems</i> , pages 784–789, Août 2005.		
[VN97]	B. VIKRAMADITYA and B. J. NELSON. « Visually Guided Microassembly Using Optical Microscope and Active Vision Technique ». In <i>ICRA'97 : IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 3172–3177, Albuquerque, Nouveau-Mexique, États-Unis, April 1997.		
[VvKH00]	B. VÖGELI and von KÄNEL H « AFM-study of sticking effects for micropart handling ». <i>Wear</i> , 238 :20–24, 2000.		
[WZ04]	Z. WEI and Y. ZHAO. « Experimental investigation of the velocity effect on adhesion forces with an atomic force microscope ». <i>Chinese Physical Letter</i> , 21(4) :616–619, 2004.		
[YN03]	G. YANG and B.J. NELSON. « Micromanipulation Contact Transition Control by Selective Focusing and Microforce Control ». In <i>Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 3200–3205, September 2003.		
[ZBW97]	W. ZESCH, M. BRUNNER and A. WEBER. « Vacuum tool for handling microobjects with a nanoro- bot ». In <i>ICRA'97 : IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 1761–1766, Albuquerque, Nouveau-Mexique, États-Unis, April 1997.		
[ZdCE+02]	Q. ZHOU, C. del CORRAL, P. ESTEBAN, A. AURELIAN and H. KOIVO. « Environmental Influences on Microassembly ». pages 1760–1765. Proc. of the IEEE/RSJ Int. conf on Intelligent robots and systems, 2002.		
[ZF98]	W. ZESCH and R.S. FEARING. « Alignment of Microparts Using Force Controlled Pushing ». In <i>Proc.</i> of the SPIE conference on Microrobotics and Micromanipulation, pages 148–156, 1998.		
[ZKA ⁺ 99]	Q. ZHOU, P. KALLIO, F. ARAI, T. FUKUDA and H. KOIVO. « A model for Operating Spherical Micro Objects ». In <i>Proc. of the International Symposium on Micro Machine and Human Science</i> , pages 79–85, 1999.		
[ZN98]	Y. ZHOU and B.J. NELSON. « Adhesion force modeling and measurement for micromanipulation ». In <i>Proc. of SPIE Microrobotics and Micromanipulation, November 1998</i> , pages 169–180, 1998.		
[ZN00]	Y. ZHOU and B.J. NELSON. « The Effect of Material Properties and Gripping Force on Micrograsping ». In <i>Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation</i> , pages 1115–1120, April 2000.		

[ZNV97] Y. ZHOU, B. J. NELSON and B. VIKRAMADITYA. « Fusing Force and Vision Feedback for Micromanipulation ». In ICRA'97 : IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3172– 3177, Louvain, Belgique, May 1997.