



Micromanipulation robotique en milieu liquide.

Michaël Gauthier

► To cite this version:

Michaël Gauthier. Micromanipulation robotique en milieu liquide.. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Franche-Comté, 2011. tel-00648661

HAL Id: tel-00648661

<https://theses.hal.science/tel-00648661>

Submitted on 6 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année : 2011

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée à

**L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

(Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)

Micromanipulation robotique en milieu liquide

par

Michaël GAUTHIER
Chargé de Recherche CNRS, FEMTO-ST.

Soutenue, le 26 mai 2011, devant la commission d'examen :

Président :

Daniel COURJON Directeur de recherche CNRS, FEMTO-ST.

Rapporteurs :

Lionel BUCHAILLOT Directeur de recherche CNRS, IEMN.

Etienne DOMBRE Directeur de recherche CNRS, LIRMM.

Michel DE MATHELIN Professeur, Université de Strasbourg.

Examineurs :

Nicolas CHAILLET Professeur, Université de Franche-Comté.

Philippe LUTZ Professeur, Université de Franche-Comté.

Stéphane RÉGNIER Professeur, UPMC.

*Faites que le rêve dévore votre vie
afin que la vie ne dévore pas votre rêve*

Antoine de Saint-Exupéry

A Marie, plus que jamais

Remerciements

Ces travaux de recherche ont débuté en 2003 dans le “Laboratoire d’Automatique de Besançon - LAB” dirigé par Alain Bourjault , devenu le département “Automatique et Systèmes MicroMécatroniques - AS2M” de l’institut FEMTO-ST, département dirigé de 2007 à 2011 par Nicolas Chaillet. Je tiens à adresser, en tout premier lieu, mes plus sincères remerciements à Nicolas Chaillet avec lequel j’ai eu la chance de travailler en étroite collaboration durant toutes ces années. J’ai appris pas à pas avec lui le métier de scientifique, fort de sa vision de notre discipline et de notre métier alliée à des qualités humaines remarquables. Les travaux présentés ci-dessous ont pu voir le jour en grande partie grâce à toi, Nicolas. Je n’oublie pas Alain Bourjault qui dirigeait le LAB lors de mon recrutement au CNRS et qui a fortement contribué au développement de la microrobotique en France.

J’exprime ma gratitude à Monsieur Lionel Buchaillot, Directeur de recherche CNRS à l’IEMN ; à Monsieur Etienne Dombre, Directeur de recherche CNRS au LIRMM et à Monsieur Michel De Mathelin, Professeur à l’Université de Strasbourg, pour m’avoir fait l’honneur de rapporter ce manuscrit. Je tiens à remercier Monsieur Daniel Courjon, Directeur de Recherche CNRS, pour avoir accepté de présider ma soutenance.

Je remercie chaleureusement Stéphane Régnier et Pierre Lambert pour les nombreux échanges scientifiques, les collaborations, ainsi que pour leurs qualités humaines. Je ne compte plus les discussions animées et approfondies à Paris, Bruxelles ou Besançon autour des phénomènes du micromonde et des moyens de micromanipulation qui nous ont enrichis (et nous enrichirons encore, je l’espère...) mutuellement.

Je tiens évidemment à remercier l’ensemble de mes collègues du département et plus largement de l’institut FEMTO-ST, pour l’excellente ambiance dans laquelle nous avons travaillé durant ces années. Parmi eux, je remercie tout particulièrement Philippe Lutz, responsable de l’équipe de recherche SAMMI pour l’animation de celle-ci qui a fortement contribué à la qualité de mon environnement de travail, et également Emmanuel Piat qui a soutenu mon recrutement au CNRS et avec qui j’ai co-encadré ma première thèse.

Les travaux reportés dans ce manuscrit sont le résultat d’un travail collectif qui repose sur l’énergie de femmes et d’hommes qui ont œuvrés à mes cotés et que je tiens à remercier très chaleureusement. Au premier rang d’entre eux se trouvent les docto-

rants que j'ai eu le plaisir de co-encadrer : Michaël Dauge, Beatriz Lopez-Walle, Cyrille Lenders, Mohamed Kharboutly et Sébastien Alvo, et aussi les post-doctorants : Jérôme Dejeu et Wei Dong. Enfin ces travaux ont été rendus possibles par un soutien important d'ingénieurs statutaires : Patrick Rougeot et Joël Agnus et d'ingénieurs sous contrat : David Rostoucher, David Hériban. Je tiens à remercier particulièrement ce dernier, cheville ouvrière du projet PRONOMIA et désormais PDG de la jeune start-up Percipio Robotics, pour avoir fortement dynamisé la thématique de la micromanipulation. Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des collègues (de l'équipe, nationaux et internationaux) qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation des travaux reportés dans ce manuscrit.

La réalisation de cette HDR repose également sur le soutien exceptionnel de mon entourage familial. Mes parents et Colette ont toujours suivi avec intérêt mes travaux m'encourageant à aller de l'avant. Marie, ma femme, est mon soutien de tous les instants, nous ne comptons plus les petits déjeuners et les soirées occupés à des discussions sur la vie du laboratoire ponctuées de conseils très avisés de sa part. Durant les années de réalisation de cette HDR, certains rêves plus qu'improbables se sont réalisés et d'autres plus communs se sont malheureusement définitivement envolés, mais nous sommes toujours là, ensemble, riche de notre amour et de notre vie pleine de contraste. Merci Marie.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte général	1
1.1.1	Les micromondes	2
1.1.2	positionnement robotique et auto-positionnement	3
1.1.3	Spécificités des micromondes	4
1.2	Structuration de l'activité	7
1.2.1	Etapes de la démarche scientifique	7
1.2.2	Objets d'étude	9
1.2.3	Contexte collaboratif	13
1.3	Enseignement et diffusion des connaissances	15
1.3.1	Enseignement	15
1.3.2	Diffusion et vulgarisation	16
2	Contexte : la micromanipulation	19
2.1	Introduction	19
2.2	Micromanipulation et positionnement sans contact	20
2.2.1	Utilisation de pinces optiques	20
2.2.2	Exploitations des forces électrostatiques	22
2.2.3	Utilisation des forces magnétiques	26
2.2.4	Lévitatie acoustique	28
2.3	Micromanipulation et positionnement avec contacts	29
2.3.1	Pincés à doigts de serrage	29
2.3.2	Préhension par changement de phase	31
2.3.3	Préhension par dépression	34
2.3.4	Manipulation par adhésion	35
2.3.5	Exploitation de la tension de surface en micromanipulation	37
2.4	Synthèse et proposition d'étude du milieu liquide	41
	Conclusion	43
3	Modélisation du comportement des micro-objets	45
3.1	Forces prépondérantes dans un milieu liquide	45
3.1.1	Impact du milieu liquide sur les forces à distance	45
3.1.2	Impact du liquide sur la force de <i>pull-off</i>	49

3.1.3	Effets hydrodynamiques	52
3.1.4	Impact sur les autres forces	55
3.2	Analyses multiphysiques des comportements à l'échelle micrométrique	56
3.2.1	Trajectoire d'un objet en micromanipulation sans contact	56
3.2.2	Fonctionnalisation de surface et interaction électrostatique	61
3.2.3	Impact des déformations locales et de la structuration de surface sur l'adhésion	64
3.2.4	Effet capillaire et compressibilité des gaz	69
3.3	Moyens de caractérisation	72
3.3.1	Mesure de force entre micro-objets	72
3.3.2	Mesures de trajectoire	75
	Conclusion	77
4	Stratégies de micromanipulation	79
4.1	Stratégie de micromanipulation par diélectrophorèse	79
4.1.1	Commande de systèmes de micromanipulation sans contact	80
4.1.2	Lâcher par diélectrophorèse	84
4.2	Stratégie de préhension par changement de phase	86
4.2.1	Principe de préhension	86
4.2.2	Comportement expérimental	86
4.2.3	Modélisation thermique	88
4.3	Manipulation par fonctionnalisation de surface active	92
4.4	Préhension à deux doigts de serrage et lâcher par substrat adhérent	94
4.4.1	Principe général	94
4.4.2	Expérimentations	95
	Conclusion	98
5	Etude des cellules de micro-assemblage	99
5.1	Robots porteurs pour la micromanipulation	99
5.1.1	Identification des défauts par vision	99
5.1.2	Identification des défauts par capteurs de contact (AFM)	103
5.1.3	Robot à actionnement capillaire	105
5.2	Démonstrateurs de stations de micromanipulation et de micro-assemblage	108
5.2.1	Conception des micro-objets à assembler	108
5.2.2	Exemples d'applications	110
5.2.3	Valorisation du micro-assemblage : la start-up Percipio-Robotics	114
	Conclusion	116
6	Conclusion et perspectives	117
6.1	Conclusion	117
6.2	Perspectives scientifiques	119
6.2.1	Automatisation de l'assemblage des déca-micro-objets	120
6.2.2	Exploration de l'assemblage dans l'iso-micro-monde	122
6.2.3	Manipulation haute-vitesse des cellules biologiques	124

6.3 Et quelques réflexions...	125
ANNEXES	129
A Curriculum vitæ	129
B Publications personnelles	135
C Modèles de la double couche électrique	141
Bibliographie	143

Table des figures

1.1	Exemples de ruptures physiques et technologiques entre les micromondes	4
1.2	Structuration de mon activité de recherche	10
1.3	Evolution des travaux collaboratifs au cours du temps.	14
1.4	Micro-vache assemblée “Maghi”.	17
2.1	Principe des pinces optiques	20
2.2	Manipulation tridimensionnelle de bille	21
2.3	Exemples de positionnement de billes de verre	21
2.4	Micro-assemblage de cellules	22
2.5	Force et couple électrostatiques	23
2.6	Electrodes spiralées	24
2.7	Principe de tri	25
2.8	Capture de micro-objets	25
2.9	Utilisation de la diélectrophorèse en nanomanipulation	26
2.10	Principe du tri magnétique de cellules	27
2.11	Principe de tri de cellules par magnétophorèse	28
2.12	Exemple de lévitation	29
2.13	Micropince actionnée	30
2.14	Pinces piezoélectriques	31
2.15	Exemple de manipulation à deux doigts	32
2.16	Micropince à doigts de serrage passif (Univ. of Victoria, [40])	33
2.17	Micropince passive monodigitale (ARRI institute, Texas, USA, [40])	34
2.18	Préhenseur à glace, CSEM	34
2.19	Principe de la micromanipulation par adhésion	35
2.20	Manipulation par saisie et dépose statique	36
2.21	Dépose par roulement (Institut ISIR [51]).	37
2.22	Dépose sélective de sphères de 20 μm (Institut ISIR [86]).	37
2.23	Ménisque liquide formé entre une sphère et un plan horizontal.	38
2.24	Schéma de la membrane déformable du préhenseur capillaire réalisé par Biganzoli <i>et al.</i> [16] (Institute of Industrial Technology and Automation, Italie).	39
2.25	Préhenseur capillaire conique tronqué de 300 μm de diamètre, proposé par Schmid <i>et al.</i> [161] (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse).	40

2.26	Stratégie de manipulation par capillarité des billes de roulement d'une montre [119] (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse).	40
2.27	Positionnement de mon domaine d'étude parmi les approches robotiques actuelles	41
3.1	Profils schématiques d'énergie d'interaction	48
3.2	Domaine de la fluïdique en fonction des dimensions d'objet considérées .	53
3.3	Exemple de structures d'électrodes permettant la manipulation sans contact de micro-objets par diélectrophorèse	57
3.4	Illustration des comportements spécifiques des micro-objets en micromanipulation sans contact	60
3.5	Molécules et procédés de dépôt utilisés pour la fonctionnalisation de surface	62
3.6	Courbe force-distance pour la fonctionnalisation APTES d'une surface en fonction du pH du milieu	62
3.7	Déformation de Hertz entre un plan et une sphère	65
3.8	Comparaison entre la force de van der Waals entre deux objets considérés rigides et la force déformée de van der Waals.	66
3.9	Structuration de surface par dépôt auto-assemblé de bille de polystyrène réalisée par l'institut EMPA en Suisse dans le cadre du projet intégré européen HYDROMEL.	67
3.10	Forces théoriques et mesurées d'adhésion entre une sphère de silice de rayon $5\mu m$ et un plan nanostructuré avec des billes de polystyrène de rayon r_2	68
3.11	Configurations types des transducteurs fluidiques capillaires	69
3.12	Evolution de la hauteur de la bulle en fonction de la variation de volume. Dans le cas d'un réservoir important, l'instabilité apparaît au point I . .	72
3.13	Système de mesure de microforce sur des contacts plan-plan	74
3.14	Exemple de résultats expérimentaux obtenus par la plateforme de mesure.	75
4.1	Résumé de la stratégie de commande	80
4.2	Représentation de la prise en compte des deux fréquences d'échantillonnage : T_c de la caméra et T_s de la commande.	82
4.3	Modification de la consigne $w'_{i,j}$ en fonction de la position $x_{0,j}$ et de la trajectoire souhaitée $w_{i,j}$	83
4.4	Evolution de la position du micro-objet commandé par la commande GPC et un correcteur PI en réponse à une consigne sinusoïdale d'une période de $2.5ms$, et d'une amplitude de $25\mu m$	84
4.5	Illustration du comportement du système bouclé dans la zone non linéaire : réponse à une consigne sinusoïdale d'amplitude $130\mu m$ et de période $100ms$ considérant une période d'échantillonnage $T_c = 2,5ms$	85
4.6	Lâcher actif d'un micro-objet en verre par diélectrophorèse.	85
4.7	Principe du système de micromanipulation par changement de phase immergé	87
4.8	Dispositif expérimental de préhension par changement de phase immergé	87

4.9	Variation de la température sur l'organe terminal du préhenseur : (a) prérefroidissement, (b) refroidissement local de l'eau, (c) gel de l'eau et croissance de la glace, (d) fonte de la glace.	88
4.10	Micromanipulation d'un composant en silicium de dimensions $600 \times 600 \times 100 \mu\text{m}^3$ avec le préhenseur à changement de phase immergé.	89
4.11	Problème thermique analysé	89
4.12	Circuit thermique représentant le problème thermique spécifié figure 4.11	90
4.13	Géométrie de la callote de glace sur le préhenseur	91
4.14	Circuit thermique non linéaire représentant la croissance de la glace sur le préhenseur.	91
4.15	Circuit thermique représentant le comportement thermique du micropréhenseur.	92
4.16	Principe de préhension active avec un levier AFM en utilisant une variation de pH et des objets fonctionnalisés	93
4.17	Comparaison de la phase de lâcher à deux pH différents sur des billes de 20 à 40 micromètre de diamètre.	93
4.18	Saisie et lâcher d'une bille de verre de 50 micromètres de diamètre en utilisant un levier en silicium fonctionnalisé par APTES	94
4.19	Principe de prise et de dépose hybride entre préhenseur à deux doigts de serrage et préhension par adhésion	95
4.20	Organes terminaux en silicium. La rugosité de la zone de préhension est visible dans l'encadré.	96
4.21	Opération de prise-dépose d'un objet de taille $40 \times 40 \times 5 \mu\text{m}^3$	96
5.1	3DOF Planar Robotic System Studied	101
5.2	Trajectoire d'un point de la table motorisé lors d'une rotation de 360° .	102
5.3	Identification des paramètres et simulation de la correction des défauts .	102
5.4	Repères utilisés dans la calibration partielle du robot de mesure de force.	103
5.5	Repères physiques réalisés sur le substrat	104
5.6	Relevés expérimentaux illustrant la calibration partielle du robot de mesure de force	105
5.7	Représentation tridimensionnelle du principe d'une table à actionnement capillaire.	106
5.8	Evolution de la force appliquée sur la table en fonction de la distance entre le plan et la table (gap).	107
5.9	Exemple de fonctionnement d'un prototype de table à trois degrés de liberté actionnée par des bulles de gaz.	107
5.10	Vue au microscope électronique de l'amorce de rupture.	110
5.11	Exemples de micro-objets réalisés	110
5.12	Principe de l'étude de l'interaction entre les bactéries et les minéraux. .	111
5.13	Manipulation d'un grain d'olivine possédant une taille d'une vingtaine de micromètres.	111
5.14	Station de micromanipulation	112
5.15	Exemple d'assemblage par insertion de deux micro-objets.	113

5.16 Exemple d'assemblage d'objets tests possédant un verrou mécanique . .	113
5.17 Perspective industrielle des travaux de micro-assemblage : la société Percipio- Robotics (www.percipio-robotics.com)	114

Liste des tableaux

1.1	Bilan des thèses co-encadrées	11
3.1	Valeurs de constantes de Hamaker $A \times 10^{-20} J$ [155]	46
3.2	Masse volumique et viscosités de l'eau et de l'air dans les conditions normales [24]	54
3.3	Constantes diélectriques et conductivités électriques de l'air et de l'eau .	56
3.4	Principe de la modification des charges électriques sur des surfaces fonctionnalisées par changement de pH	61
3.5	Influence du pH sur la force de pull-in et de pull-off obtenue avec une poutre de raideur 0.3 N/m pour des interactions entre une surface fonctionnalisée APTES et une bille en SiO ₂ non fonctionnalisée ainsi qu'entre une surface et une bille toutes deux fonctionnalisées APTES.	63
5.1	Comparaison entre les différentes techniques d'extraction de composants d'un wafer	109

Chapitre 1

Introduction

Au delà d'une courte entrée en matière sur le contexte général de mes travaux portant sur l'étude des stratégies de micro-assemblage, cette introduction vise à présenter les différentes facettes de la structuration de mon activité. L'enchaînement des problématiques scientifiques étudiées et la construction des collaborations seront ainsi synthétisés et complétés par la présentation des activités de diffusion de la connaissance et d'enseignement liées à mes travaux de recherche. Enfin, j'exposerai les trois étapes de la démarche scientifique mise en œuvre lors de l'étude des stratégies de micro-assemblage et sur laquelle repose la structure de ce document : la modélisation du comportement des micro-objets (Chapitre 3), l'étude des stratégies de micromanipulation (Chapitre 4), l'étude des cellules de micro-assemblage (Chapitre 5).

1.1 Contexte général

La micromanipulation est l'ensemble des moyens qui visent à réaliser la manipulation d'objets de taille comprise entre 1 mm et $1\text{ }\mu\text{m}$. Le domaine de travail de la micromanipulation est couramment appelé micromonde. Cet ensemble est défini en comparaison avec le "macromonde" qui est l'ensemble des objets dont la taille est supérieure à 1 mm . L'appréhension de ce domaine ne peut s'effectuer par simple homothétie des systèmes existants dans le macromonde, et nécessite une description particulière.

La miniaturisation d'un principe peut s'avérer complexe dans la mesure où l'ensemble des phénomènes physiques qu'il met en œuvre peuvent ne pas évoluer de façon identique lors de la réduction d'échelle. Si, par exemple, on réduit de manière homothétique une guitare, vous obtiendrez une nouvelle guitare donc la gamme de notes a glissé dans les aigus. La fréquence de résonance de la corde augmente en effet lorsque l'on diminue les dimensions de celle-ci. Obtenir une guitare de petite taille ayant la même gamme de note qu'une taille conventionnelle nécessiterait une reconception totale de l'instrument. Il est en de même de la plupart des fonctionnalités d'un système, qui sont modifiées lors de la réduction d'échelle. L'impact de la modification d'échelle sur les phénomènes physiques est couramment appelé "effet d'échelle".

Les phénomènes physiques prédominants à l'échelle du mètre comme le poids ou l'inertie sont majoritairement *volumiques*, c'est à dire qu'ils sont directement proportionnels au volume de l'objet considéré. Ainsi, entre un cube d'acier possédant une arête l de un centimètre et un cube d'arête $l' = \frac{l}{10}$ dix fois inférieur, la dimension caractéristique l a été divisée par 10, tandis que sa masse passe de 7,9 grammes à 7,9 milligrammes et a été divisée par $(\frac{l}{l'})^3 = 10^3$.

Certains effets physiques, en général moins bien connus par le grand public, ne sont pas volumiques comme par exemple la force de tension de surface. Celle-ci est de type linéique, son évolution est donc proportionnelle à l'échelle considérée. Ainsi, la tension de surface d'un cube de côté l est directement proportionnelle à cette longueur. Pour un cube de dimension dix fois inférieure l' , la force de tension de surface est elle aussi divisée uniquement par $\frac{l}{l'} = 10$. Cet effet diminue par conséquent beaucoup moins rapidement que le poids lors d'une miniaturisation.

La miniaturisation d'un principe est soumise à l'effet d'échelle modifiant l'impact relatif d'un phénomène physique par rapport à un autre. Cette modification peut rendre inopérant ou plus performant le dispositif miniaturisé.

1.1.1 Les micromondes

L'impact des avancées en robotique de manipulation à l'échelle des micro et nanotechnologies s'appréhende en mesurant initialement le fossé dimensionnel qu'il existe entre le nanomètre et le millimètre, couvrant six ordres de grandeur. Les niveaux de performances des robots industriels et académiques dépendent fortement de l'échelle considérée parmi ces six ordres de grandeur qui représentent tous des problématiques scientifiques et technologiques propres. Il est également nécessaire de distinguer la résolution de fabrication, comme la taille d'un transistor qui se mesure en dizaines de nanomètres et la taille du composant électronique final qui lui est typiquement de quelques centaines de micromètres. Ainsi, bien que l'industrie de la micro-électronique soit capable de réaliser des transistors à des échelles typiques de quelques dizaines de nanomètres, les plus petits composants électroniques sont d'un encombrement mille fois plus grand, de l'ordre de la centaine de micromètres. Par défaut dans ce document, la taille caractéristique d'un objet fait référence à son encombrement général et non à sa précision de réalisation ou à la taille des détails qui le composent.

La notion de micromonde habituellement portée au singulier tend à penser à tort qu'il existe une uniformité de comportement, de problématiques scientifiques et d'avancement de l'état de l'art sur cet ensemble d'objets répartis sur trois ordres de grandeur dimensionnels. En réalité, la réduction d'échelle d'une scène de manipulation est confrontée à plusieurs ruptures d'ordre technique ou physique. Il convient donc de parler de "micromondes" au pluriel et de définir à minima trois zones dimensionnelles symboliquement basées sur les trois ordres de grandeur considérés. Il est à noter que le point de vue faussé d'un micromonde monolithique est directement lié à l'absence de préfixes caractérisant les exposants 10^{-4} et 10^{-5} situés entre les préfixes *milli* et *micro*.

Je propose par conséquent de mettre en lumière les différents micromondes en utilisant les qualificatifs suivants :

- *hecto*-micromonde, pour les micro-objets de taille caractéristique supérieure à $100\ \mu m$;
- *deca*-micromonde, pour les micro-objets de taille intermédiaire située entre $10\ \mu m$ à $100\ \mu m$;
- *iso*-micromonde, pour les micro-objets situés dans la plus faible zone dimensionnelle entre $1\ \mu m$ à $10\ \mu m$.

Cette notation peut d’ailleurs être étendue aux nanomondes dont l’étude est confrontée aux mêmes difficultés d’appréhension.

Quelques exemples de ruptures technologiques sont présentés en figure 1.1. Les effets de surface et tout particulièrement l’adhésion ne peuvent être négligés en dessous d’une limite typique de $100\ \mu m$, rendant la tâche de préhension particulièrement complexe. Un deuxième point essentiel concerne les moyens de réalisation de ces micro-objets qui sont délimités par une frontière forte située aux environs de $100\ \mu m$ entre la fabrication “mécanique” basée sur des procédés dit conventionnels (enlèvement de matière par copeau) et la microfabrication inspirée de la micro-électronique (photolithographie). Cette rupture technologique et culturelle est sensible puisque les contraintes des deux familles de procédés sont différentes : on cherche typiquement à minimiser le nombre de masques en microfabrication lorsque l’on cherchera à minimiser le nombre de reprises de pièces en fabrication conventionnelle. La conception des objets et des organes terminaux de préhenseurs est donc sensiblement différente suivant l’échelle considérée. Enfin, le dernier exemple porte sur les systèmes de mesure de la position des micro-objets : au dessus de $10\ \mu m$ ces systèmes sont très majoritairement basés sur des imageurs optiques, alors que pour l’iso-micromonde, il s’agit d’imageurs électroniques. Les deux imageurs possèdent des performances très différentes en terme de niveau de bruit, de fréquence d’acquisition et de de profondeur de champ, nécessitant des méthodes de vision dédiées.

Ces exemples illustrent les différences qui peuvent exister entre les micromondes, dont une présentation plus exhaustive est proposée dans la suite de ce chapitre.

1.1.2 positionnement robotique et auto-positionnement

Il existe classiquement deux voies pour réaliser des assemblages dans les micro et nanomondes que sont : l’auto-assemblage et l’assemblage robotique. Le positionnement final de l’objet en auto-assemblage est défini par un minimum d’énergie potentielle (point stable) d’un phénomène physique tel que la gravité, les tensions de surface ou les forces électrostatiques. La génération dans l’espace d’un grand nombre de points stables permet de réaliser des assemblages de manière massivement parallèle. Toutefois, l’effort généré pour déplacer l’objet vers un point stable est faible comparativement aux efforts engendrables par un préhenseur robotique, et ne peut être exploité pour des actions complexes d’assemblage tel que des insertions ou des clipsages. Les différentes approches peuvent être retrouvées dans les ouvrages de référence et articles des équipes de G. M. Whitesides [138, 139, 186], K. Böhringer [18, 137] ou J. A. Pelesko [146]. L’assemblage robotique dont relève la majorité des travaux présentés dans ce document est basé sur l’utilisation d’un préhenseur dont la position est commandée à l’aide d’un robot

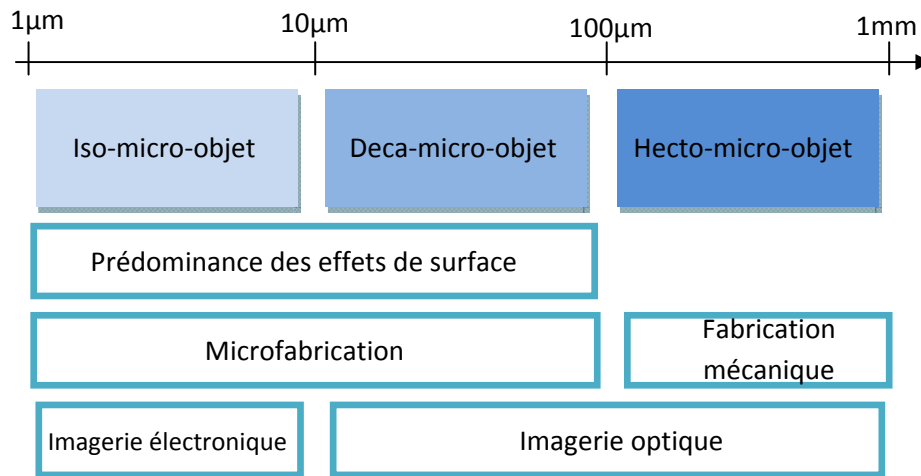


FIGURE 1.1 – Exemples de ruptures physiques et technologiques entre les micromondes

porteur. Les opérations de micromanipulation sont alors réalisées de manière séquentielle mais les trajectoires d'assemblage sont facilement reprogrammables et les efforts de blocage supérieurs à la méthode précédente. Cette approche est de loin la plus utilisée en industrie dans l'hectomicromonde, y compris pour des opérations d'assemblage à haute cadence comme le packaging de composants électroniques qui peut atteindre des cadences de 48000 opérations par heure.

Bien que l'approche par auto-assemblage apparaisse séduisante, elle peine à s'imposer dans l'environnement industriel du fait des difficultés de réglages de ces méthodes et des efforts faibles de blocage. La suite de ce document porte sur la description de contributions à la micromanipulation et au micro-assemblage en prenant le parti pris de la *robotique*.

1.1.3 Spécificités des micromondes

Cette section présente les spécificités du comportement des micro-objets et des fonctions robotiques dans les micromondes.

Comportement des micro-objets

Lorsque l'on décrit l'impact de l'effet d'échelle sur les tâches de micromanipulation, le premier exemple traité habituellement est la particularité du comportement des micro-objets. Plus l'échelle diminue, plus l'impact des forces surfaciques et linéiques sur l'objet est croissant. Les tensions de surfaces, les effets d'adhésion et les forces électrostatiques sont des effets couramment négligés à l'échelle humaine et qui sont à considérer dans les micromondes. Ils sont particulièrement prépondérants sous une limite de $100\mu\text{m}$ et induisent des collages entre les objets et les préhenseurs ou encore des déplacements

rapides dus à la faible inertie (volumique) des micro-objets. La modification de ces comportements nécessite une adaptation des méthodes robotiques de manipulation.

La présentation exhaustive des forces à considérer et des comportements des micro-objets dans un milieu liquide fait l'objet du chapitre 3 de ce document et n'est, par conséquent, pas détaillée ici. De plus, l'impact de l'effet d'échelle sur le comportement des micro-objets dans l'air est décrit régulièrement dans la littérature scientifique portant sur la micromanipulation comme dans les livres suivants : [73, 153, 154].

Mesure des positions et des forces

La mesure de la position des objets manipulés et/ou de la position des organes terminaux ainsi que la mesure de la force appliquée lors d'une tâche de micromanipulation sont des opérations particulièrement difficiles à réaliser dans les micromondes. La mesure de la position des micro-objets est très couramment obtenue en utilisant des dispositifs de vision, parce que les moyens conventionnels de mesure ne peuvent pas être utilisés sur ces objets de taille trop petite. Deux moyens sont utilisés : (i) le microscope photonique, (ii) le microscope électronique à balayage (MEB). Les deux dispositifs sont en mesure de visualiser des micro-objets d'une taille de 1 micromètre à 1 millimètre. Les particularités du microscope photonique à ces échelles portent sur :

- la faible profondeur de champ,
- le champ de vue extrêmement réduit,
- la forte sensibilité à l'éclairage.

L'étude de la mesure de position de micro-objets lors de tâche robotique en utilisant un microscope photonique doit être réalisée en tenant compte de ces éléments caractéristiques.

L'utilisation de la microscopie électronique est un moyen alternatif de mesure de la position des micro-objets. Elle présente l'avantage de posséder une profondeur de champ infinie mais un temps de réponse plus important, de l'ordre de 500 *ms*. Cet outil initialement développé pour l'imagerie de structures micrométriques n'a pas été conçu pour réaliser des tâches de vision et peu de travaux sur le traitement des flux vidéos issus de MEB sont présentés à ce jour. La mesure automatique de la position tridimensionnelle de micro-objets reste un verrou important à lever pour assurer l'automatisation des tâches de micromanipulation.

De manière comparable aux systèmes robotiques de tailles conventionnelles, certaines tâches de micromanipulation nécessitent une mesure et/ou un contrôle de l'effort de manipulation. La mesure de force peut, par exemple, être nécessaire pour :

- assurer une force de serrage suffisante sans être excessive pour ne pas risquer d'endommager l'effecteur ou l'objet (tout particulièrement dans le cas d'objets biologiques) ;
- contrôler l'effort d'insertion lors d'une opération d'assemblage ;
- détecter le contact dont la vue peut être occultée pour le système de vision.

L'ordre de grandeur des forces à mesurer est évidemment très dépendant du type d'objets (biologiques, artefacts) et de leur taille caractéristique. Celles-ci sont toute-

fois généralement de l'ordre du microNewton au milliNewton. La mesure de la force de manipulation appliquée à un micro-objet est confrontée à l'absence de techniques fiables de mesure de ce niveau de force sur un effecteur robotique. Bien qu'il existe des capteurs multi-axes capables de mesurer des efforts sur ces gammes de force avec une très bonne résolution [79,91], ceux-ci ne sont pas intégrables sur un organe terminal de micropréhension pour des raisons d'encombrement. Les aspects technologiques sont aujourd'hui prédominants et freinent l'émergence des solutions piézorésistives, capacitives ou d'autres solutions.

Conception des micro-actionneurs et technologie de réalisation

Le choix de l'énergie d'actionnement, la conception d'un actionneur et les techniques de fabrication disponibles sont également grandement dépendantes de la taille caractéristique de l'actionneur et des performances souhaitées. Ainsi, les actionneurs utilisant des matériaux déformables (bilames thermiques, structures en alliages à mémoire de forme, poutres piezoélectriques) sont particulièrement adaptés aux échelles microscopiques puisque non perturbés par des frottements mécaniques comme dans les systèmes conventionnels. L'utilisation de matériaux actifs possédant des comportements classiquement non-linéaires et fortement hystérétiques nécessite des travaux particuliers de modélisation de leur comportement et de recherche de méthodes de commande adaptées et robustes.

De plus, les contraintes de fabrication spécifiques à ces échelles doivent être nécessairement prises en compte dès le dimensionnement et la conception. Les micro-actionneurs ne peuvent pas être fabriqués à l'aide de procédés classiques (obtention de forme par enlèvement de matière) et les techniques inspirées de la microfabrication électronique ne permettent que l'obtention de structures "2D $\frac{1}{2}$ ". Deux grandes voies sont étudiées :

- l'utilisation d'une structure monobloc incluant actionneurs et organes terminaux dans une seule structure indivisible. Ce choix induit de fortes contraintes de microfabrication mais facilite la connectique.
- l'utilisation d'une structure assemblée permettant l'utilisation d'organes terminaux et d'actionneurs présentant des incompatibilités de fabrication. Cette méthode plus modulaire, simplifie les processus de fabrication mais pose des problèmes de connectique entre les différents éléments assemblés.

De plus, l'étude des micro-actionneurs est rendue difficile par l'absence de "savoir-faire métier" dans le domaine. Les grandes règles de conception valables à l'échelle macroscopique ne sont en effet pas valables à l'échelle microscopique. De manière générale, ces travaux nécessitent une approche pluridisciplinaire à l'interface entre la physique des matériaux, la microfabrication et l'automatique.

Enfin, pour la manipulation d'objets possédant une taille micrométrique, le niveau de répétabilité requis des robots est naturellement inférieur au micromètre. Les environnements de travail étant fortement contraints par la fonction de perception actuellement assurée par des systèmes optiques, la dextérité des microrobots de manipulation est

un enjeu majeur pour la réalisation de micromanipulation et tout particulièrement de micro-assemblage.

Contrôle de l'environnement

Le comportement des actionneurs actifs et des micro-objets étant fortement dépendant des conditions environnementales (température et humidité dans l'air - température et composition chimique dans un liquide, vibration), le contrôle de l'environnement est nécessaire pour fiabiliser un processus automatique de micromanipulation.

Synthèse

La conception d'un robot de micromanipulation est soumise à des contraintes nouvelles qui diffèrent de celles de la robotique conventionnelle. De manière synthétique, un robot de micromanipulation doit :

- intégrer des moyens de mesure innovants ;
- posséder des actionneurs performants à ces échelles et intégrant les contraintes de fabrication spécifiques à ces échelles ;
- mettre en œuvre des stratégies de micromanipulation adaptées aux comportements des micro-objets ;
- évoluer dans un environnement contrôlé ;
- posséder des répétabilités submicrométriques et une dextérité suffisante pour réaliser des tâches de micro-assemblage.

Un état de l'art des différents moyens de manipulations de micro-objets est proposé dans le chapitre 2 à la suite cette introduction.

1.2 Structuration de l'activité

L'objectif général de mes travaux de recherche est l'amélioration de la connaissance du comportement des systèmes aux échelles micrométriques et la proposition de moyens de micromanipulation adaptés à ces spécificités de comportement. Cette partie introductive présente la structuration de mes activités de recherche en utilisant trois angles d'approche différents :

1. les étapes de la démarche scientifique synthétisés autour de trois enjeux ;
2. les objets ou approches étudiés ;
3. le contexte collaboratif.

1.2.1 Etapes de la démarche scientifique

Ma démarche d'analyse peut se décomposer en trois étapes représentant trois enjeux scientifiques :

- la modélisation du comportement des micro-objets afin d’accroître les connaissances scientifiques sur les forces d’interactions prédominantes à l’échelle micrométrique ;
- la proposition, l’étude et la commande de principes originaux de micromanipulation ou de micropréhension adaptés aux spécificités du comportement des micro-objets ;
- l’étude des systèmes de micromanipulation et de micro-assemblage dans leur ensemble.

Modélisation du comportement des micro-objets

Une des spécificités de l’étude de la micromanipulation et du micro-assemblage repose sur le fait que les modèles de comportement des micro-objets ne sont pas clairement établis, ceci rendant impossible la conception de systèmes de manipulation basés uniquement sur la simulation. Dans certains domaines scientifiques comme la mécanique du contact, l’état des connaissances ne permet pas de prédire les forces d’interaction comme la force d’adhésion. Dans d’autres cas, les mécanismes comme l’effet électrostatique sont très bien connus, mais les conditions aux limites des modèles comme la quantité de charge sur un objet isolant nous sont généralement inconnues. L’avancement de la connaissance sur le comportement des micro-objets par la production de modèles adaptés ou de moyens de mesures de force ou de trajectoires est un axe essentiel pour faciliter la conception de systèmes agissant sur des micro-objets.

Ce travail de modélisation est basé sur des modèles physiques, existants pour la plupart, établis à l’échelle du nanomètre ou à l’échelle du millimètre. Il est souvent limité à des géométries simplistes comme des interactions sphère-plan et consiste à établir des comportements couplant généralement plusieurs effets physiques connus sur la base de ces modèles et de mesures expérimentales. L’établissement des domaines de validité dimensionnels est également d’une importance première afin de construire des modèles réellement représentatifs de l’échelle micrométrique par opposition à l’échelle nanométrique ou millimétrique.

La modélisation du comportement des micro-objets nécessite une maîtrise des conditions limites de surface de nos problèmes physiques (mécanique, électrostatique, etc.) qu’il est difficile d’obtenir expérimentalement du fait de la forte dépendance des effets de surface à l’environnement (oxydation, tribo-électrification, etc.). La conséquence est que les mesures de forces reportées dans la littérature explicitent rarement l’ensemble du protocole de manière suffisamment précise pour pouvoir exploiter les résultats. La maîtrise de propriétés de surface et l’évolution des protocoles de mesures est un enjeu majeur pour l’établissement de modèles pertinents à ces échelles.

Etude de principes originaux de micromanipulation

Sur la base des modèles physiques développés ci-dessus, des principes originaux de micromanipulation peuvent être conçus, expérimentés et améliorés. La faible fiabilité des modèles de comportement rend nécessaire le recours à de nombreuses expérimentations

pour valider les principes étudiés. Une voie consiste à étudier un premier prototype à une échelle plus élevée de manière à faciliter le prototypage. Cette approche valable à l'échelle millimétrique devient difficile lorsque l'objectif est de prototyper des systèmes pour des objets de quelques dizaines de micromètres. Les bouleversements entre le comportement à l'échelle du premier prototype et l'échelle finale visée sont tels que les expérimentations sur le prototype initial ne permettent de tirer aucune conclusion sur la pertinence de l'approche à une échelle plus faible. Ainsi, le prototypage d'une solution est désormais directement réalisé à l'échelle visée augmentant les difficultés de réalisation de celui-ci.

La proposition de principes originaux de micromanipulation s'accompagne de l'établissement de modèles du comportement nécessaires à l'étude de leur commande. Ces modèles laissent apparaître généralement des non-linéarités importantes voire des dynamiques élevées soulevant des problématiques de commande intéressantes.

Etude des systèmes de micromanipulation et de micro-assemblage

L'utilisation d'un principe de micromanipulation s'effectue dans le cadre d'un système plus large de micromanipulation ou de micro-assemblage incluant des robots porteurs, des systèmes de vision et d'autres systèmes péri-robotiques. L'étude de ces systèmes nécessite un gros investissement pour la réalisation de ces plateformes composées d'un grand nombre d'éléments. L'objectif a été ici de réaliser des preuves de concept de station de micro-assemblage en approfondissant des problématiques scientifiques liées à la commande des robots porteurs ou des problématiques technologiques liées à la réalisation de packaging de micro-objets adaptés.

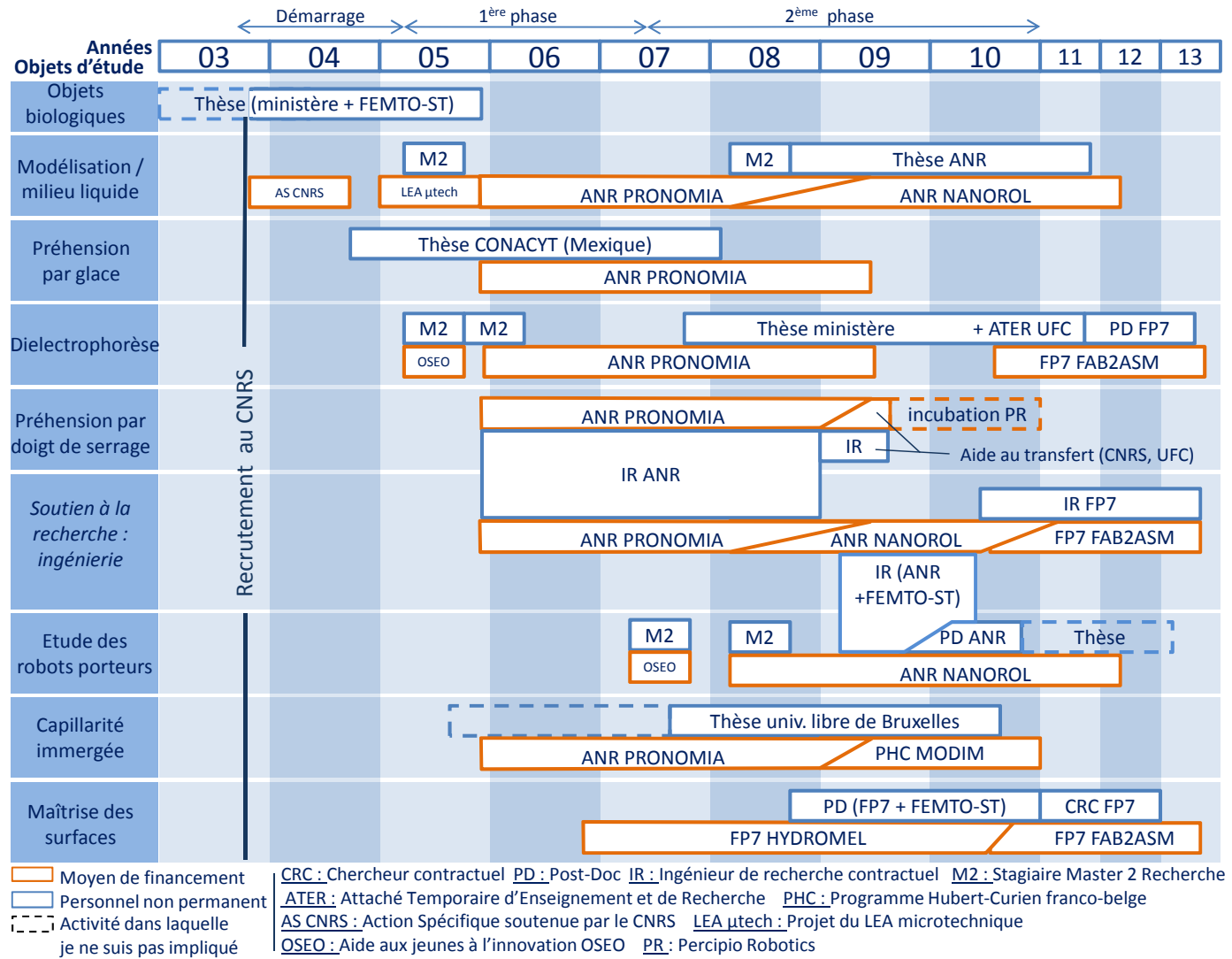
1.2.2 Objets d'étude

Cette section retrace l'évolution des objets d'études depuis mon recrutement au CNRS en octobre 2003. Cet enchainement est synthétisé sur la figure 1.2. Il est à noter que cette figure ne reporte que les personnels temporaires recrutés pour étudier la micro-assemblage en milieu liquide. Pour des raisons de lisibilité, il n'est pas fait mention de mes collègues permanents du laboratoire qui ont évidemment également contribué à cette thématique. Les thèses que j'ai co-encadrées sont synthétisées dans le tableau 1.1. Les aspects collaboratifs seront décrits plus en détail dans la section suivante.

La genèse de l'étude du micro-assemblage en milieu liquide est liée à l'expérience acquise lors de mes travaux de thèse et lors du co-encadrement avec Emmanuel Piat de la thèse de M. Dauge (2002-05) [20, 34–37], portant sur la manipulation d'objets biologiques, ayant lieu nécessairement en milieu liquide. Les expériences de validation dans ces travaux étaient effectués sur des objets artificiels dont la manipulation s'avérait plus aisée que dans un milieu aérien. L'idée initiale de proposer de manipuler et d'assembler les micro-objets en milieu liquide plutôt qu'à l'air libre était née.

Au cours de l'année 2004, des études préliminaires ont été ainsi consacrées au démarrage d'une analyse exhaustive des phénomènes physiques présents en milieu liquide à ces échelles (reportée section 3.1 dans ce manuscrit) ainsi qu'à des mesures de forces et

FIGURE 1.2 – Structuration de mon activité de recherche



Nom	Titre	dates	taux encad.	origine	position. actuelle
M. Dauge	Etude et modélisation du comportement dynamique d'un dispositif magnétique de micromanipulation : application au transport d'objets biologiques.	de oct 02 à déc 05	60%	UFC	Chef de projet ent. privée
B. Lopez-Walle	Contribution à l'étude de la micromanipulation robotisée en milieu liquide : conception et modélisation d'un système de micromanipulation immergée par changement de phase.	de oct 05 à fév 08	75%	Univ. Mexico Mexique	Ass. prof. Univ. Monterrey Mexique
C. Lenders	Study of Microbubbles mechanical behavior, application to the design of an actuated table for micromanipulation in liquid media.	de oct 05 ² à sept 10	50%	Univ. Libre de Bruxelles	Post-doc Univ. Libre de Bruxelles
M. Kharboutly	Modélisation et commande de la manipulation de micro-objets par diélectrophorèse	de oct 07 à fév 11	80%	Univ. Nantes	ATER UFC
S. Alvo	Etude et modélisation du comportement des objets à l'échelle microscopique	de oct 08 -	50%	ENSMM	3 ^{ème} année de thèse

TABLE 1.1 – Bilan des thèses co-encadrées

des essais de manipulation comparant l'environnement aérien et le milieu liquide (essentiellement de l'eau). Ces premiers résultats se sont avérés encourageants montrant une diminution sensible de l'effet d'adhésion lors de l'immersion de la tâche de micromanipulation.

Les années 2005-06-07 ont donc constitué la première phase de l'étude de la micromanipulation d'objets artificiels, reposant sur l'étude de trois stratégies de micromanipulation : la préhension immergée par glace, l'utilisation de la diélectrophorèse, et l'utilisation de micropince à deux doigts de serrage. La volonté d'expérimenter les solutions dans des conditions réelles de micro-assemblage, a nécessité de nombreux développements technologiques, mobilisant les ingénieurs de l'équipe et un ingénieur contractuel. Ce besoin de soutien technique de haut niveau ne sera d'ailleurs jamais démenti par la suite.

L'année 2007 marque un premier tournant basé sur les premiers résultats scientifiques. La préhension par glace apparaît peu fiable puisque son comportement est très dépendant des phénomènes de convection. Le choix est fait d'arrêter ces investiga-

tions qui se sont conclus avec la thèse de Beatriz Lopez-Walle co-encadrée avec Nicolas Chaillet, démarrée en septembre 2004 et soutenue en février 2008. La pertinence scientifique et applicative de l'étude de la diélectrophorèse avait été initialement mise au jour lors de travaux de Master en 2005-06, puis laissée en sommeil. Cette objet d'étude est relancé en octobre 2007 avec la thèse de Mohamed Kharboutly qui a soutenu en février 2011. Lors de la première période, la préhension par doigt de serrage d'objets en dessous de 100 micromètres a montré un intérêt applicatif dont le transfert commence à être envisagé.

De plus, de nouvelles problématiques voient le jour. L'absence d'adéquation entre les modèles physiques actuels portant sur des formes simples (sphère-plan) et nos cas d'études expérimentaux (petites surfaces planes micrométriques), me pousse à accentuer ma réflexion sur la modélisation des comportements en milieu liquide. Le rapprochement avec l'Université Libre de Bruxelles basée sur une expertise complémentaire entre l'exploitation des forces capillaires pour la micromanipulation (ULB) et la micromanipulation en milieu liquide (FEMTO-ST), se fait par le biais de la thèse Cyrille Lenders démarrée en 2005 sur l'utilisation des forces capillaires en milieu immergé. Je suis rentré dans l'encadrement de cette thèse avec le démarrage de la convention de co-tutelle entre l'UFC et l'ULB en octobre 2007 et celle-ci a été soutenue¹ en septembre 2010. La forte variabilité des mesures de forces a montré un besoin d'améliorer la maîtrise des surfaces pour fiabiliser nos stratégies de micromanipulation dont l'investigation initiée en 2007, sera dynamisée avec l'arrivée d'un post-doc, chimiste de formation, en 2008. Enfin, les travaux réalisés entre 2003 et 2007 ont montré l'importance de la conception et de la commande des robots porteurs sur la réalisation d'une tâche de micro-assemblage dont l'étude démarre en 2007.

Les années 2008-09 ont été consacrées à la mise en œuvre et à la consolidation des axes scientifiques initiés en 2007. Cette période est caractérisée tout particulièrement par la montée en puissance d'une action de transfert de technologie du savoir-faire dans le domaine de la manipulation à deux doigts de serrage porté par David Hériban, ingénieur en CDD de 2005 à 2008. L'incubation de la future société Percipio Robotics a démarré en 2009 et s'est concrétisée par la création de la société en janvier 2011.

L'année 2010 marque enfin un deuxième tournant lié aux avancées majeures en micro-assemblage auxquelles la communauté française a grandement contribué pour les objets de tailles supérieures à 10 micromètres. Mon orientation stratégique actuelle consiste à se reporter sur l'étude des objets dont la taille est située dans un "espace vierge" entre micro et nanomanipulation de taille caractéristique entre 100 nm et 10 μ m. Cette évolution reposera sur la poursuite des travaux en diélectrophorèse et sur la maîtrise des surfaces nécessaire à une échelle inférieure, dont la pérennité est déjà assurée jusqu'en 2012. L'étude des robots porteurs que je n'ai pas souhaitée continuer personnellement est désormais menée dans le cadre d'une thèse dont l'encadrement est assuré par deux

1. La thèse de Cyrille Lenders a duré effectivement 5 ans avec les 3 dernières années en co-tutelle. Cette durée, plus longue que les standards français est conforme aux standards belges du fait de la charge d'enseignement importante du candidat liée à son statut d'assistant à l'ULB.

autres collègues de l'institut. Deux autres axes ne possèdent pas encore de visibilité sur une poursuite au delà de 2010 : les travaux sur la modélisation en milieu liquide pourraient être poursuivis par une collaboration plus proche avec l'université AALTO en Finlande, et les travaux en *capillarité immergée* dont le maintien est directement liée au maintien de l'activité micromanipulation à l'Université Libre de Bruxelles.

1.2.3 Contexte collaboratif

Mes activités collaboratives ont été exercées majoritairement dans le cadre de projets nationaux ou européens. Quatre projets d'envergure ont tout particulièrement été le cadre de mes travaux :

- le projet ANR PRONOMIA (2005-09) qui concernait le cœur de mon activité puisque ciblé sur l'étude de la micromanipulation en milieu liquide. Ce projet que j'ai co-animé avec Nicolas Chaillet a été l'occasion de renforcer les collaborations naissantes (en 2005) avec l'institut ISIR ;
- le projet ANR NANOROL (2008-12) que j'anime concerne l'étude de la modélisation du comportement des micro-objets, il est la continuité d'une partie des activités du projet PRONOMIA. L'objectif est l'étude et la réalisation d'une plateforme de caractérisation du micromonde ;
- le projet intégré européen FP6 HYDROMEL (2006-10) dont l'objet est d'étudier des approches d'assemblage alliant auto-assemblage et assemblage robotique. Ce projet a été l'occasion de financer les travaux sur la fonctionnalisation de surface par couches moléculaires auto-assemblées pour l'assemblage robotique. Il a également permis de collaborer avec l'institut suisse EMPA² sur la structuration des surfaces des micropréhenseurs ;
- le projet européen FP7 FoF FAB2ASM (2010-2013) pour lequel j'ai participé activement au montage et dont j'assume l'animation d'un sous-projet. Ce projet porte sur l'étude de stratégies innovantes de packaging de microcomposants électroniques et est l'occasion de se confronter à l'état de l'art industriel en micro-assemblage. Il est issu d'une volonté personnelle de mieux comprendre les contraintes de l'industrie mais également de poursuivre deux axes majeurs que sont les travaux en diélectrophorèse et en fonctionnalisation de surface.

La description exhaustive des projets que j'ai pilotés ou auxquels j'ai participé est reportée dans mon CV, annexe A, page 129.

Les actions collaboratives sont représentées sur la figure 1.3. Elle répertorie l'évolution des actions collaboratives au cours du temps avec les différents partenaires. J'ai classé les actions en trois catégories représentant trois étapes de l'évolution d'une collaboration :

- la première étape est caractérisée par des réflexions scientifiques communes permettant d'identifier des problématiques originales qui pourront être développées par une collaboration plus approfondie ;

2. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Thun, Suisse

- la deuxième étape porte sur la réalisation de premiers travaux scientifiques collaboratifs qui n'ont pas donné lieu à une publication commune. Ce peut être le cas de travaux exploratoires nécessitant des collaborations plus approfondies pour être validés et publiés ou de travaux qui ont été arrêtés suite des premiers résultats peu probants ;
- la dernière étape consiste en des travaux collaboratifs fructueux qui génèrent des publications communes.

Les dates indiquées sur la figure 1.3 mentionnent la réalisation concrète des travaux dont la date de publication peut parfois différer de plus d'un an du fait du délai de publication.

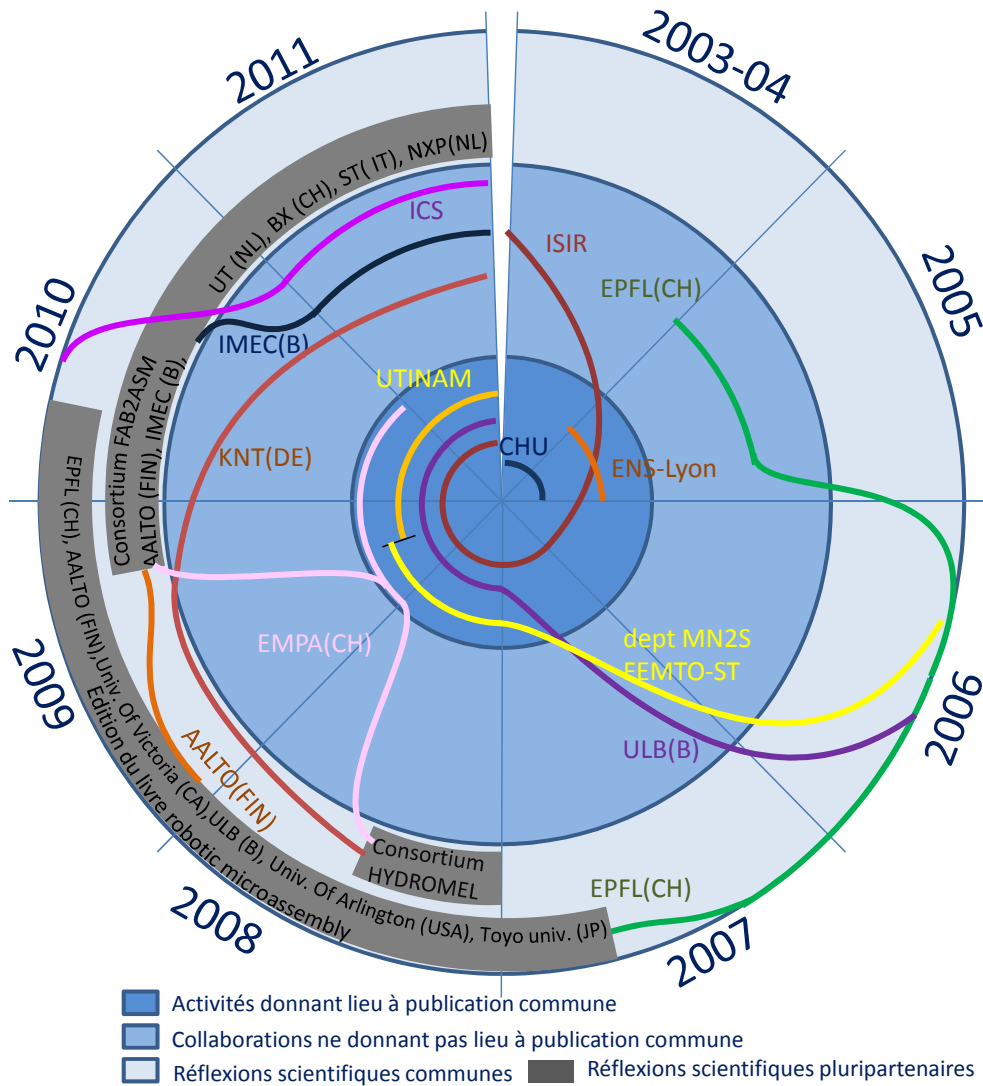


FIGURE 1.3 – Evolution des travaux collaboratifs au cours du temps.

Dans la suite de mes activités de thèse et au cours de l’encadrement de la thèse en manipulation d’objets biologiques de M. Dauge, des travaux ont été menés en interaction avec le CHU de Besançon (manipulation d’ovocytes) et avec l’ENS-Lyon (manipulation de fragments de minéraux à proximité de bactéries).

Rapidement, l’équipe projet “MAP Manipuler Analyser et Percevoir les échelles micro et nanoscopiques” de Stéphane Régnier de l’institut ISIR s’est imposée comme le partenaire privilégié pour mener à bien l’étude de la micromanipulation et du micro-assemblage en milieu liquide. Avec deux projets ANR en commun et une thèse co-encadrée, la collaboration fructueuse avec ce partenaire ne s’est pas interrompue depuis 2003.

En 2005, les expérimentations conjointes menées sur le site du LSRO à l’EPFL n’ont pas été probantes et n’ont pas donné lieu à publication. Ce contact a toutefois été réactivé lors de l’écriture du livre “robotic microassembly” dont j’ai assuré l’édition avec Stéphane Régnier de l’ISIR [73]. Ce travail d’écriture avec six collègues internationaux a favorisé une réflexion scientifique sur le micro-assemblage et tout particulièrement avec l’institut AALTO avec lequel nous avons démarré le projet européen FAB2ASM à la suite du livre. Ce projet crée des liens entre la robotique de micromanipulation et le packaging de microcomposants électroniques : les premiers échanges d’échantillons avec l’institut belge IMEC annoncent des recherches fructueuses.

Une autre source de collaboration a été le consortium du projet européen Hydromel. Il a permis la rencontre de l’institut suisse EMPA avec lequel nous avons travaillé sur la maîtrise des propriétés de surface et qui nous a également rejoint dans le projet FAB2ASM. Il a également permis d’identifier un intérêt commun avec la société KNT en Allemagne lié à notre savoir faire en fonctionnalisation de surface. De premiers essais probants ont été réalisés et apparaissent encourageants.

D’autres travaux ont été initiés hors du cadre d’un projet formalisé. C’est le cas du démarrage des activités collaboratives avec l’Université Libre de Bruxelles qui s’est concrétisé en 2007 par l’encadrement d’un doctorant en co-tutelle. C’est également le cas des collaborations avec le département MN2S de l’institut FEMTO-ST (W. Boireau) qui a participé au démarrage de nos activités sur la fonctionnalisation de surface. Cette étude a ensuite migré vers des collaborations avec l’institut UTINAM de Besançon. Enfin, le dernier contact prometteur a été établi avec Christian Gauthier³ de l’institut ICS à Strasbourg sur la mesure de force de pull-off, des mesures conjointes ont été effectuées début 2011 par un des doctorants que j’encadre.

1.3 Enseignement et diffusion des connaissances

1.3.1 Enseignement

Les enseignements que j’ai effectués au cours des dernières années portent sur la transmission de connaissances liées aux activités de l’équipe de recherche SAMMI de l’institut FEMTO-ST, représentant un spectre un peu plus large que mes strictes activités scien-

3. Bien qu’homonyme, il n’existe pas de liens de parenté connus à ce jour entre nous.

tifiques. L'évolution des connaissances en micromanipulation et micro-assemblage au cours des dernières années a engendré la construction progressive d'un corpus scientifique spécifique à ce domaine de recherche. Elle s'est accompagnée d'une transition sur la nature de l'enseignement de cette jeune discipline en passant d'un enseignement de culture générale à la transmission de savoir-faire. Concrètement, l'enseignement est passé de cours magistraux présentant l'état de l'art des technologies à des séances de Travaux Dirigés (TD) permettant d'illustrer, par le calcul, des propriétés singulières du micromonde identifiées lors des travaux de recherche. L'écriture du livre "La microrobotique, application à la micromanipulation" [133, 134] avec l'ISIR et l'ULB a également été une occasion d'uniformiser nos connaissances et nos points de vue entre ces trois instituts et de partager et d'améliorer les rares exercices que nous possédions en 2006.

Pratiquement, j'interviens majoritairement dans trois établissements au niveau Master 2 ou Master 1 (voir CV en annexe A) :

- l'Université de Franche-Comté (UFC) ;
- l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et Microtechnique (ENSMM), Besançon ;
- l'Ecole d'Ingénieur en Génie des Systèmes Industriels (EIGSI), La Rochelle.

A l'Université de Franche Comté, mes cours portent sur les méthodes d'assemblage et de packaging dans les microtechniques (12 heures par an). J'ai participé activement au montage de deux platines de TP sur la mise en œuvre d'actionneurs piezo-électriques et alliage à mémoire de forme représentant 8 heures de TP. J'interviens également dans le master européen EU4M avec un cours de 6 heures sur les mécanismes compliants qui sont couramment utilisés en microtechniques.

A l'ENSMM, j'effectue 8 heures de cours par an sur la micromanipulation, orientés vers la manipulation d'objets biologiques dans l'option 'Microsystèmes et Santé' de l'école.

Mon intervention à l'EIGSI consiste en une sensibilisation aux micro-actionneurs dans un temps très court de 6 heures regroupant un cours introductif et un ensemble de TP basé sur les données expérimentales des plateformes de TP de l'UFC.

J'ai également eu l'occasion d'animer une formation en microrobotique destinée aux doctorants à la FSRM en 2006, ainsi que des Travaux Pratiques (TP) dans le cadre des cours d'été "Highlight in Microtechnology", et également d'effectuer un cours à l'Université Libre de Bruxelles.

1.3.2 Diffusion et vulgarisation

La diffusion des connaissances s'est formalisée autour de différentes actions : (i) la participation au club sciences et citoyen du CNRS à Besançon, (ii) la participation aux opérations de parrainage *une classe un chercheur* avec des classes de seconde du Lycée Nodier de Dole, (iii) l'animation de trois sujets de TIPE en classe préparatoire et (iv) la participation active au salon industriel MICRONORA en 2008 et 2010. A cette occasion,

l'assemblage de notre microvache "Maghi⁴" a été une occasion de sensibiliser le grand public au micro-assemblage durant le salon de 2008 avec une large couverture médiatique (voir figure 1.4) [97].



FIGURE 1.4 – Micro-vache assemblée "Maghi".

Conclusion du chapitre

Cette introduction s'est focalisée sur la présentation de la structure générale des travaux reportés dans ce manuscrit regroupant les descriptions des étapes de la démarche scientifique, de l'évolution des objets d'étude et du développement des actions collaboratives. Le deuxième chapitre porte sur une synthèse de l'état de l'art et le positionnement international de mes travaux. La suite du document est structurée autour des trois étapes génériques de la démarche d'étude. La modélisation du comportement des micro-objets sera présentée dans le chapitre 3, les stratégies de micromanipulation proposées sont reportées au chapitre 4, pour ouvrir vers l'étude des cellules de micro-assemblage dans le chapitre 5. Un dernier chapitre de conclusion et de perspectives clôture ce document.

4. MAGHI : Micro-AssemblaGe d'HerbIvores, de la traduction "littérale" de l'anglais : MicroAssembly with Gripper Handling

Chapitre 2

Contexte : la micromanipulation

L'objet de ce chapitre est d'exposer le contexte et l'état de l'art des études de micromanipulation. Les méthodes actuelles de manipulation et positionnement de micro-objets sont répertoriées autour de deux catégories : les méthodes sans contact relevant d'une approche bottom-up et les méthodes avec contact s'inscrivant dans une démarche top-down. Cette analyse est la base de la proposition de réalisation des opérations de micromanipulation dans un milieu liquide qui constitue le cœur de la proposition scientifique développée dans ce document.

2.1 Introduction

Les stratégies de préhension peuvent être classifiées suivant deux types :

- les solutions sans contact comme les pinces optiques, les systèmes à diélectrophorèse ou les pinces magnétiques qui présentent l'avantage de ne jamais créer de contact entre l'effecteur et l'objet annulant ainsi l'effet d'adhésion. Les forces de blocage sur les micro-objets sont toutefois faibles et ces procédés sont souvent limités à une classe restreinte de matériaux en termes de formes et de propriétés physiques ;
- Les solutions de préhension par contact comme les préhenseurs capillaires, les préhenseurs à gel, les micropinces ou les préhenseurs par adhésion permettent la manipulation d'un grand nombre de matériaux et de formes de micro-objets. Ils sont également capables d'engendrer une force importante pouvant être intéressante par exemple dans le cadre d'une opération d'insertion pour un micro-assemblage. Ces principes sont en général perturbés par les effets d'adhésion et des stratégies innovantes de lâcher doivent être développées pour assurer une relâche contrôlée et précise de l'objet.

2.2 Micromanipulation et positionnement sans contact

2.2.1 Utilisation de pinces optiques

Les pinces optiques utilisent un faisceau laser pour manipuler des micro-objets en utilisant la pression de radiation. Ces pinces optiques fonctionnent sur des objets transparents possédant des indices de réfraction supérieurs aux indices de réfraction du milieu de manipulation. Dans ce cas, les particules sont attirées par la région de plus grande intensité lumineuse. En déplaçant le faisceau laser, il est alors possible de déplacer la particule sans contact direct avec celle-ci. Cette méthode permet ainsi de manipuler des objets allant d'une taille de quelques dizaines de nanomètres à quelques dizaines de micromètres [50, 121, 147].

Le principe de la manipulation de micro-objets par pinces optiques est décrit sur la figure 2.1. Lorsque les rayons lumineux se réfractent à la surface de l'objet, leur chemin lumineux est modifié induisant une pression de radiation sur l'objet. Dans le cas d'un objet non situé au centre du faisceau (voir figure 2.1), la pression de radiation à sa surface engendre une force dont la composante radiale (suivant $\vec{r}$) tend à ramener l'objet vers le centre du faisceau. Lorsque l'objet est situé sur l'axe central du faisceau lumineux, la composante verticale de la pression de radiation tend à ramener le centre de l'objet sphérique sur le centre de focalisation. En réalité, les rayons réfléchis induisent une composante de force verticale supplémentaire et la position stable est par conséquent légèrement décalée du centre de focalisation du faisceau suivant l'axe $\vec{z}$ et dépend de la taille du micro-objet.

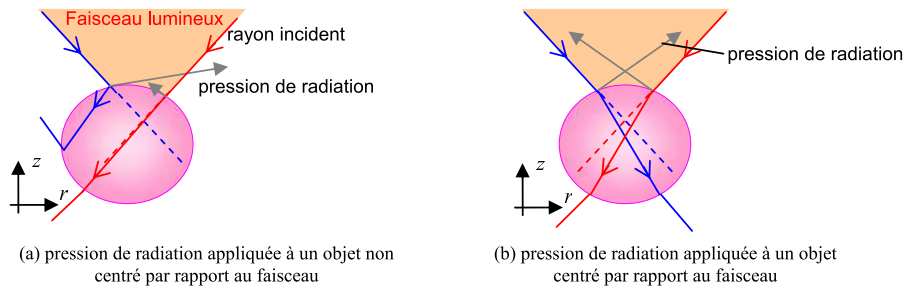


FIGURE 2.1 – Principe des pinces optiques

La manipulation de plusieurs objets nécessite le déplacement de plusieurs « pièges optiques » dans le champ de manipulation. Cette contrainte peut être obtenue soit en scannant la scène rapidement avec un laser unique, soit en créant une image possédant plusieurs pièges optiques.

Le premier principe consiste à utiliser un seul faisceau laser et à déplacer séquentiellement les objets un à un. Le passage du faisceau d'un objet à l'autre s'effectue alors en déplaçant le faisceau laser suffisamment rapidement pour que l'inertie de l'objet le maintienne immobile [10, 159]. Ce principe permet de déplacer les objets suivant les 3 dimensions comme illustré sur la figure 2.2 [9]. L'objet manipulé est déplacé dans le plan horizontal de la vue de la caméra et également verticalement.

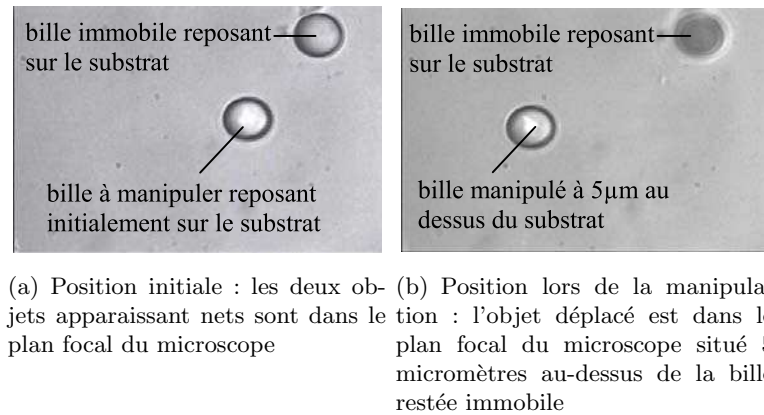


FIGURE 2.2 – Manipulation tridimensionnelle de bille de polystyrène de 7 micromètres de diamètre par *laser trapping* (Department of Bioengineering and Robotics, Tohoku University, Japon)

Le déplacement de plusieurs objets peut également être obtenu en déplaçant simultanément plusieurs pièges optiques. Dans ce cas, des principes optiques particuliers basés sur des techniques holographiques¹ sont utilisés pour structurer la lumière de façon à créer plusieurs pièges optiques [26, 58, 82]. Le déplacement simultané de plusieurs pièges optiques peut être piloté par ordinateur. Ce type de procédé permet de manipuler en parallèle un grand nombre de billes.

Une illustration des capacités de ces moyens de micromanipulation est présentée sur la figure 2.3 [26]. Les billes en verre d'un diamètre de 1 micromètre sont manipulées sans contact entre une première configuration et une deuxième configuration en 3 secondes (figure 2.3).

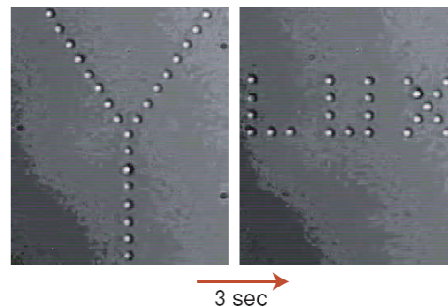


FIGURE 2.3 – Exemples de positionnement de billes de verre de 1 μm de diamètre à l'aide de la technique HOT (Yale University New Haven, USA). Vidéo disponible sur <http://www.opticsexpress.org/viewmedia.cfm>

1. HOT : *holographic optical tweezers*.

Quelques dispositifs commerciaux permettant la manipulation d'un objet existent comme le « LaserTweezer^(R) » de la société « Cell Robotics International », « Palm Microlaser Systems » de la société « PALM MicroLaser Technologies » ainsi que le dispositif « Optical Tweezer systems » de la société « Ellior Scientific ». Dans ce paysage industriel, le produit « BioRyx 200 » de la société « Arryx, Inc. » se démarque par l'utilisation de la technique HOT et permet ainsi la manipulation de 200 particules en parallèle [81]. Les forces mises en jeu sont de l'ordre de quelques picoNewtons pour des objets d'un diamètre de l'ordre du micromètre [60, 141].

Ce principe permet de manipuler une grande variété de micro-objets comme des sphères artificielles, des objets biologiques ou des nano-objets comme des nanotubes de carbone [3]. La manipulation directe focalisant le faisceau sur l'objet biologique peut engendrer des destructions. Ce procédé est par conséquent utilisé également pour déplacer les cellules biologiques de manière indirecte par poussée, à l'aide d'un « pous-seur » déplacé par pince optique [9, 10].

Les pinces optiques peuvent être utilisées pour des applications de micro-assemblage [94] (voir figure 2.4). Les cellules préalablement fixées à des billes de polystyrène de diamètre $3\text{ }\mu\text{m}$ par une structure moléculaire adéquate, sont déplacées par pince optique en focalisant le faisceau lumineux sur les billes de polystyrène. La bille en polystyrène est mise en contact avec une cellule voisine provoquant un collage moléculaire. La structure présentée figure 2.4 peut ainsi être réalisée.

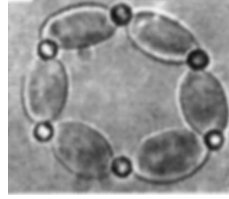


FIGURE 2.4 – Micro-assemblage de cellules et de billes de polystyrène à l'aide d'une pince optique, *Department of Chemistry and Chemical Biology, Harvard University*, [94]

2.2.2 Exploitations des forces électrostatiques

Les forces électrostatiques peuvent être utilisées pour manipuler un micro-objet sans contact en commandant un champ électrique. Considérons un objet diélectrique dans un champ électrique $\vec{E}(t)$ créé par une source extérieure. L'objet dans le champ électrique peut être considéré comme un dipôle électrique de moment $\vec{m}(t)$. La force et le couple appliqués à chaque instant sur l'objet sont exprimés classiquement par (voir figure 2.5) :

$$\vec{F} = (\vec{m}(t) \cdot \vec{\nabla}) \vec{E}(t) \quad (2.1)$$

$$\vec{\Gamma} = \vec{m}(t) \wedge \vec{E}(t) \quad (2.2)$$

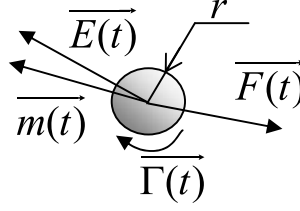


FIGURE 2.5 – Force et couple électrostatiques appliqués à un micro-objet dans un champ électrique

Le moment équivalent d'une particule sphérique de rayon r , de constante diélectrique complexe² κ_1 dans un milieu de constante diélectrique complexe κ_3 vaut :

$$\overrightarrow{m(t)} = 4\pi r^3 \epsilon_3 \frac{\kappa_1 - \kappa_3}{\kappa_1 + 2\kappa_3} \cdot \overrightarrow{E(t)} \quad (2.3)$$

La fraction complexe de cette équation dépendant de la pulsation d'excitation est appelée fonction de Clausius-Mossoti $K(w)$:

$$K(w) = \frac{\kappa_1 - \kappa_3}{\kappa_1 + 2\kappa_3} \quad (2.4)$$

Ces expressions déterminent l'effort électrostatique appliqué à un objet dans un cas quelconque. Deux exemples sont développés ci-dessous concernant la force appliquée par un champ alternatif stationnaire et celle engendrée par un champ électrique tournant.

L'expression de la force de diélectrophorèse est établie dans le cas d'un champ alternatif $\overrightarrow{E(t)}$ stationnaire [148] :

$$\overrightarrow{E(t)} = \overrightarrow{E_o} \cos(wt) \quad (2.5)$$

La force de diélectrophorèse F_{dep} représente la force moyenne appliquée à un objet diélectrique soumis à ce champ électrique. Dans le cas de milieux diélectriques, cette force s'exprime sous la forme :

$$\overrightarrow{F_{dep}} = \pi r^3 \epsilon_3 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + 2\epsilon_3} \overrightarrow{\nabla} E_o^2. \quad (2.6)$$

L'expression du couple de diélectrophorèse est établi en considérant un champ planaire tournant $\overrightarrow{E(t)}$ de norme constante :

$$\overrightarrow{E(t)} = E_o [\cos(wt) \overrightarrow{x} + \sin(wt) \overrightarrow{y}] \quad (2.7)$$

On peut montrer que dans ce cas, le couple instantané s'exprime par :

$$\overrightarrow{\Gamma_{DEP}} = 4\pi r^3 \epsilon_3 \text{Im}(K(w)) E_o^2 \quad (2.8)$$

2. La constante diélectrique complexe κ_i est fonction de la pulsation w d'excitation du milieu et est définie par $\kappa_i = \epsilon_i + j\sigma_i/w$, ϵ_i et σ_i représentant la constante diélectrique du milieu et sa conductivité électrique.

Application de la diélectrophorèse en micromanipulation

En fonction du signe de la fonction de Clausius-Mosotti $K(w)$, les objets sont soumis à deux mouvements possibles :

- $K(w) > 0$: les objets sont attirés vers les zones de fort champ électrique créées par les électrodes. Ce cas est appelé diélectrophorèse positive (pDEP) ;
- $K(w) < 0$: les objets sont repoussés des électrodes vers les zones de faible champ électrique. Elle est alors appelée diélectrophorèse négative (nDEP).

De nombreuses applications essentiellement biologiques utilisent la diélectrophorèse.

Le tri de particules et parmi elles, des cellules biologiques, trouve de nombreuses applications dans le domaine de la recherche médicale. L'intérêt de séparer certains types de cellules d'une population indifférenciée permet aux chercheurs d'effectuer des études plus précises et mieux ciblées. Par exemple, la séparation de cellules cancéreuses et de cellules non cancéreuses permet de fiabiliser les tests de traitements spécifiques de la maladie.

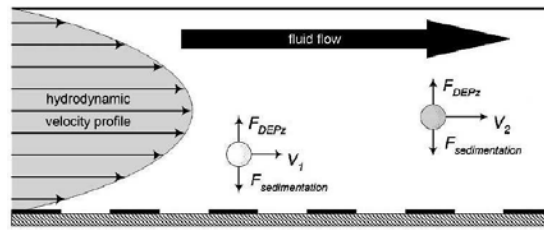
Parmi les méthodes existantes de tri, on peut retenir celle du tri d'une population de cellules biologiques par électrodes spiralées (figure 2.6). Les cellules de différents types n'ont pas toutes la même constante diélectrique et le comportement de chaque population de cellules est par conséquent différent. Ainsi, en appliquant un signal électrique d'une fréquence spécifique de façon à ce que l'une partie des cellules subissent une diélectrophorèse négative et l'autre partie une diélectrophorèse positive, les deux populations de cellules peuvent être triées [12].



FIGURE 2.6 – Electrodes spiralées – Tri de cellules contaminées par la malaria (au centre en vert), *The university of Texas System, Austin, USA*, citeBecker99.

L'utilisation uniquement de l'effort de diélectrophorèse permet donc de séparer des cellules en deux populations. Cependant il existe également une méthode alliant microfluidique et DEP permettant le tri de plusieurs populations [65].

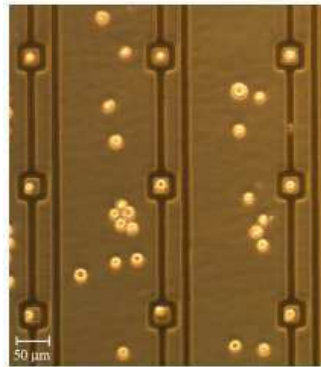
Un flux de particules (biologiques ou artificielles) en suspension dans l'eau traverse un microcanal muni sur une face d'un réseau d'électrodes appliquant un champ électrique. Le profil de vitesse parabolique qui s'établit dans le microcanal est utilisé pour trier les cellules (voir figure 2.7. En effet, l'altitude dans le microcanal de chaque particule est donnée par l'équilibre entre la force de diélectrophorèse (supposée verticale) et la force de gravité. Ainsi, les cellules soumises à une force de diélectrophorèse négative importante se trouve éloignées du bord du microcanal et évoluent ainsi dans une zone

FIGURE 2.7 – *Principe de tri alliant diélectrophorèse et force hydrodynamique*

où la vitesse du fluide est importante. La vitesse d'une population de particules dépend donc directement de ses propriétés électriques. Cette technique rend le tri plus sélectif et plus pratique car le tri s'effectue sur un flux de particules et non plus sur des particules dans un milieu stable.

Positionnement de particules par diélectrophorèse

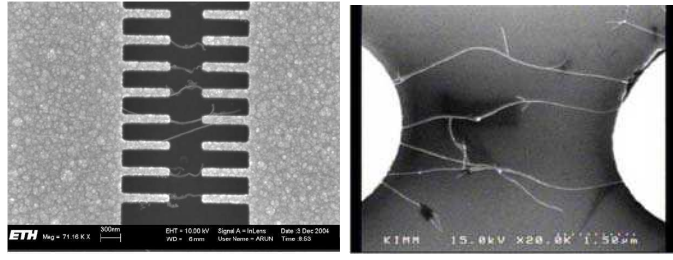
Le positionnement de particules par diélectrophorèse consiste à maintenir une particule dans une position désirée définie par le champ électrique imposé. La diélectrophorèse permet en effet de créer un effort suffisant pour bloquer une particule à proximité des électrodes.

FIGURE 2.8 – *Capture de micro-objets au-dessus d'électrodes*

La figure 2.8 représente un exemple de dispositif permettant le positionnement de particules. La structure d'électrodes déposée sur un substrat est composée de zone carrée où l'électrode est ajourée. On peut montrer que les billes ont ainsi tendance à se placer sous l'effet de la diélectrophorèse dans ces emplacements (figure 2.8). Ce principe permet de sélectionner la matière de la particule à capturer et permet de choisir une taille maximum de particule à piéger. Ce système diffère des précédents exemples puisque l'objectif n'est pas ici de trier les cellules mais surtout de les positionner une à une à un endroit précis [62, 156](figure 2.8).

Une seconde structure classiquement utilisée pour le positionnement de particules consiste à utiliser quatre électrodes positionnées autour de la particule. En utilisant un champ électrique stationnaire, et dans le cas d'une diélectrophorèse négative, on crée ainsi un point d'équilibre situé au centre des 4 électrodes. En utilisant un champ électrique tournant, on peut également appliquer un couple à l'objet. Ce principe a été, par exemple, utilisé pour contrôler la rotation d'un ovocyte, des vitesses de rotation de l'ordre de 60 degrés par seconde ont été obtenues [174].

La force de diélectrophorèse est également très largement utilisée pour la manipulation de « nano-objets » comme des nanotubes de carbone [163, 165] (voir figure 2.9).



(a) IRIS Lab, ETHZ, Zurich, Suisse, (b) Korea Inst. of Machinery and Materials, Corée du Sud

FIGURE 2.9 – Utilisation de la diélectrophorèse en nanomanipulation de nanotubes de carbone

Les dispositifs de diélectrophorèse fonctionnent actuellement en boucle ouverte : la tension appliquée sur les électrodes est maintenue constante. Nos travaux sur la commande de ces dispositifs sont présentés dans la section 4.1, page 79.

2.2.3 Utilisation des forces magnétiques

Un autre principe de manipulation de micro-objets passe par l'exploitation de l'énergie magnétique. L'effort magnétique appliqué par un champ magnétique $\vec{B}_o$ sur un volume V possédant une permittivité magnétique $\chi_1(\vec{B}_o)$ dans un milieu possédant une permittivité magnétique $\chi_3(\vec{B}_o)$, vaut [27] :

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_o} \iiint_V (\chi_1(\vec{B}_o) - \chi_3(\vec{B}_o)) \vec{B}_o \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_o \cdot dv \quad (2.9)$$

$$\text{avec : } \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_o = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{x})}{\partial x} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{y})}{\partial y} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{x})}{\partial y} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{y})}{\partial x} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{z})}{\partial y} \\ \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{x})}{\partial z} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{y})}{\partial z} & \frac{\partial(\vec{B}_o \cdot \vec{z})}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Tout comme pour la diélectrophorèse présentée plus haut, l'effort engendré peut être un effort répulsif ou un effort attractif en fonction du signe de $(\chi_1(\vec{B}_o) - \chi_3(\vec{B}_o))$. Ainsi lorsque cette différence est positive, la force appliquée a tendance à ramener l'objet

vers la source de champ magnétique ; quand celle-ci est négative, l'objet a tendance à s'éloigner de la source de champ.

Ce principe est principalement utilisé pour le tri de cellules. Les cellules n'étant que très peu sensibles au champ magnétique (χ_1 faible), l'effort magnétique appliqué directement aux cellules est extrêmement faible et peut ne pas être suffisant pour engendrer un déplacement. Le moyen le plus couramment utilisé consiste à déplacer des cellules par énergie magnétique et par conséquent à les fixer à des charges sensibles au champ magnétique.

On attache des particules fines (1500 – 50 nm [105]) paramagnétiques ou diamagnétiques³ ferromagnétiques à des anticorps (voir figure 2.10). Les anticorps et leur charges magnétiques sont plongés dans l'échantillon à analyser. Ils se fixent sur les cellules cibles et celles-ci sont alors manipulables par énergie magnétique. Les cellules non chargées étant très peu sensibles au champ magnétique [105], on peut ainsi, en utilisant un champ magnétique, séparer les cellules cibles du reste de la population.

En pratique, l'utilisation de charges paramagnétiques est privilégiée. La création d'agrégats de cellules cibles, après que le champ magnétique ait été coupé, est ainsi évitée. L'utilisation de charges paramagnétiques ($\chi_1 > 0$) ou diamagnétiques ($\chi_1 < 0$) est donc privilégiée. Dans ce cas, les permittivités magnétiques sont constantes et indépendantes du champ $\vec{B}_o$ appliqué. Par conséquent la force peut s'écrire :

$$\vec{F} = \frac{(\chi_1 - \chi_3)}{\mu_o} \iiint_V \vec{B}_o \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_o \cdot dv \quad (2.11)$$

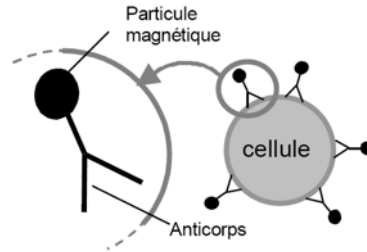


FIGURE 2.10 – Principe du tri magnétique de cellules

L'utilisation des charges magnétiques afin de différencier les cellules a été proposée en 1976 par Giaver [75]. Globalement, le principe de l'utilisation d'anticorps permet une bonne sélectivité et un grand choix de critères de tri. De nombreuses applications dans ce domaine font l'objet de brevets [172,182]. Deux principaux problèmes subsistent toutefois :

- l'accroche des anticorps sur la cellule,

3. Particules paramagnétiques ou diamagnétiques : particules qui s'aimantent légèrement dans un champ magnétique $\vec{B}_o$, mais qui, contrairement aux particules ferromagnétiques, ne possèdent pas d'aimantation rémanente lorsque le champ $\vec{B}_o$ s'annule. Dans ce cas la permittivité magnétique est non dépendante du champ $\vec{B}_o$. χ_1 est positive dans le cas paramagnétique et négative dans le cas diamagnétique.

- la destruction possible des cellules lors du décrochage des anticorps après le tri.

Récemment, des travaux d'optimisation de la structure du système créant le gradient de champ magnétique nécessaire à la création de la force magnétique ont permis d'accroître sensiblement l'effort applicable. Ainsi, il est désormais possible de manipuler directement les cellules et de les trier en fonction de leurs propriétés magnétiques sans ajout de particules [63, 194] (voir figure 2.11).

De manière plus marginale, l'utilisation de ces effets magnétiques est importante dans le cadre de la manipulation d'objets artificiels :

- immobilisation de particule magnétique dans un conduit à l'aide de micro-électro-aimants [164] ;
- lévitation diamagnétique de particule unique [27].

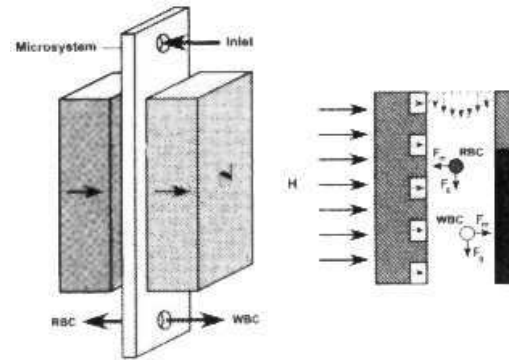


FIGURE 2.11 – Principe de tri de cellules par magnétophorèse [63]

2.2.4 Lévitation acoustique

La lévitation acoustique est exploitée suivant deux principes :

- la lévitation par ondes stationnaires : le principe se base sur l'établissement d'une onde acoustique stationnaire entre une sonotrode et un réflecteur. On peut alors montrer que la position des nœuds de l'onde stationnaire sont des points stables pour des petits objets qui peuvent ainsi se maintenir en lévitation sous l'effet de la pression (figure 2.12). Toutefois, dans ces dispositifs, l'inertie de l'objet est le phénomène qui permet la stabilisation de sa position naturellement très peu amortie. Les micro-objets possédant de faibles inerties, ces dispositifs sont appliqués à des objets millimétriques plutôt qu'à des micro-objets [177, 178].
- la lévitation par champ proche : dans ce cas le réflecteur est remplacé par un objet plan. L'onde stationnaire s'établit entre le composant et la sonotrode engendrant sa lévitation [142, 175, 187].

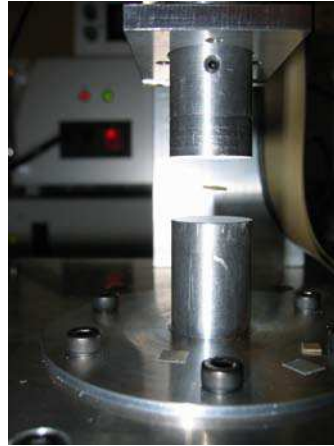


FIGURE 2.12 – Exemple de lévitation en onde stationnaire (Univ. Libre de Bruxelles, [177]) : le cylindre inférieur représente la sonotrode, le cylindre supérieur représente le réflecteur, la distance entre les deux étant de l'ordre de 12 mm

2.3 Micromanipulation et positionnement avec contacts

La seconde approche utilisée pour manipuler des micro-objets consiste à utiliser des préhenseurs rentrant en contact avec l'objet à manipuler. Cette approche permet de générer des forces de blocage plus importantes que l'approche sans contact développée dans la section précédente, mais est perturbée par les forces d'adhésion qui s'établissent entre le préhenseur et l'objet. Les différentes méthodes de préhension par contact sont présentées ci-dessous.

2.3.1 Pinces à doigts de serrage

La prise et la dépose d'objets sont des opérations largement répandues dans le monde industriel. Les préhenseurs à doigts de serrage sont des outils intuitifs pour l'utilisateur et tiennent une part importante dans la résolution des problèmes de manipulation. La miniaturisation de ces principes de préhension permet également de manipuler des objets dont la taille caractéristique est inférieure au millimètre.

Les prototypes de micropince peuvent être classés en deux grandes catégories :

- les micropinces actionnées pour lesquels la position des doigts est commandée de manière à réaliser un mouvement de fermeture lors de la saisie et d'ouverture pour libérer l'objet ;
- les micropinces passives qui ne possèdent pas d'actionneur pilotant les mouvements de fermeture ou d'ouverture, ceux-ci sont obtenus de manière passive lors de la saisie de l'objet (clipsage réversible). Le lâcher ne peut s'effectuer que si l'objet est maintenu en position par un autre élément (collage, clipsage non réversible, etc.).

Les micropinces actionnées

Concernant les pinces actionnées, de nombreux principes de micro-actionnement sont utilisés comme l'actionnement électrostatique, hydraulique, thermique ou piezoélectrique. Il est à noter que la recherche sur les micropinces est focalisée sur l'étude des méthodes d'actionnement et de commande : ainsi, un grand nombre de dispositifs qualifiés de micropince dans la littérature ont été validés expérimentalement uniquement en tant qu'actionneurs et n'ont jamais été utilisés pour manipuler des micro-objets. Le mode d'actionnement électrostatique est extrêmement répandu puisque particulièrement adapté aux techniques de microfabrication. On peut citer, par exemple, une pince développée au LIMMS [191] et présentée figure 2.13.

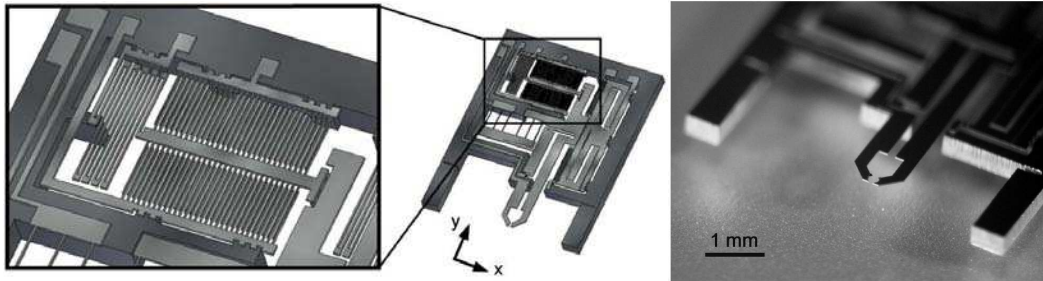


FIGURE 2.13 – Micropinche actionnée électrostatiquement et réalisée par microfabrication (LIMMS, [191]).

Les pinces multicomposants permettent de séparer sur différents éléments les fonctions d'actionnements et de contact avec l'objet. L'approche est ainsi plus modulaire que pour les pinces monolithiques et un type d'actionneur peut être utilisé pour différents micro-objets en ne changeant que les organes terminaux [5, 29, 89]. La difficulté de cette approche tient dans la nécessité d'assembler chaque composant pouvant induire des problématiques de tenue mécanique ou de connectique. La pince piezoélectrique développée à l'institut FEMTO-ST par J. Agnus *et al.* rentre dans cette catégorie de structure modulaire [4]. En effet, elle est basée sur des actionneurs piezoélectriques sur lesquels des organes terminaux peuvent être collés. La figure 2.14 illustre deux montages utilisant des organes terminaux différents sur le même type de micro-actionneur.

Les preuves de concept les plus récentes sur la pertinence de l'utilisation de préhenseur à deux doigts de serrage actifs portent sur la manipulation d'*iso-micro-objets*⁴ : sphère de 10 à 5 micromètres de diamètre [190, 195]. Dans les deux cas, le lâcher de l'objet est obtenu en contrôlant la trajectoire après ouverture de la pince. Ces travaux réalisés à l'institut ISIR (UMPC, CNRS) sont focalisés particulièrement sur l'utilisation de la mesure de la force lors du contrôle de la préhension. Ces stratégies de préhension ont permis la réalisation d'empilement de sphères comme indiqué sur la figure 2.15, représentant un résultat remarquable à l'échelle de l'*iso-micromonde*.

4. Iso-micro-objets : définition page 2

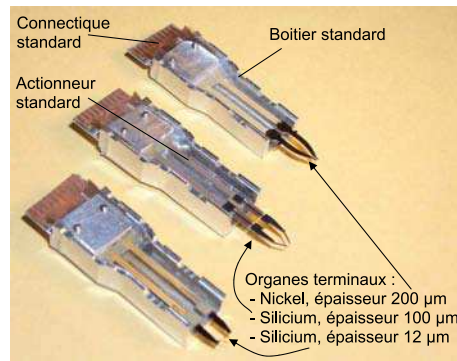


FIGURE 2.14 – Pinces piézoélectriques similaires munies d’organes terminaux de matériaux et formes différentes (Institut FEMTO-ST [5, 29, 89]).

Pince à doigts de serrage passif

Le principe de pinces à doigts de serrage passif consiste à saisir un objet initialement immobilisé à l’aide d’un système de clipsage réversible. Ainsi, l’objet saisi ne peut être relâché qu’à la condition qu’il soit fixé sur un autre élément. L’utilisation de pince à doigts de serrage passif trouve donc son application dans le micro-assemblage et plus particulièrement dans un cadre applicatif de solidarisation de micro-objets. Un exemple de cette approche est proposé figure 2.16 [40]. La pince possède deux doigts qui sont des structures élastiques déformables (voir figure 2.16(a)). Les objets à saisir doivent posséder une forme particulière épousant la forme de la pince (voir figure 2.16(b)). Les objets sont assemblés après saisie en utilisant des structures mécaniques de types clip, ou verrou. Après assemblage, le préhenseur recule et libère l’objet. L’intérêt de ce type d’approche tient dans la simplicité de réalisation de la structure passive qui ne comporte pas de parties actionnées. En revanche, les objets à saisir doivent posséder une forme compatible avec le système de préhension.

En utilisant le même principe mais en plaçant la structure déformable (analogue des doigts de pince dans le cas précédent) sur l’objet, l’objet peut être saisi avec un unique doigt rigide (analogue de la forme sur le micro-objet dans le cas précédent) [33]. La complexité de réalisation des micro-objets est alors comparable aux cas précédents mais le préhenseur est de forme plus simple. Un exemple de préhenseur placé à proximité d’un objet à saisir est présenté figure 2.17(a). La photographie d’un assemblage est reportée sur la figure 2.17(b).

2.3.2 Préhension par changement de phase

La solidification d’un liquide entre un préhenseur et un micro-objet à saisir est une autre méthode permettant de réaliser une opération de saisie. La dépose de l’objet peut s’effectuer en liquéfiant le liquide solidifié. La saisie par solidification permet de saisir un grand nombre de types d’objet quels que soient leur forme et le type de matériau. Comparativement à l’utilisation des forces de capillarité, cette technique permet de réaliser

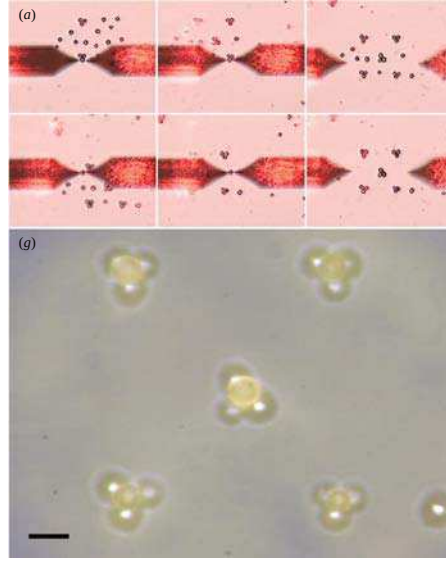


FIGURE 2.15 – Exemples de manipulation de bille de $5\,\mu\text{m}$ de diamètre en utilisant une pince à deux doigts basée sur deux leviers d'AFM (institut ISIR, [190]).

une liaison mécanique complète avec l'objet. Ceci permet, par conséquent, de pouvoir contrôler l'orientation de l'objet lors de sa manipulation. L'inconvénient de cette solution comparativement au préhenseur capillaire porte sur l'absence de compliance⁵ des systèmes de préhension par solidification. Enfin dans le cas d'objets de taille typiquement inférieure à $500\,\mu\text{m}$, le ménisque de liquide présent entre les deux objets après liquéfaction peut, comme dans le cas des préhenseurs par capillarité, perturber le lâcher de l'objet. Les problématiques de relâche des préhenseurs capillaires et des préhenseurs à changement de phase sont donc similaires et les méthodes présentées dans le cas des préhenseurs capillaires peuvent être étendues aux préhenseurs par changement de phase.

La plupart des dispositifs utilisent de l'eau comme liquide du fait de la simplicité d'utilisation de ce liquide et de son point de fusion proche de la température ambiante. L'utilisation de polymère solide à la température ambiante et liquide au-delà de leur point de fusion est également proposée pour réaliser des tâches de prise-dépose. La force maximale F de saisie est fonction de la surface S de contact entre le liquide solidifié et l'objet :

$$F = f.S \quad (2.12)$$

Dans le cas de l'eau, la force surfacique de saisie est peu dépendante de la forme des objets saisis et atteint une valeur de l'ordre de $1\,\text{N}.\text{mm}^{-2}$ [56,120]. Dans le cas de liquide polymère, la valeur de f est plus faible, de l'ordre de $60\,\text{mN}.\text{mm}^{-2}$ [120].

5. compliance mécanique : inverse de la raideur mécanique

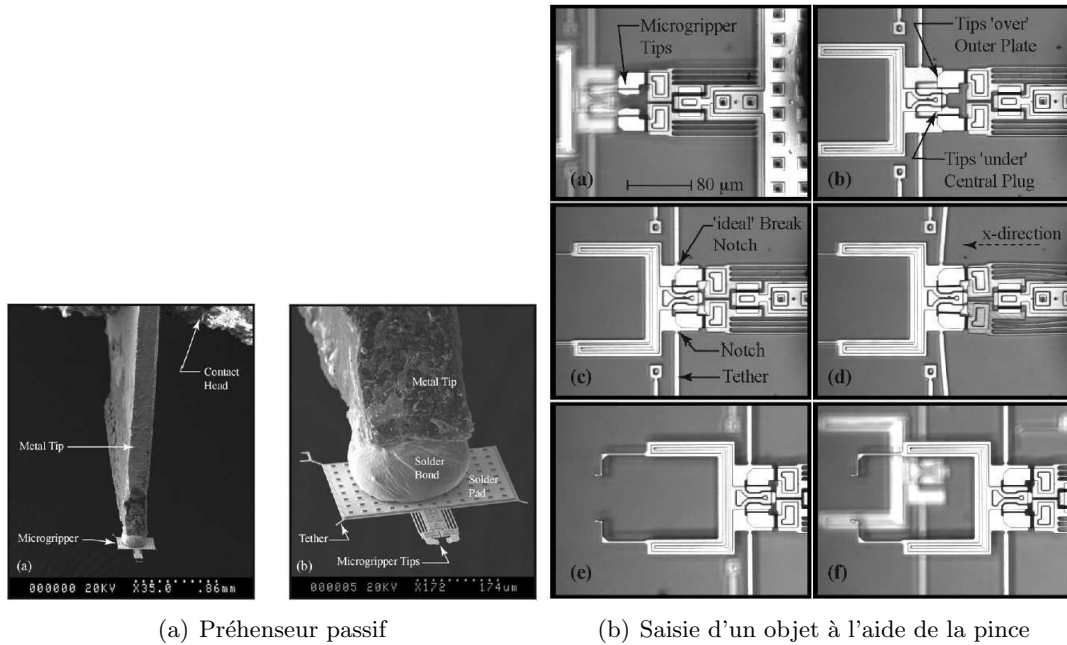


FIGURE 2.16 – Micropinçe à doigts de serrage passif (Univ. of Victoria, [40])

Les prototypes de préhension par changement de phase se différencient par le type de phénomène physique utilisé pour modifier la température de l'organe terminal de préhension.

La modification de température du préhenseur peut être effectuée à l'aide de modules à effet Peltier. Dans ce cas, le flux de chaleur absorbée sur la face froide du module à effet Peltier relié à l'effecteur est directement lié au courant traversant le module. Le préhenseur à glace développé par le CSEM utilise ce principe (voir figure 2.18) [56]. La quantité de liquide utilisée est de l'ordre de $1\mu l$. Afin de faciliter le lâcher de l'objet après fonte de la glace, des ultrasons sont utilisés pour rompre le ménisque aqueux entre l'objet et le préhenseur. Le préhenseur permet des opérations de prise-dépose avec un temps de cycle de l'ordre de 1 000 cycles/heure. La force surfacique maximale de prise est de l'ordre de $1 N.m^{-2}$.

Une deuxième méthode est utilisée pour modifier la température de l'effecteur en mettant à profit l'effet Joule-Thompson. Lors de sa détente, un gaz se refroidit alors qu'il s'échauffe lors de sa compression. Ce principe utilisé pour le fonctionnement des réfrigérateurs peut être également exploité pour le contrôle de la température du préhenseur [125].

L'utilisation de ce principe de préhension par changement de phase dans l'air est limité à des objets de taille typiquement supérieure à 500 micromètres puisque les effets capillaires perturbent la dépose de l'objet. Un moyen de lever ce verrou technologique consiste à utiliser le changement de phase à l'intérieur d'un liquide en réalisant des tâches de prise-dépose à l'intérieur du liquide. Ainsi, lors de la liquéfaction du liquide,

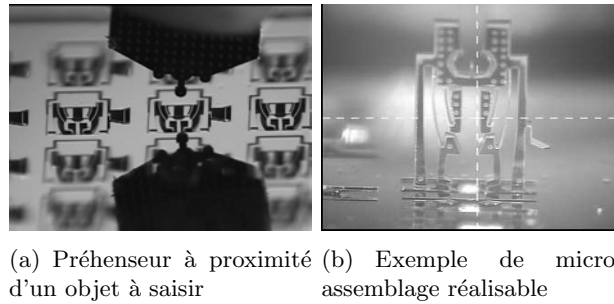


FIGURE 2.17 – Micropinche passive monodigitale (ARRI institute, Texas, USA, [40])

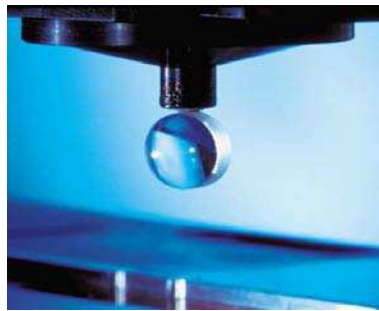


FIGURE 2.18 – Préhenseur à glace (CSEM, Neuchatel, Suisse, [56])

le liquide se mélange avec le milieu environnant sans faire apparaître de ménisque entre l'objet et le préhenseur. Ce principe est détaillée dans la partie 4.2, page 86.

2.3.3 Préhension par dépression

La préhension basée sur l'aspiration des composants (*vacuum gripping*) est de loin la méthode de préhension la plus répandue, notamment dans l'assemblage de composants SMD (*Surface Mounted Devices*) [176]. Cette technique donne toute satisfaction pour le placement des composants parallélépipédiques d'une taille de $250 \times 250 \times 50 \mu\text{m}$, mais c'est actuellement la taille limite pour le packaging de composants en microélectronique. Les hautes cadences des machines qui portent ces buses vont de pair avec des accélérations qui peuvent aller jusqu'à $10g$. La force d'aspiration s'évalue alors à partir de cette accélération, du poids du composant ainsi que d'un coefficient de sécurité.

La miniaturisation de ce procédé semble délicate en dessous de $100 \mu\text{m}$ du fait des effets d'adhésion entre le préhenseur et l'objet. La solution consiste couramment à inverser la pression de manière à effectuer un contre-soufflage. Lorsque l'objet est inférieur à $100 \mu\text{m}$ le contre soufflage engendre un déplacement rapide de l'objet et sa position finale n'est pas facilement contrôlable.

2.3.4 Manipulation par adhésion

Le principe général de la manipulation par adhésion consiste en l'exploitation des phénomènes d'adhésion inhérents aux échelles microscopiques. La figure 2.19 représente cette stratégie étudiée par l'institut ISIR à Paris. La saisie d'un objet sur un substrat peut s'effectuer à l'aide d'un seul doigt robotisé si l'adhésion entre le préhenseur et l'objet est supérieure à l'adhésion entre le substrat de l'objet. L'objet peut alors être déplacé vers sa position finale. Plusieurs stratégies de lâcher ont été développées. La première consiste à redéposer l'objet sur un substrat dont l'adhésion avec l'objet est supérieure à l'adhésion objet-préhenseur garantissant le lâcher de l'objet sur le substrat. Le choix des matériaux des substrats et du préhenseur est toutefois très contraignant, puisque la manipulation doit s'effectuer systématiquement par "adhésion croissante".

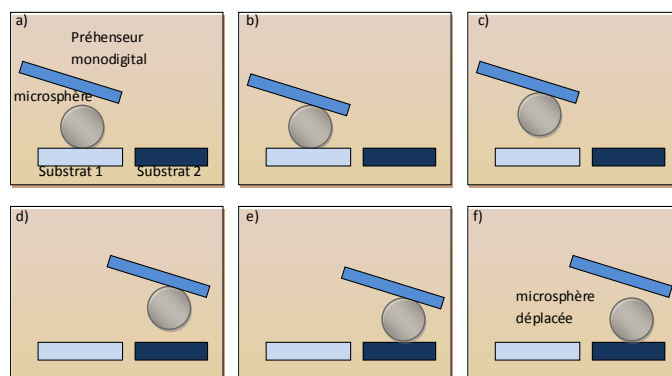


FIGURE 2.19 – Principe de la micromanipulation par adhésion

Utiliser les forces d'adhésion comme principe de préhension est une démarche qui paraît naturelle à l'échelle microscopique. La saisie de l'objet peut ainsi être obtenue par simple contact et le préhenseur ne nécessite pas d'architectures complexes. En fait, il suffit que la force de pull-off⁶ entre le préhenseur et l'objet soit plus importante que celle entre l'objet et le substrat [86, 160]. Toutefois, le problème du lâcher subsiste. Les méthodes de manipulation par forces d'adhésion se différencient donc essentiellement par la technique utilisée pour assurer le lâcher de l'objet.

Une première solution est obtenue en introduisant une inclinaison au préhenseur, ce qui réduit la composante normale au substrat de la force d'adhésion entre le préhenseur et l'objet [84]. La figure 2.20 présente le déroulement d'une telle manipulation en utilisant le levier d'un microscope à force atomique (AFM) comme préhenseur, une sphère en verre de 40 μm de diamètre et un substrat en plexiglas.

Ce type de manipulation nécessite que la force appliquée au préhenseur vérifie les conditions de saisie et dépose de l'objet. Ses valeurs peuvent varier rapidement en fonc-

6. Force nécessaire pour rompre le contact entre deux objets.

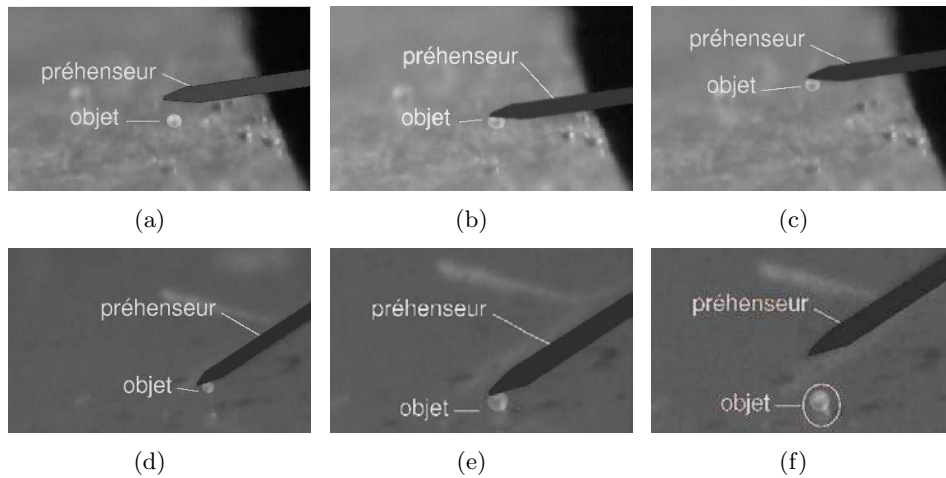


FIGURE 2.20 – Manipulation par saisie et dépose statique : (a) le préhenseur, parallèle au substrat, est placé au-dessus de l'objet à saisir ; (b) le préhenseur est mis en contact avec l'objet ; (c) l'objet adhère au préhenseur et les deux sont retirés verticalement. La mise en contact de l'objet avec le substrat sans incliner le préhenseur ne permet pas la dépose de l'objet (d) le préhenseur est incliné de 40° ; (e) l'objet est mis en contact avec le substrat ; (f) la dépose est effectuée en retirant verticalement le préhenseur (Institut ISIR, [84]).

tion des facteurs liés à l'environnement. Il devient donc très difficile de garantir la fiabilité de la prise et la dépose des objets. D'autres solutions ont été étudiées en employant trois stratégies différentes : dépose par roulement, dépose par effet d'éponge et dépose par accélération [51, 55, 86, 185].

La dépose par roulement est réservée aux objets sphériques. Pour permettre le roulement, le moment de roulement doit être supérieur ou égal au moment maximal de roulement de chaque interface de contact [51, 55]. Il est important de contrôler la force de contact afin de rouler l'objet et le positionner à l'extrémité du préhenseur. Une fois à cette position, l'aire de contact entre l'objet et le préhenseur est très petite ; en revanche, l'aire de contact entre l'objet et le substrat n'a pas changé. Ainsi, la force d'adhésion entre ces deux derniers est supérieure à celle entre l'objet et l'extrémité du préhenseur. En utilisant un asservissement visuel, ce type de dépose peut être effectué avec une grande précision comme l'illustre la figure 2.21.

Finalement, la dernière technique de lâcher est la dépose par accélération qui utilise la force d'inertie pour contrebalancer les effets d'adhésion entre le préhenseur et l'objet [55, 86]. Des expérimentations réalisées par Haliyo *et al.* [86] ont démontré l'existence d'une accélération pour laquelle ceci est vérifié. Sa valeur est comprise entre 10^4 et 10^6 m/s² pour des objets de dimension caractéristique autour de $50\text{ }\mu\text{m}$. Cette valeur dépend évidemment de la masse de l'objet et de l'angle d'attaque du préhenseur. Ces accélérations sont obtenues en bout de levier en le faisant vibrer. Cette technique a aussi été utilisée pour séparer des objets préalablement saisis en vrac (dépose sélective). En

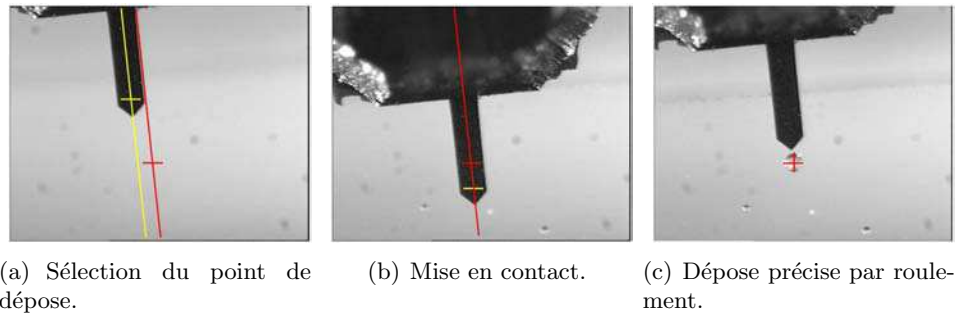
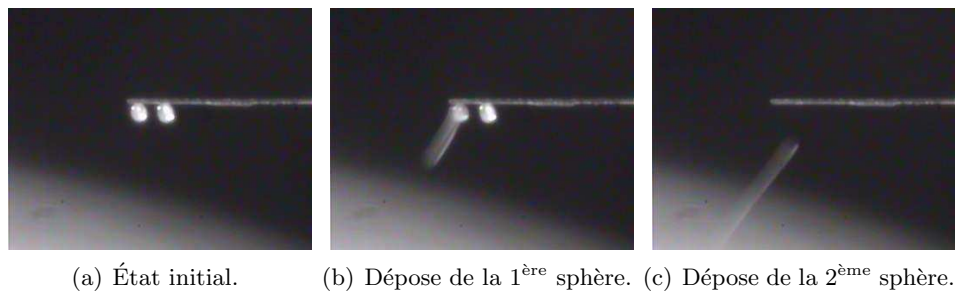


FIGURE 2.21 – Dépose par roulement (Institut ISIR [51]).

effet, le système de préhension-oscillation a une fréquence propre liée au nombre et à la position des objets attachés. Ainsi, il est possible de contrôler le détachement de chacun des objets, un par un, de manière particulière. La figure 2.22 présente la dépose des sphères de pollen de 10 à 20 μm de diamètre.

Le principal inconvénient de ces stratégies est l'absence de contrôle et de précision de la position finale de l'objet. En outre, elles deviennent moins efficaces quand les dimensions caractéristiques des objets diminuent car des fréquences de vibration plus élevées deviennent nécessaires en raison de la diminution de l'inertie de l'objet [19].

Il apparaît toutefois pertinent de considérer cette méthode en interaction avec d'autres stratégies. Nous montrerons par la suite l'intérêt de celle-ci en complément d'un préhenseur à deux doigts (section 4.4, page 94) ou en la couplant avec un contrôle chimique des propriétés d'adhésion (section 4.3, page 92).

FIGURE 2.22 – Dépose sélective de sphères de 20 μm (Institut ISIR [86]).

2.3.5 Exploitation de la tension de surface en micromanipulation

Fondamentalement, la force de capillarité qui s'exerce entre deux solides (par exemple le préhenseur et le composant) résulte de deux actions différentes [71] :

- soit une goutte de liquide est appliquée entre les deux solides ; il se crée alors un ménisque ou pont liquide entre les deux solides ;
- soit l'humidité ambiante fait apparaître un pont capillaire entre les deux solides.

En effet, lorsque l'environnement possède un degré d'hygrométrie supérieur à 5%, un phénomène de condensation de la vapeur d'eau est observé [51]. Quand ce pourcentage est élevé, la force de capillarité devient la principale cause de l'adhésion [188].

En fait, la force de capillarité dépend du liquide utilisé à travers sa tension de surface γ , du volume V constituant le pont liquide, de la distance z séparant les deux solides, et des matériaux des solides qui, combinés au liquide choisi, conduisent à l'angle de contact θ_1 formé par le liquide et le composant d'une part, et θ_2 entre le liquide et le manipulateur d'autre part. En considérant par exemple l'interaction en figure 2.23 entre un plan et une sphère de rayon R où les angles de contact sont égaux entre eux ($\theta_1 = \theta_2 = \theta$), le volume V est constant et la hauteur d'immersion d est petite, la force capillaire peut alors être exprimée par [144] :

$$F = \frac{4\pi R\gamma \cos\theta}{1 + z/d} \quad (2.13)$$

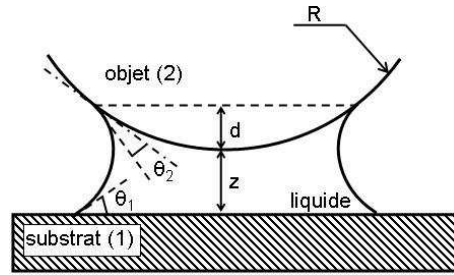


FIGURE 2.23 – Ménisque liquide formé entre une sphère et un plan horizontal.

La force de capillarité peut donc être utilisée comme moyen de préhension. Elle est introduite soit par l'humidité dans l'environnement, soit par une couche de liquide entre le préhenseur et l'objet. Cette stratégie présente une particularité quand le pont liquide est gelé capturant ainsi l'objet dans une petite couche de glace. La libération de l'objet est obtenue par la liquéfaction de la glace. Dans ces cas, le problème du lâcher consiste alors à rompre le pont liquide lors de la dépose de l'objet afin qu'il ne reste pas collé au préhenseur.

Ces préhenseurs sont capables de fournir des forces très importantes par rapport aux dimensions des préhenseurs et des objets (typiquement $100 \mu\text{N}$ pour des objets de dimension caractéristique de l'ordre de $500 \mu\text{m}$). Or, contrairement aux systèmes de manipulation par pince, seule une direction d'accès vers l'objet est nécessaire. Dans cette section, nous présentons quelques exemples des microprehenseurs utilisant uniquement des ponts liquides.

L'une des premières manipulations exploitant la force de capillarité en utilisant un apport de liquide entre l'objet et le préhenseur a été effectuée par Grutzeck et Kieseeweter. Ils ont manipulé des composants en silicium de $4 \times 4 \text{ mm}^2$ et $600 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Ils ont montré que l'eau exerçait une force 100 fois plus importante que la force de gravité

sur ces composants sans pourtant endommager les objets [83].

Plus récemment, Biganzoli *et al.* ont étudié l'influence du rayon de courbure du préhenseur sur la force de capillarité entre une surface sphérique et un objet plat unis par un ménisque liquide [16]. La partie active du préhenseur est une membrane circulaire élastique de $800\text{ }\mu\text{m}$ de rayon, comme le schématise la figure 2.24, capable de modifier son rayon de courbure. La force de capillarité augmente quand le rayon de courbure augmente, en atteignant sa valeur maximale quand le rayon s'approche de l'infini (plan). De ce fait, l'amplitude de la force peut être contrôlée à travers le rayon de courbure de la surface mouillée. Les objets peuvent donc être saisis quand le préhenseur a un rayon important, et déposés quand ce rayon diminue. La déformation de la membrane est maîtrisée par l'injection d'un liquide incompressible (l'eau). La stratégie de préhension est la suivante :

- une goutte de liquide (eau, huile, eau savonneuse, alcool) est déposée sur l'objet ;
- la membrane avec une configuration plate s'approche de l'objet et le saisit à l'aide de la goutte placée sur l'objet ;
- l'objet est repositionné et libéré en augmentant le rayon de courbure de la membrane.

Ce prototype a aussi montré une bonne fiabilité lors des expérimentations utilisant des objets ayant différentes formes et poids compris entre 48 et 198 mg. Cependant, en raisons des contraintes technologiques, le préhenseur n'a pas encore été miniaturisé.

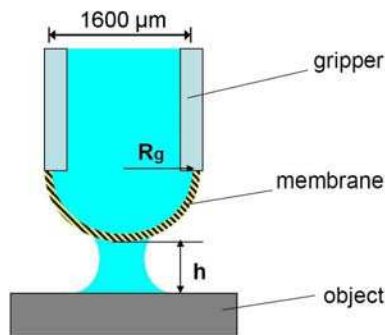


FIGURE 2.24 – Schéma de la membrane déformable du préhenseur capillaire réalisé par Biganzoli *et al.* [16] (Institute of Industrial Technology and Automation, Italie).

La manipulation de micro-objets ($100 \times 100 \times 20\text{ }\mu\text{m}^3$) avec un autre type de préhenseur capillaire a été effectuée par Schmid *et al.* et est illustré en figure 2.25 [161]. Il consiste en un cylindre conique tronqué de $300\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre et un angle de 20° . Le pont liquide est obtenu en trempant le préhenseur dans le liquide (huile L23). D'autres tests ont aussi été effectués avec des composants de $1 \times 1\text{ mm}^2$ et un préhenseur de $500\text{ }\mu\text{m}$. Dans les deux cas, les objets doivent être déposés sur une surface collante afin de ne pas adhérer au préhenseur lors de la tentative de dépose.

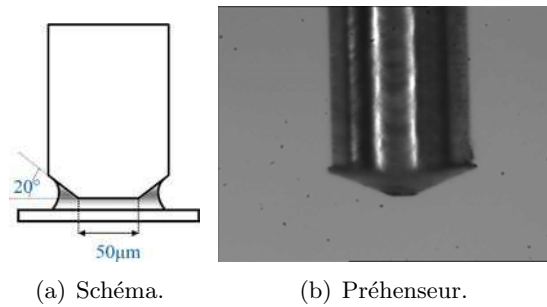


FIGURE 2.25 – Préhenseur capillaire conique tronqué de $300\ \mu\text{m}$ de diamètre, proposé par Schmid *et al.* [161] (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse).

Une étude approfondie de la manipulation des micro-objets en utilisant les effets de la tension de surface a été menée par P. Lambert. D'après cette analyse, les facteurs qui influencent directement la saisie sont : les angles de contact du liquide, le volume du liquide, la géométrie du préhenseur, la tension de surface du liquide, et la distance de séparation entre le composant et le préhenseur [118]. Ces résultats ont servi à développer une stratégie de manipulation appliquée aux billes d'une montre, dont le diamètre est de 300 et $500\ \mu\text{m}$. Cette stratégie est schématisée en figure 2.26 : la force de préhension est fournie par la force de capillarité, tandis que la relâche est assurée par le mouvement latéral du préhenseur une fois que la bille est placée dans un orifice. Pour déposer du liquide dans le préhenseur, celui-ci est trempé dans le liquide. Cette technique offre une bonne répétabilité du volume de liquide transféré, et les forces obtenues sont largement suffisantes par rapport aux poids des billes, par exemple $150\ \mu\text{N}$ comparé au poids de l'ordre de $4\ \mu\text{N}$.

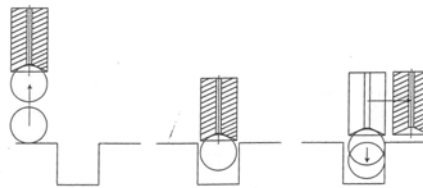


FIGURE 2.26 – Stratégie de manipulation par capillarité des billes de roulement d'une montre [119] (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse).

La capillarité est généralement exploitée en utilisant des gouttes de liquide dans un milieu aérien. Il est également possible d'exploiter celle-ci en utilisant des bulles d'air dans un milieu liquide. Nos contributions dans ce domaine sont reportées à la section 3.2.4, page 69 concernant la modélisation des bulles et section 5.1.3, page 105 concernant leur exploitation en micro-actionnement.

2.4 Synthèse et proposition d'étude du milieu liquide

L'état de l'art en micromanipulation laisse apparaître une grande diversité de principes physiques utilisés et de technologies développées. Toutefois deux grandes tendances se détachent.

Premièrement, la taille des objets étudiés est directement liée au contexte applicatif : les travaux sur la manipulation de cellules biologiques portent majoritairement sur l'*iso-micromonde*⁷ alors que la manipulation d'objets artificiels est majoritairement étudiée dans le *hecto-micromonde*⁷ et plus rarement dans le *deca-micromonde*⁷.

Deuxièmement, le choix de l'environnement (aérien ou liquide) est également lié à l'application. Les objets biologiques sont nécessairement manipulés dans un milieu aqueux et les objets artificiels sont manipulés dans l'air.

Ce bilan laisse apparaître la faible quantité de stratégies *fiables* de micromanipulation *robotique* d'objets artificiels sous la limite de $100\ \mu\text{m}$ et l'absence de réalisation de micro-assemblage *robotique* en milieu liquide. Les approches par auto-assemblage permettent de réaliser des structures composées d'objets de taille inférieure à $100\ \mu\text{m}$ mais la fiabilité de ces processus est discutable. Une discussion sur le positionnement relatif de l'auto-assemblage et de l'assemblage robotique est proposée en section 1.1.2, page 3. (voir figure 2.27). Mon approche originale consiste à proposer de franchir la limite dimensionnelle des $100\ \mu\text{m}$ en proposant de réaliser les micro-assemblages dans un environnement liquide.

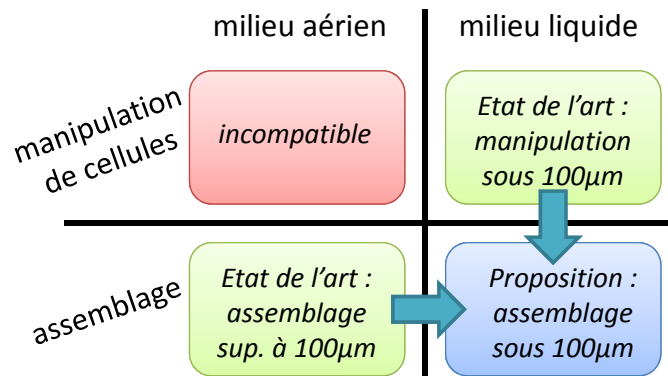


FIGURE 2.27 – Positionnement de mon domaine d'étude parmi les approches robotiques actuelles

L'utilisation d'un médium liquide représente, en effet, une alternative nouvelle et entraîne une diminution sensible des perturbations dues aux efforts d'adhésion et aux forces électrostatiques et l'absence de ponts capillaires non désirés. L'immersion engendre également l'accroissement des efforts visqueux, offrant l'avantage de stabiliser le comportement des micro-objets et facilitant leur assemblage. De plus, le contrôle des propriétés chimiques du milieu est susceptible de permettre le contrôle des effets d'adhésion. L'uti-

7. voir définition en section 1.1.1, page 2

lisation d'un environnement liquide permet donc de lever des contraintes physiques et ouvre un champ d'étude nouveau et prometteur pour le micro-assemblage.

Il est à noter que cette thématique se différencie de la microfluidique dont les objectifs sont l'étude et la réalisation des écoulements dans des microcanaux. L'approche de la microfluidique est par conséquent fondamentalement différente de l'assemblage de micro-objets au sein d'un fluide. Un dernier domaine connexe à nos travaux est la manipulation de cellules biologiques. Le micro-assemblage se différencie également nettement de ces travaux par les contraintes imposées (biocompatibilité, pH, température...) et la nature des objets manipulés (élasticité, fragilité...).

Afin d'établir des stratégies de micro-assemblage adaptées au milieu liquide, deux voies exploratoires pourront être étudiées : (i) des propositions basées sur des principes physiques utilisés en micromanipulation cellulaire, dont la mise en œuvre devra être adaptée aux contraintes spécifiques du micro-assemblage (diélectrophorèse, laser trapping...); (ii) des solutions non utilisées en micromanipulation cellulaire basées sur des principes physiques nouveaux et adaptées au micro-assemblage en milieu liquide (gradient de température, etc.).

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a porté sur une présentation des moyens de micromanipulation qui constituent le contexte de mes travaux scientifiques. J'ai illustré le fait que la micromanipulation portait sur un domaine dimensionnel vaste couvrant plusieurs paradigmes nécessitant des approches diverses. Les principales approches relevées dans la littérature ont été reportées et structurées autour de deux grandes familles que sont les approches avec contact et sans contact. Sur la base de ces travaux, il est apparu que l'étude d'opérations de micromanipulation à des fins de micro-assemblage dans un milieu liquide semblait prometteur. Cette approche par le milieu liquide est la colonne vertébrale de mes travaux présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre 3

Modélisation du comportement des micro-objets

La présentation des travaux actuels en micromanipulation et micro-assemblage établie au chapitre précédent a illustré l'intérêt de réaliser des opérations de micro-assemblage en milieu liquide. Ce chapitre porte sur une analyse détaillée du comportement des micro-objets en milieu liquide. Celle-ci débute par une analyse de l'impact du milieu liquide sur les différentes forces prédominantes aux échelles micrométriques. Les comportements typiques des micro-objets en milieu liquide sont ensuite illustrés par des modèles couplant plusieurs modèles physiques. Enfin, ce chapitre se termine par la description des moyens de caractérisation expérimentale de ces comportements. Les méthodes de modélisation et de caractérisation proposées dans ce chapitre ont été exploitées pour la conception et la commande de stratégies de micromanipulation présentées dans le chapitre suivant.

3.1 Forces prépondérantes dans un milieu liquide

La première étape d'analyse du comportement des micro-objets en milieu liquide a consisté à répertorier les forces prépondérantes appliquées à un micro-objet immergé. Ce travail de synthèse a donné lieu à l'édition d'un livre [73], à l'écriture de chapitres de livre [133–136], à la publication de contributions scientifiques [47, 69–71].

3.1.1 Impact du milieu liquide sur les forces à distance

Le premier type de force usuellement considéré aux échelles micro-nanométriques sont les forces à distances résultant des interactions interparticulaires.

Impact du liquide sur les forces de van-der-Waals

Parmi ces forces à distance, l'interaction de van der Waals est formée de la somme de trois forces interparticulaires. Il s'agit de :

- la force d'induction : elle intervient lors de l'interaction dipôle-dipôle induit et est appelée interaction de Debye (1920) ;
- la force d'orientation : elle intervient lors de l'interaction dipôle-dipôle et est appelée interaction de Keesom (1921) ;
- la force de dispersion : cette interaction existe entre tout atome ou molécule, même neutre, et est appelée interaction de London (1937).

La force de van-der-Waals entre un plan et une sphère de rayon R à une distance D est établie de manière analogue à l'air en fonction de la constante de Hamaker A_{132} caractérisant l'interaction entre les deux éléments 1 et 2 dans un milieu 3 :

$$F_{vdW}(D) = -\frac{A_{123}R}{6D^2} \quad (3.1)$$

La constante de Hamaker A_{132} peut être définie en utilisant les lois de combinaison suivantes à partir des constantes de Hamaker de chacun des matériaux :

$$A_{132} \simeq (\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}})(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}) \quad (3.2)$$

Le tableau 3.1 donne quelques exemples de valeur de constantes de Hamaker mesurée pour différents matériaux dans l'air et dans l'eau. Ceci montre une réduction sensible des force de van-der-Waals lors de l'immersion.

Matériaux	Air A_{11}	Eau A_{131}
Or	40	30
Argent	50	40
Al_2O_3	16.8	4.4
Cuivre	40	30

TABLE 3.1 – Valeurs de constantes de Hamaker $A \times 10^{-20} J$ [155]

Modèles de la double couche électrique

La double couche électrique est spécifique aux environnements liquides et est liée au chargement électrique des surfaces en milieu liquide. Les interactions électrostatiques sont dues à la présence de charges fixes ou induites à la surface des particules. En milieu polaire, les principaux mécanismes de chargement électrique sont :

- la dissociation de groupes surfaciques (par exemple $-\text{COOH} \rightleftharpoons -\text{COO}^- + \text{H}^+$) ;
- l'adsorption d'ions, de surfactants ioniques et/ou de polymères chargés provenant de la solution (ou de particules insérées) sur une surface non chargée auparavant.

Ces charges de surface attirent les ions de charge opposée contenus dans le milieu liquide. Ceux-ci forment ainsi une région de contre-ions autour de l'interface et assurent la condition d'électroneutralité globale. La longueur caractéristique de la compensation

de la charge de surface, appelée longueur d'écran, dépend de la concentration des ions. Dans le cas des solutions colloïdales liquides¹ notamment, la concentration dépasse habituellement 10^{-7} mol/l, et par conséquent la longueur d'écran est comparable ou plus petite que la taille des particules. Dans ce cas, une double couche électrique (EDL²) se forme, constituée par la charge de surface et sa contre-charge associée. Une synthèse des modèles existants est reportée en annexe C, page 141.

La contribution de la double couche entre deux sphères de rayon R_1 et R_2 distantes de z peut³ être représentée par la formule HHF [93] :

$$F_{dc\ ss} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_3\kappa}{1 - e^{-2\kappa z}} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (\pm(\psi_{s1}^2 + \psi_{s2}^2)e^{-2\kappa z} + 2\psi_{s1}\psi_{s2}e^{-\kappa z}) \quad (3.3)$$

où le signe $\pm$ dépend des conditions aux frontières : signe du haut pour des surfaces à charge constante (c.c.) et signe du bas pour des surfaces à potentiel constant (p.c) ; $\epsilon_0\epsilon_3$ représente la permittivité électrique absolue du milieu, ψ_{si} le potentiel du matériau i , κ^{-1} la longueur de Debye :

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{\epsilon_0\epsilon_3 kT}{\sum q_i^2 c_i} \right)^{1/2}, \quad (3.4)$$

fonction des n types d'ions de la solution de concentration c_i et de charge q_i et de la constante k de Boltzmann.

Le modèle DLVO

La théorie DLVO suppose que l'interaction totale entre deux surfaces soit la somme de la répulsion de double-couche et de l'attraction de van der Waals. Par exemple, dans le cas d'une sphère et d'un plan à potentiel faible, la force est égale à :

$$F = F_{vdW} + F_{dc} \quad (3.5)$$

Les deux forces sont déterminées par les expressions présentées dans les deux précédentes sections. Contrairement à l'interaction de double-couche, celle de van der Waals est beaucoup moins sensible aux variations de concentration et de pH de l'électrolyte. On peut donc la considérer fixe en première approximation. De plus, elle dépasse toujours la répulsion de double couche à courtes distances puisque $V_{vdW} \propto -1/z^n$. Ainsi, selon la concentration de l'électrolyte et le potentiel ou la densité de charge de surface, différents scénarios, illustrés schématiquement sur la figure 3.1, peuvent se produire [101] :

- a) les surfaces se repoussent fortement ; les colloïdes sont dits thermodynamiquement stables ;
- b) les surfaces peuvent se stabiliser à un minimum secondaire si celui-ci est assez profond mais les colloïdes restent cinétiquement stables ;

1. Liquide contenant en suspension des particules de taille entre 1 nm et 1 μ m.

2. Acronyme de l'anglais *Electric Double Layer*.

3. sous réserve des hypothèses explicitées dans l'annexe C, page 141

- c) les surfaces se stabilisent au minimum secondaire ; les colloïdes s'agglomèrent lentement. On parle de floculation : formation de « floes », c'est à dire de particules agglomérées de tailles suffisantes pour décantier ou flotter. Une simple agitation peut annuler cette floculation ;
- d) à la concentration critique de coagulation, les surfaces peuvent rester dans le minimum secondaire ou coaguler ; les colloïdes s'agglomèrent rapidement ;
- e) les surfaces et les colloïdes coagulent rapidement (formation d'un précipité).

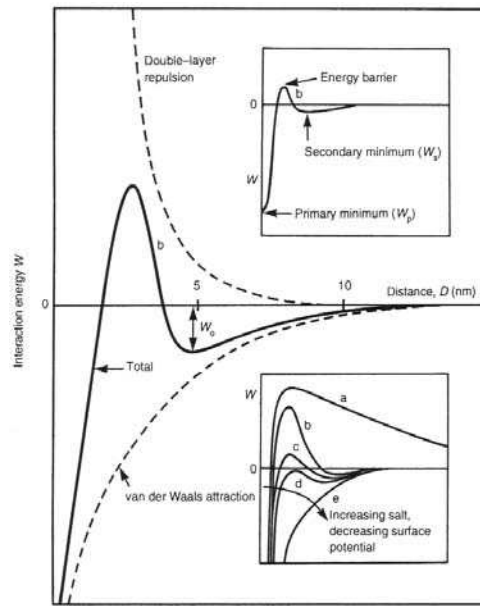


FIGURE 3.1 – Profils schématiques d'énergie d'interaction DLVO en fonction de la distance de séparation [101]

Enfin de nombreux écarts⁴ entre la théorie DLVO et les observations expérimentales ont été signalés [92]. Ces divergences sont dues à des interactions non-DLVO de très courte portée telles que les forces d'hydratation en milieu aqueux [189], les forces stériques⁵ et les forces hydrodynamiques. La prise en compte de ces interactions fait aussi l'objet de l'approche *DLVO étendue* ou *XDLVO* [21, 22]. Dans la mesure où la portée de ces effets est de l'ordre du nanomètre, leur impact en microrobotique n'est sensible que lors du contact entre deux objets. Cette théorie sera donc détaillée dans la section suivante portant sur les forces d'adhésion au contact.

4. La théorie DLVO prédit une stabilité ou instabilité contradictoire par rapport à l'expérience.

5. L'adsorption de polymères neutres sur les particules créent une répulsion stérique, due aux interactions répulsives entre les chaînes de polymères qui s'enchevêtrent.

3.1.2 Impact du liquide sur la force de *pull-off*

La force de pull-off caractérise la force nécessaire pour rompre la surface de contact entre deux objets en contact.

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

$$W_{12} : \text{travail d'adhésion} \quad (3.6)$$

$$W_{11} : \text{travail de cohésion} \quad (3.7)$$

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

$$\gamma_1 = \frac{1}{2}W_{11}.$$

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

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2}W_{11} + \frac{1}{2}W_{22} - W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - W_{12}.$$

La relation de combinaison la plus usuelle est obtenue à partir d'une approche thermodynamique. La formule suivante, sous forme combinée est alors [101] :

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_1 \gamma_2}, \quad (3.8)$$

$$W_{12} = 2\sqrt{\gamma_1 \gamma_2}. \quad (3.9)$$

Cas d'un milieu apolaire

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

$$W_{132} = W_{12} + W_{33} - W_{13} - W_{23} = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12}. \quad (3.10)$$

Par exemple dans le cas d'un contact SiO_2-SiO_2 ($\gamma_{SiO_2} = 290 \text{ mJ.m}^{-1}$ [155]), les énergies de surface obtenues par les équations ci-dessus valent :

$$W_{11} = 580 \text{ mJ.m}^{-1}, \quad W_{131} = 146 \text{ mJ.m}^{-1}. \quad (3.11)$$

Dans cet exemple, la force de *pull-off* est réduite dans l'eau comparativement à l'air. Les valeurs courantes d'énergies de surface de solide sont aux alentours de $1\,000 \text{ mJ.m}^{-1}$ et la réduction théorique de la force de *pull-off* de l'ordre de 50 % à 80 %.

Cas d'un milieu polaire

Dans le cas d'un milieu polaire, les forces de solvation (ou d'hydratation dans l'eau) sont à considérer. Celles-ci sont aussi appelées interactions acide-base de Lewis. Dans l'eau, ces forces seront attractives pour des surfaces hydrophobes et répulsives pour des surfaces hydrophiles. Ainsi, les composantes de l'énergie de surface peuvent être alors classées en deux catégories [77, 78] :

- la première regroupant les interactions dispersives dites de Lifshitz van der Waals, désignées par l'exposant LW ;
- la seconde regroupant les interactions descriptives des mécanismes donneur – accepteur d'électrons. Ces interactions correspondent à la théorie acido-basique de Lewis et sont désignées par l'exposant AB [61].

On peut écrire avec ces hypothèses :

$$\gamma_i = \gamma_i^{AB} + \gamma_i^{LW}. \quad (3.12)$$

Dans la théorie de Lewis, une base est un composé porteur d'un doublet électronique et donc donneur d'électron. Un acide est un composé porteur d'une lacune et donc accepteur d'électron. Cette approche nous permet de qualifier le caractère acido-basique à l'aide de deux paramètres, γ^+ et γ^- , où γ^+ est le paramètre accepteur d'électron (acide de Lewis) et γ^- est le paramètre donneur d'électron (base de Lewis). La composante γ^{AB} de l'énergie de surface est fonction des paramètres γ^+ et γ^- suivant la relation :

$$\gamma_i^{AB} = 2\sqrt{\gamma_i^+ \gamma_i^-}. \quad (3.13)$$

L'énergie de surface totale s'écrit donc :

$$\gamma = \gamma_i^{AB} + \gamma^{LW} = \gamma_i^{LW} + 2\sqrt{\gamma_i^+ \gamma_i^-}. \quad (3.14)$$

Ainsi un liquide polaire est donc caractérisé par trois tensions de surface γ^{LW} , γ^+ et γ^- . Dans le cas de l'eau, on considère par convention que :

$$\gamma_{eau}^{LW} = 21.8 \text{ mN.m}^{-1}, \quad \gamma_{eau}^+ = \gamma_{eau}^- = 25.5 \text{ mN.m}^{-1}. \quad (3.15)$$

On peut vérifier que l'on retrouve la tension du surface globale de l'eau exprimée par l'équation (3.12) d'une valeur 72.8 mN.m^{-1} .

On peut donc écrire l'énergie interfaciale dans le cas d'un contact entre un solide i et un liquide 3 :

$$\gamma_{i3} = \gamma_{i3}^{AB} + \gamma_{i3}^{LW} \quad (3.16)$$

avec les expressions des composantes proposées par Good :

$$\gamma_{i3}^{AB} = 2 \left(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_3^+ \gamma_3^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_S^-} \right) \quad (3.17)$$

$$\gamma_{i3}^{LW} = \left(\sqrt{\gamma_S^{LW}} - \sqrt{\gamma_3^{LW}} \right)^2 \quad (3.18)$$

Enfin, l'équation de composition (3.10) est toujours valable dans le cas des milieux polaires et permet de calculer l'énergie nécessaire pour séparer deux surfaces solides dans un milieu polaire, en considérant (3.16).

Le modèle JKR

Sur la base du calcul de l'énergie de contact W_{132} , la force dit de *pull-off* F_{PO} nécessaire pour séparer deux objets en contact peut être établie. En 1971, Johnson, Kendall et Roberts ont proposé la théorie JKR [103] qui régit la mécanique du contact entre une sphère de rayon R en contact avec un plan sous l'effet d'une force extérieure F . Le rayon a du disque de contact et la distance d'interpénétration δ sont définies par :

$$a^3 = \frac{R}{K} \left(F + 3\pi RW + \sqrt{6\pi RW F + (3\pi WR)^2} \right) \quad (3.19)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} - \sqrt{\frac{8\pi W a}{3K}} \quad (3.20)$$

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 :

$$F_{PO} = \frac{3}{2} \pi RW. \quad (3.21)$$

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, d'un point de vue théorique, une anomalie, puisqu'elle est basée sur une tension infinie au bord de la zone de contact.

Le modèle DMT

En 1975, Derjaguin, Muller et Toporov ont proposé une autre théorie dite DMT [49] 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 :

$$a^3 = \frac{R}{K} (F + 2\pi WR) \quad (3.22)$$

Sous charge nulle, ce rayon vaut :

$$a_0^3 = \frac{2\pi WR^2}{K} \quad (3.23)$$

Cette théorie prévoit qu'il est nécessaire de fournir une force F_{PO} , pour séparer les solides exprimée par :

$$F_{PO} = 2\pi RW \quad (3.24)$$

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.

3.1.3 Effets hydrodynamiques sur la manipulation immergée

Domaine fluide à considérer en micromanipulation

En fonction de l'échelle considérée, les lois de comportement des fluides s'expriment de manières différentes. Cette partie présente le “domaine fluide” dans lequel les tâches de micromanipulation ont lieu à partir du nombre de Reynolds caractérisant le rapport entre les phénomènes inertiels et les phénomènes visqueux :

$$R_e = \frac{\rho_3 V d}{\mu_3} \quad \text{avec :} \quad \begin{cases} \rho_3 & : \text{la masse volumique du fluide} \\ \mu_3 & : \text{la viscosité dynamique du fluide} \\ V & : \text{la vitesse de l'écoulement} \\ d & : \text{la dimension caractéristique de l'écoulement} \end{cases} \quad (3.25)$$

En dynamique des fluides, on peut référencer quatre grands domaines physiques [166] fonctions de l'échelle considérée l et du nombre de Reynolds R_e :

- la nanofluidique : dimension caractéristique en dessous de la distance intermoléculaire $l \simeq 5 \text{ nm}$,
- la microfluidique : effets visqueux supérieurs aux effets inertiels $R_e < 1$ (équation de Stokes),
- la minifluidique : fluide des écoulements laminaires $1 < Re < 2000$ (équation de Navier-Stokes),
- la fluidique des écoulements turbulents.

Les domaines fluidiques dépendant du nombre de Reynolds et par conséquent de la vitesse de l'écoulement, il est nécessaire de déterminer l'effet d'échelle sur la vitesse des fluides⁶. La vitesse moyenne d'un fluide de viscosité dynamique μ_3 dans une canalisation de rayon r et de longueur l soumis à une différence de pression P est donnée par la loi de Poiseuille⁷ :

$$V = \frac{r^2 P}{8\mu_3 l} \quad (3.26)$$

Le rayon r et la longueur l du tube sont proportionnels à la diminution d'échelle l . La vitesse V du fluide est donc également proportionnelle à la diminution d'échelle

6. La démonstration de l'effet d'échelle sur la vitesse d'un écoulement aboutissant à l'équation (3.27) est extraite de [166], pages 52-53.

7. La loi de Poiseuille est valable dans l'ensemble du régime laminaire (microfluidique et minifluidique). Il est à noter que le théorème de Bernoulli basé sur la prédominance des effets inertiels sur les effets visqueux n'est évidemment pas valide dans le domaine de la microfluidique.

l [166, 192] :

$$V \sim l \quad (3.27)$$

D'après des valeurs typiques relevées dans la littérature [13, 100, 116, 132, 152], les vitesses engendrées sont globalement comprises entre V_1 et V_2 définies ci-dessous :

$$V_1 = K_1.l \text{ avec : } K_1 = 10^3 \text{ s}^{-1} \quad (3.28)$$

$$V_2 = K_2.l \text{ avec : } K_2 = 1 \text{ s}^{-1} \quad (3.29)$$

On obtient ainsi la figure 3.2, synthétisant les lois de comportement fluide en fonction de l'échelle considérée l . Les travaux en microrobotique se situent par conséquent à la frontière entre la microfluidique et la minifluidique. Les écoulements sont dans ces deux domaines définis par la loi de Navier-Stokes.

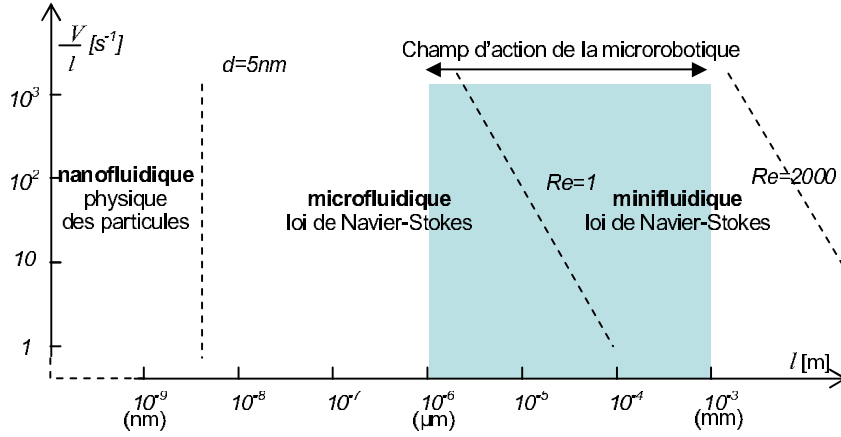


FIGURE 3.2 – Domaine de la fluidique en fonction des dimensions d'objet considérées

Lois d'écoulement

Dans le domaine de la minifluidique et de la microfluidique, les écoulements incompressibles visqueux sont définis par l'équation de Navier-Stokes (3.30) et par l'équation d'incompressibilité (3.31) :

$$\mu_3 \cdot \Delta \vec{V} - \vec{\nabla} p = \rho_3 \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \vec{V} \cdot \vec{V} \right) \quad (3.30)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{V}) = 0 \quad (3.31)$$

Ces lois de comportement font intervenir la vitesse $\vec{V}$ et la pression p du fluide. Le fluide est caractérisé par :

- sa masse volumique ρ_3 et,

propriété	notation	eau	air
masse volumique	ρ_3	1000 kg.m^{-3}	$1,2 \text{ kg.m}^{-3}$
viscosité dynamique	μ_3 (ou η_3)	$1 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$18,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
viscosité cinématique	$\nu_3 = \frac{\mu_3}{\rho_3}$	$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$15,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

TABLE 3.2 – Masse volumique et viscosités de l’eau et de l’air dans les conditions normales [24]

– sa viscosité dynamique μ_3 (voire η_3) ou sa viscosité cinématique $\nu_3 = \frac{\mu_3}{\rho_3}$.

Le tableau 3.2 présente les valeurs de ces paramètres pour l’eau et l’air dans les conditions normales.

La résolution des équations de Navier-Stokes (3.30- 3.31) pour une géométrie et des conditions aux limites données peut s’effectuer via des méthodes de résolution à éléments finis⁸. Dans le cas de la microfluidique, les phénomènes inertiels sont négligeables et l’équation de Navier-Stokes (3.30) est simplifiable à l’équation de Stokes (3.32) qui présente la particularité d’être linéaire :

$$\mu_3 \cdot \Delta \vec{V} - \vec{\nabla} p = 0 \quad (3.32)$$

Efforts appliqués

De manière générale, l’effort $d\vec{F}$ appliqué à une surface élémentaire dS de normale unitaire orientée en direction du fluide $\vec{n}$ s’exprime en fonction du tenseur des contraintes σ dans le fluide :

$$d\vec{F} = \sigma \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (3.33)$$

Le tenseur des contraintes σ dans le fluide vérifie :

$$\sigma = -pI + \mu_3 \cdot (\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla} \vec{V}^t) \quad (3.34)$$

donc :

$$d\vec{F} = \left(-p\vec{n} + \mu_3 \cdot (\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla} \vec{V}^t) \cdot \vec{n} \right) \cdot dS \quad (3.35)$$

Cette force peut être décomposée en deux types de force :

- la force de pression (premier terme en p),
- la force visqueuse (deuxième terme en μ_3).

Dans la grande majorité des cas, les deux types de forces sont à considérer et aucune des deux forces n’est négligeable devant l’autre.

La loi de Stokes permet de déterminer l’effort de traînée appliqué à un objet plongé dans un écoulement à vitesse V , d’un fluide de viscosité dynamique μ_3 :

$$\vec{F} = -k \cdot \mu_3 \cdot \vec{V}, \quad (3.36)$$

8. Exemples de logiciel : Fluent, Comsol multiphysics.

avec k dépendant uniquement de la géométrie. A titre d'exemple dans le cas d'une sphère de diamètre d_1 :

$$k = 3\pi d_1. \quad (3.37)$$

La loi de Stokes est valable en microfluidique ($Re < 1$) et peut être étendue dans le cas d'écoulement possédant un nombre de Reynolds Re inférieur à 10. La notion de C_x permettant de calculer l'effort de traînée dans des écoulements à grands nombres de Reynolds n'est pas valable⁹ dans le cas de la microfluidique.

Impact sur le comportement des micro-objets

Les effets inertiels étant négligeables dans le micromonde, les accélérations subies par les micro-objets sont très importantes. La vitesse des micro-objets croît par conséquent dans un court laps de temps. Par conséquent, les objets sont à même d'atteindre rapidement des vitesses importantes et les trajectoires des micro-objets peuvent s'avérer difficiles à contrôler. Dans la plupart des cas, la vitesse des micro-objets est limitée non pas par effet inertiel mais par les effets visqueux¹⁰. L'augmentation des forces hydrodynamiques due au milieu liquide induit donc une diminution de la vitesse maximale des micro-objets. Cet effet tend donc à stabiliser le comportement des micro-objets.

3.1.4 Impact sur les autres forces

Impact du milieu liquide sur la tension de surface

Les effets de tension de surface apparaissant entre deux objets lorsqu'un pont capillaire s'établit entre les deux sont supprimés pour un objet complètement immergé. En revanche dans le cadre de la micromanipulation en milieu liquide, les effets de la tension de surface à la surface air-liquide doivent être considérés. Les forces de tension de surface apparaissent effectivement lors du franchissement de la surface air-liquide par un objet pouvant perturber :

- l'introduction des micro-objets possédant des propriétés de surfaces hydrophobes ;
- le comportement des préhenseurs lors du franchissement de la surface air-liquide.

L'immersion d'une scène de micromanipulation ouvre également vers l'étude des bulles d'air immergées dont l'originalité en terme de comportement sera présentée à la section 3.2.4, page 69, et la potentialité applicative à la section 5.1.3, page 105.

Impact du liquide sur la force électrostatique

Les forces électrostatiques provoquées par l'apparition de charges par triboélectrification engendrent des perturbations sur le comportement des micro-objets lors de leur manipulation. Leur étude est par conséquent un point clef en micromanipulation. Or,

9. La notion de C_x est parfois utilisée en microfluidique, en choisissant un C_x fonction du nombre de Reynolds Re . L'expression obtenue est équivalente à la loi de Stokes, mais n'explique pas clairement le fait que la force de traînée est proportionnelle à la vitesse.

10. voir exemple dans la section 3.2.1, page 56.

celles-ci sont particulièrement difficiles à prédire puisque la répartition de charges sur une scène de micromanipulation est souvent très mal connue et non mesurable. Deux phénomènes tendent à réduire les perturbations électrostatiques lors de l'utilisation de liquide en micromanipulation. Les forces électrostatiques sont fonction de la quantité de charges en présence et inversement proportionnelles à la constante diélectrique du milieu. Les liquides possèdent des constantes diélectriques supérieures à celles de l'air et par conséquent réduisent les efforts électrostatiques pour une configuration de charges donnée (voir tableau 3.3). De plus, la plupart des liquides possèdent des conductivités nettement supérieures à celles de l'air facilitant la dispersion des charges. Le niveau de charge est donc réduit dans un liquide diminuant de fait les forces électrostatiques perturbatrices.

Paramètres électriques	Air	Eau
Constante diélectrique relative ϵ_3	~ 1	80.4
Conductivité	$10^{-7} S.m^{-1}$	$> 10^{-4} S.m^{-1}$

TABLE 3.3 – Constantes diélectriques et conductivités électriques de l'air et de l'eau

3.2 Analyses multiphysiques des comportements à l'échelle micrométrique

Sur la base des modèles développés ci-dessus, mes travaux ont conduit à l'établissement de plusieurs modèles de comportement validés expérimentalement. Ceux-ci sont basés sur un couplage entre plusieurs effets physiques prédominants à l'échelle micrométrique.

3.2.1 Trajectoire d'un objet en micromanipulation sans contact

Cette section illustre une démarche dont l'objectif est la constitution d'un modèle de comportement des systèmes de micromanipulation sans contact utilisable pour l'étude de la commande en boucle fermée de ces systèmes. La trajectoire d'un objet dans un dispositif de manipulation sans contact est régi par l'équilibre entre la force visqueuse induite par le milieu environnant et la force motrice qui dépend du principe physique utilisé (pince optique, diélectrophorèse, magnétophorèse). Ces dispositifs sont caractérisés par une non-linéarité de la force motrice et engendrent des trajectoires avec des temps de réponses faibles de l'ordre de la milliseconde. Ces comportements sont illustrés ici par l'analyse de la trajectoire d'un objet dans un dispositif de micromanipulation sans contact par diélectrophorèse.

Comportement dynamique d'un micro-objet

Comme explicité en section 2.2.2, page 22, la force de diélectrophorèse représente la valeur moyenne de la force électrostatique appliquée par un champ électrique alternatif

$\vec{E}$ sur une microbille diélectrique [25, 66] :

$$\vec{F}_{DEP} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_p r^3 \text{Re}[K(\omega)] \vec{\nabla} \mathbb{E}^2. \quad (3.38)$$

où $K(\omega)$ est le coefficient de Clausius-Mossotti :

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*}; \quad (3.39)$$

et

$$\epsilon^* = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}; \quad (3.40)$$

où ϵ sont les permittivités électriques, σ sont les conductivités électriques, l'index 0 réfère au vide, l'index m réfère au milieu environnant et l'index p réfère à la microbille, r est le rayon de la microbille, ω est la pulsation du signal électrique, $\vec{\nabla}$ est l'opérateur gradient et $\mathbb{E}$ est la valeur efficace du champ électrique $\vec{E}$ à hauteur de la microbille.

Dans notre cas, le champ électrique $\vec{E}$ est créé en appliquant des tensions alternatives aux quatre électrodes représentées sur la figure 3.3.

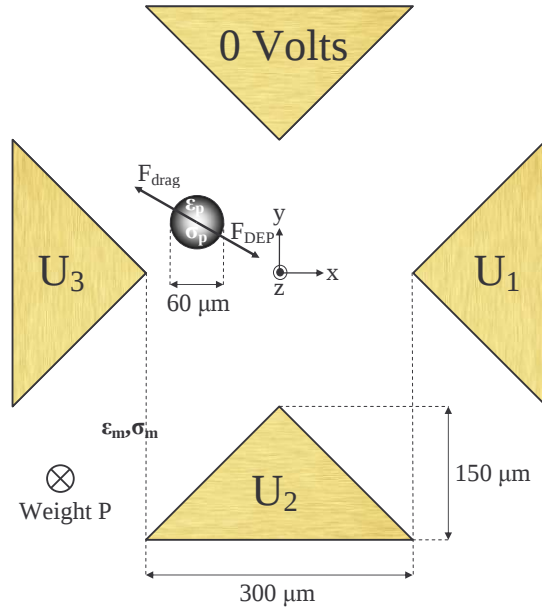


FIGURE 3.3 – Exemple de structures d'électrodes permettant la manipulation sans contact de micro-objets par diélectrophorèse

Le principe fondamental de la dynamique liant les forces appliquées à un corps à son accélération reste valable aux échelles micrométriques et régit donc la trajectoire des micro-objets. Le micro-objet est typiquement soumis à la force motrice (force de diélectrophorèse) $\vec{F}_{DEP}$, la force visqueuse $\vec{F}_{drag}$ (équation (3.36)) et son poids $\vec{P}$ (voir

Fig.3.3). Si on note $X(x, y, z)$ la position dans l'espace de la microbille de rayon r_1 , sa trajectoire vérifie donc :

$$\overrightarrow{F_{DEP}} + \overrightarrow{P} - 6\pi\mu_3r_1\overrightarrow{\dot{X}} = m_1\overrightarrow{\ddot{X}}, \quad (3.41)$$

où μ_3 est la viscosité dynamique du liquide et m_1 la masse de la microbille. Nous avons montré dans [111] que le terme $m_1\overrightarrow{\ddot{X}}$ représentant l'inertie était un terme volumique négligeable devant les deux autres dans le micromonde. Le temps de réponse lié au terme d'accélération est en effet négligeable devant le temps de réponse lié au terme visqueux. La trajectoire de la microbille peut donc être représentée par :

$$\overrightarrow{\dot{X}} = \frac{(\overrightarrow{F_{DEP}} + \overrightarrow{P})}{6\pi\mu_3r_1}. \quad (3.42)$$

La construction d'un modèle liant les tensions d'entrée des électrodes à la position X de la microbille nécessite le calcul du champ électrique $\overrightarrow{E}$ en fonction des tensions appliquées.

Simulation du champ électrique

La simulation du champ électrique alternatif généré par les électrodes consiste à calculer le champ efficace $\overrightarrow{E}$ en fonction des potentiels appliqués sur les électrodes. On considère la valeur efficace¹¹ des potentiels sinusoïdaux appliqués sur les électrodes :

$$[\vartheta_0, \vartheta_1, \dots, \vartheta_n]. \quad (3.43)$$

Les paramètres de commande accessibles pour contrôler la trajectoire de l'objet sont les différences de potentiels :

$$U = [U_1 = \vartheta_1 - \vartheta_0, \dots, U_n = \vartheta_n - \vartheta_0]. \quad (3.44)$$

La détermination du champ $\overrightarrow{E}$ dans l'espace en fonction du vecteur U ne peut s'effectuer sur la base d'un calcul analytique puisque les électrodes ne peuvent être assimilés à des éléments ponctuels. La solution la plus couramment retenue consiste à effectuer une simulation par éléments finis qui autorise la prise en compte de diverses géométries d'électrodes. Ces simulations sont particulièrement intéressantes pour obtenir une trajectoire avec une entrée U constante. Toutefois, l'objectif de notre démarche étant de construire un modèle du comportement afin d'étudier la commande de celui-ci, la grandeur de commande U doit pouvoir évoluer durant la simulation du comportement. La méthode par éléments finis doit par conséquent être enrichie de manière à obtenir un modèle de comportement utilisable pour la synthèse de lois de commande.

Le principe général de l'approche que nous avons proposée est d'établir une base de

11. Notre simulateur se limite à des champs électriques générés par des tensions alternatives qui ne possèdent pas de déphasage, la connaissance des valeurs efficaces des potentiels suffit donc à caractériser notre problème

donnée suffisante reposant sur n simulations éléments finis obtenues sur une base algébrique de l'espace U et d'utiliser le principe de superposition pour simuler le champ $\vec{\mathbb{E}}$ quelle que soit la tension U . La base de données peut concrètement consister en un stockage de valeurs de champ $\vec{\mathbb{E}}$ dans l'espace, de valeurs de potentiel V dans l'espace ou de charges Q sur les électrodes. Nous avons montré qu'il semble plus intéressant de retenir cette dernière solution [111].

Dans ce cas, les électrodes sont considérées comme une matrice d'éléments de surface ds et de centre $P(r, s)$. Le champ électrique $\vec{\mathbb{E}}$ est la somme des contributions des charges élémentaires $Q_{r,s}$ de chaque élément considéré comme ponctuel :

$$\vec{\mathbb{E}}(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\epsilon_m} \sum_{r=1}^{e_x} \sum_{s=1}^{e_y} Q_{r,s} \cdot \frac{\overrightarrow{P(r, s)M(x, y, z)}}{\left\| \overrightarrow{P(r, s)M(x, y, z)} \right\|^3} ds, \quad (3.45)$$

La charge élémentaire $Q_{r,s}$ est liée au potentiel U par le principe de superposition :

$$Q_{r,s} = \sum_{m=1}^n C_{r,s,m} \cdot U_m. \quad (3.46)$$

où $C_{r,s,m}$ représente les capacités élémentaires qui ne dépendent que de la géométrie et sont par conséquent calculables en prétraitement sur la base de n simulations par éléments finis.

Ainsi, la simulation de la trajectoire $X(t)$ en fonction de la grandeur de commande $U(t)$ nécessite un calcul préliminaire de n simulations par éléments finis afin de construire la matrice de capacité C . A chaque instant t , les équations (3.45) et (3.46) permettent de calculer le champ $\vec{\mathbb{E}}$ à hauteur de la microbille. Les équations (3.38) et (3.42) régissent le comportement dynamique de la position $X(t)$ de la microbille. Un simulateur mettant en œuvre ce principe a été implémenté sur Matlab. Des mesures expérimentales de trajectoire par caméra rapide ont été effectuées en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles dans le cadre du projet PHC Tournesol 'MODIM'. Ces mesures ont permis de comparer avec succès les trajectoires simulées et les trajectoires expérimentales [109, 111].

Analyse du comportement dynamique

Afin d'illustrer les principales caractéristiques du comportement de la microbille, nous allons réduire notre problème à un déplacement suivant une dimension. Nous faisons l'hypothèse que la particule ne se déplace que suivant l'axe $\vec{x}$ décrit figure 3.3. La position X vérifie donc $X = (x, y = 0, z = r_1)$. La tension de commande appliquée doit être symétrique autour de l'axe $\vec{x}$ et donc de la forme :

$$U = [U_{ref} - \delta u, 0, U_{ref} + \delta u]. \quad (3.47)$$

où U_{ref} est une tension fixe (par exemple, 75 V) et δu la grandeur de commande de ce système réduit à un degré de liberté. Nous avons montré sur la base du principe

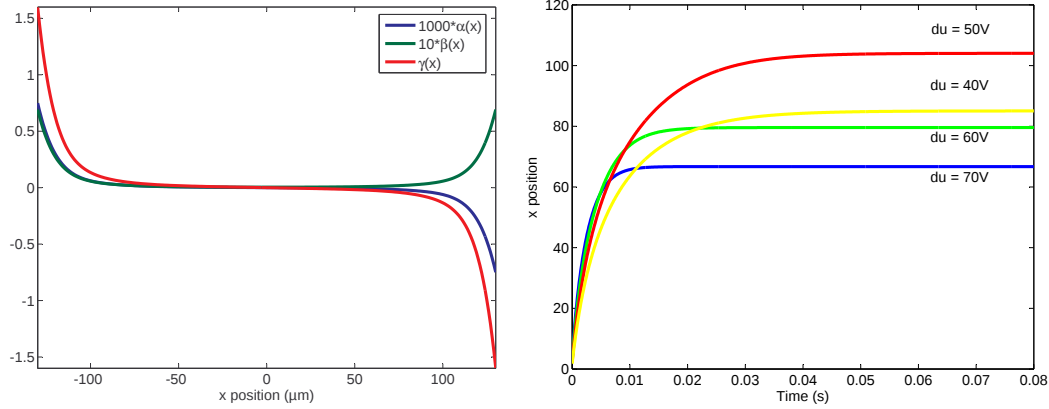
de simulation présenté précédemment que la position $x(t)$ de la trajectoire était régie par [110] :

$$\dot{x} = \alpha(x)\delta u^2 + \beta(x)\delta u + \gamma(x) \quad (3.48)$$

Les fonctions $\alpha(x)$, $\beta(x)$ et $\gamma(x)$ simulées par la méthode présentée ci-dessus sont représentées sur la figure 3.4(a). L'équation (3.48) et la figure 3.4(a) illustrent respectivement une non-linéarité forte du comportement vis-à-vis de la commande et vis-à-vis de la position.

La deuxième particularité du comportement tient dans la dynamique élevée des trajectoires observées essentiellement due au fait que l'inertie est négligeable à ces échelles. La figure 3.4(b) représente des réponses indicielles de la position $x(t)$ pour une position initiale $x_0 = 0\mu m$ et pour différentes amplitudes $\delta u = 70V, 60V, 50V$ et $40V$. Le temps de réponse de l'ordre de $3ms$ est à comparer avec les temps de réponse des moyens de mesure de position de micro-objets qui sont actuellement basés uniquement sur de la vision optique. Le temps de réponse du système est proche de celui du temps de réponse du capteur ($2,5$ ms pour une caméra rapide à 400 images par secondes).

Les non-linéarités du comportement et le sous-échantillonnage de la mesure de la position consiste en un paradigme particulier pour la définition des lois de commande des micromanipulations sans contact. Ce problème de commande est traité dans la suite de ce document dans la section 4.1, page 79.



(a) Fonctions $\alpha(x)$, $\beta(x)$ et $\gamma(x)$ illustrant la non-linéarité du comportement, respectivement exprimées en $ms^{-1}V^{-2}$, $ms^{-1}V^{-1}$ et ms^{-1} . (b) Réponse indicielle de la position $x(t)$ de la micro-bille initialement placée en $x_0 = 0\mu m$, et soumise à des échelons de tensions $\delta u = 40V, 50V, 60V$ et $70V$

FIGURE 3.4 – Illustration des comportements spécifiques des micro-objets en micromanipulation sans contact

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Mohamed Kharboutly, co-encadrée par Nicolas Chaillet, professeur à l'université de Franche-Comté et moi-même [106, 107, 109].

3.2.2 Fonctionnalisation de surface et interaction électrostatique

Dans le cadre de micromanipulations en milieu liquide, l'interaction chimique entre le milieu liquide et les surfaces des solides peut être utilisée pour modifier les propriétés de surface des objets et des préhenseurs. Ces travaux reposent sur une approche pluridisciplinaire liant la chimie des surfaces et les lois de l'électrostatisme. La mise en œuvre de ce principe nécessite le dépôt contrôlé sur la surface des solides d'espèces chimiques susceptibles d'interagir avec le milieu. La méthode que nous avons explorée est basée sur la dépendance au pH de la charge électrostatique des fonctions amine NH_2 et des silanols SiOH . La protonation¹² peut, en effet, être contrôlée en modifiant le pH du milieu comme indiqué dans la table 3.4.

	Fonction Amine	Fonction Hydroxyl sur silicium	
pH acide	$-\text{NH}_3^+$	Si(OH)	↑protonation
pH basique	$-\text{NH}_2$	SiO^-	

TABLE 3.4 – Principe de la modification des charges électriques sur des surfaces fonctionnalisées par changement de pH

Fonctionnalisation de surface

La fonctionnalisation de surface consiste en un dépôt contrôlé sur la surface d'une espèce chimique contenant une fonction amine. Plusieurs types de composés ont été testés, nous illustrerons dans ce document le principe sur le silane 3 (ethoxydimethylsilyl) propyl amine (APTES) décrit figure 3.5.

Le mécanisme de formation des mono-couches auto-assemblées (SAM¹³) par silanisation, décrit sur la figure 3.5(b), se décompose en 4 étapes [184]. La première étape durant laquelle les molécules de silane sont physisorbées sur la surface oxydée de silicium. Durant la deuxième étape, le groupe silane s'hydrolyse en présence de la couche d'eau adsorbée sur la surface et forme des groupes hydroxysilane $-\text{Si(OH)}$. Ces groupes polaires forment des liaisons covalentes avec les groupes hydroxyl sur la surface SiO_2 lors de la troisième étape. Durant la quatrième étape, la réticulation de molécules s'établit dans le plan de manière à stabiliser la monocouche déposée. L'ensemble des détails du procédé chimique de dépôt est référencé dans [46].

Influence du pH sur les surfaces fonctionnalisées

Afin de caractériser l'impact du pH sur les surfaces fonctionnalisées, des mesures de forces d'interaction entre une bille de rayon $r_1 = 5 \mu\text{m}$ de diamètre et les surfaces fonctionnalisées ont été réalisées à l'aide d'un microscope à force atomique présenté en section 3.3.1, page 72 [43]. Deux types d'expérimentations ont été menées (i) sur

12. Protonation : échange de proton H^+ avec le milieu environnant.

13. SAM : Self-Assembly Mono-layers

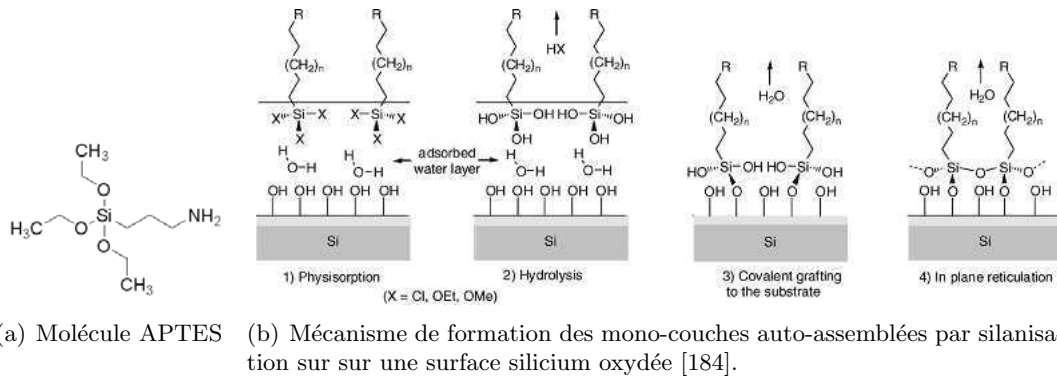


FIGURE 3.5 – Molécules et procédés de dépôt utilisés pour la fonctionnalisation de surface

l'interaction entre une bille non fonctionnalisée et une surface fonctionnalisée et (ii) sur l'interaction entre une bille et une surface toutes deux fonctionnalisées. Les courbes d'approche et de retrait obtenues dans le premier cas sont présentées sur la figure 3.6.

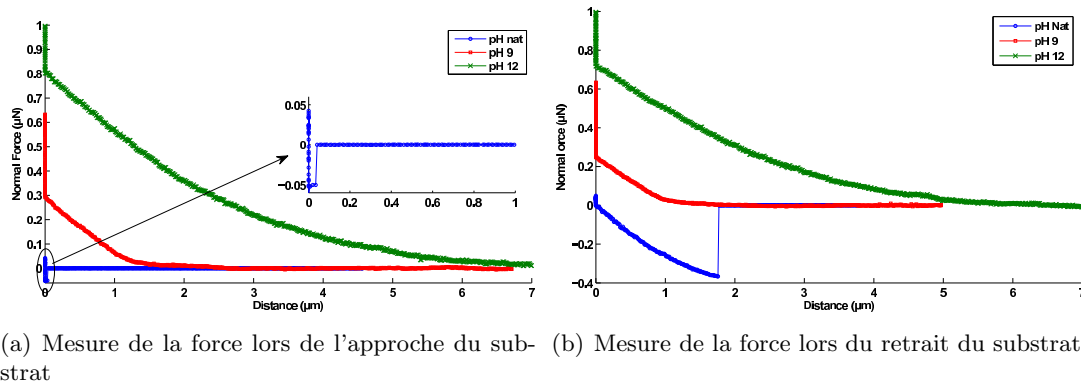


FIGURE 3.6 – Courbe force-distance pour la fonctionnalisation APTES d'une surface en fonction du pH du milieu

Le pH influence de façon sensible l'interaction entre les deux surfaces. A pH naturel, la force d'attraction (pull-in) est mesurée (environ -60 nN, Fig. 3.6(a)) avec une importante force de pull-off (-350 nN, Fig. 3.6(b)). Lorsque le pH augmente, la force d'interaction devient répulsive et est atteinte au contact respectivement 280 nN et 770 nN à pH 9 et 12, aucun effort de pull-off n'est alors mesuré. Les valeurs moyennes des différentes mesures effectuées sur le plan sont reportées dans le tableau 3.5. L'interaction bascule d'une nature attractive caractérisée par un effort de pull-off à une interaction à distance de nature répulsive où la force d'interaction tend systématiquement à repousser les deux surfaces. La distance d'interaction de plus de $5 \mu m$ observée indique que cette interaction longue distance est de type électrostatique. Le comportement peut s'expliquer par un changement du signe de la densité surfacique de charges sur la surface

fonctionnalisée :

$$\begin{aligned} &\text{pour un pH naturel ou pH 2, } \sigma \geq 0; \\ &\text{pour un pH 9 ou pH 12, } \sigma \leq 0. \end{aligned} \quad (3.49)$$

En effet, à pH acide les charges positives induites par les groupements amines sont plus important que les charges négatives induites par les groupes hydroxyl du substrat. A pH basique, l'effet est inverse, les charges négatives des groupes hydroxyl sont prédominantes. Le contrôle par un stimuli chimique (pH) de l'adhésion entre deux objets offre des perspectives intéressantes de stratégies de micromanipulation dont les premiers travaux sont reportés en section 4.3, page 92.

Enfin, le même type de mesure de force d'interaction a été réalisé entre une bille et une surface toutes deux fonctionnalisées. Les résultats sont reportés également dans le tableau 3.5. Ils montrent que l'interaction est systématiquement répulsive puisque la densité de surface est du même type sur les deux surfaces possédant le même dépôt chimique. Ce résultat présente également un intérêt dans le cadre de la micromanipulation robotique puisqu'il montre une annulation de l'adhésion qui est la source principale de perturbations.

interaction	APTES - SiO ₂			APTES - APTES			
milieu	pull-in (nN)	pull-off (nN)	type	pull-in (nN)	pull-off (nN)	type	σ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
pH 2	0	-176	attractif	3190	0	répulsif	+0,38
pH nat	-59.5	-387	attractif	735	0	répulsif	+0,17
pH 9	282	0	répulsif	150	0	répulsif	-0,08
pH 12	768	0	répulsif	983	0	répulsif	-0,21
Air	-13.2	-1150	attractif	0	-91	attractif	

TABLE 3.5 – Influence du pH sur la force de pull-in et de pull-off obtenue avec une poutre de raideur 0.3 N/m pour des interactions entre une surface fonctionnalisée APTES et une bille en SiO₂ non fonctionnalisée ainsi qu'entre une surface et une bille toutes deux fonctionnalisées APTES.

Caractérisation de la densité surfacique de charge en fonction du pH

Afin de pouvoir étendre ce résultat à des géométries plus complexes, la densité surfacique de charge a été identifiée en fonction du pH. Partant de l'hypothèse que la surface fonctionnalisée peut être représentée par une densité surfacique σ constante de charge électrique :

$$F = 2\pi r_1^2 \frac{\sigma^2}{\epsilon_3 \epsilon_0} \quad (3.50)$$

où ϵ_0 est la permittivité électrique du vide et ϵ_3 la permittivité relative du milieu.

La mesure de la force d'interaction permet donc de calculer une densité de charge électrostatique présente sur la surface. Le résultat obtenu est reporté dans le tableau 3.5. Il est à noter que ces résultats récents devront être comparés au formalisme de l'équation de Boltzmann (C.7), page 142 qui représente les interactions de double couche. Au premier abord, les distances d'interaction mesurées dans le cas de surfaces fonctionnalisées de l'ordre du micromètre et pouvant atteindre 40 micromètres semblent très supérieures à l'ordre de grandeur des distances de Debye typiquement de quelques dizaines de nanomètre qui représentent la distance d'interaction de la double couche.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du séjour post-doctoral de Jérôme Dejeu à l'institut FEMTO-ST avec le support de Patrick Rougeot [43, 44, 46].

3.2.3 Impact des déformations locales et de la structuration de surface sur l'adhésion

Un autre couplage également caractéristique des échelles micrométriques est l'interaction entre la force de van der Waals et la déformation locale de l'objet ou la rugosité locale de l'objet. Lors du contact entre deux micro-objets, la force de van der Waals crée une force d'attraction qui tend à déformer localement les deux objets. Cette déformation a tendance à augmenter la force de van der Waals. Nous allons montrer que ce couplage est sensible à l'échelle micrométrique alors qu'il peut être négligé à l'échelle nanoscopique.

Modélisation du couplage entre déformation locale et force de van der Waals

Le couplage entre les deux phénomènes physiques peut être représenté par deux suites F_n et a_n . F_n représente la force de van der Waals induite par un rayon de disque de déformation a_n , et a_{n+1} représente la déformation induite par la force de van der Waals F_n . Ces deux suites peuvent être initialisées par un contact sphère-plan considéré ponctuel : $a_0 = 0$.

On considère que la déformation locale de l'objet est basée sur la loi de Hertz qui définit le rayon a du disque de contact entre une sphère de rayon r_1 et un plan (voir figure 3.7) :

$$a^3 = -\frac{3}{4} \frac{r_1 F}{E^*}, \quad (3.51)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}. \quad (3.52)$$

où E_i et ν_i sont les modules de Young et les coefficients de Poisson des deux matériaux en contact. Ainsi, on obtient la fonction qui lie a_{n+1} à F_n :

$$a_{n+1} = -\left(\frac{3r_1}{4E^*}\right)^{1/3} F_n^{1/3}. \quad (3.53)$$

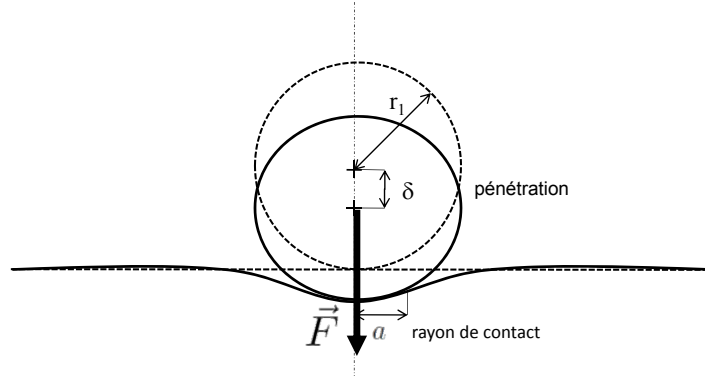


FIGURE 3.7 – Déformation de Hertz entre un plan et une sphère

Du point de vue du calcul de la force de van der Waals, on fait l'hypothèse que l'interaction entre le plan et la sphère déformée peut être considérée comme l'interaction entre un plan et une sphère tronquée. On peut ainsi montrer que la force de van der Waals F_n liée à la constante de Hamaker A et la distance interatomique minimale z_0 et engendrée par une déformation a_n vérifie [157] :

$$F_n = -\frac{A(z_0 r_1 + 2a_n^2)}{6z_0^3}. \quad (3.54)$$

Nous avons montré que les deux suites ainsi construites convergent vers un rayon du disque de contact a_{dvdw} et une force déformée de van der Waals F_{dvdw} vérifiant :

$$8z_0^3 E^* a_{dvdw}^3 - 2Ar_1 a_{dvdw}^2 - z_0 A r_1^2 = 0 \quad (3.55)$$

$$F_{dvdw} = -\frac{A(z_0 r_1 + 2a_{dvdw}^2)}{6z_0^3} \quad (3.56)$$

L'équation (3.55) définit une expression implicite du rayon du disque de contact dont on ne peut obtenir de formulation analytique simple. Une résolution numérique de cette équation permet le calcul de la force déformée de van der Waals F_{dvdw} (voir figure 3.8). Il est également possible d'établir une expression analytique de deux comportements asymptotiques correspondant aux échelles micrométriques et nanométriques.

Comportements asymptotiques

Nous avons montré que le diamètre R_c de bille caractérisant le passage entre les deux comportements asymptotiques visibles sur la figure 3.8 vérifie [8] :

$$R_c = \frac{8z_0^7 E^{*2}}{A^2} \quad (3.57)$$

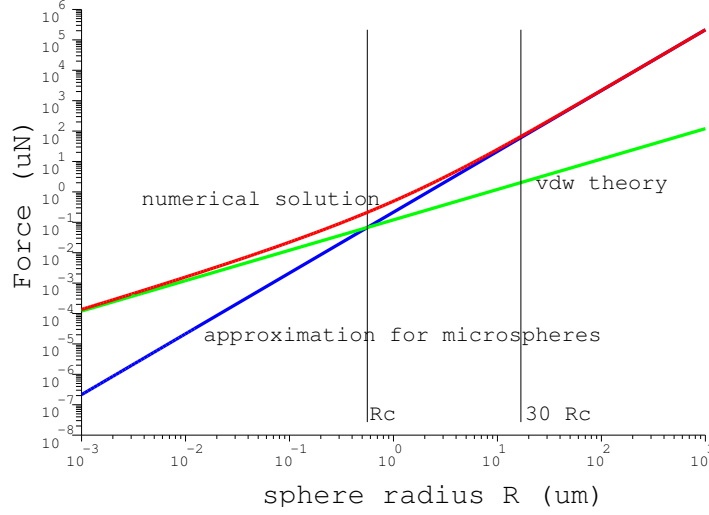


FIGURE 3.8 – Comparaison entre la force de van der Waals entre deux objets considérés rigides et la force déformée de van der Waals. Tracé vert : Force de van der Waals entre deux objets non déformables (eq. 3.1, page 46). Tracé bleu : Approximation asymptotique dans le cas d’une sphère micrométrique (eq. 3.58). Tracé rouge : solution numérique de la force de van der Waals modifiée par la déformation locale (eq. 3.55).

Dans le cas d’un contact entre deux matériaux en verre de module de Young E de 68 GPa , de coefficient de Poisson ν de $0,19$, de coefficient de Hamaker A de $6,5 \cdot 10^{-20} \text{ J}$, et une distance interatomique minimale z_0 de $0,3 \text{ nm}$, la valeur de R_c est de $0,5 \mu\text{m}$, représentant la transition entre nanomonde et micromonde. Ainsi pour $r_1 \gg R_c$, la force de van der Waals est impactée par la déformation et vaut :

$$\tilde{F}_{dvdw} = -\frac{A^3 r_1^2}{48 z_0^9 E^{*2}}, \quad (3.58)$$

alors que lorsque $r_1 \ll R_c$, la déformation est négligeable sur le calcul de la force de van der Waals, et l’expression de celle-ci est identique à une interaction entre deux matériaux rigides (voir équation (3.1), page 46) :

$$\tilde{F}_{dvdw} = -\frac{A r_1}{6 z_0^2}. \quad (3.59)$$

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Sébastien Alvo co-encadrée par Stéphane Régnier, professeur à l’université Pierre et Marie Curie (institut ISIR) et moi-même [8]. Ils ont permis de mettre en lumière une spécificité des échelles micrométriques où la déformation joue un rôle amplificateur sensible sur la force de van der Waals contrairement aux échelles nanométriques.

Force d'interaction avec une surface nanostructurée

Dans le même esprit, les équations décrivant les forces de van der Waals ont été utilisées pour caractériser l'adhésion entre une bille micrométrique et des surfaces nanostructurées. Nous avons montré que la nanostructuration de surface par auto-assemblage de nanosphères sur une surface permet de réduire sensiblement les effets d'adhésion entre cette surface et une microsphère. On considère une surface structurée par des nanosphères de rayon r_2 comme représenté sur la figure 3.9. On fait l'hypothèse que le contact entre la microsphère de rayon r_1 et la surface aura lieu sur la sphère définie par $(i = 0, j = 0)$ sur la figure 3.9(b). La distance z_{ij} entre la sphère de rayon r_1 et une nanosphère (i, j) est :

$$z_{ij} = \sqrt{(r_2 + z_0 + r_1)^2 + 4r_2^2(j^2 - ij + i^2)} - r_1 - r_2. \quad (3.60)$$

La force totale F_{mvdw} entre la sphère de rayon r_1 et l'ensemble des sphères du plan peut s'établir comme la somme vectorielle des forces d'interaction $\vec{F}_{ij}$ avec chacune des nanosphères :

$$F_{mvdw} = \sum_{i,j} \vec{F}_{ij} \cdot \vec{z} = \sum_{i,j} \frac{A}{6z_{ij}^2} \cdot \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{r_2 + z_0 + r_1}{r_2 + z_{ij} + r_1}. \quad (3.61)$$

L'impact de cette structuration a été testé expérimentalement sur des nanosphères de polystyrène en interaction avec une sphère de silice de rayon $r_1 = 5 \mu m$. Les constantes de Hamaker du polystyrène et de la silice valent respectivement $A_1 = 79 zJ$ [145] et $A_2 = 65 zJ$ [157]. Comme précédemment, on fait l'hypothèse que la distance interatomique minimale est $z_0 = 0.3 nm$.

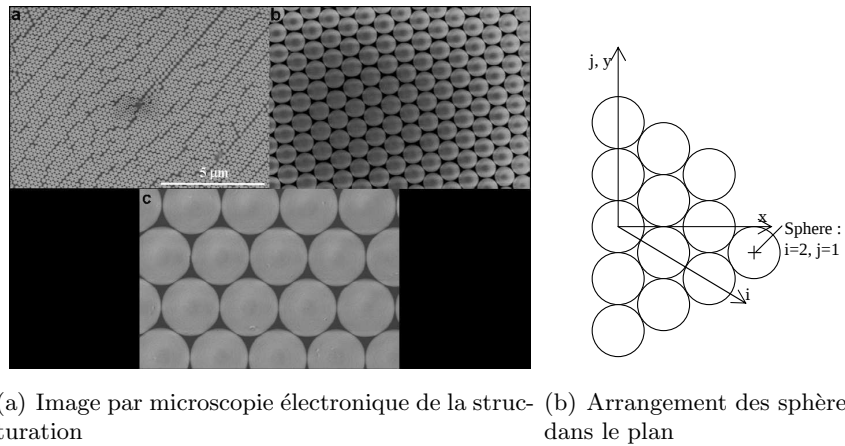


FIGURE 3.9 – Structuration de surface par dépôt auto-assemblé de bille de polystyrène réalisée par l'institut EMPA en Suisse dans le cadre du projet intégré européen HYDROMEL.

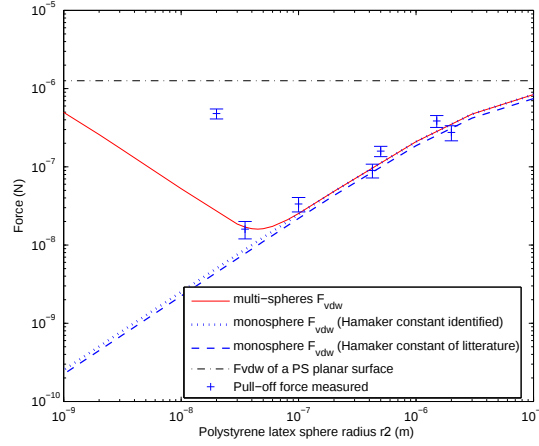


FIGURE 3.10 – Forces théoriques et mesurées d’adhésion entre une sphère de silice de rayon $5\ \mu\text{m}$ et un plan nanostructuré avec des billes de polystyrène de rayon r_2 .

La figure 3.10 présente les mesures expérimentales de force de pull-off réalisées sur un microscope à force atomique pour différentes valeurs de rayon r_2 de nanosphère. La force de van der Waals (equation (3.1), page 46) entre deux sphères rigides de rayon r_1 et r_2 , basée sur les constantes de Hamaker relevée dans la littérature est représentée en traits discontinus bleu. La constante de Hamaker identifiée lors de ces mesures :

$$A_{12}^{id} = 1,29 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (3.62)$$

permet de représenter l’évolution de la force identifiée de van der Waals entre deux sphères représentée en pointillés bleu sur la figure 3.10. Enfin le modèle numérique (3.61) représentant l’interaction entre toutes les nanosphères du plan et la microsphère est tracé en rouge sur cette figure. Elle montre que le modèle multisphère, le modèle monosphère sont équivalents pour des tailles de nanosphères supérieures à 100nm. Au dessus de cette limite, seule l’interaction avec la nanosphère en contact avec la microsphère influence la force de pull-off. La force d’interaction basée sur le modèle multisphère admet un minimum $r_2 = 45 \text{ nm}$ qui représente la nanostructuration optimale si l’on souhaite diminuer l’adhésion entre la surface nanostructurée et la microsphère. En dessous de cette valeur optimale, les sphères étant petites devant le rayon de la sphère r_1 , la surface nanostructurée se rapproche du comportement d’une surface plane.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet intégré européen HYDROMEL portant sur l’étude d’approches hybrides entre auto-assemblage et assemblage robotique et plus particulièrement en collaboration avec l’institut EMPA situé à Thun en Suisse. Ils ont été réalisés avec Jérôme Dejeu que j’ai encadré au cours de son séjour post-doctoral à l’institut FEMTO-ST [42].

3.2.4 Effet capillaire et compressibilité des gaz

Le dernier couplage permettant de décrire des phénomènes caractéristiques de l'échelle micrométrique porte sur la combinaison des effets capillaires et de la compressibilité des gaz dans le cas de microbulles de gaz.

En micromanipulation en milieu aérien, des gouttes de liquide sont utilisées pour exploiter les forces capillaires pour réaliser des actions de préhension. Dans le cadre de la micromanipulation en milieu liquide, il est également possible d'utiliser les effets capillaires à condition de créer des bulles de gaz. Le comportement des gouttes d'eau est régi par la loi de Laplace et on considère en général que l'évolution s'effectue à volume de liquide constant. Le comportement des bulles de gaz est sensiblement différent puisque le gaz étant compressible, la pression capillaire modifie sensiblement le volume de la bulle. Ainsi la loi de Laplace définissant la pression capillaire au sein de la bulle en fonction de la géométrie du ménisque et la loi des gaz parfait régissant également la pression au sein de la bulle en fonction du volume de la bulle doivent être analysées conjointement.

Une bulle peut ainsi être considérée comme un transducteur liant une énergie pneumatique $P.V$ à une énergie mécanique $F.d$ via l'interface capillaire à l'instar des actionneurs fluidiques flexibles qui réalisent la même conversion d'énergie par des membranes flexibles [80] [31] [114]. Nous allons montrer que l'identification de ce nouveau transducteur ouvre des perspectives intéressantes en terme d'actionneur et de capteurs autour de deux configurations représentées sur la figure 3.11.

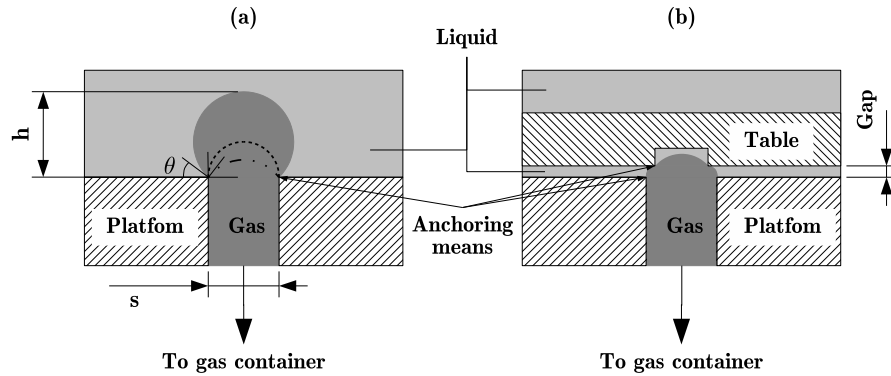


FIGURE 3.11 – Configurations types des transducteurs fluidiques capillaires

Lois physiques élémentaires

A l'équilibre, l'interface air-liquide est régi par l'équation de Laplace liant la différence de pression à l'interface ΔP à la tension de surface γ et à la courbe de l'interface H :

$$\Delta P = 2\gamma H \quad (3.63)$$

La pression $P + \Delta P$ au sein du gaz est liée au volume V de la bulle par la loi des gaz parfaits :

$$(P + \Delta P) V = nRT \quad (3.64)$$

où T représente la température du gaz, n le nombre de moles de gaz et R la constante des gaz parfait. On considère que la ligne triple est fixe lors de l'accroissement de la bulle et seul l'angle de contact θ varie (voir figure 3.11). Ceci peut être obtenu en créant une barrière énergétique soit par fonctionnalisation locale de surface soit par structuration locale de surface.

La force générée par une bulle sur un solide peut être calculée comme la somme de la force de pression capillaire (F_P) et de la force de tension de surface (F_{TS}). F_P est l'intégrale de la pression ΔP sur la surface de contact entre l'air et le solide alors que F_{TS} est l'intégrale de la tension de surface sur la ligne triple¹⁴. On limite notre analyse à une configuration axisymétrique autour de $\vec{z}$:

$$\vec{F}_P = \iint_{\text{interface gaz-liquide}} \Delta P dS \vec{z} \quad (3.65)$$

$$\vec{F}_{TS} = \oint_{\text{ligne triple}} \gamma \sin(\theta) dl \vec{1}_z \quad (3.66)$$

Couplage entre la compressibilité des gaz et la capillarité

Dans la cas où la bulle n'est en contact qu'avec un solide et que sa hauteur est suffisamment petite pour considérer que la pression est identique à l'intérieur, on peut montrer que la bulle adopte une forme sphérique qui peut être définie par :

$$\begin{aligned} r &= \frac{s^2}{8h} + \frac{h}{2} \\ V_c &= \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3s^2}{4} + h^2 \right) \\ V &= V_c + V_0 \end{aligned} \quad (3.67)$$

où s est le diamètre du canal définissant la ligne triple, h la hauteur de la bulle, r le rayon de la calotte sphérique, V_c son volume et V_0 le volume du réservoir de gaz auquel est relié la bulle. La combinaison des équations (3.63), (3.64) et (3.67) débouche sur une solution implicite de la hauteur h sous la forme d'un polynôme du cinquième ordre. On peut également montrer que cette expression peut être ramenée à une expression ne faisant intervenir que 5 paramètres adimensionnels :

$$\begin{aligned} &\frac{\pi}{384} \tilde{P} \tilde{H}^5 + \frac{\pi}{48} \tilde{H}^4 + \frac{\pi}{96} \tilde{P} \tilde{H}^3 + \left[\frac{1}{8} (\tilde{P} \tilde{V} - \tilde{E}) + \frac{\pi}{16} \right] \tilde{H}^2 \\ &+ \left(\frac{\pi}{128} \tilde{P} + \tilde{V} \right) \tilde{H} + \frac{1}{8} (\tilde{P} \tilde{V} - \tilde{E}) = 0 \end{aligned} \quad (3.68)$$

où $\tilde{E} = \frac{nRT}{\gamma s^2}$, $\tilde{S} = \frac{S}{s^2}$, $\tilde{P} = \frac{P}{\gamma/s}$, $\tilde{H} = \frac{h}{s}$, et $\tilde{V} = \frac{V_0}{s^3}$ sont les paramètres adimensionnels. Cette équation décrit le comportement d'une bulle compressible dont la pression interne

14. ligne triple : ligne caractérisée par la présence des trois phases solide, liquide et gaz

est régie par la capillarité. Tous les paramètres adimensionnels $\tilde{E}, \tilde{P}, \tilde{S}, \tilde{V}$ peuvent être utilisés pour contrôler la hauteur adimensionnelle $\tilde{H}$ de la bulle.

La géométrie de la bulle est directement liée à la différence de pression ΔP entre le liquide et l'air. Nous avons montré que ce principe peut être utilisé comme un capteur de pression. La forme de la bulle peut être mesurée en utilisant un système de vision détectant l'interface air-liquide ou en détectant uniquement la hauteur h de la bulle de laquelle on peut déduire la pression en utilisant les équations (3.63) et (3.67). La pression maximale mesurable est atteinte lorsque que la hauteur h atteint le rayon $s/2$ du canal. Par exemple, dans le cas d'une bulle d'air générée à partir d'un canal de diamètre $500\mu\text{m}$ dans de l'eau, la pression maximale mesurable est de 576Pa .

Toutefois, le couplage entre la compressibilité et la capillarité peut induire des croissances instables de bulles qui peuvent être expliquées à partir de l'analyse de l'équation (3.68). Afin d'expliquer le mécanisme physique qui conduit à cette instabilité, on considère que la pression est modifiée en changeant le volume V_o (par exemple à l'aide d'un pousse-seringue). Lorsque que l'équation (3.68) du cinquième ordre ne possède qu'une seule solution h pour chaque volume V_o , la croissance de la bulle est stable. En revanche, si au cours de la croissance, pour un volume V_o , plusieurs hauteurs h sont accessibles (voir point **I** sur la figure 3.12), la fonction qui lie le volume V_o à la hauteur h possède un échelon représentant une croissance instable de la bulle. Sur la base des équations analytiques, nous avons pu montrer qu'il existait un critère caractérisant l'apparition de cette instabilité. Ainsi, nous avons montré que l'instabilité se produit si et seulement si $\tilde{E} < (128/27\pi) \tilde{P}^2$, ce qui correspond dans une version dimensionnelle à $\sigma = \frac{Ps^4}{V\gamma} > \frac{27\pi}{128}$. La comparaison entre le modèle de croissance (3.68) de la bulle et les relevés expérimentaux sont reportés sur la figure 3.12.

Lorsque la bulle est en contact avec deux solides, le couplage entre la capillarité et la compressibilité du gaz nécessite une résolution numérique et ne peut être représentée sur une forme analytique même implicite. On résout ainsi l'équation aux dérivées partielles (3.69) définissant la courbure en assurant une courbure H constante sur l'interface air-liquide, et en vérifiant les équations (3.63), (3.64) et la position des deux lignes triples.

$$2H = \frac{\frac{\partial^2 r}{\partial z^2}}{\left(1 + \left(\frac{\partial r}{\partial z}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{r \left(1 + \left(\frac{\partial r}{\partial z}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.69)$$

Une bulle entre deux solides peut être utilisée comme un moyen d'actionnement offrant des perspectives pour la réalisation de microrobot parallèle exposées dans la partie 5.1.3, page 105.

L'étude de ce transducteur s'est déroulée dans le cadre de la thèse de Cyrille Lenders en co-tutelle entre l'Université de Franche-Comté (UFC) et l'Université Libre de Bruxelles (ULB) [122, 123].

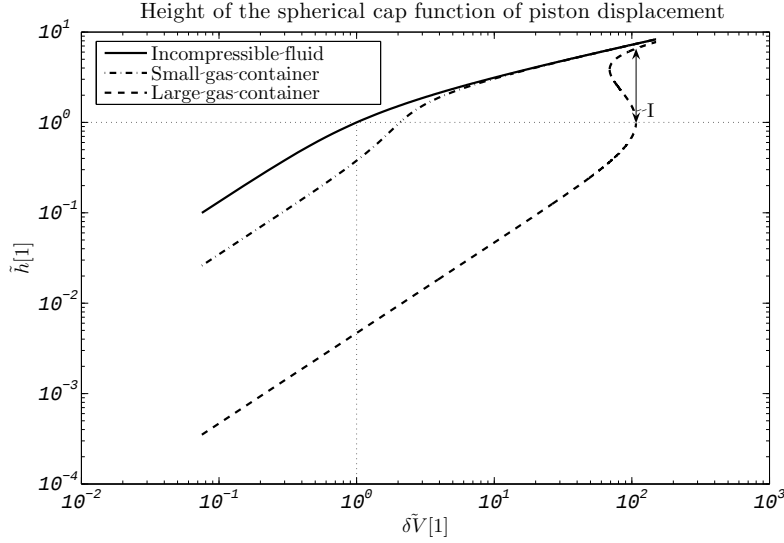


FIGURE 3.12 – Evolution de la hauteur de la bulle en fonction de la variation de volume. Dans le cas d'un réservoir important, l'instabilité apparaît au point *I*.

3.3 Moyens de caractérisation

La validation des modèles exposés ci-dessus repose sur des moyens expérimentaux de mesure des forces et des trajectoires des micro-objets. Ceux-ci nécessitent des développements techniques et scientifiques particuliers de manière à être opérants à l'échelle des micro-objets considérés.

3.3.1 Mesure de force entre micro-objets

La mesure des forces d'interaction entre micro-objets de forme quelconque est un enjeu important pour la fiabilisation des opérations de micro-assemblage. Les modèles sont en effet peu fiables surtout dans le cas de contact entre deux objets réputés plans et la validation expérimentale est souvent nécessaire pour déterminer l'ordre de grandeur d'une force. Or les moyens de mesure basés essentiellement sur les microscopes à force atomiques (AFM) limités en nombre de degré de liberté ne permettent pas la caractérisation de contacts complexes rencontrés dans des opérations de micropréhension. Nous avons proposé un système de mesure basé sur l'intégration d'un robot parallèle à 6 degrés de liberté et d'un capteur de force afin d'étudier les contacts plan sur plan. Dans notre système les deux objets sont fixés respectivement sur la plateforme du robot et sur le capteur de force. Le robot est utilisé pour placer les deux objets en regard en maîtrisant précisément leur position relative.

Moyen de mesure actuel : microscope à force atomique

Le microscope à force atomique est l'outil privilégié aux échelles micro et nanoscopiques pour mesurer les forces d'interaction [15, 41, 57, 59, 115, 117, 151, 193, 196]. Ces outils initialement développés pour réaliser de l'imagerie peuvent être détournés de leur utilisation première pour réaliser de la mesure de force. Ils sont couramment utilisés pour effectuer des mesures de force sur des contacts entre un plan et une sphère de rayon caractéristique allant du nanomètre à quelques dizaines de micromètres. Le cas plan-plan nécessitant un positionnement relatif suivant six degrés de liberté entre les deux objets n'est actuellement pas étudié. Il est en effet difficile d'implémenter un contact plan sur plan dans un système conventionnel de microscopie AFM pour lequel un alignement des deux surfaces ne peut être réalisé.

Des travaux ont été menés par la communauté internationale pour modifier les systèmes de mesure de force par AFM ou d'autres dispositifs de mesures de force commerciaux pour élargir leur domaine d'application. Ces améliorations concernent généralement l'ajout de quelques degrés de liberté en translation pour étendre la plage de mesure de l'AFM par exemple dans le cadre de mesure de membranes souples [17, 112, 113, 168–170]. Finalement, peu de travaux relatent la prise en compte de l'orientation entre les objets à tester. Ando et al. reportent des mesures de force de friction et pull-off entre une pointe plane d'AFM de surface $0.7\mu\text{m} \times 0.7\mu\text{m}$ et une surface texturée dont ils démontrent la sensibilité à l'angle relatif entre deux surfaces.

Les premiers travaux que nous¹⁵ avons menés portent sur des premières mesures entre une surface plane $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ et un plan infini montrant l'impact de l'angle de contact sur la mesure de pull-off [52].

Système de mesure de microforce pour des contacts plan-plan

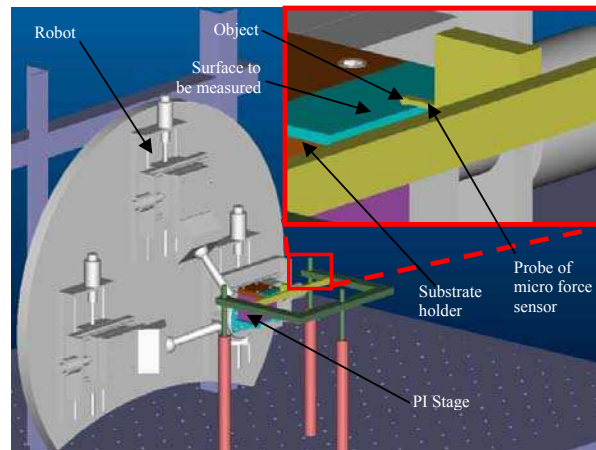
Sur la base de cette première validation, un dispositif complet de mesure a été développé. Il est construit autour d'une structure robotique à 6 degrés de liberté placée sous différents capteurs de force commerciaux.

La figure 3.13(a) représente un schéma de principe du système de mesure de force pour contact plan-plan. Le robot de positionnement à 6 degrés de liberté est un robot parallèle commercialisé par la société MICOS (SpaceFab 3000 BS, MICOS, Allemagne) capable d'engendrer des mouvements sur des courses décimétriques ($50 \times 12 \times 100\text{mm}^3$) avec une résolution submicrométrique (résolution en translation : $0,2\mu\text{m}$ et en rotation : $0,5.10^{-3}\text{deg}$). Les six degrés de liberté sont utilisés pour aligner les objets avant la mesure. La mise en contact des deux objets nécessaire à la caractérisation de leur adhésion s'effectue par un axe de translation piezo-électrique possédant une résolution nanométrique (P-611.ZS, PI, Allemagne). La plateforme de caractérisation a vocation à être ouverte à plusieurs types de capteurs. A l'heure actuelle, des mesures ont été effectuées à l'aide de capteur de type MEMS (FT-G100, FemtoTools, suisse) ou d'un microscope

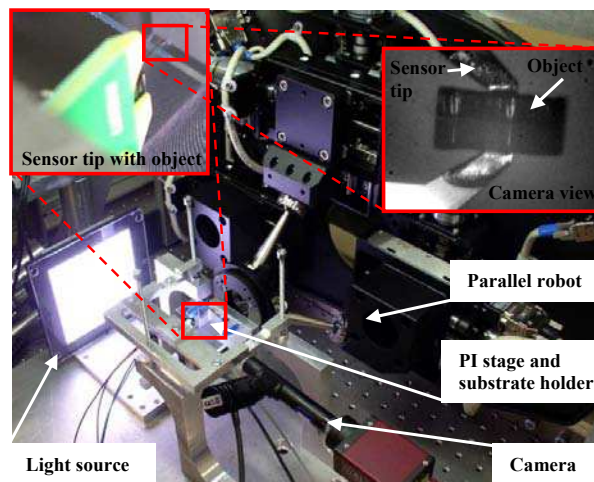
15. Il est à noter que je ne suis pas à l'origine de ces travaux préliminaires réalisés dans le cadre de la thèse de K. Rabenorosoa, encadrée par C. Clévy et P. Lutz et que j'ai été associé à la publication de ces travaux au cours de leur réalisation pour un apport personnel uniquement sur la partie modélisation.

à force atomique. L'ensemble est placé sur une table antivibration pour assurer une isolation mécanique et sous un flux laminaire permettant de garantir une propreté de l'air.

La procédure de test débute avec le collage des deux objets respectivement sur la partie mobile du robot et sur l'extrémité du capteur de force. La mise en position de ces deux objets ne pouvant faire l'objet d'une indexation, une calibration de la position relative entre les deux objets est nécessaire et fait l'objet de la proposition d'une méthode originale reportée dans la section 5.1.2, page 103 [53].



(a) Modèle 3D du système de mesure



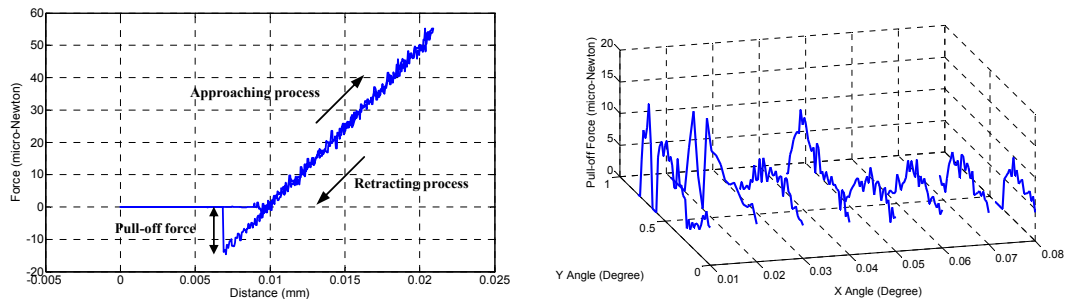
(b) Système expérimental de mesure

FIGURE 3.13 – Système de mesure de microforce sur des contacts plan-plan

Mesure de la force de pull-off

La figure 3.13(b) présente le dispositif expérimental de mesure de force qui est également équipé de systèmes de vision et d'éclairage afin de faciliter les expérimentations. L'exemple reporté ici porte sur la mesure de force de pull-off entre une surface plane en verre et un objet en silicium de volume $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$ collé sur le capteur de force. Pour une orientation donnée, l'axe de translation piezo-électrique est utilisé pour appliquer une force de précharge de $55 \mu\text{N}$. La force de pull-off correspond alors classiquement à la force nécessaire pour rompre le contact établi avec la précharge. Celle-ci se déduit de la courbe force-distance comme dans le cas d'une mesure par microscope à force atomique. Un exemple de relevé expérimental est présenté sur la figure 3.14(a). La vitesse de déplacement lors de la mesure est fixée à $1 \mu\text{m/s}$. Cette mesure peut être effectuée pour différentes valeurs d'orientation relative entre les deux surfaces afin d'étudier l'impact des angles d'inclinaison sur la force de pull-off. A titre d'exemple, des mesures ont été menées en modifiant l'orientation sur chaque angle avec un pas de 0.01° . Ces mesures permettent de tracer l'évolution de la force de pull-off en fonction des deux angles comme reporté sur la figure 3.14(b). Elles montrent la capacité de notre système à caractériser l'adhésion entre micro-objets réputés plans en fonction de leur position relative lors du contact. Ce dispositif pourra ainsi être appliqué à la caractérisation de contact entre un préhenseur et un micro-objet.

Ce système a été développé dans le cadre du projet ANR NANOROL lors du séjour post-doctoral de Wei Dong de septembre 2009 à août 2010 que j'ai encadré avec le support de David Rostoucher [54]. Il est inscrit comme équipement de la plateforme micronanorobotique nationale et est ouvert aux utilisateurs extérieurs.



(a) Courbe force-distance permettant la (b) Evolution de la force de pull-off en fonction de
détermination de la force de pull-off l'orientation entre les deux surfaces

FIGURE 3.14 – Exemple de résultats expérimentaux obtenus par la plateforme de mesure.

3.3.2 Mesures de trajectoire

Le deuxième moyen d'expérimentation du comportement des micro-objets consiste à observer leur trajectoire et ce particulièrement dans le cas de la caractérisation des moyens de micromanipulation sans contact. La mesure de la position d'un objet de taille

micrométrie n'offre pas un grand choix de technologies disponibles. Il est couramment admis que le moyen le plus pertinent est l'utilisation d'une caméra optique complétée par des objectifs choisis en fonction de la taille du composant observé. Toutefois comme relevé dans la section 3.2.1, et du fait de la faible inertie des micro-objets, ceux-ci peuvent suivre des trajectoires très rapides au regard de la taille de l'objet. A titre d'exemple, dans un système de diélectrophorèse, les vitesses typiques sont de l'ordre de 10 mm.s^{-1} pour un objet de 60 micromètres de diamètre. Cette valeur est intrinsèquement faible comparée à des vitesses d'objets macroscopiques qui sont classiquement de l'ordre de 10 m.s^{-1} (36 km/h), mais présente toutefois une difficulté pour l'observation de la trajectoire. En effet, les courses étant faibles (typiquement quelques centaines de micromètres), les temps de déplacement sont faibles, de l'ordre de 10 ms . L'utilisation de caméras rapides permettant d'observer une trajectoire avec une fréquence typiquement de l'ordre de la milliseconde est nécessaire pour l'analyse du comportement des micro-objets en micromanipulation sans contact.

Un partenariat fructueux par le projet PHC Tournesol 'MODIM' a été mené avec l'Université Libre de Bruxelles afin de valider des mesures de trajectoires de micro-objets propulsés par un effort de diélectrophorèse. Cette caméra d'analyse est capable de visualiser des phénomènes avec une cadence de $100\mu\text{s}$. Toutefois, le traitement ne peut s'effectuer que hors ligne après enregistrement de la trajectoire. Ce type de capteur est donc pertinent pour l'observation de comportement mais pas pour assurer un contrôle en boucle fermée. Par ailleurs, des tests préliminaires ont été menés sur une caméra 'Photon Focus' qui permet l'acquisition et le traitement de régions d'intérêt dans l'image à une fréquence pouvant atteindre 400Hz. Ce type de caméra semble donc particulièrement adapté comme moyen de mesure de la position des micro-objets lors de la commande de trajectoire par boucle fermée. Cette solution reste à explorer plus avant.

Conclusion du chapitre

A partir d'une analyse initiale des effets physiques prédominants à l'échelle micrométrique et plus particulièrement orientée sur les environnements liquides, ce chapitre a été l'occasion de présenter ma contribution à l'analyse de quelques comportements spécifiques de ces échelles dimensionnelles. La modélisation de ces comportements nécessite des approches pluridisciplinaires originales qui lient des phénomènes physiques habituellement découplés à l'échelle macroscopique ou nanoscopique. Les phénomènes ainsi établis présentent des non linéarités fortes qui devront être prises en compte dans la commande comme présenté au chapitre suivant. Ces différents modèles, dont la validité est typiquement restreinte à l'échelle micrométrique, illustrent le paradigme scientifique lié aux comportements des micro-objets. Les modèles se restreignent toutefois à des géométries simples et la poursuite des travaux sur des géométries plus complexes apparaît comme nécessaire pour améliorer la compréhension des comportements à ces échelles. Dans cette évolution, la mesure des forces et des trajectoires d'objets est une étape indispensable dont les enjeux ont été présentés dans ce chapitre. Les modèles de comportement sont utilisés comme une base de connaissance utile à la conception de moyens de micropréhension et de micromanipulation présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Stratégies de micromanipulation

Sur la base des travaux de modélisation et de compréhension des phénomènes prédominants à l'échelle du micromonde, présentés au chapitre précédent, des stratégies de micromanipulation ont été étudiées. Ces travaux se sont focalisés sur la proposition, la modélisation et la commande de systèmes mécatroniques originaux principalement dédiés au milieu liquide. Ce chapitre résume ces travaux portant sur la commande de moyens de manipulation sans contact par diélectrophorèse, l'exploitation du changement de phase du milieu environnant à des fins de micropréhension, l'utilisation de vecteurs chimiques pour maîtriser la micromanipulation et enfin l'utilisation de pinces à deux doigts de serrage. L'intégration de ces stratégies de préhension dans des systèmes de micro-assemblage sera présentée dans le chapitre suivant.

4.1 Stratégie de micromanipulation par diélectrophorèse

Ces travaux s'inscrivent dans l'étude des stratégies de micromanipulation d'objets artificiels, adaptées aux milieux liquides et inspirées des techniques actuelles de micromanipulation d'objets biologiques. Malgré la réduction des effets perturbateurs (électrostatique, effets d'adhésion...) dans un liquide, la problématique du lâcher des micro-objets, problème central de la micromanipulation dans l'air, subsiste. L'étude du comportement des micro-objets soumis à un effort de diélectrophorèse présentée dans la partie 3.2.1, page 56 a montré la capacité de cet effet physique à être utilisé pour de la micromanipulation sans contact. Nos travaux se sont focalisés sur l'étude de la commande de ces systèmes caractérisés par des fortes non-linéarités et une dynamique proche ou plus grande de celle du capteur de mesure de la position. Nous avons également montré que la force de diélectrophorèse pouvait être utilisée pour assurer le lâcher actif de micro-objets manipulés par un préhenseur à deux doigts de serrage.

4.1.1 Commande de systèmes de micromanipulation sans contact

L'objectif de la commande proposée est d'assurer un suivi d'une trajectoire de référence w par un micro-objet manipulé par diélectrophorèse en utilisant comme capteur un système de vision optique. Afin de présenter les problématiques rencontrées, nous allons considérer un système à seul degré de liberté [110] dont le comportement est synthétisé par l'équation (3.48), page 60 rappelée ci-dessous :

$$\dot{x} = f_1(\delta u) = \alpha(x)\delta u^2 + \beta(x)\delta u + \gamma(x). \quad (3.48)$$

La synthèse de la commande de ce système est confrontée à deux spécificités de ces systèmes :

- la non-linéarité du système par rapport à la grandeur de commande δu (3.48) et la non linéarité par rapport à la position x représentée par l'allure des fonctions $\alpha(x)$, $\beta(x)$ et $\gamma(x)$ reportées figure 3.4(a), page 60.
- la dynamique importante du système qui induit des déplacements rapides de l'objet au regard de la fréquence de la caméra utilisée pour l'observation.

Le problème est ainsi schématisé sur la figure 4.1 et a nécessité une analyse particulière conduisant à la production d'une méthode de commande originale.

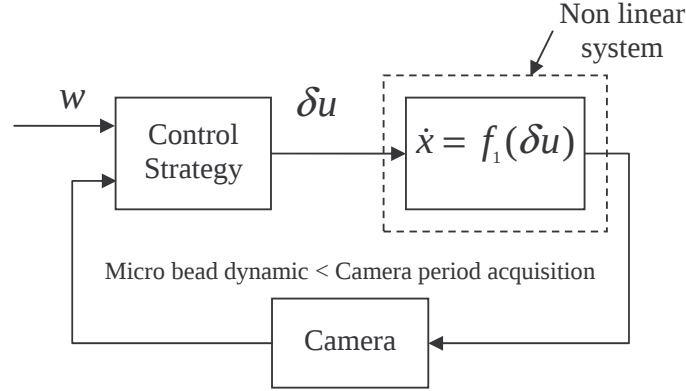


FIGURE 4.1 – Résumé de la stratégie de commande

Linéarisation partielle du problème

La première étape de notre démarche porte sur la linéarisation du système par rapport à la grandeur de commande en utilisant un changement de variable conduisant à l'utilisation d'une nouvelle grandeur de commande notée ξ et vérifiant :

$$\xi = f_2(\delta u) = \left(\delta u + \frac{\beta(x)}{2\alpha(x)} \right)^2. \quad (4.1)$$

Par construction, la nouvelle grandeur de commande doit nécessairement être positive :

$$\xi \geq 0. \quad (4.2)$$

Ce changement de variable revient à considérer le modèle suivant :

$$\dot{x} = \alpha(x)\xi + \rho(x), \quad (4.3)$$

où

$$\rho(x) = \gamma(x) - \frac{\beta^2(x)}{4\alpha(x)}. \quad (4.4)$$

Enfin dans le cas singulier où $\alpha(x)$ est nul, alors

$$\xi = \beta(x)\delta u + \gamma(x). \quad (4.5)$$

Ce changement de variable permet de lever la non-linéarité vis-à-vis de la grandeur de commande.

Commande prédictive généralisée

Afin de contrôler la trajectoire de l'objet malgré la grande dynamique de celui-ci, la stratégie de contrôle doit être capable de faire évoluer la grandeur de commande en l'absence de retour capteur entre deux acquisitions caméra. La stratégie proposée repose sur le formalisme de la commande prédictive qui permet la définition d'une commande basée sur un modèle en l'absence de retour capteur.

La commande prédictive (GPC)¹ est une méthode de commande basée sur un modèle qui permet la définition d'un ensemble d'actions futures minimisant l'erreur entre la référence et la sortie prédite [104]. Ce type de commande est utilisé dans quelques domaines d'applications comme les centrales électriques solaires [64], les machines tournantes [140] et les manipulateurs robotiques [171].

L'adaptation de la commande GPC à notre système nécessite un modèle discrétisé. On note T_c la période d'acquisition de la caméra et $T_s \leq T_c$ la fréquence de génération de la commande. En l'absence d'information de la caméra, le contrôleur doit calculer une séquence appropriée de N futures commandes afin de suivre la trajectoire de référence avec $N \times T_s \geq T_c$ (voir figure 4.2). Dans le formalisme de la commande prédictive, le choix de la commande s'établit en minimisant le critère J représentant la somme pondérée des carrés des erreurs futures et des variations de commandes :

$$J = \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - w_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^N \lambda \xi_{i-1,j}^2, \quad (4.6)$$

où N est l'horizon de prédiction, les indices i, j sont l'image du temps $t = j.T_c + i.T_s$ comme décrit sur la figure 4.2 et λ représente le poids affecté à la variation de la commande ξ .

L'état $x_{i,j}$ est calculé par discrétisation de l'équation (4.3) en considérant les deux périodes d'échantillonnage T_s et T_c :

$$x_{i,j} = T_s [\alpha(x_{i-1,j}) \xi_{i-1,j} + \rho(x_{i-1,j})] + x_{i-1,j}. \quad (4.7)$$

1. En anglais : Generalized Predictive Control, GPC.

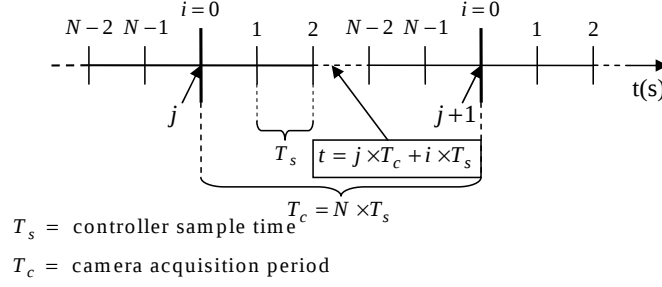


FIGURE 4.2 – Représentation de la prise en compte des deux fréquences d'échantillonnage : T_c de la caméra et T_s de la commande.

A chaque acquisition j de la caméra, la commande prédictive est utilisée pour définir les N futures commandes optimales suivant la dernière position mesurée $x_{0,j}$. L'optimisation du critère J est donc effectuée à chaque acquisition de la caméra ($j.T_c$). Celle-ci s'effectue classiquement en annulant les dérivées partielles de J en fonction des variables de commandes $\xi_{i,j}$, pour $1 \leq i < N-1$. Nous avons ainsi pu montrer que la minimisation du critère J induit l'application d'une commande vérifiant :

$$\xi_{i,j} = \frac{1}{\alpha(x_{i,j})} \left[\frac{-\lambda}{2\alpha(x_{i,j})} + \frac{\lambda}{2\alpha(w_{i+1,j})} \right] + \frac{1}{\alpha(x_{i,j})} [-\rho(x_{i,j}) + w_{i,j} - x_{i,j}]. \quad (4.8)$$

La position $x_{0,j}$ représente la valeur mesurée par la caméra lors la $j^{\text{ième}}$ acquisition, les positions $\{x_{i,j}, i \neq 0\}$ sont les positions prédites à partir du modèle d'évolution (4.7). Dans le cas où la commande calculée $\xi_{i,j}$ ne respecte pas la contrainte $\xi_{i,j} \geq 0$ (4.2), on peut montrer que le minimum de J sachant (4.2) est atteint pour une commande $\xi_{i,j}$ nulle. Enfin, de manière à éviter des variations de commande importantes lors de la prise en compte d'une nouvelle acquisition de la caméra induite par la détection d'une erreur sensible $w_{0,j} - x_{0,j}$, nous proposons de modifier la consigne w en répartissant l'erreur mesurée sur les N prochaines commandes (voir figure 4.3) :

$$w'_{i,j} = w_{i,j} - e_{i,j}. \quad (4.9)$$

A l'heure actuelle, la répartition $e_{i,j}$ sur les N futures consignes n'a pas été optimisée et les résultats présentés dans la suite ont été obtenus en utilisant la répartition arbitraire suivante :

$$e_{i,j} = \frac{N-i}{N} (w_{i,j} - x_{0,j}). \quad (4.10)$$

Résultats

Afin d'illustrer le fonctionnement de cette loi de commande, nous choisissons de retenir comme période d'échantillonnage : $T_s = 0,5 \text{ ms}$ pour la commande et $T_c =$

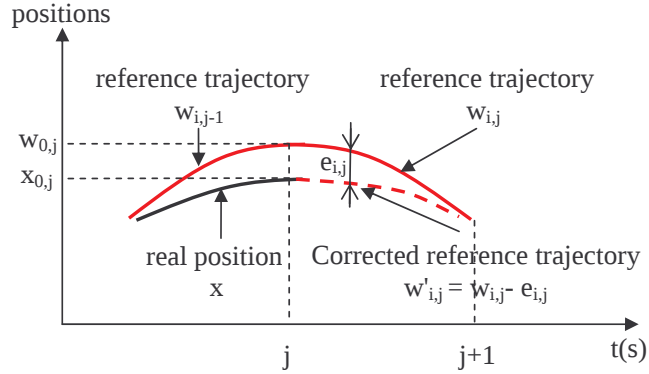


FIGURE 4.3 – Modification de la consigne $w'_{i,j}$ en fonction de la position $x_{0,j}$ et de la trajectoire souhaitée $w_{i,j}$

2,5 ms pour la caméra. L'horizon de prédiction est donc de $N = 5$ pas. Afin d'illustrer la robustesse de la loi de commande, les modèles respectivement utilisés pour établir la loi de commande et pour simuler le comportement du système sont établis en considérant des permittivités électriques différant de 20%.

Le premier résultat illustre la capacité de notre commande à suivre des trajectoires rapides. On considère un signal de consigne $w(t)$ sinusoïdal avec une période de 25 ms et une amplitude de $25 \mu m$ centrée sur l'origine. Dans cette zone, le comportement du modèle (4.3) peut être considéré comme linéaire (voir figure 3.4(a), page 60). La figure 4.4 reporte la position d'un micro-objet commandé en boucle fermée. Ce résultat est comparé avec un correcteur PI dont les coefficients ont été déduits d'un modèle linéaire local du premier ordre. Cette comparaison montre la pertinence de notre approche lors du suivi de trajectoire rapide.

Le deuxième résultat porte sur la commande du système sur une amplitude plus grande de $130 \mu m$ où le comportement est non-linéaire avec une période plus grande également de 100 ms. Dans cet exemple, le micro-objet doit s'approcher sensiblement des électrodes et est donc soumis à un comportement non linéaire. Les évolutions de la position et de la commande sont reportées sur la figure 4.5 : à l'instant $t = 0.01 s$, la commande calculée par (4.8) ne respectant plus la contrainte (4.2), la commande ξ prend la valeur 0 comme expliqué précédemment. Physiquement, ceci correspond au fait que la vitesse maximale admissible par l'objet est inférieure à la vitesse de la consigne. La commande sature à sa valeur limite $\xi = 0$. La particularité de cette saturation sur la variable de commande linéarisée ξ est qu'elle n'engendre pas de saturation sur la commande physique δu du système qui se maintient aux alentours de 50 V. On peut en effet montrer que la vitesse maximale à cette position est atteinte pour une tension de commande $\delta u = 50 V$ et non pour la valeur maximale admissible $\delta u = 75 V$. La prise en compte de la non-linéarité dans la synthèse de la commande permet de définir une commande optimale prenant en compte ces spécificités.

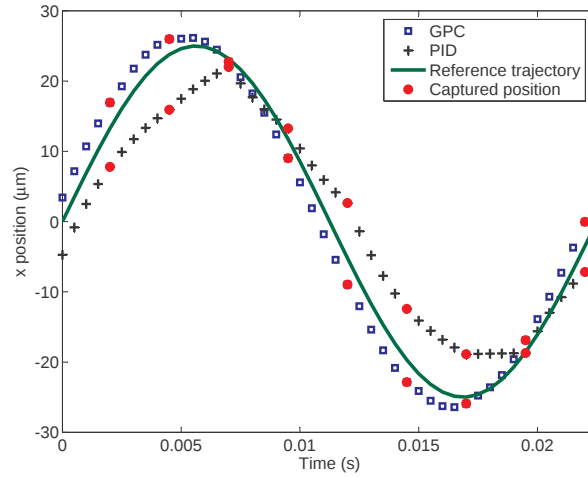


FIGURE 4.4 – Evolution de la position du micro-objet commandé par la commande GPC et un correcteur PI en réponse à une consigne sinusoïdale d’une période de 2.5ms , et d’une amplitude de $25\mu\text{m}$.

Ces travaux ont montré la spécificité que pouvait présenter les systèmes de micromanipulation sans contact vis-à-vis de leur commande. Les grandes dynamiques couplées à des comportements non-linéaires sont en effet une caractéristique de ces systèmes. L’approche proposée basée sur le formalisme de la commande prédictive montre des résultats encourageants qui devront être validés par des mesures expérimentales et étendus à la commande suivant plusieurs degrés de liberté. Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes sur la commande des systèmes de micromanipulation.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Mohamed Kharboutly, co-encadrée par Nicolas Chaillet, professeur à l’université de Franche-Comté et moi-même [106, 108, 110].

4.1.2 Lâcher par diélectrophorèse

Nous avons également proposé d’utiliser la force de diélectrophorèse comme un effort répulsif capable de contrôler le lâcher d’un micro-objet. Contrairement au cas d’application classique de la diélectrophorèse où les électrodes sont fixes, nous proposons de placer les électrodes sur les organes terminaux d’un préhenseur à deux doigts de serrage [68]. En l’absence de modèles fiables de l’adhésion entre un objet et un préhenseur, l’approche a été validée expérimentalement. Les expérimentations ont été réalisées à l’aide d’une pince piezoélectrique² développée par J. Agnus et al. [6] et munie d’organes terminaux spécifiquement étudiés pour la diélectrophorèse comprenant chacun une électrode permettant de créer un champ électrique alternatif aux abords de l’objet manipulé. Une séquence de lâcher d’objet par diélectrophorèse est détaillée figure 4.6. Dans un pre-

2. Le préhenseur piezoélectrique MMOC est présenté sur la figure 2.14, page 31.

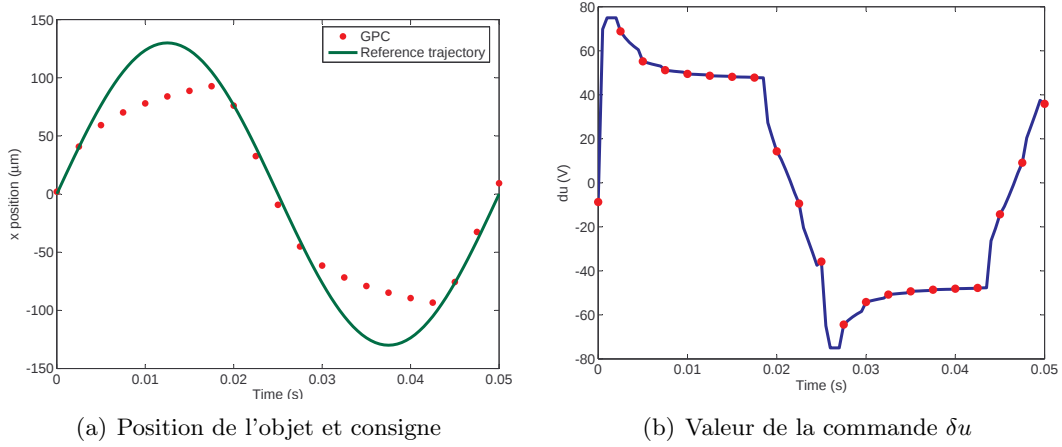
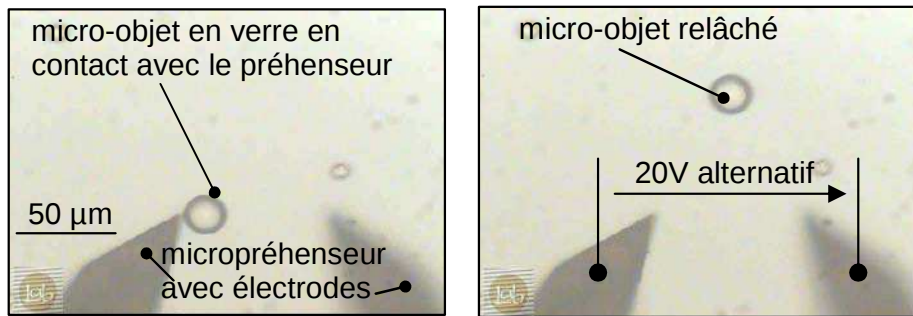


FIGURE 4.5 – Illustration du comportement du système bouclé dans la zone non linéaire : réponse à une consigne sinusoïdale d’amplitude $130 \mu m$ et de période $100 ms$ considérant une période d’échantillonnage $T_c = 2,5 ms$.

mier temps, l’ouverture de la pince ne permet pas la dépose de l’objet qui reste collé sur l’organe terminal gauche. Un signal électrique alternatif sinusoïdal d’amplitude $20V$ est alors appliqué entre les deux électrodes des deux organes terminaux. Ce champ électrique provoque par diélectrophorèse négative un effort répulsif capable de vaincre l’effort d’adhésion (force de pull-off). L’objet est ainsi relâché.

Les premiers travaux ont montré un intérêt majeur pour cette technique de lâcher contrôlé de l’objet dont le fonctionnement peut être optimisé par une conception plus complexe des électrodes. La méthode de lâcher pourrait également être améliorée en la couplant avec les travaux précédents sur la commande prédictive afin d’assurer un contrôle de la trajectoire de relâche.



(a) position de l’objet avant le lâcher actif (b) position de l’objet après le lâcher actif

FIGURE 4.6 – Lâcher actif d’un micro-objet en verre par diélectrophorèse.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des stages de master de David Hériban et Elie Gibeau que j’ai encadrés [68, 76, 87].

4.2 Stratégie de préhension par changement de phase

Le deuxième type de stratégies de micromanipulation adaptée au milieu liquide qui a été étudié porte sur l'utilisation du changement de phase liquide-solide du milieu [180]. La préhension par changement de phase et tout particulièrement en utilisant le gel d'une gouttelette d'eau est un principe déjà utilisé en micromanipulation. Toutefois ces systèmes opérant dans l'air, lors de la fonte de la glace, s'établit un pont capillaire entre l'objet et le préhenseur qui perturbe significativement le lâcher de l'objet. Afin d'éviter l'apparition de force capillaire due à l'interface air-liquide lors de la fonte, nous proposons d'effectuer le changement de phase au sein du liquide. Ainsi, l'approche proposée consiste à positionner le préhenseur aux abords de l'objet (voir figure 4.7(a)), à créer une bille de glace englobant le préhenseur et l'objet, ce dernier peut alors être positionné, et relâché sans problème d'adhésion lors de la fonte de glace [131].

Ces travaux ont été menés dans le cadre de la thèse de Beatriz Lopez Walle supportée par un contrat de l'institut mexicain CONACYT et co-encadrée par Nicolas Chaillot, professeur à l'université de Franche-Comté et moi-même [126–131, 180, 181]

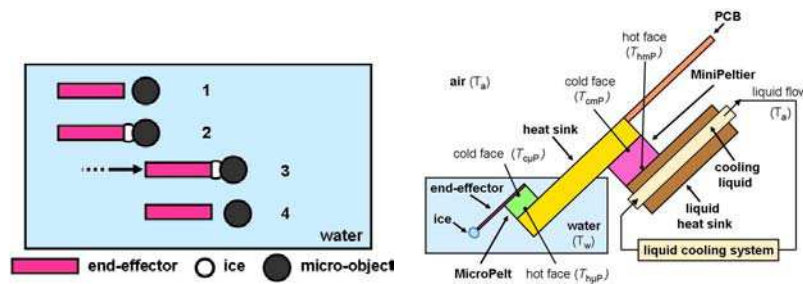
4.2.1 Principe de préhension

Le préhenseur à glace est constitué de deux modules à effets Peltier pour générer localement la bille de glace. Les modules à effets Peltier sont des transducteurs capables de générer *ou d'absorber* de l'énergie thermique, à partir d'un courant électrique. La direction du flux thermique est fonction du sens du courant qui définit ainsi une face chaude sur laquelle de l'énergie thermique est créée et une face froide sur laquelle de l'énergie thermique est absorbée. L'architecture du préhenseur est représentée sur la figure 4.7(b). Le premier module à effet Peltier noté MicroPelt (μP) est directement relié à l'organe terminal afin de générer la bille de glace nécessaire à la préhension. Or l'utilisation de ce module engendre également une génération d'énergie thermique sur sa face chaude qui, en l'absence d'autres précautions, a tendance à augmenter la température moyenne de l'eau rendant le principe de préhension inopérant. Afin d'absorber cette quantité de chaleur en dehors du liquide de manipulation, nous avons choisi d'ajouter un deuxième module à effet Peltier (Mini-Peltier) situé hors de l'eau et relié à la surface chaude du microPelt par un radiateur intermédiaire en cuivre [131, 181].

Le prototype réalisé est représenté sur la figure 4.8. Le module MicroPelt (Infineon Technologies AG) possède des dimensions de $720 \times 720 \times 428 \mu\text{m}^3$. Le module Mini-Peltier (Melcor FC0.6-18-05) de dimensions de $6.2 \times 6.2 \times 2.4 \text{ mm}^3$ est relié sur sa face chaude à système de convection forcée garantissant le maintien de sa température à la température ambiante.

4.2.2 Comportement expérimental

Le préhenseur peut être considéré comme un système à deux entrées que sont les courants d'alimentation des deux modules à effets Peltier et une sortie qui est la température



(a) Stratégie de préhension : (1) approche du préhenseur, (2) création d'un petit volume de glace et saisie de l'objet, (3) l'objet est déplacé avec le préhenseur, (4) la glace est fondue et l'objet est relâché

(b) Architecture du prototype

FIGURE 4.7 – Principe du système de micromanipulation par changement de phase immergé

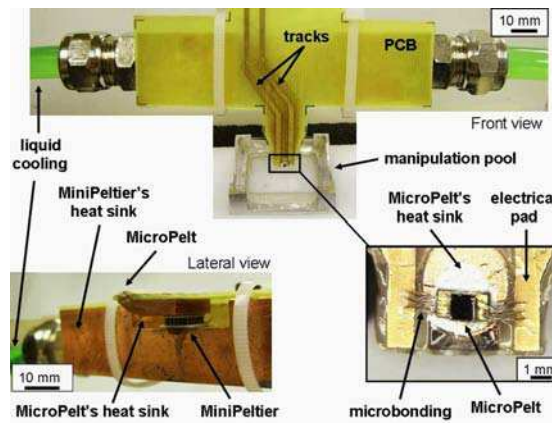


FIGURE 4.8 – Dispositif expérimental de préhension par changement de phase immergé

du microprehenseur. La figure 4.9 présente un relevé expérimental illustrant le fonctionnement typique du préhenseur.

La température initiale de l'organe terminal est de $14,5^{\circ}\text{C}$. A l'instant $t = 0$, le MiniPeltier est actionné avec un courant de $0,9\text{ A}$. Cette valeur ne sera plus modifiée durant le reste de l'expérimentation. Durant la phase de prérefroidissement, l'actionnement du MiniPeltier fait chuter progressivement la température de l'organe terminal (repère (a)). Ensuite, le module MicroPelt est actionné avec un courant de $0,5\text{ A}$ afin de faire décroître localement la température. A cet instant t_b , la température chute en effet rapidement, mais l'eau est en état de surfusion en état liquide sous la température 0°C [1, 143]. A l'instant t_c , la glace se forme sur un point de nucleation et la température augmente du fait de la chaleur latente. Au cours de la phase (c), la glace croît sur l'organe terminal. Enfin, le courant du module MicroPelt est inversé à $-0,5\text{ A}$ afin de faire fondre la glace.

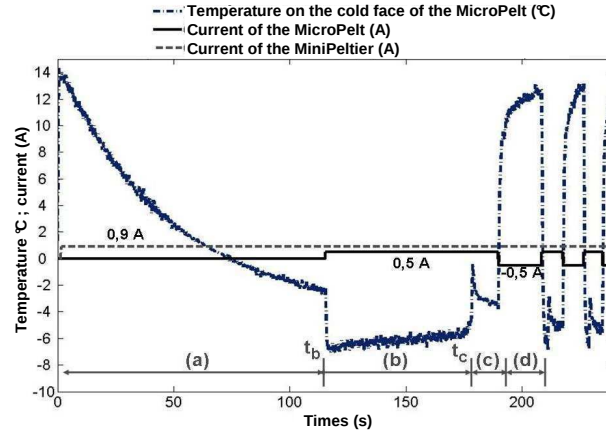


FIGURE 4.9 – Variation de la température sur l’organe terminal du préhenseur : (a) prérefroidissement, (b) refroidissement local de l’eau, (c) gel de l’eau et croissance de la glace, (d) fonte de la glace.

La température augmente rapidement du fait de l’action conjointe de l’effet Peltier et de l’effet Joule. La génération cyclique de glace peut alors s’opérer en modifiant le courant du MicroPelt entre ces deux valeurs limites 0,5 A et $-0,5$ A. Ces relevés expérimentaux montrent la capacité du système à contrôler la température de l’organe terminal aux alentours de la température de fusion 0°C .

Des démonstrations de micromanipulation d’objets en silicium de dimension $600 \times 600 \times 100 \mu\text{m}^3$ ont été réalisés de manière téléopérée (voir figure 4.10). Le préhenseur est tout d’abord approché de l’objet à manipuler (a). Le module microPelt est alors actionné avec un courant de 0,5 A afin de générer une bille de glace d’environ $4 \mu\text{l}$ qui enveloppe une partie de l’objet en 3 s (b). L’objet est alors déplacé vers la position souhaitée (c) et le courant du module MicroPelt est inversé à $-0,3$ A faisant fondre la glace en 7 s. Contrairement aux manipulations par glace dans l’air, le lâcher a lieu sans perturbation des forces capillaires. Ces expérimentations montrent la pertinence de cette approche.

4.2.3 Modélisation thermique

La relation entre les courants électriques dans les modules à effet Peltier et la température à la surface de l’organe terminal est une fonction de transfert complexe qui a fait l’objet d’une modélisation modulaire basée sur l’analogie thermique-électrique. Ces travaux sur la modélisation thermique à l’échelle du micromonde possèdent un caractère générique utilisable pour l’analyse thermique des microsystemes [127].

Modèle d’une structure élancée passive

La plupart des microsystemes thermiques se caractérisent par l’utilisation de structures élancées parcourues par un flux thermique et soumises à un effet de convection sur les surfaces longitudinales. Le problème thermique est synthétisé sur la figure 4.11 : un

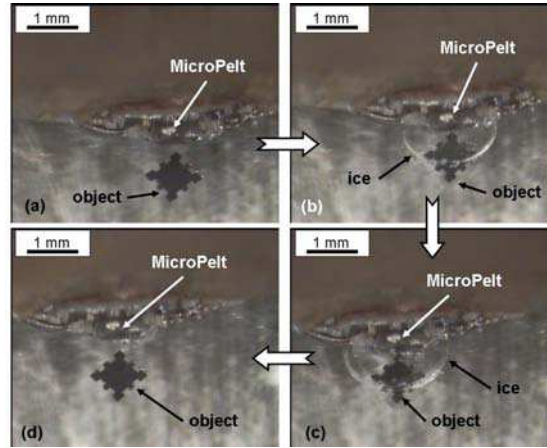


FIGURE 4.10 – Micromanipulation d'un composant en silicium de dimensions $600 \times 600 \times 100 \mu\text{m}^3$ avec le préhenseur à changement de phase immergé.

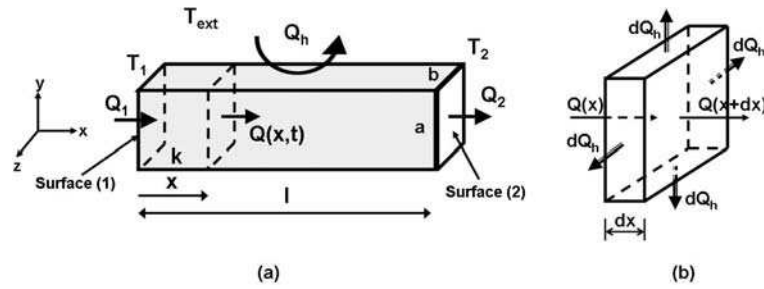


FIGURE 4.11 – Problème thermique analysé

flux thermique $Q(x, t)$ à travers la poutre engendre une différence de température entre les deux faces latérales T_1 et T_2 ; et un transfert par convection Q_h s'établit sur les autres faces en contact avec un fluide à une température extérieure T_{ext} . Ce problème générique s'illustre par le comportement du radiateur intermédiaire dans le cas du préhenseur à glace immergé.

Sur la base de l'écriture du problème thermique, de sa résolution analytique et de sa linéarisation, nous avons montré que ce système peut être représenté par :

$$Q_1 = -\frac{T_{ext} - T_1}{R_{v0}} + C_{th0} \frac{dT_1}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_{c0}} \quad (4.11)$$

$$Q_2 = -\frac{T_2 - T_{ext}}{R_{v0}} - C_{th0} \frac{dT_2}{dt} + \frac{T_1 - T_2}{R_{c0}} \quad (4.12)$$

où R_{c0} la résistance thermique de conduction, R_{v0} la résistance thermique de convection et C_{th0} la capacité thermique vérifient :

$$R_{c0} = \frac{l}{kS} \quad R_{v0} = \frac{2}{hPl} \quad C_{th0} = \frac{\rho C_p S l}{2} \quad (4.13)$$

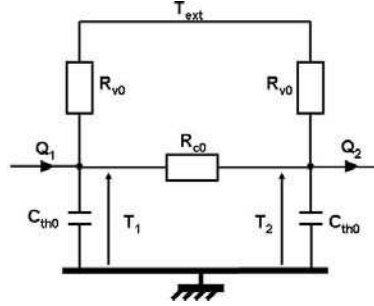


FIGURE 4.12 – Circuit thermique représentant le problème thermique spécifié figure 4.11

Ce modèle est représenté par le circuit thermique représenté figure 4.12.

Une analyse des hypothèses sous-jacentes à la linéarisation du système nécessaire à son écriture sous forme d'un circuit thermique permet de définir le critère de validité ν du modèle proposé :

$$\nu \ll 1 \text{ où } \nu = \frac{hPl^2}{(\sqrt{14} - 2)kS} \quad (4.14)$$

Analyse thermique de la formation de glace

L'objet de cette partie est de décrire le mécanisme de croissance de la glace sur le préhenseur. La formation de glace, créant un solide entre le préhenseur et le liquide, modifie les conditions d'échanges thermiques. On considère ainsi deux problèmes distincts dans le cas de présence ou non de glace. On note Q_4 la quantité de chaleur traversant la surface du préhenseur et T_4 sa température. En l'absence de glace, la face du préhenseur est en contact avec le liquide à température T_w , les conditions limites sur cette face sont donc des conditions de convection liées à une résistance de convection R_{v4} :

$$Q_4 = \frac{1}{R_{v4}}(T_4 - T_w) \quad (4.15)$$

En présence de glace, sur la base des observations expérimentales, on considère que la glace est une calotte sphérique (figure 4.13) dont la surface en contact S_5 avec le liquide est à température de fusion $T_5 = T_f$ de l'eau. Le volume de glace et la surface S_5 de contact entre l'eau et la glace peuvent s'établir en fonction de la hauteur de glace H_{glace} :

$$V_{glace} = \frac{\pi H_{glace}}{24}(3d_{\mu P}^2 + 4H_{glace}^2) \quad (4.16)$$

$$S_5 = \frac{\pi}{4}(d_{\mu P}^2 + 4H_{glace}^2) \quad (4.17)$$

La surface du microvolume de glace en contact avec l'eau est soumis à un flux de convection Q_5 :

$$Q_5 = \frac{1}{Z_{glace}}(T_f - T_w) \quad (4.18)$$

$$Z_{glace} = h_w S_5 = \frac{4}{\pi h_w}(d_{\mu P}^2 + 4H_{glace}^2)^{-1} \quad (4.19)$$

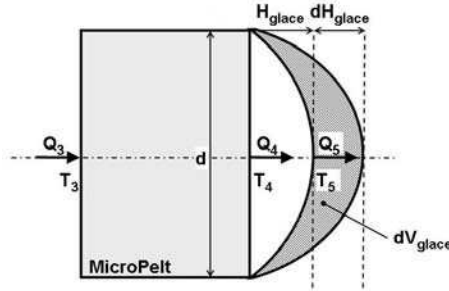


FIGURE 4.13 – Géométrie de la callote de glace sur le préhenseur

La surface de convection n'étant pas constante au cours du temps, l'impédance Z_{glace} est variable. Enfin, la différence entre les flux thermiques Q_5 et Q_4 est absorbée par la chaleur latente de changement de phase :

$$\rho_{glace} L_f dV_{glace} = Q_5 dt - Q_4 dt \quad (4.20)$$

où ρ_{glace} est la masse volumique de la glace et L_f l'enthalpie de fusion de l'eau. Ainsi sachant (4.16) et (4.18), la variation dans le temps de la hauteur de glace H_{glace} en fonction des températures T_f et T_w , et du flux de chaleur Q_4 vérifie :

$$\frac{dH_{glace}}{dt} = \frac{1}{\rho_{glace} L_f} \left(2h_w(T_f - T_w) - \frac{8Q_4}{\pi(d_{\mu P}^2 + 4H_{glace}^2)} \right) \quad (4.21)$$

Le circuit thermique non linéaire de la génération de glace est représenté sur la figure 4.14.

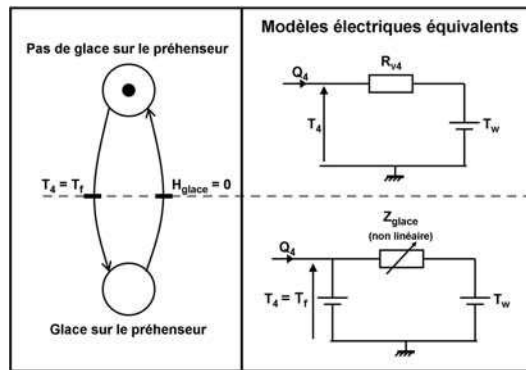


FIGURE 4.14 – Circuit thermique non linéaire représentant la croissance de la glace sur le préhenseur.

Modélisation thermique de l'ensemble du système

L'intérêt de la modélisation thermique est d'ouvrir la possibilité de connecter différents modèles de sous-systèmes pour constituer le modèle final [126]. Nous sommes ainsi

capables de construire un modèle complet du comportement thermique du préhenseur dont le circuit général est représenté figure 4.15. Le modèle des structures élancées a été utilisé pour représenter le radiateur intermédiaire. Les modèles électriques équivalents des modules à effet Peltier ont été extraits des travaux de Seliger *et al.* [162]. Enfin le modèle non-linéaire de formation de la glace vient compléter le circuit. L'identification des différentes impédances du système a été validée par des mesures réalisées sur des sous-systèmes. Le modèle ainsi constitué a permis de reconstruire le comportement expérimental décrit sur la figure 4.9.

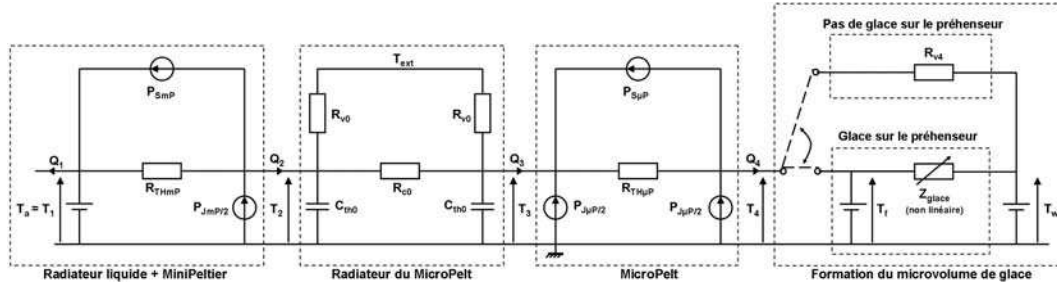


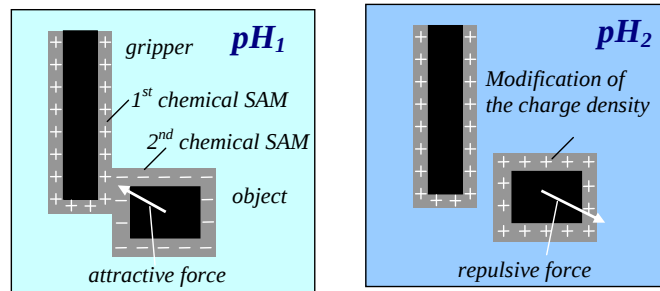
FIGURE 4.15 – Circuit thermique représentant le comportement thermique du micropréhenseur.

4.3 Manipulation par fonctionnalisation de surface active

La troisième voie de micromanipulation en milieu liquide qui a été explorée est basée sur l'analyse de l'impact de la fonctionnalisation chimique de surface sur l'adhésion présentée dans la partie 3.2.2, page 61. Nous avons en effet montré que le changement d'un milieu acide à un milieu basique permettait de basculer entre des interactions attractives intéressantes pour la saisie d'un objet et des interactions répulsives qui sont susceptibles d'engendrer le lâcher contrôlé d'un objet (voir figure 4.16). On peut ainsi projeter de saisir un objet avec un levier fonctionnalisé à un certain $\text{pH}=\text{pH}_1$ et de modifier le pH vers une nouvelle valeur pH_2 pour laquelle l'objet est repoussé du préhenseur. La mise en œuvre de ce principe nécessite la capacité de modifier les propriétés chimiques du milieu au cours de la manipulation.

Les figures 4.18, 4.17 relatent les premiers essais mettant en œuvre cette stratégie de manipulation prometteuse. Un levier sans pointe de microscope à force atomique (PointProbe Technology) a été fonctionnalisé par le silane APTES³. A pH naturel, l'interaction avec la bille de verre d'un diamètre de 50 micromètres est attractive et la bille est saisie sur le levier (voir figure 4.18(a)). L'augmentation du pH inverse le comportement pour devenir répulsif provoquant le lâcher de la bille (figure 4.18(b)). Des essais comparatifs de lâcher de micro-objets lors de manipulations avec des pinces à deux doigts de serrage fonctionnalisées ont été menés à différents pH (voir figure 4.17).

3. APTES : 3 (ethoxydimethylsilyl) propyl amine, voir figure 3.5(a), page 62

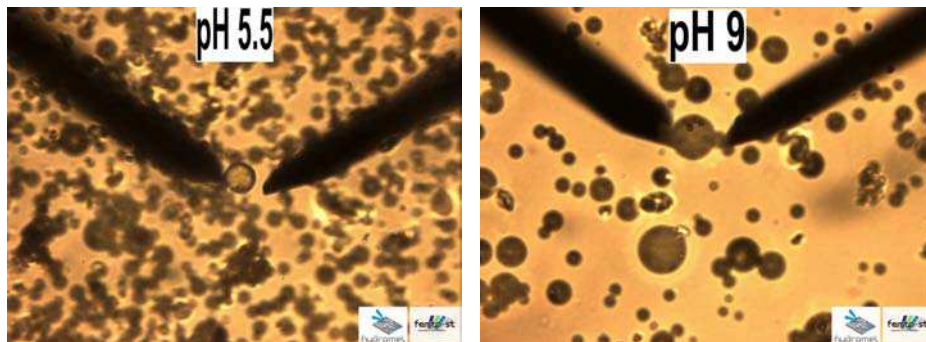


(a) Saisie de la microbille à pH_1 lorsque les charges surfaciques induisent une force électrostatique attractive
 (b) Lâcher de la bille à pH_2 lorsque la force d'interaction est répulsive

FIGURE 4.16 – Principe de préhension active avec un levier AFM en utilisant une variation de pH et des objets fonctionnalisés

Selon que l'interaction est de type attractive ou répulsive l'objet est respectivement maintenu sur les doigts du préhenseur ou lâché lors de l'ouverture de la pince.

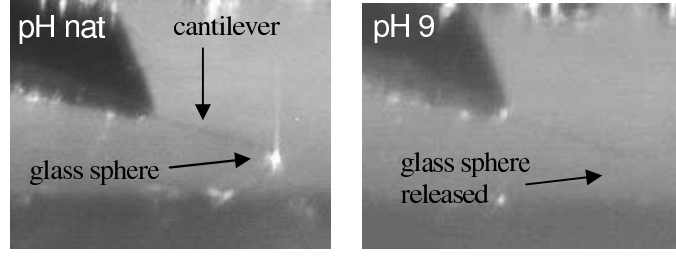
Ces manipulations constituent une première preuve de concept qu'il convient d'enrichir par des manipulations complémentaires. De manière générale, l'utilisation de fonctionnalisations ou de structurations de surface apparaît comme un moyen fiable de contrôler les interactions entre les objets manipulés et le préhenseur. D'autres fonctionnalisations non réversibles mais réduisant de manière sensible l'adhésion dans le milieu aérien sont également à l'étude.



(a) Ouverture d'une pince fonctionnalisée à pH_5 : l'adhésion empêche le lâcher de la bille.
 (b) Ouverture d'une pince fonctionnalisée à pH_9 : la répulsion induit le lâcher de la bille qui apparaît donc floue sur l'image

FIGURE 4.17 – Comparaison de la phase de lâcher à deux pH différents sur des billes de 20 à 40 micromètre de diamètre.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du séjour post-doctoral de Jérôme Dejeu à l'institut FEMTO-ST que j'ai encadré avec le support de Patrick Rougeot [43–46].



(a) Saisie de la microbille à pH naturel (b) Lâcher de la bille à pH 9

FIGURE 4.18 – Saisie et lâcher d’une bille de verre de 50 micromètres de diamètre en utilisant un levier en silicium fonctionnalisé par APTES

4.4 Préhension à deux doigts de serrage et lâcher par substrat adhérent

Cette partie est dédiée à la présentation de la dernière stratégie de manipulation étudiée dont l’application porte sur le micro-assemblage en milieu aérien.

4.4.1 Principe général

Le principe général repose sur une hiérarchisation des forces de préhension et des différentes forces d’adhésion. Il consiste en une approche hybride couplant préhension à deux doigts de serrage et manipulation par adhésion et aboutissant à un compromis intéressant entre ces deux méthodes.

D’une part pour permettre le lâcher de l’objet, la force de pull-off entre l’objet et le substrat doit être supérieure à la force de pull-off entre le préhenseur selon la normale $\vec{n}$ au substrat (voir figure 4.19(a)) :

$$F_{\text{objet-substrat}}^{\text{pull-off}} \gg F_{\text{objet-préhenseur}}^{\text{pull-off}} \quad (4.22)$$

Afin de se prémunir des perturbations extérieures, la force $F_{\text{objet-préhenseur}}^{\text{pull-off}}$ doit être minimale et la force $F_{\text{objet-substrat}}^{\text{pull-off}}$ la plus grande possible. Ce principe est celui utilisé lors de manipulation par adhésion. En l’absence d’autres stratégies complémentaires, cette méthode fiabilise le lâcher mais rend la saisie impossible par adhésion [85].

D’autre part, la saisie de l’objet nécessite la mise en œuvre d’une autre stratégie capable d’induire des efforts de saisie suffisants pour rompre l’adhésion entre l’objet et le substrat. Autrement dit, une saisie fiable d’un objet est réalisable si la force de préhension prédomine sur la force de pull-off entre l’objet et le substrat (voir figure 4.19(b)) :

$$F_{\text{objet-préhenseur}}^{\text{saisie}} \gg F_{\text{objet-substrat}}^{\text{pull-off}} \quad (4.23)$$

Une des solutions technologiques qui garantit un effort de préhension important est une pince à deux doigts de serrage actif pour laquelle la force de préhension peut facilement

être un ordre de grandeur supérieur à la force de pull-off entre l'objet et le substrat. Cette méthode hybride tire avantage des deux principes de manipulation actuels que sont la préhension par deux doigts de serrage et la manipulation par adhésion.

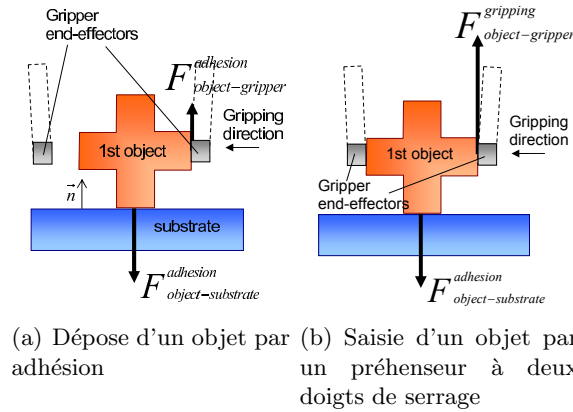


FIGURE 4.19 – Principe de prise et de dépose hybride entre préhenseur à deux doigts de serrage et préhension par adhésion

4.4.2 Expérimentations

La mise en œuvre de cette stratégie nécessite que le préhenseur possède un ratio le plus important possible entre sa force de préhension et la force de pull-off entre le substrat et le préhenseur. Le préhenseur piezoélectrique⁴ développé par J. Agnus et al. [6] a été modifié au niveau de ces organes terminaux de façon à expérimenter cette stratégie. Les organes terminaux ont été réalisés en silicium à l'aide de la technique de gravure DRIE utilisée en microfabrication [5] et sur la base d'un wafer de type SOI. Les organes terminaux sont caractérisés par une poutre millimétrique d'une épaisseur de $12\mu m$ conçue pour saisir des objets de dimensions caractéristiques situées entre 5 et 100 micromètres. De plus le procédé de gravure a été mis à profit pour structurer la surface du préhenseur en contact avec l'objet. Le procédé de gravure est en effet une succession de cycles enchainant gravure isotropique et dépôt polymère protecteur, qui provoque une rugosité non négligeable sur le flan de gravure appelée *scalloping*. Cette rugosité permet de réduire sensiblement l'adhésion entre le préhenseur et l'objet comme illustré en section 3.2.3, page 64. L'organe terminal ainsi réalisé est présenté figure 4.20.

De plus, il est nécessaire d'augmenter l'adhésion entre l'objet et le substrat. Une manière pertinente d'augmenter l'adhésion est d'utiliser des substrats polymères déformables couramment utilisés lors du conditionnement des composants micro-électroniques. Ces matériaux permettent d'accroître sensiblement l'adhésion entre le substrat et l'objet.

4. Le préhenseur piezoélectrique MMOC est présenté sur la figure 2.14, page 31.

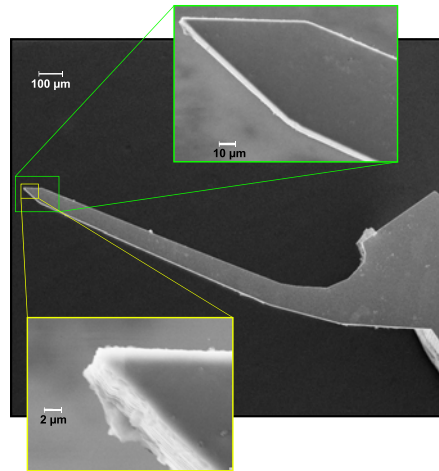


FIGURE 4.20 – Organes terminaux en silicium. La rugosité de la zone de préhension est visible dans l’encadré.

La mise en œuvre expérimentale de ce principe de manipulation est synthétisée sur la figure 4.21. Initialement, un objet ⁵ en silicium de $40 \times 40 \times 5 \mu m^3$ a été placé verticalement sur le substrat en téléopération. Le gripper est utilisé pour saisir l’objet par serrage entre les deux doigts (1-2), puis pour le déplacer vers une nouvelle position (3). L’objet est alors redéposé sur le substrat, le préhenseur est ouvert et se dégage verticalement laissant l’objet sur le substrat (4). En l’absence de polymère sur le substrat, il est très difficile de relâcher l’objet lors de l’ouverture des doigts de pince, l’objet restant en contact sur les doigts du préhenseur.

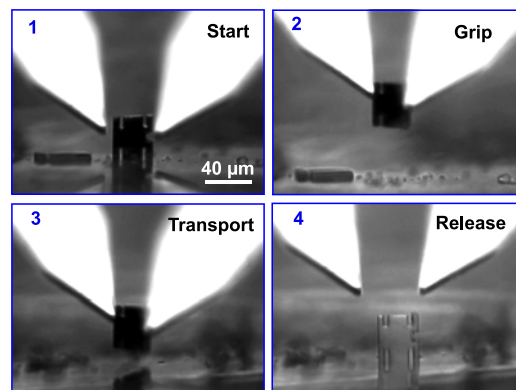


FIGURE 4.21 – Opération de prise-dépose d’un objet de taille $40 \times 40 \times 5 \mu m^3$.

5. le procédé de réalisation de ces micro-objets en silicium est reporté à la section 5.2.1, page 108.

Afin de montrer la fiabilité de cette méthode de préhension, des séquences automatiques de prise-dépose d'objets ont été réalisées en téléopération et en cycle automatique. Ces tests ont été réalisés sur des micro-objets en silicium d'une taille de $5 \times 10 \times 20 \mu\text{m}^3$. L'objectif de la séquence est de saisir l'objet sur le plan, le déplacer de $100 \mu\text{m}$, le lâcher, le saisir à nouveau et le replacer sur sa position initiale. Les tests ont été premièrement réalisés par téléopération sans retour de force, l'utilisateur s'aidant de deux vues microscopes pour réaliser l'opération. Les 60 cycles de prise-dépose ont été réalisés avec un temps de cycle de l'ordre de 3 à 4 secondes. Les tests ont également été effectués en cycle automatique avec un temps de cycle de 1,8 seconde et une fiabilité de 99%. Comme peu d'articles de la littérature mentionnent le niveau de fiabilité des stratégies de micromanipulation, il n'est pas aisé de positionner clairement cette valeur de fiabilité par rapport à l'état de l'art. Toutefois, quelques tests de fiabilité sont présentés dans [32, 70]. Ces deux tests ont utilisés des billes de polystyrène d'un diamètre de $50 \mu\text{m}$. Le taux de réussite varie entre 51% et 95% sur un échantillon de 60 à 100 tests. Notre stratégie semble par conséquent présenter un niveau de fiabilité intéressant au regard des performances relatées dans la littérature.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR PRONOMIA par David Hériban, ingénieur de recherche sous contrat que j'ai encadré [72, 90, 98].

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a montré que les spécificités du comportement des micro-objets nécessitaient de repenser la fonction robotique de préhension et plus largement de manipulation en faisant émerger des principes originaux. De plus, le choix de manipuler en milieu liquide ouvre vers des voies nouvelles qui se distinguent de la micromanipulation dans l'air et présentent ainsi des marges sensibles en terme d'innovation. Mes contributions sur la conception, l'expérimentation et la commande de stratégies de micromanipulation adaptées au paradigme du micromonde ont été présentées. L'étude des moyens de micromanipulation a également fait émerger une problématique particulière sur le plan de la commande de systèmes fortement non linéaires dont la fréquence de coupure est proche de celle du capteur. Cette étude peut sans doute être élargie à d'autres principes de micromanipulation sans contact. Ces méthodes de micropréhension constituent le cœur des systèmes de micro-assemblage présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Etude des cellules de micro-assemblage

Sur la base des stratégies de micromanipulation et de micropréhension présentées dans le chapitre précédent, des séquences d'assemblage ont été réalisées. L'analyse de quelques structures robotiques porteuses capable de mettre en œuvre les stratégies de manipulation et de préhension sera tout d'abord présentée. Quelques exemples d'applications d'assemblage d'objets manufacturés et de manipulation d'objets biologiques seront ensuite illustrés sur des cas d'étude. Ce chapitre conclut la présentation des activités scientifiques et ouvre vers le dernier chapitre dédié aux perspectives applicatives et scientifiques de ces travaux

5.1 Robots porteurs pour la micromanipulation

Au delà des stratégies de micropréhension présentées au chapitre précédent, la réalisation d'opérations complexes de micro-assemblage et de micromanipulation nécessite la mise en œuvre de structures robotiques porteuses. Des travaux de type exploratoire ont été menés autour de l'étude de ces robots. L'identification des défauts de la structure actionnée et leur prise en compte dans la commande robotique est un premier enjeu qui a été exploré en utilisant des mesures par vision et par capteur de contact à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM). Une structure robotique parallèle à trois degrés de liberté actionnée par le principe fluide décrit dans la section 3.2.4, page 69 a également été proposée.

5.1.1 Identification des défauts par vision

Afin de réaliser des tâches de micro-assemblage, les structures robotiques doivent posséder de nombreux degrés de liberté tant en translation qu'en rotation. La course des axes de translation est typiquement proportionnelle à la taille des objets manipulés. Les courses en micro-assemblage sont de l'ordre de quelques centaines de micromètres

et quelques millimètres. Dans ce domaine, un grand nombre de technologies sont commercialisées et existe “sur étagère”. Elles sont, par exemple, basées sur des actionneurs piezoélectriques exploitant la déformation des matériaux (exemple : PI GmbH, MICOS GmbH). Concernant les rotations, quelle que soit l’échelle, des assemblages tridimensionnels nécessitent des courses importantes (exemple : 180° pour un demi tour). Autrement dit, les angles ne sont pas modifiés par l’effet d’échelle et les axes en rotations doivent posséder des précisions et des courses comparables quelle que soit la dimension de l’objet manipulé. Les principes de micro-actionnement basés sur la déformation ne permettent pas de réaliser des liaisons cinématiques en rotations avec des courses importantes. L’utilisation de guidages standards (roulement à bille) doit donc être envisagée, et permet d’atteindre des répétabilités en rotation suffisantes (typiquement $0,1^\circ$).

Toutefois, les couplages entre les axes de translations et de rotations doivent être pris en compte au travers de deux cas : (i) l’impact des défauts angulaires (pitch, yaw, roll) des axes de translation sur la répétabilité en rotation ; (ii) l’impact des axes de rotations sur les translations via les défauts d’excentricité qui deviennent sensibles par rapport à la répétabilité des axes de translation par déformations. Ce deuxième couplage impacte fortement la répétabilité et la précision du système en translation et sa réduction est un enjeu pour l’automatisation d’opérations de micro-assemblage. Il est à noter que les travaux sur la calibration de robots porteurs de micro-assemblage sont focalisés sur des modélisations de structures possédant 2 ou 3 degrés de liberté en translation ou rotation obtenus par déformation qui ne peuvent engendrer de rotations sur de grandes courses [11, 179, 183].

Système robotique plan étudié

Nos travaux ont porté sur deux systèmes à 3 degrés de liberté comprenant deux translations et une rotation engendrant un mouvement planaire. Ils sont illustrés ici par une présentation de l’analyse d’un de ces deux systèmes. Nous considérons le système présenté figure 5.1 et possédant deux degrés de liberté en translation (Physick Instrumente, M111.1DG). Ces axes motorisés ont un défaut de linéarité inférieure à $2\ \mu\text{m}$ sur la course de l’axe, une répétabilité unidirectionnelle de $500\ \text{nm}$ et bidirectionnelle de $2\ \mu\text{m}$. Le système de rotation est basé sur un guidage par roulement et possède une excentricité de $65\ \mu\text{m}$ supérieure à la répétabilité des axes en translations (voir figure 5.2).

La mesure des défauts dans le plan est effectuée en utilisant un imageur optique muni d’un objectif de microscopie. Le repère fixe de référence est choisi comme étant le repère R_0 lié à l’image. Le modèle est basé sur deux repères définis comme suit :

- R_1 , repère non orthogonal dont les deux axes x_1 et y_1 sont colinéaires aux directions des axes de translations.
- R_2 , repère orthogonal lié au mobile, son centre O_2 caractérise le centre de l’axe de rotation.

En l’absence de défaut d’excentricité le centre de rotation O_2 est fixe dans R_1 . Dans notre cas, on représente le défaut d’excentricité par un déplacement du centre O_2 dans

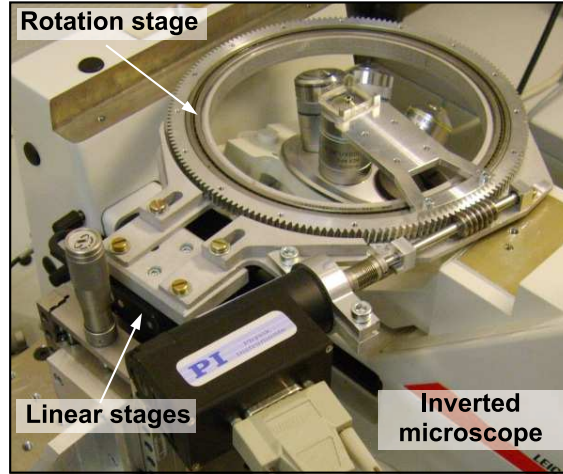


FIGURE 5.1 – 3DOF Planar Robotic System Studied

R_1 en fonction de l'angle θ :

$$\vec{O_1O_2} = X(\theta) \cdot \vec{x}_1 + Y(\theta) \cdot \vec{y}_1 \quad (5.1)$$

Ainsi la position d'un point M fixe sur le mobile s'exprime en fonction de sa position (x_M, y_M) dans R_2 , des paramètres articulaires (c_x, c_y, θ) et des défauts angulaires $(X(\theta), Y(\theta))$:

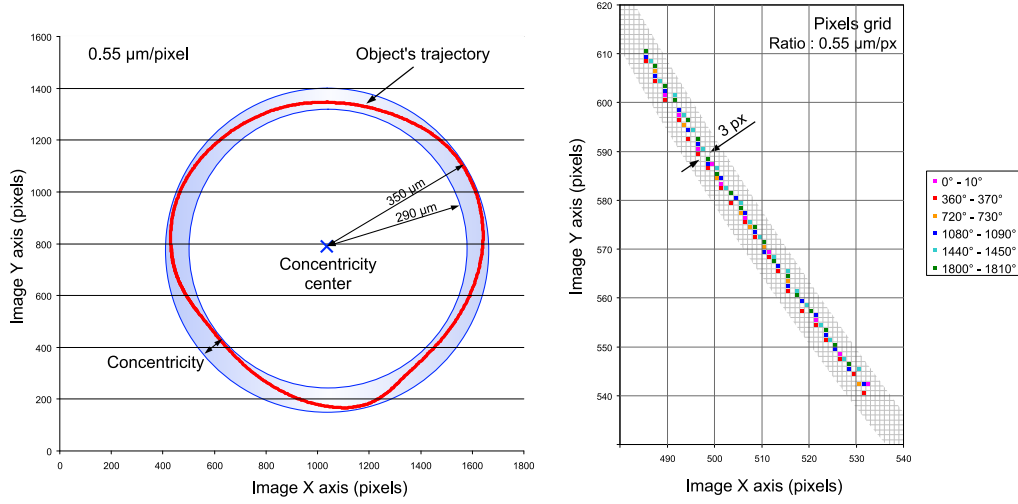
$$\vec{O_0M} = c_x \cdot \vec{x}_1 + c_y \cdot \vec{y}_1 + X(\theta) \cdot \vec{x}_1 + Y(\theta) \cdot \vec{y}_1 + x_M \vec{x}_2 + y_M \vec{y}_2 \quad (5.2)$$

Identification des paramètres et simulation de la correction des défauts

Sous réserve d'identification des défauts angulaires $(X(\theta), Y(\theta))$, le modèle (5.2) peut être utilisé pour corriger ces défauts à l'aide des tables de translations. Le système de vision utilisé est basé sur un capteur CCD de 2044x1500 pixels avec un zoom optique 10x permettant d'obtenir une résolution de $0,55 \mu\text{m}/\text{px}$ sur un champ de vue de $1124 \times 825 \mu\text{m}^2$. L'identification des défauts de la structure est basée sur la mesure de la trajectoire de deux objets carrés de $40 \mu\text{m}$ de côté placés sur le mobile. Il est ainsi possible de déterminer la trajectoire de O_2 dans le repère R_1 au cours de l'évolution de l'angle θ aboutissant à la détermination des paramètres $(X(\theta), Y(\theta))$ caractérisant l'excentricité (figure 5.3(a)).

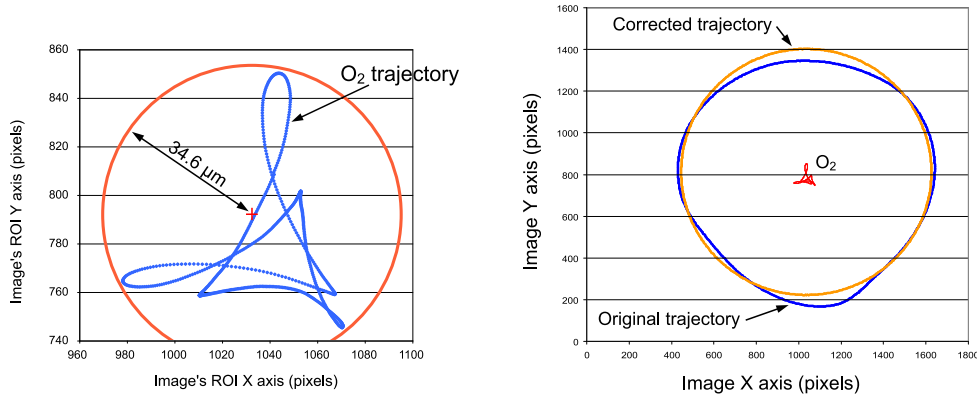
L'utilisation du modèle inverse de l'équation (5.2) pour corriger les défauts d'excentricité a été simulé. Ces travaux montrent la possibilité de réduire le défaut d'excentricité de $65 \mu\text{m}$ à $4,4 \mu\text{m}$ (voir figure 5.3(b)). Des résultats similaires ont été obtenus également sur le deuxième système étudié.

Ces travaux, effectués dans le cadre des stages de Master de A. Thiebault et S. Alvo [7, 99, 173] que j'ai encadré avec D. Hériban et C. Clevy, ont permis de relever



(a) Identification de l'excentricité de l'axe en rotation (b) Répétabilité de la trajectoire sur 10° au cours de 6 tours

FIGURE 5.2 – Trajectoire d'un point de la table motorisée lors d'une rotation de 360°



(a) Trajectoire du point O_2 dans le repère R_1 (b) Trajectoire d'un point du mobile en corrigeant le défaut d'excentricité

FIGURE 5.3 – Identification des paramètres et simulation de la correction des défauts

l'importance de la commande robotique des structures porteuses utilisées en micromanipulation et micro-assemblage dans une perspective d'automatisation des processus. Ils consistent en des travaux préliminaires montrant l'impact des couplages entre les différents axes et tout particulièrement entre les défauts d'excentricité des axes de rotations et les axes de translations. La poursuite de ces travaux est réalisée dans le cadre d'une thèse encadrée par mes collègues Cédric Clevy et Nicolas Chaillet.

5.1.2 Identification des défauts par capteurs de contact (AFM)

Une deuxième approche liée à l'identification des défauts de structures robotiques porteuses portent sur l'utilisation de capteurs de contact. L'objet de ces approches est d'assurer un positionnement relatif de deux micro-objets afin de réaliser une mesure des forces d'interaction s'établissant entre ces deux objets (voir section 3.3.1, page 73). Contrairement à l'approche présentée ci-dessus qui utilise la vision comme capteur, le contexte applicatif de cette section n'est pas directement liée au micro-assemblage mais l'objectif scientifique d'analyse et d'amélioration de la répétabilité des robots porteurs est identique.

La mesure des forces d'interaction à distance ou au contact entre deux micro-objets nécessite le contrôle de la trajectoire relative entre eux. Comme explicité à la section 3.3.1, page 73, les besoins de mesure de force d'interaction se tournent vers l'étude d'objets de forme quelconque pour lesquels les degrés de liberté de la position dans l'espace doivent être contrôlés. Les objets à positionner sont respectivement placés sur une structure robotique à 6 degrés de liberté (voir figure 5.4), et sur un capteur de force que nous considérerons comme fixe. Les micro-objets ne pouvant être indexés sur les systèmes de positionnement avec une précision suffisante, une méthode particulière de calibration partielle du robot de mesure a été proposée afin de pouvoir maîtriser la position relative entre les deux objets.

Le principe retenu consiste à fixer au préalable le premier objet sur un substrat possédant des repères (trous dans la plan). Le substrat est alors placé sur le robot avec une indexation grossière. On considère alors les repères suivants (voir figure 5.4) :

- un repère monde (FW) ;
- un repère robot (FR) correspondant à la position de la partie mobile du robot ;
- un repère substrat (FS) correspondant au repère physique sur le substrat ;
- un repère objet (FO) ;
- un repère AFM (FA) correspondant à la position du deuxième objet sur l'AFM.

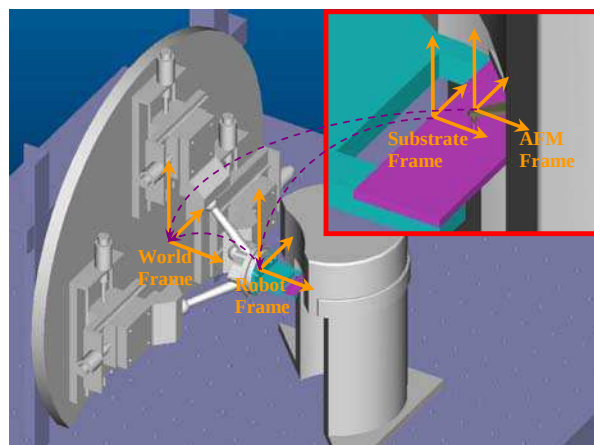


FIGURE 5.4 – Repères utilisés dans la calibration partielle du robot de mesure de force.

La transformée entre le repère monde (FW) et le repère robot (FR) est établie par la calibration initiale du robot qui ne sera pas modifiée dans ces travaux. La transformée entre le repère substrat (FS) et le repère objet (FO) peut être mesurée à l'aide de moyens de microscopie électronique au préalable. Le contrôle de la position entre les deux objets (FO) et (FA) nécessite ainsi la définition de la position de l'AFM (FA) dans le repère monde (FW) et de la position du substrat (FS) dans le repère robot (FR). Celles-ci sont définies en utilisant le capteur AFM (FA) comme un capteur de contact capable d'identifier la position des repères physiques sur le substrat (FS).

Ces repères sont des trous carrés représentés sur la figure 5.5. Le repère (FS) peut être déterminé par la mesure de la position des trois coins I, II, III du trou. Celle-ci s'effectue en maintenant le levier de l'AFM fixe est en utilisant les axes du robot porteur pour déplacer le levier de l'AFM à proximité du trou. On peut ainsi obtenir des courbes de mesure représentées sur la figure 5.6(a) sur lesquelles la position du bord du trou est identifiable. Un minimum de 8 mesures correspondant à 2 mesures par bord à été réalisé pour différentes postures angulaires du robot. On peut montrer qu'à partir de deux postures angulaires, il est possible de reconstruire un modèle géométrique de notre problème, suffisant pour commander la position relative entre les deux objets. La calibration partielle effectuée, il est possible de comparer une posture mesurée et une posture simulée sur la base du modèle (voir figure 5.6(b)). L'erreur entre les deux postures est de l'ordre de 1 à 2 micromètres. Cette erreur semble acceptable pour la caractérisation d'objets de taille caractéristique supérieure à $10\mu m$ mais ne sera pas assez précise pour des objets plus petits. Ces travaux préliminaires nous ont également permis d'appréhender l'importance des dérives thermiques, qui peuvent au cours d'une même journée, induire sur notre robot des défauts de l'ordre du micromètre.

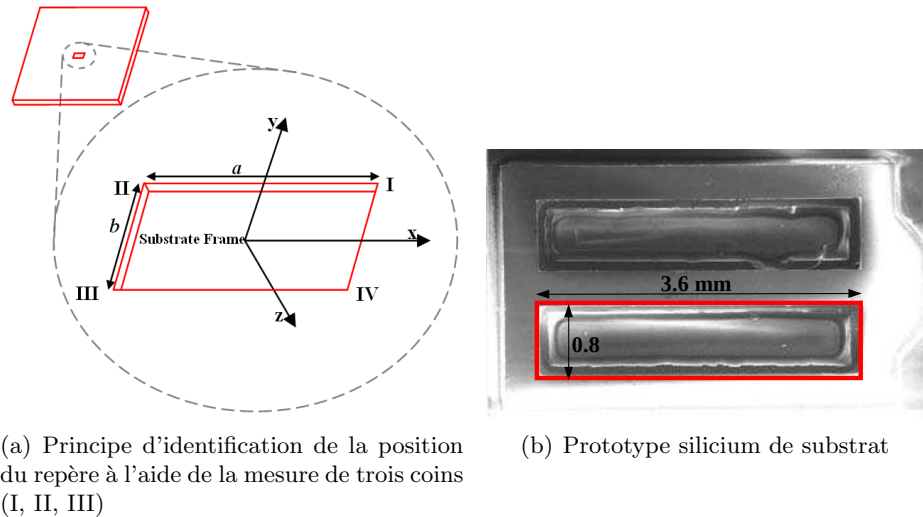


FIGURE 5.5 – Repères physiques réalisés sur le substrat

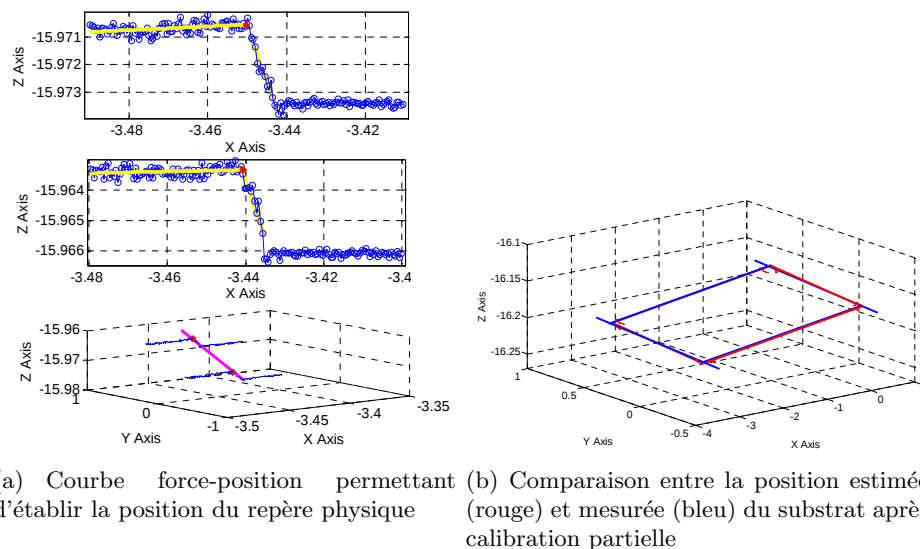


FIGURE 5.6 – Relevés expérimentaux illustrant la calibration partielle du robot de mesure de force

Ces premiers résultats ont montré que l'utilisation d'un levier d'AFM comme d'un capteur de contact semble être un moyen de mesure pertinent pour mesurer des postures d'un robot de précision évoluant sur des faibles courses.

Ces travaux ont été effectués lors du séjour post-doctoral de Wei Dong que j'ai encadré avec le support de David Rostoucher [52].

5.1.3 Robot à actionnement capillaire

La génération de mouvement dans une cellule de micro-assemblage peut également être obtenue en exploitant des principes physiques spécifiques des échelles micrométriques. Ainsi, nous proposons d'exploiter les bulles de gaz dont le comportement a été décrit à la section 3.2.4, page 69 pour actionner une table compliant immergée.

Le principe d'actionnement est reporté sur la figure 5.7. Il repose sur l'utilisation de trois bulles placées entre la table à actionner et un substrat. L'originalité de ces travaux tient au fait de considérer une bulle de gaz dans un milieu liquide contrairement à des approches plus classiques considérant des gouttes de liquide dans un milieu aérien. Afin que la taille des bulles soit modifiable, elles sont reliées à un réservoir de gaz dont le volume peut être contrôlé par un système de type "pousse-seringue". Les bulles peuvent être considérées comme des transducteurs entre une énergie fluïdique (P.V) fournie par le pousse seringue et une énergie mécanique transmise à la table (F.d). Ainsi une modification du volume de gaz V par le pousse seringue engendre un déplacement d de la table.

Le premier intérêt de cette approche est de pouvoir déporter le pousse seringue à une distance sensible de la table (typiquement plusieurs centimètre, voire un mètre),

évitant des problèmes d'encombrement cruciaux à cette échelle. Le deuxième avantage porte sur le montage facile de la table par auto-assemblage. De plus, la structure ainsi réalisée est particulièrement robuste comparativement à une structure élastique capable des mêmes déplacements. En effet, si un effort trop important est appliqué sur la structure, la table se détachera des bulles et pourra être rapidement remontée alors qu'une structure compliant serait définitivement cassée. Enfin, l'effet d'échelle est très favorable à la miniaturisation d'un tel principe basé sur les forces capillaires linéaires à l'échelle considérée contrairement au poids de la table qui est volumique. Ainsi, plus le système est petit, plus les bulles seront efficaces pour déplacer la table.

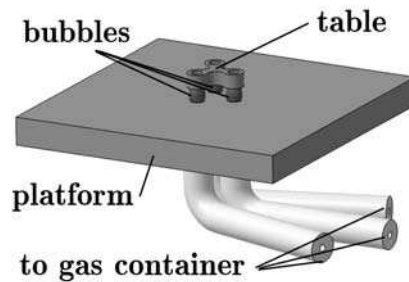


FIGURE 5.7 – Représentation tridimensionnelle du principe d'une table à actionnement capillaire.

De plus, le comportement particulier d'une bulle compressible entre deux solides est un moyen de contrôler la compliance mécanique¹. En effet, l'interface peut être considérée comme un mécanisme compliant dont la compliance est ajustable en fonction des paramètres fluidiques. Des simulations numériques issues du modèle présenté section 3.2.4, page 69 ont été réalisées pour démontrer la capacité à modifier de manière sensible la compliance de l'interface. La figure 5.8 représente ainsi l'évolution de la hauteur de la table (gap) en fonction de la force appliquée sur celle-ci et ce pour différents volumes initiaux de gaz. On constate alors que la compliance (inverse de la pente de la courbe) varie de manière sensible en fonction du volume de gaz présent dans le réservoir en amont de la bulle. Cette variation de la compliance est caractéristique de l'utilisation de bulle (comparé à des gouttes) puisque directement lié au fait que le gaz est compressible. Ce principe pourra être exploité pour modifier la compliance de la table en fonction des différentes opérations d'assemblage immergées.

Afin de démontrer la pertinence de cette approche, plusieurs prototypes ont été réalisés. La figure 5.9 illustre la facilité de montage de la table par auto-assemblage (a), la compliance de la table lorsqu'une force extérieure lui est appliquée (b), et enfin la capacité d'actionnement (c-d). Le contrôle de la position dans l'espace de cette table à trois degrés de liberté est pour l'instant réalisé en boucle ouverte. Une perspective intéressante consiste en la reconstruction des paramètres mécaniques (F , d) de la table à partir des paramètres fluidiques (P , V) du gaz contenu dans la bulle et le réservoir.

1. compliance mécanique : inverse de la raideur mécanique

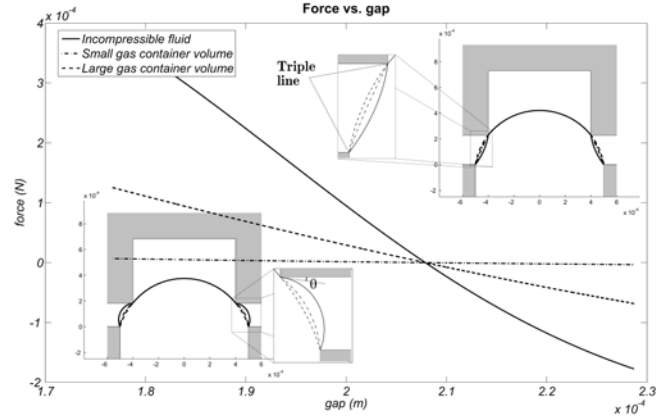


FIGURE 5.8 – Evolution de la force appliquée sur la table en fonction de la distance entre le plan et la table (gap) : le volume dans le réservoir de gaz influence de manière sensible la compliance du système

En effet, la connaissance du volume de gaz contrôlé par chaque pousse-seringue et la mesure de la pression du gaz dans chaque bulle permettrait de déterminer la position de la table dans l'espace ainsi que la position et l'amplitude de la force appliquée sur la table. Cette reconstruction basée sur un modèle de l'interface air-liquide ouvrirait la voie vers un contrôle en position ou en force pour des opérations d'assemblage en milieu immergé.

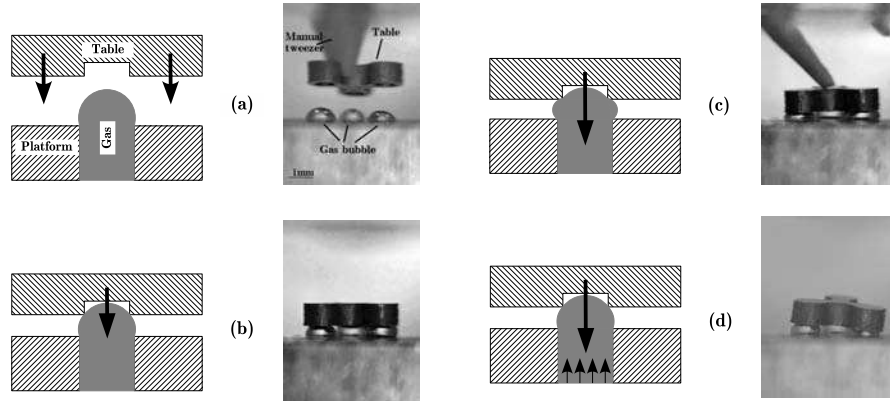


FIGURE 5.9 – Exemple de fonctionnement d'un prototype de table à trois degrés de liberté actionnée par des bulles de gaz.

Ce principe étudié dans le cadre de la thèse de Cyrille Lenders en co-tutelle entre l'Université de Franche-Comté (UFC) et l'Université Libre de Bruxelles (ULB) [122] a fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2009 [23].

5.2 Démonstrateurs de stations de micromanipulation et de micro-assemblage

5.2.1 Conception des micro-objets à assembler

Les travaux développés dans ce manuscrit visent à proposer des solutions originales de manipulation et d'assemblage pour des objets d'une taille caractéristique inférieure aux composants actuellement produits par l'industrie. L'expérimentation de ces solutions a donc nécessité la réalisation d'objets tests d'une taille inférieure à l'état de l'art, soulevant donc des problématiques technologiques particulières.

La réalisation d'objets de taille typiquement inférieure à la centaine de micromètres nécessite la mise en œuvre de moyens de microfabrication dit "salle blanche" capables de structurer la matière avec une précision typiquement de l'ordre du micromètre voire légèrement inférieure. Ces procédés permettent la réalisation de structures micrométriques sur des galettes planes circulaires (wafer) de silicium de dimensions variant classiquement² de 10 centimètres à 30 centimètres. L'extraction des composants du wafer se réalise en utilisant une scie diamant découpant le wafer en éléments rectangulaires de taille actuellement minimale de $100\ \mu m$ par $200\ \mu m$. Les deux inconvénients de cette méthode est qu'elle soumet les objets à des vibrations importantes susceptibles d'endommager les structures des composants, et qu'elle possède une précision de découpe grossière de l'ordre de $10\ \mu m$. La réalisation d'objets tests (ex : $40\ \mu m \times 40\ \mu m \times 5\ \mu m$) pour l'étude de la micromanipulation nécessite donc la proposition d'un nouveau moyen d'extraction des microcomposants du wafer de fabrication.

La première alternative consiste à réaliser les composants sur une couche sacrificielle qui peut être attaquée chimiquement pour libérer les composants. La couche sacrificielle peut être composée de différents matériaux. Dans les wafers SOI, la couche d'oxyde (BOX) intermédiaire peut faire office de couche sacrificielle attaquable par du HF en phase vapeur [102]. La couche sacrifiée peut également être métallique déposée par pulvérisation et retirée par une attaque en phase liquide [67]. Des résines peuvent être également mises à contribution pour réaliser la couche sacrificielle [30]. L'utilisation de couches sacrificielles possède toutefois deux principaux inconvénients : (i) un nombre important d'étapes de microfabrication nécessaires à la réalisation et l'attaque la couche sacrificielle ; (ii) la réalisation d'une libération uniquement collective des composants.

La deuxième alternative consiste à réaliser une structure mécanique sécable entre le composant et le wafer [38, 149]. Cette partie peut être réalisée dans le même matériau que le corps de l'objet, généralement en silicium, et peut être détruite par l'application d'une contrainte mécanique. La suppression de la liaison peut également être obtenue par fusion de celle-ci en utilisant par exemple l'effet Joule [28]. L'utilisation de liaisons sécables permet de détacher de manière sélective chaque objet, mais nécessite également

2. La dimension des wafers est usuellement donné en "pouces" (inch).

l'ajout d'un nombre d'étapes sensibles de microfabrication pour réaliser ces structures. Une synthèse des avantages et inconvénients des différentes méthodes est proposée dans le tableau 5.1.

		Wafer dicing	Laser cutting	Sacrificial layer	Fuse tether	Mechanical tether
Selective		No	Could be	No	Yes	Yes
Object size	10 to 100 mm^2	OK	OK	-	?	OK
	1 to 10 mm^2	OK	OK	OK	?	OK
	0.1 to 1 mm^2	-	OK	OK	OK	OK
	0.01 to 0.1 mm^2	-	OK	OK	OK	OK
Invest cost		Medium	High	Medium	Low	None
Operational cost		Medium	High	Low	Medium	Low
Time per object		-	--	++	+	+

TABLE 5.1 – Comparaison entre les différentes techniques d'extraction de composants d'un wafer

Nous avons proposé une méthode de réalisation de structures sécables n'ajoutant pas d'étapes de fabrication et exploitant une particularité des procédés de gravure DRIE³. En effet, ce procédé de gravure possède actuellement un inconvénient principal : la vitesse de gravure verticale est fonction de la taille du trait de gravure. Cette particularité peut ainsi être exploitée pour réaliser des amorces de rupture dans des liaisons sécables afin de réduire le niveau de force pour engendrer la rupture de celle-ci. Le principe consiste à utiliser des traits de gravure importants pour réaliser les flancs de l'objet et des traits de gravure plus petits pour réaliser les amorces de rupture.

Le dimensionnement de l'amorce de rupture a été étudié et validé expérimentalement par des mesures de force [95]. Le résultat d'un tel procédé est décrit sur la figure 5.10 sur laquelle on distingue le flanc de l'objet et l'amorce de rupture réalisée lors de la même opération de fabrication. Le principal intérêt de la méthode proposée est qu'elle ne nécessite pas d'ajout d'étapes de fabrication pour la réalisation de la structure sécable. Cette méthode a permis la réalisation d'objets tests visibles sur la figure 5.11.

L'étude de structures sécables comme une alternative à l'utilisation de scies pour libérer les microcomposants du wafer est actuellement étudiée dans le projet FAB2ASM dans le cadre du packaging de composants silicium ultra-fins⁴ (épaisseur inférieure à 40 μm).

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR PRONOMIA par David Hériban que j'ai encadré et Joël Agnus [5, 89, 95].

3. DRIE : Deep Reaction Ionic Etching [124]

4. ultra thin ides

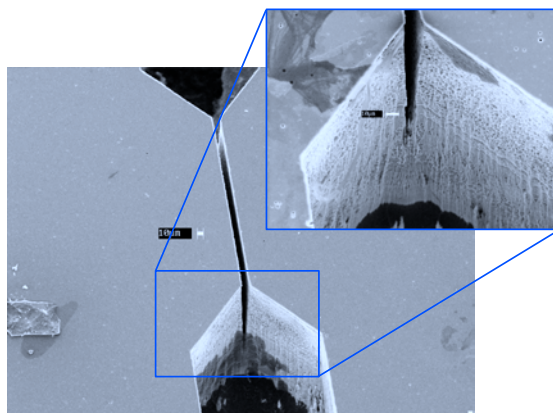


FIGURE 5.10 – Vue au microscope électronique de l’amorce de rupture.

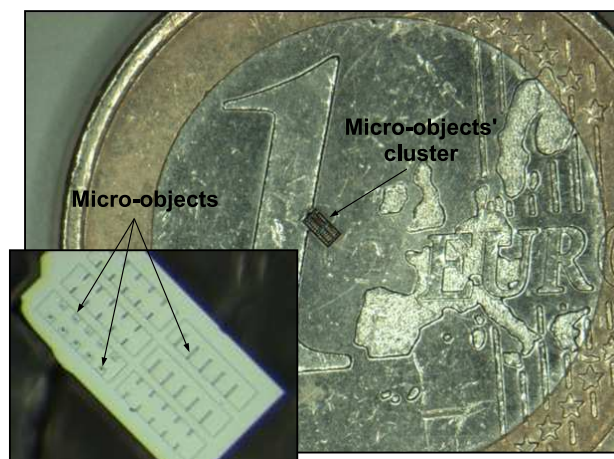


FIGURE 5.11 – Exemples de micro-objets réalisés

5.2.2 Exemples d’applications

Manipulation de grain d’olivine

La manipulation de micro-objets en milieux liquide trouve application dans le domaine de la biologie cellulaire pour l’étude de l’interaction entre des cellules biologiques et des objets artificiels. Des travaux ont été menés dans ce sens avec l’ENS-Lyon portant sur l’étude de l’impact de grain de roche (olivine) sur le comportement des bactéries *E. coli*. Du point de vue de la manipulation, l’objectif était de saisir dans l’air un grain de roche inférieur à la centaine de micromètres de coté pour l’immerger dans un liquide aqueux comprenant des cellules. Le grain de roche doit alors être déposé dans le champ de vue du microscope de manière à visualiser la trajectoire des bactéries dans le gradient de ions ferreux induit par le grain de roche (voir figure 5.12).

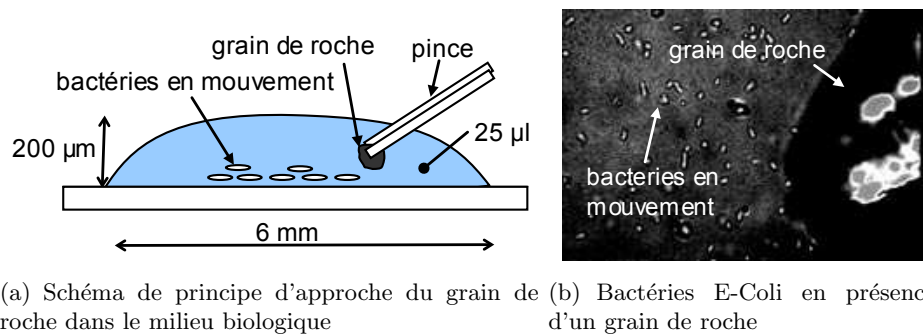


FIGURE 5.12 – Principe de l'étude de l'interaction entre les bactéries et les minéraux.

Des organes terminaux de pince adaptés à la préhension en milieu liquide ont été développés pour cette application dans le cadre du travail de fin d'étude d'ingénieur de David Hériban soutenu par OSEO-ANVAR (figure 5.13) [87, 88].

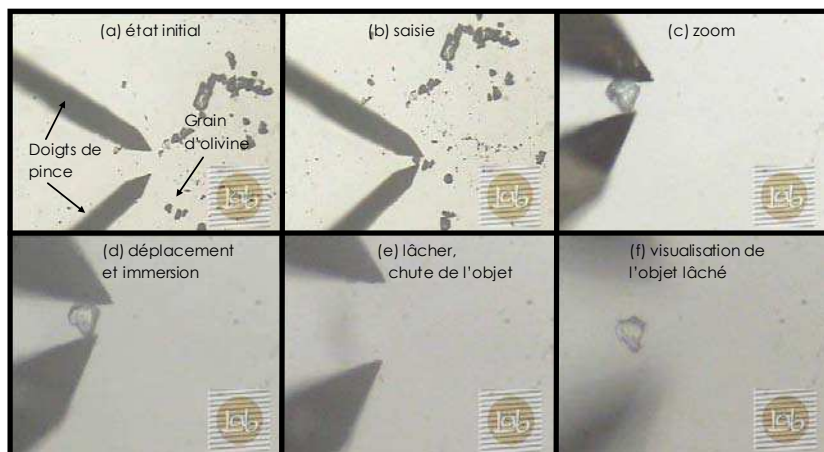
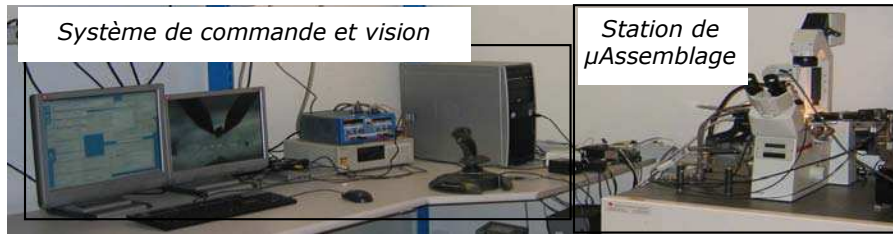


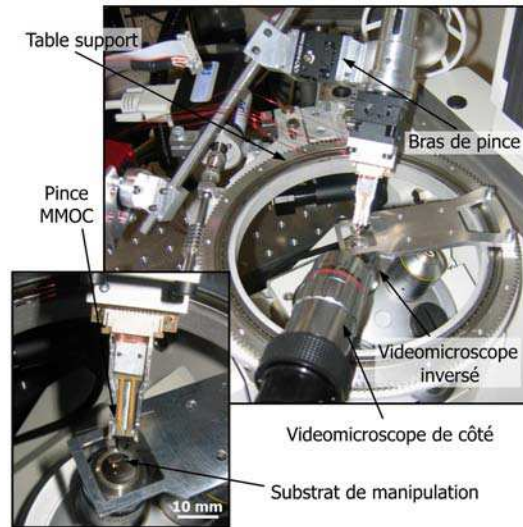
FIGURE 5.13 – Manipulation d'un grain d'olivine possédant une taille d'une vingtaine de micromètres.

Tâches de micro-assemblage

La station de micromanipulation en milieu liquide que nous avons développée repose sur un microscope inversé de manière à pouvoir visualiser les échantillons manipulés dans le liquide (figure 5.14). Elle est constituée de deux bras robot de 3 et 5 axes portant respectivement le substrat sur lequel la manipulation est réalisée et le préhenseur. Une vue de coté est également utilisable. L'ensemble est piloté par un ordinateur de vision chargé de déterminer la position des objets et d'un ordinateur de commande chargé de générer les trajectoires du robot et l'interface homme-machine. Le système de commande est basé sur une architecture logicielle modulaire présentée dans [74, 96].



(a) Vue d'ensemble de la station de micromanipulation



(b) Robot et préhenseur de manipulation

FIGURE 5.14 – Station de micromanipulation

Des objets tests de taille caractéristique de $40\ \mu\text{m}$ ont été manipulés sur cette plateforme. Ils consistent globalement en des carrés de $40\ \mu\text{m}$ de côté et de $5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur sur lesquels sont réalisés des ouvertures de manière à pouvoir les assembler. La plus grande partie des opérations ont été réalisées de manière téléopéré sans retour d'effort.

Un premier exemple d'assemblage est présenté sur la figure 5.15(a), il consiste en l'assemblage hors plan de deux objets en silicium sur lesquels ont été réalisées des encoches de $5\ \mu\text{m}$ de largeur et $10\ \mu\text{m}$ de long. La première pièce est placée verticalement sur un substrat polymère possédant une grande adhésion en utilisant la stratégie de manipulation décrite section 4.4, page 94 (étape 1). La deuxième pièce est alors saisie et placée au dessus de la première (étape 2). L'assemblage est obtenu par un mouvement vertical, durant lequel la compliance du substrat est essentielle à la réussite de celui-ci (étape 3). Le lâcher de l'objet est réalisé en utilisant une trajectoire astucieuse du robot durant l'ouverture de la pince comme représentée sur la figure 5.15(b).

Le deuxième exemple d'assemblage requiert plus d'étapes et de précision. Il est basé sur l'utilisation de "verrou" mécanique : la pièce mécanique mâle possède une clé qui se loge dans une partie femelle sur un deuxième objet comme proposé par Dechev [39]

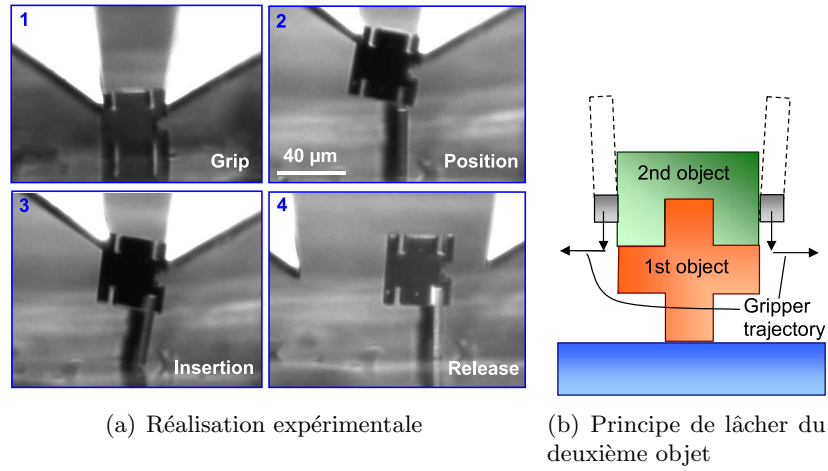


FIGURE 5.15 – Exemple d'assemblage par insertion de deux micro-objets.

(figure 5.16(a)). Les deux composants possèdent respectivement des empreintes mâle et femelle en forme de T. L'opération consiste à insérer la clé mâle dans la clé femelle, puis de réaliser un mouvement latéral pour verrouiller l'assemblage (figure 5.16(b)). Comme dans le cas précédent, la première étape consiste à placer le premier objet verticalement sur la surface (étape 1). Le deuxième objet possédant l'empreinte femelle est alors inséré sur le premier (étape 2), puis verrouillé par un mouvement latéral (étape 3). Afin de démontrer que l'assemblage est réalisé, le préhenseur soulève la pièce femelle entraînant le détachement du premier objet du plan malgré sa grande adhésion (étape 4). Le système peut également être désassemblé par un mouvement latéral (étape 5-6). Plusieurs cycles d'assemblage-désassemblage ont été testés avec succès.

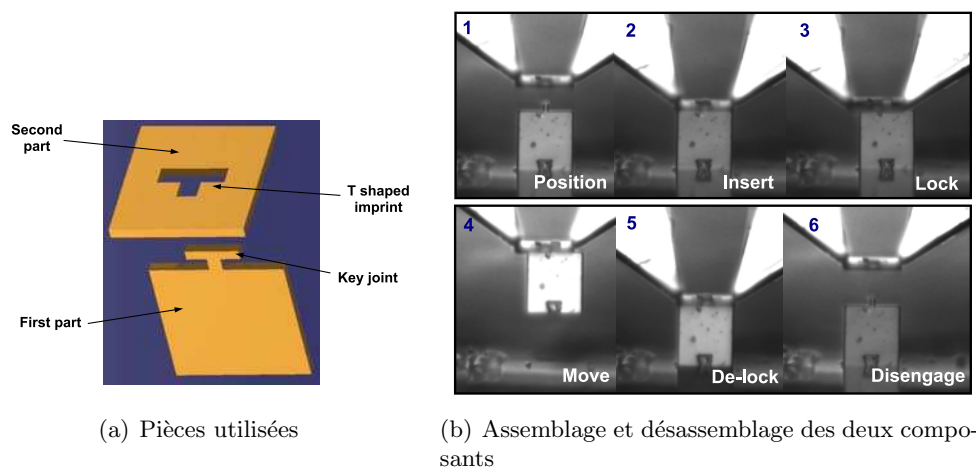


FIGURE 5.16 – Exemple d'assemblage d'objets tests possédant un verrou mécanique

Les travaux sur cette station de micro-assemblage essentiellement réalisés par David Hériban [72, 90] ont été salués par le monde économique par la remise d'un "micron d'or" au salon industriel international des microtechniques "Micronora 2008" [97]. Un challenge important dans ce domaine porte sur l'automatisation de ces assemblages, relevé récemment dans les thèses de Brahim Tamadazte et Kanty Rabenorosoa encadrées par des collègues de l'institut FEMTO-ST [150, 167].

5.2.3 Valorisation du micro-assemblage : la start-up Percipio-Robotics

Au delà du cadre académique des manipulations ou assemblages tests présentés ici, le savoir-faire dans la manipulation des pièces de très petites tailles rencontre désormais un marché industriel sur un ensemble de niches applicatives. La manipulation et le positionnement de cristaux de protéines possédant des tailles de l'ordre de la centaine de micromètres est, par exemple, une demande forte en instrumentation biophysique. D'autres produits d'instrumentation scientifique nécessitent l'assemblage de pièces de taille inférieure à 100 micromètres actuellement réalisé à la main en plusieurs heures avec un rendement de l'ordre de 50%. Au delà des marchés de niche de l'instrumentation scientifique, l'industrie des microcomposants optiques, domaine en effervescence avec la perspective des déploiement des réseaux à fibres optiques pour le grand public, est confrontée de plus en plus souvent à des problèmes d'assemblage. Les challenges dans ce domaine sont liés à la réduction du coût et des temps de production en maintenant une très grande précision de l'assemblage (typiquement 1 micromètre).



FIGURE 5.17 – Perspective industrielle des travaux de micro-assemblage : la société Percipio-Robotics (www.percipio-robotics.com)

La jeune société Percipio-Robotics créée au début de l'année 2011 est positionnée sur ces marchés. Elle est dirigée par David Hériban, ingénieur de recherche contractuel à l'institut de 2004 à 2009, dont j'ai assuré l'encadrement dans le cadre du projet ANR PRONOMIA. La fin de l'année 2009 et l'année 2010 ont été consacrées à l'incubation de la société à l'incubateur d'entreprises innovantes de Franche-Comté. Ce projet de société a été soutenu initialement (2009) par un projet de soutien au transfert financé par la DPI

CNRS et l'université de Franche-comté. Il est également deux fois lauréat du concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes respectivement en 2009 dans la section 'émergence' et en 2010 dans la section 'en création'. Début 2011, la jeune société a également été reconnue par le monde de l'entrepreneuriat en étant lauréat du concours *Franche-Comté entreprendre* et sur le plan national en étant lauréat du concours *Tremplin Entreprise* organisé par le Sénat et l'ESSEC Business School.

Sur le plan du développement technologique, l'année 2010 a été consacrée à l'industrialisation de la pince piezoélectrique développée au laboratoire, aboutissant une version pré-industrielle (voir figure 5.17). J'effectue depuis le début de l'année 2011 un concours scientifique auprès de cette société représentant un détachement à hauteur de 20% de mon activité professionnelle. Je siège également au conseil d'administration de la société.

Conclusion de chapitre

La mise en œuvre des stratégies de micromanipulation et de micropréhension (chapitre précédent) dans un cadre applicatif nécessite d'étudier également les autres fonctions robotiques comme le robot porteur ou la perception (effort ou position). Ma contribution dans ce cadre s'est focalisée essentiellement sur l'étude du robot porteur par la proposition de méthodes de calibration adaptées à la micromanipulation et la proposition d'une structure de robot parallèle exploitant la capillarité comme mode d'actionnement. Ce chapitre illustre également l'investissement humain et matériel nécessaire à la construction, la mise en œuvre et l'entretien de moyens expérimentaux complets de micromanipulation. Des exemples de micromanipulation et de micro-assemblages ainsi que le transfert industriel de ces méthodes ont été présentés. Ce chapitre finalise la présentation de mes travaux scientifiques et ouvre vers une présentation des perspectives scientifiques et applicatives.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Ce chapitre conclut ce manuscrit par une synthèse des contributions scientifiques et une présentation des perspectives de mes travaux sur l'automatisation du micro-assemblage, l'exploration de l'espace vierge entre micromonde et nanomonde et la réalisation de manipulation ultra-rapide de cellules biologiques. Celui-ci est complété de quelques réflexions sur des prospectives possibles.

6.1 Conclusion

Mes travaux ont porté sur l'étude de la micromanipulation en utilisant une approche particulière qui consiste à effectuer les opérations dans un *milieu liquide*. La micromanipulation porte sur la manipulation d'objets possédant une taille caractéristique comprise entre 1 micromètre et 1 millimètre qui représente un très large spectre dimensionnel sur trois ordres de grandeur : les micromondes. La miniaturisation des systèmes est confrontée à l'effet d'échelle modifiant le rapport entre les différents phénomènes physiques. Ainsi, au sein de ce large espace dimensionnel, le poids relatif des différents phénomènes physiques est sensiblement modifié, laissant apparaître des paradigmes propres à chacun des trois ordres de grandeur. Le milieu liquide présente particulièrement un intérêt pour la manipulation d'objets d'une taille inférieure à 100 micromètres. L'étude de ces moyens de micromanipulation s'est effectuée en trois étapes portant sur la modélisation du comportement des objets, l'étude de la fonction de micropréhension et enfin l'étude de l'ensemble du système robotique de micromanipulation.

Les modèles développés à l'échelle du nanomètre ou à l'échelle du millimètre ne sont généralement pas extrapolables aux micromondes. La modélisation du comportement des micro-objets est donc une étape essentielle préalable à la conception d'un système robotique de micromanipulation. Mes travaux ont contribué à une meilleure connaissance dans ce domaine par la proposition de modèles couplant plusieurs effets physiques prédominants à ces échelles. Plusieurs exemples ont été étudiés : le couplage entre la fonctionnalisation de surface et les interactions électrostatiques, l'impact de la

déformation locale sur les forces de van der Waals, le couplage entre les effets capillaires et la compressibilité des gaz et plus classiquement l'équilibre entre la force de trainée et la force de diélectrophorèse. Ces modèles sont caractéristiques des micromondes et illustrent le corpus scientifique propre à la micromanipulation qui se différencie de la manipulation aux échelles supérieures et de la nanomanipulation. Les modèles développés sont toutefois limités à des géométries simples et l'absence de modèles valables pour des géométries plus complexes, y compris via des méthodes numériques représente un verrou fort limitant l'exploitation des micromondes.

L'objet des modèles de comportement est de former une base de connaissance pour la conception des moyens de micropréhension et de micromanipulation. Les fonctions robotiques et tout particulièrement la préhension et la manipulation doivent être repensées pour pouvoir être efficaces face aux comportements spécifiques aux micromondes. Mes travaux se sont focalisés sur la proposition de méthodes de manipulation en *milieu liquide* exploitant la double spécificité de ce domaine en terme de dimension et de milieu environnant. Plusieurs principes ont été analysés, conçus, expérimentés et commandés : l'exploitation de la diélectrophorèse pour la réalisation de trajectoires rapides contrôlées, l'utilisation de changement de phase air-glace en milieu immergé, la manipulation par fonctionnalisation de surface active et plus classiquement la préhension à deux doigts de serrage. L'étude de ces moyens de préhension a contribué à la génération de nouvelles solutions robotiques adaptées aux micromondes. L'étude de ces systèmes a également fait émerger des problématiques de commande liées à la non-linéarité des comportements et à la rapidité¹ de déplacement par rapport à la fréquence de coupure des moyens de mesure.

La réalisation de micro-assemblages nécessite la mise en œuvre des stratégies de micromanipulation et de micropréhension dans un système robotique incluant des fonctions de positionnement et de perception en position voire en force. Mes travaux dans ce domaine se sont focalisés sur les robots porteurs pour le micro-assemblage au travers de quelques études : la calibration de robots porteurs de micro-assemblage par vision ou grâce à un microscope à force atomique et la proposition d'un microrobot parallèle basé sur l'exploitation de la capillarité. Ces travaux sur des démonstrateurs robotiques ont débouchés vers des applications de micromanipulation dans le domaine biologique et dans l'assemblage de microcomposants. Ce dernier point s'est concrétisé par la création récente de la start-up Percipio Robotics.

L'ensemble de ces travaux permet également d'évaluer la pertinence de la manipulation de micro-objets dans un milieu liquide à des fins de micro-assemblage. Le bilan est évidemment balancé entre des avantages liés essentiellement à la physique des micromondes et les difficultés technologiques liées à l'utilisation d'un liquide. L'utilisation de liquide est confrontée à de sévères difficultés technologiques.

1. dans le cas de micromanipulations sans contact

La mise en place des moyens de vision est fortement contrainte par la présence d'un liquide induisant des ménisques, sources de distorsions optiques. Ainsi des solutions existent pour des vues verticales par microscope inversé, mais les vues de côté sont très fortement bruitées. Le franchissement de l'interface air liquide par les objets et les préhenseurs, lieu des tensions de surface, est également une difficulté technologique qui limite l'applicabilité du milieu liquide.

Au delà de ces difficultés technologiques, l'approche par le milieu liquide présente un grand nombre d'avantages. Les travaux sur la fonctionnalisation de surface illustrent parfaitement la potentialité d'utiliser un milieu liquide permettant par simple modification du pH de contrôler l'effort d'interaction entre micro-objets. La possibilité de réaliser des micromanipulations sans contact, qui sont très généralement limitées au milieu liquide présente un intérêt majeur pour la manipulation de micro-objets de taille inférieure à 10 micromètres sans effet d'adhésion. L'utilisation d'un milieu liquide permet donc globalement de mieux maîtriser les propriétés de surface dans les problèmes de micromanipulation.

6.2 Perspectives scientifiques

Les perspectives liées aux travaux de micromanipulation en milieu liquide sont diverses tant sur le plan des domaines applicatifs que sur le plan des problématiques scientifiques. Comme présenté en introduction de ce document, elles dépendent également sensiblement de l'échelle considérée entre le micromètre et le millimètre. Ces perspectives peuvent toutefois être classées en trois grands domaines d'application :

- à l'échelle du déca-micromonde, des travaux auxquels j'ai contribué (chapitre 4) ont relevé des preuves de concept de stratégies de micromanipulation. L'enjeu actuel est d'améliorer les performances de ces solutions afin de réaliser des *assemblages plus complexes* ;
- concernant la *poursuite de la miniaturisation* de l'étude de la micromanipulation et du micro-assemblage, le projet challenge porte sur l'étude de l'espace vierge entre nanoscience et microscience avec des approches hybride 'micro'-'nano' pour la manipulation des iso-micro-objets ;
- enfin les récents progrès sur les cellules souches biologiques ouvrent de nouvelles problématiques en microrobotique liées à la réalisation de *micro-usines à cellules* soulevant des problématiques de manipulation à très haute cadence.

Cette section présente un panorama des perspectives qui s'ouvrent pour la micromanipulation sans réaliser la distinction entre mes futures activités et la réalisation de ces perspectives par une personne tierce. Ces perspectives sont le fruit de discussions multiples avec la communauté française et internationale en micromanipulation.

6.2.1 Automatisation de l'assemblage des déca-micro-objets

Contexte et enjeux

A l'échelle de la manipulation d'objets de taille supérieure à $100\ \mu m$ (hecto-micro-monde), les enjeux sont essentiellement des enjeux de transfert industriels symbolisés à l'institut FEMTO-ST par la création de la start-up Percipio Robotics. En revanche, de nombreux travaux restent à mener sur des objets de taille inférieure à $100\ \mu m$. Concernant les déca-micro-objets, les opérations actuelles demeurent élémentaires et sont souvent plus assimilables à de la manipulation que réellement à du micro-assemblage. De plus, les opérations de manipulation sont très souvent réalisées de manière téléopérée, avec ou sans retour haptique. Les manipulateurs associés incluent généralement peu de degrés de liberté et tout particulièrement peu d'axes de rotations dont les défauts en excentricité, difficilement corrigeables, sont très souvent du même ordre de grandeur que l'objet à manipuler. Les perspectives à ces échelles portent sur l'étude de la commande des processus de micro-assemblage et également sur la réalisation d'assemblages plus complexes au delà des preuves actuelles de concept de manipulation.

La production d'assemblages plus complexes est liée à plusieurs secteurs applicatifs en plein développement comme les microsystèmes optiques (MOEMS) ou le packaging de composants microélectroniques. L'assemblage de MOEMS répond à des critères particulièrement sévères en terme de précision de positionnement, typiquement inférieure au micromètre. La réalisation de produits à base de composants réalisables par des processus de fabrication non compatibles rend nécessaire la solution de l'assemblage. Concernant le packaging de composants microélectroniques (front-end industries), il s'apparente de plus en plus à une opération d'assemblage : l'avènement de la réalisation de vias (TSV²) au travers des composants siliciums rend désormais possible l'empilage de composants (3D-STACK²). Les enjeux sont ici de réduire sensiblement l'épaisseur actuelle de 50 micromètres des composants afin de diminuer le coût de la réalisation des vias. La réduction de l'épaisseur des composants nécessite la proposition de nouveaux moyens de réalisation, de stockage et de préhension adaptés à ces objets extrêmement fragiles.

Problématiques scientifiques

Sur le plan scientifique, les défis à relever portent plus particulièrement sur la dextérité des préhenseurs, l'étude des commandes basées sur la mesure de force et/ou sur la vision pour l'assemblage.

Afin de proposer une alternative à l'utilisation d'axes de rotation conventionnels, sources de défauts de positionnement, la position angulaire des objets pourrait être obtenue de manière originale en augmentant la dextérité des préhenseurs. En effet, nous pouvons envisager des robots porteurs ne possédant que des translations et des

2. TSV : Through Silicon Vias. Les TSV sont des ponts électriques obtenus par un trou dans le silicium rempli de métal, ils permettent d'assurer une connexion entre les deux faces d'un composant électronique, et donc d'empiler ces composants par assemblage pour réaliser une structure électronique tridimensionnelle (3D-STACK).

préhenseurs qui sont capables de modifier la position angulaire des objets localement. La rotation de l'objet ne nécessite plus d'induire une rotation de toute la structure porteuse mais ne s'opère que localement. Cette voie semble donc pertinente tant en terme de répétabilité que en terme de rapidité.

A l'instar des mains robotisées utilisées sur des robots humanoïdes, nous pouvons envisager de concevoir des micromains robotisées avec typiquement quatre doigts micro-actionnés afin de réaliser des micromanipulations dextres. Cette perspective ouvre la voie vers l'étude de nouvelles stratégies de contrôle de ces mains robotisées dont la manipulation risque d'être perturbée par des effets d'adhésion. A l'échelle macroscopique, les mains robotisées sont habituellement contrôlées en exploitant des capteurs de force. La réalisation de micromains robotisées nécessite donc des technologies de micro-capteurs de force intégrées sur les doigts, dont la faisabilité a déjà été démontrée sur des pinces à deux doigts.

L'autre voie de contrôle local de la position est l'exploitation des principes de manipulation sans contact. L'électrorotation, principe analogue à la diélectrophorèse, permet d'appliquer un couple à un objet diélectrique dans un champ électrique tournant. On peut ainsi envisager de générer un champ électrique grâce à des électrodes placées sur les doigts du préhenseur et d'orienter l'objet placé en lévitation dans les doigts de la pince par électrorotation. Les phases d'insertion qui nécessitent un effort de blocage important pourront être réalisées en saisissant l'objet avec le préhenseur à deux doigts. Les verrous sont technologiques, puisque ce type de solution nécessite la réalisation d'électrodes sur, au minimum, deux plans sur le préhenseur. Ils sont également scientifiques sur le plan de la commande des tensions d'électrodes nécessaire pour maîtriser l'orientation finale de l'objet dont le comportement est globalement similaire à un système de diélectrophorèse présenté dans ce document.

A l'échelle des déca-micro-objets, l'automatisation de la micromanipulation est un enjeu qui repose sur des problématiques scientifiques liées à la commande de trajectoire sur la base de vision et à la commande en effort. Au croisement des deux, la commande hybride force-position semble nécessaire lors d'opérations d'assemblage.

Bien qu'étant désormais très largement utilisée pour des objets de taille supérieure à $100\ \mu m$, la vision robotique est très peu exploitée à une échelle intermédiaire entre $10\ \mu m$ et $100\ \mu m$. Les microscopes sont le plus souvent des moyens d'observation pour l'opérateur qui réalise ces opérations de manière téléopérée (sans ou avec retour haptique). La faible profondeur de champ en microscopie, la grande dépendance à l'éclairage perturbent actuellement l'opérateur et rend complexe la mise en œuvre de commande automatique basée sur un retour visuel. Ceci ouvre vers des problématiques de vision portant sur la production de moyens de traitement de l'image et de stratégies de commande adaptées à la spécificité de ces imageurs. Bien que cette problématique de vision ait été identifiée depuis quelques années, peu de méthodes réellement compatibles avec ces contraintes ont été proposées et ces travaux restent d'actualité.

L'exploitation d'une mesure de la force de préhension dans le système de commande du robot de manipulation semble être une voie complémentaire à la vision. Elle soulève des difficultés technologiques liées à la réalisation de ces capteurs (comme dans le cas

de la micromain robotisée). Les problématiques scientifiques sont liées à l'utilisation de capteurs dont le rapport signal sur bruit risque d'être faible (spécificité des micro-mondes) et également aux interactions particulières entre les deux objets. De récents travaux ont en effet montré que l'adhésion pouvait sensiblement perturber une tâche d'insertion et que la commande en force devait être robuste aux échelons de force induits par l'adhésion [150].

De manière annexe aux développements scientifiques sur la dernière décennie, la proposition d'un grand nombre de preuves de concept de micromanipulateurs soulève le problème de l'évaluation comparative des performances (précision, vitesse, fiabilité, dextérité, type d'objets manipulés). L'absence de norme pose une réelle difficulté d'évaluation de la pertinence d'une solution proposée. Cohabitent ainsi dans la littérature scientifique des dispositifs dont la fiabilité est extrêmement faible (une ou deux manipulations effectuées sur la vie du démonstrateur) et des systèmes d'une grande fiabilité ayant été testés dans un grand nombre de conditions expérimentales. Ce problème dépasse le simple cadre normatif, puisqu'il rend difficile la valorisation de travaux scientifiques qui visent à fiabiliser (par la commande, par exemple) des dispositifs dont la preuve de concept a déjà été publiée. Cette demande croissante est, sans doute, le fait de la mutation de la microrobotique d'une discipline exploratoire dont les résultats étaient par nature des preuves de concept à une discipline plus mature où les résultats sont désormais synonymes de gains de performance.

6.2.2 Exploration de l'assemblage dans l'iso-micro-monde

Contexte et enjeux

Jusqu'alors le moteur de la miniaturisation était lié à une volonté de diminution du volume du produit (téléphonie mobile), le moteur principal est désormais porté par l'intégration d'un maximum de fonctions dans un produit de volume désormais constant (smart phone). À l'avenir, les fonctions réalisées essentiellement à base de nanotechnologies devront pouvoir être assemblées pour construire un composant fonctionnel intégré, voire intelligent. L'hybridation de technologie dans les micro-nanosystèmes est donc un défi majeur des prochaines décennies pour lequel la robotique occupe une place cruciale, par ses capacités de préhension, de positionnement et d'assemblage automatique. Les champs d'application visés par le développement des produits intégrés portent par exemple sur les réseaux de capteurs appliqués à la surveillance environnementale ou le diagnostic et la délivrance de médicament par des systèmes embarqués dans le corps.

Afin de préparer ce marché, il est nécessaire que les équipes de recherche académiques spécialisées en microrobotique investiguent désormais une échelle dimensionnelle en avance sur les préoccupations industrielles quotidiennes et se positionne sur l'espace libre laissé entre nanomanipulation et micromanipulation (situé entre 100nm et 10 μ m). La capacité d'assemblage dans cet espace dimensionnel est un point clé du développement de futurs produits complexes, basés sur des nanotechnologies.

Problématiques scientifiques

L'investigation de cette échelle nouvelle se heurte à une frontière technologique liée à la nécessité de réaliser les opérations robotiques dans un environnement maîtrisé. Deux approches se dessinent autour de l'utilisation d'enceintes à vide ou de milieux liquides.

L'intérêt d'une enceinte à vide est de maîtriser l'environnement mais également de pouvoir utiliser les techniques d'imagerie électronique (MEB : Microscope Electronique à Balayage). Au delà du cadre strict de la manipulation, la micromanipulation sous-vide s'inscrit dans une tendance forte à intégrer l'ensemble des processus de dépôt de matériaux, de structuration et d'analyse de surface dans des lignes sous-vides compactes où le transfert entre chambres est effectué sans rompre le vide. L'intégration de moyens de micromanipulation dans ce type de structure crée une synergie : la maîtrise des propriétés de surface des objets facilite l'étude de leur manipulation ; des outils de micromanipulation peuvent être exploités pour positionner un (ou plusieurs) composant(s) avant un traitement ou une analyse de surface.

Le choix du vide contraint fortement les solutions de préhension et des solutions de pinces à doigts de serrage semblent les plus prometteuses. Ces préhenseurs font partie des micromanipulateurs *à contact* pour lesquels l'adhésion liée aux surfaces est un facteur perturbateur. La maîtrise des propriétés physicochimiques des surfaces des préhenseurs et des objets est donc cruciales à ces échelles et devra être abordées de manière pluridisciplinaire entre nanoscience et microscience. Sur la base de nos travaux préliminaires montrant l'intérêt de la fonctionnalisation de surface pour la micromanipulation et des méthodes alliant nanostructuration et fonctionnalisations de surfaces pourront être explorées. Les problématiques portent ici sur la proposition de principes physicochimiques capables de réduire sensiblement l'adhésion voire de la contrôler activement. La poursuite des travaux de modélisation du comportement au contact des micro-objets est également essentiel à l'avènement de solutions fiables de micromanipulation sous-vide.

L'utilisation d'imageurs électroniques (et non optiques) modifie également sensiblement le paradigme de l'asservissement visuel avec des niveaux de bruits importants et des fréquences d'acquisition faibles. Un dilemme apparaît ainsi entre l'obtention d'une image de bonne qualité mais à une fréquence faible et une image de qualité médiocre à une fréquence importante. Enfin, l'augmentation des performances de positionnement des robots porteurs très fortement impactés par les dérives thermiques nécessitera des travaux sur la conception et la commande de ceux-ci.

L'autre approche pour la réalisation de manipulations d'iso-micro-objets est l'utilisation de principes de micromanipulation sans contact en milieu immergé afin de s'affranchir des problèmes d'adhésion intrinsèques à la manipulation par contact. Classiquement l'assemblage peut alors être envisagé en trois phases : un transfert de l'objet qui peut s'opérer par un transfert des gouttes possédant chacune un objet, un positionnement sans contact des objets après fusion de deux gouttes, une solidarisation des deux objets placés en contact. La première phase soulève des problématiques qui ne sont développées ici.

Le positionnement sans contact des objets dans un milieu liquide repose sur une poursuite des travaux de modélisation des interactions à distance sur les micro-objets. La commande de ces dispositifs est également un enjeu pour induire des trajectoires rapides et contrôlées à ces micro-objets. Cette thématique de commande est plus largement développée dans la section suivante sur la manipulation haute-vitesse des cellules biologiques.

L'inconvénient sous-jacent des micromanipulations sans contact porte sur l'effort de blocage sur les objets qui très nettement plus faible que dans le cas de préhenseur à contact (typiquement quelques centièmes contre quelques centaines de microNewtons). De plus, l'immersion rend difficile l'utilisation de principe de fusion de matériaux pour solidariser les objets, nécessitant des différences de température importantes. Ainsi, la micromanipulation sans contact en milieu immergé devra s'enrichir de nouveaux moyens de solidarisation afin de réaliser des assemblages. Des solutions basées sur la fonctionnalisation de surface sont actuellement envisagées.

6.2.3 Manipulation haute-vitesse des cellules biologiques

Contexte et enjeux

Avec le micro-assemblage, l'autre grand cadre applicatif de la micromanipulation est la manipulation de cellules biologiques non adhérentes dont les tailles typiques sont de l'ordre de 3 micromètres à 30 micromètres et exceptionnellement 200 micromètres dans le cas des ovocytes. Les approches robotiques ont longtemps présenté un intérêt marginal pour la manipulation de cellules. En effet, d'une part les processus de fécondation in vitro réalisent des opérations sur des très petits volumes de cellules où l'automatisation ne semble pas une priorité et d'autre part les procédés de tri portent sur un grand nombre de cellules (10^6 , 10^9 cellules) où des approches robotiques séquentielles n'avaient que peu d'intérêt par rapport aux procédés de l'état de l'art.

Les derniers résultats sur les cellules souches et la perspective de thérapies cellulaires modifient sensiblement les demandes des biologistes. L'enjeu est la génération de cellules possédant des propriétés particulières dans des volumes pouvant dépasser le milliard de cellules pour que cela puisse avoir un intérêt thérapeutique pour le patient. La rapidité de la génération de ces cellules est actuellement un verrou pour le développement des thérapies. Deux voies de progrès conjointes peuvent être abordées : l'amélioration des procédés biologiques qui permettent de générer actuellement un million de cellules à partir d'une cellule souche et l'automatisation à haute vitesse du procédé de traitement initial de chaque cellule souche.

Sur le plan de la robotique, la faible inertie des systèmes à l'échelle du micromonde autorise l'application d'accélération très importantes et donc la génération de trajectoires extrêmement rapides (opérations de prise/dépose à une fréquence proche de 1kHz). Cette perspective se base donc sur le double constat d'un besoin de rapidité sur la manipulation de cellules et d'une capacité physique à se déplacer très rapidement du fait du faible impact de l'inertie. L'enjeu est donc de manipuler le plus rapidement possible des cellules souches pour les placer séquentiellement sous des postes de traitement et

de test. L'étude d'un cadre applicatif biologique nécessite de plus la prise en compte de contraintes de biocompatibilité et des considérations éthiques.

Problématiques scientifiques

L'approche qui semble la plus prometteuse est l'utilisation d'effecteurs manipulés par des principes sans contact exploitant un champ de force (électrostatique ou plus probablement magnétique). Ainsi, à l'instar d'une structure robotique articulée qui est utilisée pour appliquer une trajectoire aux effecteurs, les sources de champ induisent une trajectoire à l'effecteur au travers de ce que l'on peut considérer comme une "structure robotique dématérialisée". Le comportement de ce robot dématérialisé est caractérisé par son modèle direct liant les données articulaires (grandeurs de commande des sources de champ) à la position de l'effecteur. L'intérêt premier est l'absence de structures matérielles : l'inertie et la trainée sont réduites à celles de l'effecteur. Le système de positionnement multi-degrés de liberté ainsi créé se différencie nettement, par son comportement, des robots articulés conventionnels et de nouvelles règles de conception et de commande de ces "robots porteurs" sont nécessaires.

L'objet du développement de méthodes de conception est analogue à celle des robots conventionnels et porte sur l'optimisation de l'architecture du système pour atteindre des performances en terme d'espace accessible, de vitesse, de répétabilité ou de précision. L'architecture d'un microrobot immatériel est essentiellement fonction de la position et de la forme des sources de champ. L'enjeu de la conception portera, probablement, sur un compromis entre un ensemble {rigidité, rapidité} et un ensemble {non-linéarité, course} du robot. En effet, une grande vitesse de déplacement et une grande rigidité locale, nécessitent des gradients de champ importants. Ces derniers ne sont accessibles que sur des faibles courses et sont sources de non-linéarité. De nouveaux principes de conception seront ainsi proposés sur la base de modèles de ces principes de manipulation sans contact.

Ces "robots immatériels" possédant des rigidités faibles devront être probablement commandés en utilisant un capteur extéroceptif. Le recours à l'utilisation d'un capteur de vision semble la solution la plus simple. Les problématiques portent alors sur la commande en haute vitesse de systèmes à plusieurs degrés de liberté basés sur un capteur possédant une faible bande passante. Cette problématique est dans la continuité des travaux exploratoires sur la manipulation sans contact présentée dans ce manuscrit. Une autre voie consiste à explorer des moyens de mesures de la position de l'effecteur basé sur la déformation du champ physique (changement de capacité ou d'inductance) dans lequel il évolue. Ce type de mesure de position, probablement d'une fréquence de coupure plus élevée, pourrait être également une voie pour optimiser la vitesse des trajectoires contrôlées.

6.3 Et quelques réflexions...

Cette section reporte des réflexions sur le devenir de la micronanorobotique à plus long terme sans que celles-ci puissent apparaître actuellement comme des problématiques

scientifiques structurées.

Des microrobots mobiles

Une première idée consiste à développer des robots mobiles d'une taille typiquement inférieure à un millimètre. Les essais actuels s'apparentent plus à de la manipulation sans contact dans laquelle le champ de force à distance est utilisé pour transmettre l'énergie au système manipulé ne possédant aucune autonomie. Un objectif à long terme est donc de concevoir un robot réellement de taille millimétrique possédant des capacités sensorielles, d'action, de calcul, et de communication. Les verrous sont divers mais tous intimement liés à l'économie ou au stockage d'énergie. Il semble illusoire de stocker l'énergie de manière volumique (batteries, essence) sur une structure aussi petite. En revanche, le système pourrait capter de l'énergie du milieu ambiant surtout si celui-ci est biologique (dans le cas d'intervention intra-corporelle), fluide (dans le cas d'intervention intra-vaisseau sanguin)³ ou chimique (dans le cas d'un milieu liquide). Dans ce cas, le robot pourrait évoluer de manière autonome et communiquer ponctuellement (par onde électromagnétique basse énergie sans doute) avec l'extérieur. Cette perspective repose également sur le développement de solutions d'actionnement, de mesures, et plus marginalement de calcul, peu consommatrice d'énergie de taille très réduite.

La captation d'énergie peut s'avérer un verrou très difficile à lever surtout pour assurer l'actionnement qui sera probablement la fonction la plus consommatrice d'énergie. Des solutions alternatives exploitant des mécanismes cellulaires pourraient être initialement considérés. On peut ainsi envisager de piéger une ou plusieurs bactéries sur un système mobile. La récupération de l'énergie issue du milieu biologique et la propulsion sont ainsi assurées par la bactérie. L'artefact en contact avec la bactérie doit être capable d'influencer le comportement de celle-ci pour diriger ce robot. Cette solution qui s'apparente à un 'char à bactéries' peut être une solution de contournement du stockage artificiel d'énergie.

Les microsystèmes à la demande

En informatique, l'assemblage structuré de lignes de code permet la réalisation de fonctions. De manière analogue, en robotique, l'assemblage de composants permet la réalisation de fonctions complexes. Nous assistons à une volonté, presque universelle, de personnaliser les contenus informatiques des objets que nous manipulons qui pourrait s'étendre par une volonté de personnalisation de la structure des systèmes en eux-mêmes. Comme vous téléchargez votre dernier album de musique⁴ ou une dernière sonnerie sur votre portable (qui est physiquement le même que celui de votre voisin),

3. Je suis toutefois très sceptique sur la perspective d'un robot nageant dans le réseau sanguin. La vitesse du sang est non seulement non stationnaire mais est de l'ordre de 100 mm.s^{-1} à 1 mm.s^{-1} , ce qui apparaît très élevée pour un microrobot. Le transport sur des longues distances peut sans doute s'opérer en suivant le flux de sang, mais une opération locale devra s'effectuer en ancrant le robot sur le bord du vaisseau sanguin.

4. légalement bien-sûr

vous téléchargerez peut-être à l'avenir les plans d'un système personnalisé que votre "assemblante" (équivalent futuriste de l'imprimante) vous réalisera sur la base de composants standards. La perspective des assemblantes domestiques semble très futuriste, mais leurs équivalents industriels sont promis à un avenir beaucoup plus proche. La réalisation d'assemblage de microcomposants standards permettra la réalisation d'une grande variété de systèmes hyperspécialisés en très petites séries issus de composants à très bas coût réalisés eux en très grande séries. L'assemblage représente ainsi une opportunité d'étendre le marché actuel de très grande série de la micro-électronique et des microsystèmes à des marchés de petites voire très petites séries.

La conquête des applications spatiales

Bien que le spatial ait été identifié, très tôt comme un domaine applicatif de la microrobotique, aucune application n'a réellement émergé dans ce domaine sur le plan international. L'idée générale repose sur le fait que les coûts de mise sur orbite sont essentiellement liés au poids du satellite (environ vingt mille euros par kilo), et que par conséquent la miniaturisation des systèmes engendre des gains sensibles. Cette perspective pourrait conduire, par exemple, à l'utilisation de robots mobiles collaboratifs de petites tailles pour l'exploration de planètes dont le développement nécessitera de s'adapter aux contraintes du lancement et aux contraintes de l'environnement spatial. Sur la base des récents progrès faits en micronanorobotique, il semble nécessaire de ré-examiner avec l'homme de l'art en spatial les interactions possibles entre ces deux domaines.

L'avènement d'une microscience

Au delà de la structuration d'un corpus scientifique lié à la microrobotique, l'avancement progressif des travaux à l'échelle des micromondes fait émerger une communauté des *microsciences*. Les travaux scientifiques sur les micromondes ont initialement porté sur des approches exploratoires reposant sur des domaines disciplinaires différents comme la microscopie champ proche, la tribologie, la chimie des surfaces, la microfabrication, la mécatronique, la robotique. L'enjeu actuel dépasse la simple exploration disciplinaire et porte désormais sur l'approfondissement des travaux scientifiques en tissant des liens entre disciplines. On voit ainsi naître une communauté composée de personnes issues d'horizons scientifiques différents mais partageant un socle de connaissances spécifiques de ces échelles. Ce socle en développement permanent se caractérise par la connaissance de principes physiques (absence d'inertie, mécanismes compliant, etc.) et par des pratiques scientifiques similaires comme le recours très récurrent à l'expérimentation pour pallier le manque de modèles.

L'espace à explorer étant très majoritairement entre les disciplines classiquement identifiées, ce mécanisme de création d'une nouvelle discipline des microsciences devrait s'amplifier dans les années à venir. Les scientifiques dans ce mouvement se sentiront progressivement alors plus proches d'une communauté des microsciences que de leur

discipline d'origine. L'institut FEMTO-ST possédant des compétences dans plusieurs champs des microsciences se trouvera un des acteurs majeurs de cette mutation sur le plan français.

des micromondes

Au delà de la description stricte de perspectives, l'apprentissage majeur de ces dernières années porte sur une meilleure compréhension, de ma part, de l'espace extrêmement vaste du "micronanomonde" que j'ai tenté de retranscrire dans ce document par l'introduction des termes 'iso- deca- hecto-micromonde'. L'avènement des nanotechnologies a sensiblement brouillé les discours sur la miniaturisation reléguant faussement les microtechnologies au rang des problèmes "réglés" ignorant au passage l'espace gigantesque qui subsistait entre les deux domaines. Ainsi bien que nous maîtrisons la manipulation d'hecto-micro-objets, à l'échelle des iso-micro-objets, l'état de l'art est presque vierge. Cette pluralité se retrouve également dans les nanotechnologies où la confusion est souvent faite entre des performances à quelques nanomètres et à quelques centaines de nanomètres. Un réel effort pédagogique emprunt d'honnêteté et de rigueur scientifique est nécessaire pour que l'évidente diversité des nano et microtechnologies puisse être comprise plus largement de la communauté scientifique et du grand public. A mes yeux, ceci constitue un des plus grands enjeux des communautés des micro et nanosciences pour les années à venir.

Annexe A

Curriculum vitæ

Michaël GAUTHIER

Institut FEMTO-ST
24, rue Alain Savary
25000 BESANCON
Tel : 03.81.40.27.95
: 06.77.37.84.10

michael.gauthier@femto-st.fr

www.femto-st.fr/~michael.gauthier



Chargé de Recherche CNRS Section 7

Né le 6 juillet 1975.

FONCTIONS ACTUELLES

depuis 2003 **Chargé de recherche (CR1)**, Institut FEMTO-ST, département 'Automatique et Systèmes micromécatroniques', UMR 6174 CNRS UFC ENSMM UTBM.

Equipe : Systèmes Automatisés de Micromanipulation et de Micro-assemblage (SAMMI).

Thèmes de recherche : Etude du micro-assemblage robotique, des systèmes de micropéhension et modélisation des interactions entre micro-objets.

2011-15 **Directeur Adjoint du département AS2M de FEMTO-ST.**

Animation du 'Comité d'Orientation Scientifique' du département.

2011-17 **Concours scientifique (25-2) à la société Percipio Robotics SA,**
start-up de l'institut FEMTO-ST.

Actionnaire et membre du CA de la société.

Etat d'avancement : création de la société effectuée en février 2011.

FORMATION ET FONCTIONS ANTERIEURES

26/05/2011 **Habilitation à Diriger des Recherches**, Université de Franche-Comté :
"Micromanipulation robotique en milieu liquide".

16/12/2002 **Doctorat de l'Université de Franche-comté**, spécialité Automatique et Informatique,
mention très honorable avec les félicitations du jury :

"Conception et commande d'un dispositif magnétique de micromanipulation par poussée,
application à la manipulation de micro-objets biologiques".

Composition du jury :

B. LePioufle	Professeur, ENS Cachan, Rennes	: Président
H. Bleuler	Professeur, EPFL, Lausanne, Suisse	: Rapporteur
M. de Mathelin	Professeur, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg	: Rapporteur
N. Chaillet	Professeur, Univ. de Franche-Comté	: Directeur de thèse
A. Charara	HDR, maître de conférences, UTC, Compiègne	: Examineur
E. Piat	Maître de conférences, ENSMM, Besançon	: Co-directeur de thèse

1995-99 **Ecole Normale Supérieure de Cachan**, section génie mécanique-productique.

4ème année de spécialisation à l'université de Franche-Comté :

DEA Informatique Automatique et Productique, mention très bien, rang 1^{er} / 51.

THEMATIQUES SCIENTIFIQUES

Mes travaux s'inscrivent dans le contexte du micro-assemblage robotisé. Afin de manipuler de manière fiable des micro-objets pour les assembler, il est nécessaire de maîtriser les forces de surface et d'adhésion prépondérantes à ces échelles. D'une part, mes travaux portent sur **l'étude du comportement des micro-objets** soumis à ces forces et plus particulièrement sur le développement de modèles adaptés aux géométries complexes, la maîtrise de ces effets par le contrôle des propriétés chimiques des surfaces et l'étude de nouveaux moyens de mesure de ces forces. D'autre part, je propose des **approches robotiques originales dédiées au paradigme de la micromanipulation** en focalisant sur la modélisation et la commande de méthodes de micropéhension et de la calibration de robot de micromanipulation. Certains de ces travaux font l'objet d'un **transfert vers le milieu économique** via la création d'une start-up dont ma participation prendra la forme d'un **concours scientifique (art. 25.2)**. Mes activités sont principalement structurées autour des projets ANR NANOROL (07-11) dont je suis le coordinateur et du projet européen STREP FAB2ASM (10-13) dont j'assure l'animation à l'institut FEMTO-ST.

RESPONSABILITES COLLECTIVES

- depuis 10 **Responsable de la plate-forme nationale micronanorobotique** bilocalisée entre l'institut FEMTO-ST et l'institut ISIR.
- depuis 11 **Responsable de l'axe 'micronanorobotique'** de l'équipement d'excellence (**EQUIPEX**), intitulé plate-formes robotiques nationales.
- 2008-15 **Membre élu du conseil scientifique** de FEMTO-ST
- depuis 07 **Membre du IEEE Technical Committee on Micro/Nano Robotics and Automation**
- 2010-11 Animation du thème 'micropréhension' dans l'équipe de recherche SAMMI
- 2008 Membre du 'Program Committee' de la conférence 'Robotics : Science and Systems 2008', Zurich, Suisse.
- 2004-09 Délégué scientifique du département AS2M de FEMTO-ST au Laboratoire Européen Associé (LEA) "Microtechniques".
- 2004-07 Membre élu du conseil de laboratoire du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB)
- 2007 Responsable et organisateur du workshop international, 'Workshop in Micro-assembly of 3D Hybrid MEMS', San Diego, Etats-Unis, 2007.
- 2006 Membre du comité d'organisation de IWMF : Int. Workshop on Microfactories.
- 2004-07 Participation aux comités de lecture des journaux : "Journal of Micromechanics and Microengineering", "IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics - Part A", "Journal of Micromechatronics", "IEEE Trans. on Robotics", "IEEE Trans. on Mechatronics", "IEEE Trans. on Automatic Science and Engineering", "Journal of Micro-Nano Mechatronics", "Journal on Microfluidics and Nanofluidics", "Sensors and Actuators A: Physical".
- 2008-09 Participation à deux jurys de thèse : Université Paris VI et Université Libre de Bruxelles

PROJETS DE COLLABORATION

- 2010-14 **Projet FP7 STREP FAB2ASM** (Efficient and Precise 3D Integration of Heterogeneous Microsystems from Fabrication to Assembly),
Partenaires : 5 instituts de recherche et 4 partenaires privées
Implication : **responsable du projet à FEMTO-ST** et responsable d'un sous-projet.
Fait marquant : Projet classé premier du call européen 2009 PPP 'Factories of the Future'
- 2008-12 **Projet ANR PSIROB2 NANOROL** (NANOCaractériser pour micROManipuLer),
Partenaires : FEMTO-ST et ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et Robotique, Paris VI)
Implication : **porteur de projet**
- 2008-10 **Projet PHC Toursnesol MODIM** (Modélisation du Micromondes)
Partenaires : FEMTO-ST, Université Libre de Bruxelles (ULB)
Implication : **porteur de projet**
- 2005-10 **Projet IP-FP6 HYDROMEL** (Hybrid ultra precision manufacturing process based on positional- and self-assembly for complex micro-products), 24 partenaires.
Implication : **responsable d'un 'Workpackage'** de 9 partenaires, 90 personnes.mois.
- 2005-08 **Projet ANR non thématique PRONOMIA** (PRincipe et Outils NOUveaux pour le MICOassemblage Automatisé, une alternative par le milieu liquide)
Partenaires : LAB et ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et Robotique, Paris VI)
Implication : **Co-animation du projet, responsable de sous projet.**
- 2005 **Aides jeunes OSEO-ANVAR** Franche-comté, "Station de micromanipulation de grains d'olivine"
(8 mois) Partenaires : LAB et LST (Lab. des Sciences de la Terre, ENS- Lyon).
Implication : encadrement du projet (100%).
- 2005-06 **2 Projets Lab. Européen Associé (LEA)** franco-suisse, "Etude de la répétabilité d'une tâche de micromanipulation dans les milieux sec et immergé" et "Techniques d'assemblage de micro-objets silicium : étude, réalisation et expérimentations".
Partenaires : LAB et LSRO (Lab. de Système Robotiques - EPFL), Lausanne, Suisse.
Implication : Séjour à l'EPFL et réalisation des expérimentations.
- 2003-04 **Collaboration intra-université de franche-comté**, "Etude de l'automatisation des procédés in-vitro".
Partenaires : LAB et EA 3185 "Génétique et reproduction : qualité des gamètes et du conceptus" de l'université de Franche-Comté.
Implication : Travail collaboratif sur la manipulation d'ovocytes.

VALORISATION

- 2009-11 **Prix liés à la création de la société Percipio Robotics**
2009 : Lauréat du Concours national d'entreprises de technologies innovantes en *Emergence*, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.
2010 : Lauréat du Concours national d'entreprises de technologies innovantes en *Création*, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.
2010 : Lauréat du réseau entreprendre Franche-Comté.
2011 : Lauréat du concours national 'Talents', catégorie innovation, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.
2011 : Lauréat du concours national 'Tremplin entreprises', organisé par le sénat et l'ESSEC.
- 2008-09 **Projet de Soutien au transfert, DPI CNRS**, "Stations de micro-assemblage", transfert lié au démonstrateur du projet ANR-PRONOMIA.
(6 mois) Implication : **porteur de projet**.
- 2007-08 **2 Aides jeunes OSEO-ANVAR** Franche-comté, "Réalisation d'un prototype fonctionnel de détachement automatique de micro-objets en milieu immergé" et "Conception de nouveaux degrés de liberté sur une station robotisée de micro-assemblage "
(2x8 mois) Implication : **encadrement des projets** (50%).

DISTINCTIONS

- 2011 Médaille de Bronze du CNRS
- 2010-14 Bénéficiaire de la prime d'excellence scientifique (PES) au CNRS.
- 2008 Micron d'or au salon industriel international Micronora pour la réalisation d'une plateforme de micro-assemblage (démonstrateur du projet PRONOMIA).

ENCADREMENTS

- 2008-11 **Post-doctorat** de J. Dejeu (80%), "Etude de monocouches auto-assemblées pour le micro-assemblage robotique", Travaux en co-encadrement avec le département MN2S de FEMTO-ST.
(36 mois)
- 2009-10 **Post-doctorat** de W. Dong (100%), "Commande d'un robot parallèle pour la mesure de (12 mois) forces d'interaction entre micro-objets", situation actuelle : Enseignant-Chercheur à l'Université d'Harbin, Chine.
- 2011-13 **Doctorat** de A. Pizrado (40%), "Modeling and control of non-contact robotic microhandling for nanopackaging", Thèse co-financée par EGIDE et le gouvernement Pakistanais, Doctorat de l'université de Franche-Comté, Ecole doctorale SPIM, Situation actuelle : première année de doctorat.
- 2011-13 **Doctorat** de A. Cot (30%), "Modélisation, expérimentation et optimisation de systèmes de micro-nanomanipulation par électrophorèse exploitant les fonctionnalisations de surface", Thèse en co-encadrement entre FEMTO-ST et UTINAM (UMR CNRS UFC), Doctorat de l'université de Franche-Comté, Ecole doctorale SPIM, Situation actuelle : première année de doctorat.
- 2008-11 **Doctorat** de S. Alvo (50%), "Etude et modélisation du comportement des objets à l'échelle microscopique", Thèse en co-encadrement entre FEMTO-ST et l'ISIR (UMR CNRS UPMC), Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie. Situation actuelle : troisième année de doctorat.
- 2007-10 **Doctorat** de M. Karboutly (80%), "Modélisation et commande de la manipulation de micro-objets par diélectrophorèse", Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique, soutenance le 2 février 2011. Situation actuelle : ATER à l'Université de Franche-Comté,
- 2007-10 **Doctorat** de C. Lenders (50%), " Study of Microbubbles mechanical behavior, application to the design of an actuated table for micromanipulation in liquid media", Doctorat en cotutelle : université libre de Bruxelles, université de Franche-comté, soutenance le 2 septembre 2010. Situation actuelle : 'Assistant' à l'Université Libre de Bruxelles.
- 2004-08 **Doctorat** de B-C Lopez Walle (75%), "Etude de la micropréhension par gel pour la micromanipulation immergée", Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique soutenu le 29 Février 2008. Situation actuelle : enseignant-chercheur à l'université de Monterey, Mexique.

- 2003-05 **Doctorat** de M. Dauge (60%) "Etude et modélisation du comportement dynamique d'un dispositif magnétique de micromanipulation : application au transport d'objets biologiques". Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique soutenu le 20 décembre 2005 (2002-05). Situation en sortie de thèse : chef de projet dans le secteur privé.
- 2009-11 **Ingénieur de recherche sous contrat**, David Rostoucher (100%), Projet ANR PSIROB2, NANOROL, projet FP7 FAB2ASM.
- 2005-08 **Ingénieur de recherche sous contrat**, David Heriban (100%), Projet non thématique ANR, PRONOMIA. Situation actuelle : chef de projet de l'incubation de la société Percipio Robotics, future start-up de l'institut FEMTO-ST, incubateur de Franche-Comté.
- 2005-08 **7 Masters recherche**, Master Sciences, Santé, Technologie, Mention STIC, spécialité mécatronique, univ de franche-comté. Durée de 6 mois.
Taux d'encadrement moyen : 90%
- 2005-08 **5 Ingénieurs stagiaires** en projets de fin d'étude, issus de l'ENSMM ou de l'UTBM. Durée de 6 mois.
Taux d'encadrement : 50%

ENSEIGNEMENT ET DIFUSION DES CONNAISSANCES

Université de Franche-comté, Besançon, France.

- 2008-11 Master 'mécatronique', 1ère année
Responsabilité du module 'Micromanipulation' (2009)
12 heures de cours/an, (16 heures de TP en 2009).
- 2005-07 Master pro 'mécatronique', 2ème année
6 heures de cours annuel en microrobotique.
12 heures de TP annuel en microbotique (participation au montage du TP).

Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques et Microtechniques (ENSMM), Besançon, France.

- 2008-11 Niveau Master 2, option 'Microsystèmes et Santé', cours sur les moyens de micromanipulation - 8 heures de cours/an
- 2004-07 Master pro 'mécatronique', 2ème année
7 heures de cours annuel en microrobotique.
2 heures de TP annuel en microbotique (montage du TP).

Ecole d'Ingénieur en Génie des Systèmes Industriels (EIGSI), La Rochelle, France.

- 2008-11 Niveau Master 2, Cours sur les micro-actionneurs et la microrobotique - 6 h de cours

Fédération suisse pour la recherche en microtechnique, Neuchâtel, Suisse.

- 2006 Formation destinée aux doctorants, projet intégré européen de formation ASSEMIC
3,5 heures de cours en microrobotique (langue anglaise)
- 2007-08 Cours d'été 'Highlight in Microtechnology', animation d'un TP de découverte du micromonde et de la micromanipulation. 3 heures TP (langue anglaise)

Université Libre de Bruxelles

- 2007 Master deuxième année, cours sur la microrobotique en milieu liquide - 3 h de cours

Diffusion vers le grand public

- 2004-08 Participation à l'opération '**une classe - un chercheur**' en partenariat avec le Lycée 'Nodier' de Dôle : 3 interventions annuelles dans deux classes de seconde autour des métiers de la recherche du thème de la microrobotique (exposés et travaux pratiques), 1 visite annuelle de laboratoires par les élèves.
- 2006-09 Encadrement de trois travaux de TIPE, en lien avec le Lycée du Parc, Lyon et le Lycée Victor Hugo, Besançon.

Annexe B

Publications personnelles

Livres et chapitres de livres

M. Gauthier, S. Régnier, 'Robotic micro-assembly', IEEE Press, Wiley Edition, 320 pages, Livre en langue anglaise, ISBN :9780470484173, publication le 20 août 2010.

M. Gauthier, P. Lambert, S. Régnier, Chapitre 3 - Microhandling and Micromanipulation strategy, Microrobotics for micromanipulation, Ed. S. Régnier et N. Chaillet, Wiley Edition, Juin 2010.

M. Gauthier, P. Lambert, S. Régnier, Chapitre 1 - Physics of the microworld, Microrobotics for micromanipulation, Ed. S. Régnier et N. Chaillet, Wiley Edition, Juin 2010.

M. Gauthier, P. Lambert, S. Régnier, 'Chapitre 3 - Micropréhension et Stratégies de micromanipulation', La microrobotique, application à la micromanipulation, Ed. S. Régnier et N. Chaillet, Edition Hermes, septembre 2008.

M. Gauthier, P. Lambert, S. Régnier, 'Chapitre 1 - La physique du micromonde', La microrobotique, application à la micromanipulation, Ed. S. Régnier et N. Chaillet, Edition Hermes, septembre 2008.

Brevet

C. Lenders, **M. Gauthier**, P. Lambert, Meniscus supported compliant table, 9 novembre 2009, N° BP.ULBB.165A/EP.

Revue internationale à comité de lecture

J. Dejeu, M. Benchelany, L. Philippe, P. Rougeot, J. Michler, **M. Gauthier**, Adhesion control for micro- and nano-manipulation, ACS NANO, 2011.

W. Dong, D. Rostoucher, **M. Gauthier**, A novel integrated micro-force measurement system for plane-plane contact research, Rev. Sci. Instrum. 81,116101(2010).

B. Lopez-Walle, **M. Gauthier**, and N. Chaillet, Dynamic modelling for thermal micro-actuators using thermal networks, International Journal of Thermal Sciences, 49 (2010)

2108-2116.

J. Dejeu, M. Benchelany, L. Philippe, P. Rougeot, J. Michler, **M. Gauthier**, Reducing the Adhesion between Surfaces Using Surface Structuring with PS Latex Particle, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 2 ,No 6, Juin 2010.

B. Lopez-Walle, **M. Gauthier**, and N. Chaillet, Dynamic modelling for a submerged freeze microgripper using thermal networks, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, issue 2, 025001, Feb. 2010.

D. Gendreau, **M. Gauthier**, D. Hériban, P. Lutz, Modular Architecture of the Microfactories for automatic micro-assembly, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 26 (2010) 354-360.

S. Alvo, P. Lambert, **M. Gauthier**, S. Régnier, Adhesion Model for Micromanipulation based on van der Waals forces *J. Adhesion Sci. Technol.* vol.24, pp.2415-28, 2010.

M. Kharboutly, **M. Gauthier**, N. Chaillet, Modeling the trajectory of a micro-particle in a dielectrophoresis device. *Journal of Applied Physics*, vol. 106, 114312, dec. 2009.

J. Dejeu, **M. Gauthier**, P. Rougeot, W. Boireau, Adhesion forces controlled by chemical self-assembly and pH, application to robotic microhandling, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 1, No. 9, 1966-1973, 2009.

K. Rabenorosoa, C. Clévy, P. Lutz, **M. Gauthier**, P. Rougeot, Measurement of pull-off force for planar contact at the microscale, in *MicroNano Letters* vol 4, Iss 3, 2009.

J. Dejeu, P. Rougeot, **M. Gauthier**, W. Boireau, Reduction of micro-object's adhesion using chemical fonctionnalisation, in *MicroNano Letters*, Vol. 4, Iss. 2, pp. 74-79, 2009.

J. Agnus, D. Hériban, **M. Gauthier**, V. Pétrini, Silicon End-Effectors For Microgripping Tasks, *Precision Engineering*, Volume 33, Issue 4, October 2009, Pages 542-548.

D. Hériban, , J. Agnus, V. Pétrini, **M. Gauthier**, Mechanical de-tethering technique for Silicon MEMS etched with DRIE process, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 19, Issue 5, pp. 055011 (2009).

B. Lopez-Walle, **M. Gauthier**, and N. Chaillet, Principle of a Submerged Freeze Gripper for Micro-assembly, *IEEE Trans. on Robotics*, vol 24, no4, pp897-902, august 2008.

M. Dauge, **M. Gauthier** et E. Piat, Modelling of a planar magnetic micropusher for biological cell manipulations, *Sensors and Actuators A*, vol 138, 239-247, juillet 2007.

M. Boukallel, **M. Gauthier**, M.Dauge, E. Piat et J. Abadie, "Smart Microrobots for Mechanical Cell Characterization and Cell Convoying", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 54(8) :1536-40, août 2007.

M. Gauthier et M. Nourine, Capillary Force Disturbances on a Partially Submerged Cylindrical Micromanipulator, in *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, no 3, 600-604, Juin 2007.

M. Gauthier, S. Regnier, P. Rougeot et N. Chaillet, "Forces analysis for micromanipulation", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, no 1, 1-11, Jan. 2008.

pulations in dry and liquid media", Journal of Micromechatronics, Vol. 3, No. 3-4, pp. 389-413, sept. 2006.

M. Gauthier et E. Piat, "Control of a particular micro-macro positioning applied to cell microdisplacement", IEEE Trans. on Automation, vol 3, no 3, pp. 264-271, juillet 2006.

M. Boukallel, **M. Gauthier**, E. Piat, J. Abadie et C. Roux, "Microrobots for in vitro fertilization applications", Cellular and Molecular biology, vol. 50, no. 3, pages 267-74, mai 2004.

M. Gauthier et E. Piat, "An electromagnetic micromanipulation system for single cell manipulation", Journal of Micromechatronics, vol. 2, no. 2, pages 87-119, février 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "Force study applied to a biological objects planar micro-manipulator", Journal Européen des Systèmes Automatisés - JESA, vol. 36, n° 9, pages 1249-64, 2002.

Communications internationales dans des congrès avec actes

C. Lenders, **M. Gauthier**, P. Lambert, Parallel Microrobot Actuated by Capillary, in proc. of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, May 2011.

W. Dong, D. Rostoucher, **M. Gauthier**, Kinematics Parameters Estimation for an AFM/Robot Integrated Micro-Force Measurement System, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, oct. 2010.

M. Kharboutly, **M. Gauthier**, N. Chaillet, Predictive control of a micro bead's trajectory in a dielectrophoresis-based device, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, oct. 2010.

M. Kharboutly, **M. Gauthier**, N. Chaillet, Modeling the trajectory of a micro particle in a dielectrophoresis device, IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2010, Alaska, USA, May 2010.

J. Dejeu, P. Rougeot, **M. Gauthier**, W. Boireau, Improvement of Robotic Micromanipulations using Chemical Functionalizations, IPAS conference, Chamonix, France, Feb. 2010.

H. Xie, **M. Gauthier**, P. Lutz, S. Régnier, N. Chaillet, Recent advances in the study of Micro/Nano Robotics in France, in IARP Workshop on Service Robotics and Nanorobotics., Beijing : China (2009).

C. Lenders, **M. Gauthier**, P. Lambert, Microbubble Generation Using a Syringe Pump, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Intelligent Systems, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 2009.

J. Dejeu, P. Rougeot, **M. Gauthier**, W. Boireau, Robotic Microhandling Controlled by

Chemical Self-assembly , Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Intelligent Systems, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 2009.

D. Hériban, **M. Gauthier**, S. Régnier, N. Chaillet, P. Lutz, Automatic pick-and-place of 40 microns objects using a robotic platform, in proc. of Proceedings of the 9th euspen International Conference - San Sebastian - June 2009.

D. Hériban, **M. Gauthier**, D. Gendreau, "Modular Robotic Platform for Silicon Micro-mechanical Components Assembly", on proc. of the 6th int. Workshop on Microfactories, Evanston, Illinois, USA, October 2008.

D. Hériban, **M. Gauthier**, "Robotic Micro-assembly of Microparts Using a Piezogripper", in proc. of the IEEE/RSJ IROS Conference, Nice, France, page 4042-47, septembre 2008.

D. Hériban, A. Thiebault, **M. Gauthier**, G. Fortier, "Improving Rotation Behaviour of Robotic Structures for Micro-Assembly", in the proceedings of the 2008 IEEE/CASE, Washington DC, USA, pp. 983-88, août 2008.

B. Lopez Walle, **M. Gauthier**, N. Chaillet, "Dynamic modelling of a submerged freeze microgripper using a thermal network", in the proceedings of the 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, sept. 2007.

B. Lopez Walle, **M. Gauthier** and N. Chaillet, "A Submerged Freeze Microgripper for Micromanipulations", in proc. of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 10-14 April 2007.

M. Dauge, **M. Gauthier** et E. Piat, "Trajectory Modelling of a Planar Magnetic Cell Micropusher", in Proc. of the IEEE-ROBIO conference, pages 144-47, Kunming, China, dec. 2006.

M. Gauthier, E. Gibeau et D. Hériban, "Submerged Robotic Micromanipulation and Dielectrophoretic Micro-object Release", in proc. of the IEEE ICARCV' 2006 conference, Singapour, dec. 2006.

D. Hériban, J Agnus et M Gauthier, "Micromanipulation of silicate micro-sized particles for biological applications", in Proc. on the Int. Workshop on Microfactories, Besancon, France, oct. 2006.

B. Lopez-Walle, **M. Gauthier** et N. Chaillet, "Principle of a submerged freeze microgripper", in Proc. on the Int. Workshop on Microfactories, Besancon, France, oct. 2006.

M. Gauthier, D. Heriban, D. Gendreau, S. Regnier, P. Lutz et N. Chaillet, "Microfactory for Submerged Assembly : Interests and Architectures", in Proc. on the Int. Workshop on Microfactories, Besancon, France, oct. 2006.

B.Lopez-Walle, **M. Gauthier** et N. Chaillet, Submerged Freeze Gripper to Manipulate Micro-objects, proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'06, pp. 784-789, Beijing, Chine, oct. 2006.

M. Nourine et **M. Gauthier**, Effect of the Capillary Force on Force Measurements in

Submerged Micromanipulations, proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'06, pp. 766-771, Beijing, Chine, oct. 2006.

D. Heriban, J. Agnus, J-R Coudevylle, **M. Gauthier** et N. Chaillet, "Design of silicon finger tips for a MOC Microgripper", proc. of the 1st Topical Meeting on Microfactories Desktop MEMS and Nano Factories : TMMF'2005, pages 47-52, Tsukuba, Japon, oct. 2005.

M. Dauge, **M. Gauthier** et E. Piat, "Cell Transport system for-microfactory automation In-Vitro Fertilization", in proc. of the Int. conf. on nanomaterials, NANO'05, India, juillet 2005.

M. Dauge, **M. Gauthier** et E. Piat, "Modelling of a 2D Magnetic Cell Transport System", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'05, pages 4098-4103, août 2005.

M. Gauthier, B. Lopez-Walle et C. Cleve, "Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums", proc. (CD ROM) of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA'05, 6 pages, Finlande, juin 2005.

M. Dauge, M. Boukallel, **M. Gauthier**, J. Abadie and E. Piat, "Bio-microfactory for automatic in-vitro fertilization process", Proc of the Int. Workshop on Microfactories, vol. 2, pp. 432-435, octobre 2004, Shangai, Chine.

M. Boukallel, **M. Gauthier**, E. Piat, J. Abadie et C. Roux, "Microrobots for in vitro fertilization applications", proc. (CD ROM) of the First Congress on Men's Health Medicine, avril 2004, UNESCO, Paris, France.

M. Gauthier, M. Boukallel et E. Piat, "Micromanipulation of biological cells and micro-nano force measurement applied to IntraCytoplasmic Sperm Injection (ICSI) ", Proc. Of the Workshop on Microrobotics for Biomanipulation - IROS03, pp.61-73, Las Vegas, Etats-Unis, oct 2003.

M. Gauthier, E. Piat, "Control of a particular coarse-fine micropositioning system based on a magnetic actuation", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'02, vol. 2, pages 1748-53, Lausanne - Suisse, Oct 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "Microfabrication and scale effect studies for a magnetic micro-manipulation system", proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS'02, vol. 2, pages 1754-59, Lausanne - Suisse, Oct 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "Behavior of a magnetic manipulator of biological objets", proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation - ICRA'02, Washington D.C., vol.2, pp 3199-3204, Mai 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "A magnetic manipulator for single cell manipulation : behavior and control", proc. of the 8th Int. Conf. on New Actuators - Actuator'02, pages 110-115, Breme - Allemagne, Juin 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "A magnetic Wireless Micromanipulator System applicable to biological cell manipulation", proc. of the 8th Mechatronics Forum Int. Conf. - Mechatronics'02, pages 735-744, Enschede - Pays Bas, Juin 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "Magnetic micro-actuator for biological objects micro-manipulation", proc. of the 12th Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics - ISMCR'02, Bourges - France, Juin 2002.

M. Gauthier, E. Piat, "Force study for micro-objects manipulation in an aqueous medium with a magnetic micro-manipulator", proc. of the 5th Franco-Japanese Congress - 3rd European - Asian Congress - Mecatronics'01, pp 489-94, Besançon - France, Juillet 2001.

Annexe C

Modèles de la double couche électrique

Cette annexe présente une synthèse sur les modèles de la double couche électrique complémentaire à la section 3.1.1, page 46.

Les modèles de double couche électrique visent à décrire la variation du potentiel électrique à l'interface solide/liquide. L'équation de Poisson-Boltzmann décrit l'évolution du potentiel électrique ψ aux abords d'une surface en fonction des n types d'ions de la solution de concentration c_i et de charge q_i :

$$\nabla^2 \psi = \sum_{i=1}^n \frac{q_i c_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_3} e^{\frac{-q_i \psi}{kT}} \quad (\text{C.1})$$

avec $\varepsilon_0 \varepsilon_3$ la permittivité électrique absolue du milieu, k la constante de Boltzmann ($k = 1,381.10^{-23} \text{ JK}^{-1}$) et T la température. Cette équation décrivant le problème électrochimique est fortement non linéaire du fait des termes exponentiels, ce qui rend difficile l'obtention d'une solution analytique. La résolution de cette équation fait apparaître classiquement la longueur d'écran de Debye κ^{-1} :

$$\kappa^{-1} = \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 kT}{\sum q_i^2 c_i} \right)^{1/2} \quad (\text{C.2})$$

qui caractérise l'épaisseur de la double couche électrique. Pour avoir un ordre de grandeur, la longueur de Debye κ^{-1} dans l'eau et à température ambiante varie entre environ 0,4 nm (pour une solution de Na_3PO_4 à 0,1 mol/l) et 30 nm (pour une solution de KCl à 10^{-6} mol/l) [2].

Deux expressions de l'équation de Poisson-Boltzmann (PB) sont couramment employées. Pour un électrolyte symétrique composé de deux types d'ions $n = 2$, de charge opposée $q_1 = -q_2 = q$ et de même concentration $c_1 = c_2 = c$, les deux équations

précédentes deviennent :

$$\nabla^2 \bar{\psi} = \kappa^2 \sinh(\bar{\psi}) \quad \kappa^{-1} = \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3 kT}{2q^2 c} \right)^{1/2} \quad (\text{C.3})$$

où $\bar{\psi} = q\psi/kT$ est le potentiel électrique réduit. L'autre forme courante de cette équation est l'équation de PB linéaire, obtenue en linéarisant les termes exponentiels, à condition que $\max(q_i\psi/kT) < 1$. Il s'agit de l'approximation linéaire de Debye-Hückel :

$$\nabla^2 \psi = \kappa^2 \psi \quad (\text{C.4})$$

Trois principales méthodes existent pour calculer de façon approchée les interactions entre sphères : la méthode de superposition linéaire (LSA) restreinte aux grandes distances ($\kappa z > 1$) et l'approximation de Derjaguin (1940) appropriée aux petites distances ($\kappa z < 1$) et aux petites longueurs d'écran ($\kappa^{-1} < R$). Enfin, une formule valable pour tout κz , tout en gardant une forme analytique simple est explicitée dans [158].

La méthode LSA [14] postule que la solution de l'équation de PB pour un système de deux particules peut être construite comme la superposition linéaire des solutions pour les particules isolées. Ceci se justifie par le fait que le potentiel électrique à des distances supérieures à κ^{-1} descend à des valeurs faibles et sa description peut alors être établie par l'équation de PB linéaire (C.4). Par conséquent, la solution de cette équation dans cette région est obtenue en postulant l'additivité des potentiels des particules isolées : $\psi = \psi_1 + \psi_2$. La solution de l'équation de PB linéaire (C.4) pour une sphère i de rayon R_i est :

$$\psi_i(z_i) = \psi_{si} \frac{R_i}{z_i + R_i} e^{-\kappa z_i}, \quad (\text{C.5})$$

où z_i est la distance à la surface de la sphère et ψ_{si} est une constante représentant un potentiel caractéristique de la surface i . Pour de petits potentiels ψ_{si} et une distance d'interaction $z > \kappa^{-1}$, on peut ainsi calculer la force entre deux sphères :

$$F_{\text{dc ss}} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_3 R_1 R_2 \frac{1 + \kappa(R_1 + R_2 + z)}{(R_1 + R_2 + z)^2} \psi_{s1} \psi_{s2} e^{-\kappa z} \quad (\text{C.6})$$

Par ailleurs, dans le cas où un des rayons tend vers l'infini, cette équation se réduit à la forme décrivant l'interaction entre une sphère de rayon R et un plan infini :

$$F_{\text{dc sp}} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_3 \kappa R \psi_{s1} \psi_{s2} e^{-\kappa z} \quad (\text{C.7})$$

L'inconvénient de la méthode LSA est qu'elle devient moins efficace pour de petites distances de séparations ($\kappa z < 1$). Dans ce cas, on peut utiliser l'approximation de Derjaguin. Selon cette méthode [48], les interactions entre sphères peuvent être calculées comme la somme (intégrale) des interactions correspondantes de surfaces élémentaires (anneaux) ayant une géométrie plane. Cette approximation suppose que la portée de

l'énergie d'interaction soit beaucoup plus courte que les rayons de courbure R_i des particules. La méthode Derjaguin n'est donc valide que si $\kappa R_i \gg 1$. En pratique, l'approximation reste bonne pour $\kappa R_i > 5$ [93]. Cette hypothèse permet d'obtenir la formule HHF, du nom de ses auteurs Hogg, Healy et Fuerstenau [93] :

$$F_{\text{dc ss}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_3\kappa}{1 - e^{-2\kappa z}} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (\pm(\psi_{s1}^2 + \psi_{s2}^2)e^{-2\kappa z} + 2\psi_{s1}\psi_{s2}e^{-\kappa z}) \quad (\text{C.8})$$

où le signe $\pm$ dépend des conditions aux frontières : signe du haut pour des surfaces à charge constante (c.c.) et signe du bas pour des surfaces à potentiel constant (p.c). De plus, les potentiels de surfaces doivent être faibles. Il a été montré que l'approximation était bonne jusqu'à 50 mV (soit $\bar{\psi}_{si} \leq 2$) dans [93]. En résumé, les conditions à vérifier pour utiliser la formule HHF sont donc $\kappa z < 1$, $\bar{\psi}_{si} \leq 2$ et $\kappa R_i > 5$.

Enfin, Sader et al. ont démontré que la formule HHF pouvait être facilement modifiée pour s'appliquer à tout κz tout en gardant sa simplicité analytique [158]. Ils proposent ainsi une formule simple et efficace pour deux sphères identiques de rayon R et de potentiel modéré à élevé ($\bar{\psi}_{si} \leq 4$ soit $\psi_{si} \leq 100$ mV), valide pour tout κz et $\kappa R > 5$:

$$F_{\text{dc ss}} = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_3 R^2}{(R + z)^2} \left[4e^{\frac{\kappa z}{2}} \tanh^{-1} \left(e^{-\frac{\kappa z}{2}} \tanh \frac{\bar{\psi}_s}{4} \right) \right]^2 \cdot \left[\ln(1 + e^{-\kappa z}) + \frac{\kappa R e^{-\kappa z}}{1 + e^{-\kappa z}} \right] \quad (\text{C.9})$$

Bibliographie

- [1] S. F. Ackley and K. Itagaki. Ice adhesion studies : properties of defects in the interfacial region. *Highway Research Board Special Report*, (115) :87–96, 1970.
- [2] Z. Adamczyk. Particle adsorption and deposition : role of electrostatic interactions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100–102 :267–347, February 2003.
- [3] R. Agarwal, K. Ladavac, Y. Roichman, G. Yu, C. Lieber, and D. Grier. Manipulation and assembly of nanowires with holographic optical traps. *Optics Express*, 13(22) :8906–8912, 2005.
- [4] J. Agnus. *Contribution à la micromanipulation. Étude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropince piézoélectrique*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, November 2003.
- [5] J. Agnus, D. Hériban, M. Gauthier, and V. Pétrini. Silicon end-effectors for microgripping tasks. *Precision Engineering*, 2009.
- [6] J. Agnus, P. Nectoux, and N. Chaillet. Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on a mmoc microgripper. In *Proc. of IEEE CIRA*, Finland, June 2005.
- [7] S. Alvo. Etude de la calibration d'une station robotique de micromanipulation. Master's thesis, Master de l'Université de Franche-Comté, 2008.
- [8] S. Alvo, P. Lambert, M. Gauthier, and S. Régnier. Adhesion model for micromanipulation based on van der waals forces. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 24 :2415–28, 2010.
- [9] F. Arai, T. Endo, R. Yamuchi, and T. Fukuda. 3d 6dof manipulation of micro-object using laser trapped microtool. In *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1350–55, Orlando, Florida, may 2006.
- [10] F. Arai, K. Yoshikawa, T. Sakami, and T. Fukuda. Synchronized laser micromanipulation of multiple targets along each trajectory by single laser. *Applied Physics Letters*, 85(19) :4301–4303, November 2004.
- [11] Tatsuo ARAI, Akihiro SUZUKI, Yosuke KATO, Yasushi MAE, Kenji INOUE, and Tamio TANIKAWA. Automated calibration for micro hand using visual information. In *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 293–98, Lausanne, Switzerland, October 2002.

- [12] F. Becker, P. Gascoyne, Y. Huang, and X-B Wang. Method and apparatus for manipulation using spiral electrodes. In *Patent 5,858,192*, Etats-Unis, 12 janvier 1999.
- [13] D. Beebe, M. Wheeler, H. Zeringue, E. Walters, and S. Raty. Microfluidic technology for assisted reproduction. *Theriogenology*, 57(1) :125–135, 2002.
- [14] G. M. Bell, S. Levine, and L. N. McCartney. Approximate methods of determining the double-layer free energy of interaction between two charged colloidal spheres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 33 :335–359, July 1970.
- [15] B. Bhushan. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 366, 2008.
- [16] F. Biganzoli, I. Fassi, and C. Pagano. Development of a gripping system based on a capillary force. In *Proc. of IEEE ISATP*, pages 36–40, Canada, 2005.
- [17] M. S. Bobji and B. Bhushan. *Scr. Mater.*, 44 :37, 2001.
- [18] Karl F. Bohringer. *Self-Assembly from Nano to Milli Scales*. Springer, 2013.
- [19] S. C. Bou, A. Almansa, N. Balabanava, and Z. Rymuza. Handling processes in microsystems technology. In *Proc. of IEEE/ASME AIM*, Monterey, USA, July 2005.
- [20] M. Boukallel, M. Gauthier, M.Dauge, E. Piat, and J. Abadie. Smart microrobots for mechanical cell characterization and cell convoying. *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 54(8) :1536–40, août 2007.
- [21] Jonathan A. Brant and Amy E. Childress. Assessing short-range membrane.colloid interactions using surface energetics. *Journal of Membrane Science*, 203 :257–273, 2002.
- [22] Jonathan A. Brant and Amy E. Childress. Colloidal adhesion to hydrophilic membrane surfaces. *Journal of Membrane Science*, 241 :235–248, 2004.
- [23] P. Lambert C. Lenders, M. Gauthier. Meniscus supported compliant table, 2009.
- [24] Sébastien Candel. Paris, France, dunod - 2ème ed. edition, 2001.
- [25] F. T. Chang, Y. C. Lee, and C. C. Chiu. Multiple electrodes arrayeed dielectrophoretic chip with application on micro-bead manipulation. In *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Enhineered and Molecular Systems*, pages 850 – 853, Sanya, China, january 2008.
- [26] S. C. Chapin, V. Germain, and E. R. Dufresne. Automated trapping, assembly, and sorting with holographic optical tweezers. *Optics Express*, 14(26) :13095–13100, 2006.
- [27] H. Chetouani, C. Jeandey, V. Haguet, H. Rostaing, C. Dieppedale, and G. Reyne. Diamagnetic levitation with permanent magnets for contactless guiding and trapping of microdroplets and particles in air and liquids. *IEEE Transactions on Magnetism*, 42(10) :3557– 3559, Oct. 2006.
- [28] Y-S Chiu, K-S Chang, R W Johnstone, and M Parameswaran. Fuse-tethers in mems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16 :480–486, 2006.

- [29] Cédric Clevy. *Contribution à la micro-manipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, décembre 2005.
- [30] Z Cuiy and R A Lawes. A new sacrificial layer process for the fabrication of micro-mechanical systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 7 :128–130, 1997.
- [31] F. Daerden and D. Lefeber. Pneumatic artificial muscles : actuators for robotics and automation. *Eur. J. Mech. Env. Eng.*, 47(1) :10–21, 2002.
- [32] Mélanie Dafflon, Benoit Lorent, and Reymond Clavel. A micromanipulation setup for comparative tests of microgrippers. In *International Symposium on Robotics (ISR)*, 2006.
- [33] Aditya N. Das, Ping Zhang, Woo H. Lee, Dan Popa, and Harry Stephanou. mu3 : Multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots. In *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 461–66, Roma, Italy, April 2007.
- [34] M. Dauge. *Etude et modélisation du comportement dynamique d'un dispositif magnétique de micromanipulation : application au transport d'objets biologiques*. PhD thesis, Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique, 20 décembre 2005.
- [35] M. Dauge, M. Gauthier, and E. Piat. Modelling of a 2d magnetic cell transport system. In *proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 4098–4103, August 2005.
- [36] M. Dauge, M. Gauthier, and E. Piat. Trajectory modelling of a planar magnetic cell micropusher. In *Proc. of the IEEE-ROBIO conference*, pages 144–47, Kunming, China, dec 2006.
- [37] M. Dauge, M. Gauthier, and E. Piat. Modelling of a planar magnetic micropusher for biological cell manipulations. *Sensors and Actuators A*, 138(239-247), juillet 2007.
- [38] N. Dechev and M. Basha. Robotic microassembly of 3d mems structures. In *Proc. of IEEE/RSJ IROS Workshop Robotic Microassembly of 3D Hybrid MEMS*, USA, October 2007.
- [39] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and J. K. Mills. Microassembly of 3d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2), April 2004.
- [40] Nikolai Dechev, William L. Cleghorn, and James K. Mills. Construction of 3d mems microstructures using robotic microassembly. In *Proc. of RSJ/IEEE IROS 2003*, pages 3193– 3199, Sept. 2003.
- [41] G. V. Dedkov and M. B. Dyshekov. *Surf. Sci.*, 463,(125), 2000.
- [42] J. Dejeu, M. Benchelany, L. Philippe, P. Rougeot, J. Michler, and M. Gauthier. Reducing the adhesion between surfaces using surface structuring with ps latex particle,. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(6), Juin 2010.

- [43] J. Dejeu, M. Gauthier, P. Rougeot, and W. Boireau. Adhesion forces controlled by chemical self-assembly and ph, application to robotic microhandling. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 1(9) :1966–1973, 2009.
- [44] J. Dejeu, P. Rougeot, M. Gauthier, and W. Boireau. Robotic microhandling controlled by chemical self-assembly. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Intelligent Systems*, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 2009.
- [45] J. Dejeu, P. Rougeot, M. Gauthier, and W. Boireau. Improvement of robotic micro-manipulations using chemical functionalisations. In *IPAS conference*, Chamonix, France, Feb. 2010.
- [46] Jérôme Dejeu, Patrick Rougeot, Michaël Gauthier, and Wilfrid Boireau. Reduction of micro-object’s using chemical functionalisation. *Micronanoletters*, 2009.
- [47] A. Delettre. Etude de l’impact de la précharge sur la force de pull-off à l’échelle micrométrique. Master’s thesis, Master de l’université de Franche-Comté, 2008.
- [48] B. V. Derjaguin. Untersuchungen über die reibung und adhäsion, IV. *Kolloid Zeitschrift*, 69(2) :155–164, November 1934.
- [49] B. V. Derjaguin, V.M. Muller, and YU. P. Toporov. effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of Colloid and interface science*, 53(2) :314–326, 1975.
- [50] K. Dholakia, G. Spalding, and M. MacDonald. Optical tweezers : the next generation. *Physics world (Phys. world) ISSN 0953-8585*, 15(10) :31–35, 2002.
- [51] F. Dionnet. *Télé-micro-manipulation par adhésion*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [52] W. Dong, D. Rostoucher, and M. Gauthier. Kinematics parameters estimation for an afm/robot integrated micro-force measurement system. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 6143–48, Taipei, Taiwan, oct. 2010.
- [53] W. Dong, D. Rostoucher, and M. Gauthier. Kinematics parameters estimation for an afm/robot integrated micro-force measurement system. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, oct. 2010.
- [54] W. Dong, D. Rostoucher, and M. Gauthier. A novel integrated micro-force measurement system for plane-plane contact research. *Review of Scientific Instrument*, In press, 2011.
- [55] W. Driesen, T. Varidel, S. Régnier, and J-M. Breguet. Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobiles micro robots. In *Proc. of IWMMF*, China, 2004.
- [56] S. Droz et al. New generation of grippers for the manipulation of miniaturized components. In *Proc. of Mechatronics*, pages 572–575, Besançon, France, October 2001.
- [57] F. Dubourg and J. P. Aime. *Surf. Sci.*, 466 :137, 2000.

- [58] E. R. Dufresne and D. G. Grier. Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics. *Rev. Sci. Instr.*, 69 :1974–1977, 1998.
- [59] S. Eichenlaub, A. Gelb, and S. Beaudoin. *J. Colloid and Interface Sci.*, 280(289), 2004.
- [60] V. Emiliani, D. Sanvitto, M. Zahid, F. Gerbal, and M. Coppey-Moisan. Multi force optical tweezers to generate gradients of forces. *Optics Express*, 12, 2004.
- [61] F.M. Fowkes. Role of acid-base interfacial bonding in adhesion. *J. Adh. Sci. Tech.*, 1(1) :7–27, 1987.
- [62] M. Frenea, S.P. Faure, B. Le Pioufle, Ph. Coquet, and H. Fujita. Positioning living cells on a high-density electrode array by negative dielectrophoresis. *Material Science and Engineering*, C 23 :597–603, 2003.
- [63] E P Furlani. Magnetophoretic separation of blood cells at the microscale. *J. Phys. D : Appl. Phys*, 40(5), 2007.
- [64] Manuel Gálvez-Carrillo, Robin De Keyser, and Clara Ionescu. Nonlinear predictive control with dead-time compensator : Application to a solar power plant. *Solar Energy*, 83, Issue 5 :743–752, 2009.
- [65] P. Gascoyne and J. Vikoukal. Dielectrophoresis-based sample handling in general-purpose programmable diagnostic instruments. *IEEE Proceedings*, 92(1), janvier 2004.
- [66] P. R. C. Gascoyne and J. V.Vykoual. Dielectrophoresis-based sample handling in general-purpose programmable diagnostic instruments. *IEEE Sensors Journal*, 92(1) :22 – 42, January 2004.
- [67] M. Gauthier. *Conception et commande d'un dispositif magnétique de micromanipulation par poussée : Application à la manipulation de micro-objets biologiques*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2002.
- [68] M. Gauthier, E. Gibeau, and D. Hériban. Submerged robotic micromanipulation and dielectrophoretic micro-object release. In *Proc. of the IEEE ICARCV 2006 conference*, Singapour, 2006.
- [69] M. Gauthier, D. Heriban, D. Gendreau, S. Regnier, P. Lutz, and N. Chaillet. Micro-factory for submerged assembly : Interests and architectures. In *Proc. on the Int. Workshop on Microfactories*, Besancon, France, oct. 2006.
- [70] M. Gauthier, B. Lopez-Walle, and C. Clévy. Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums. In *proc. of CIRA'05*, June 2005.
- [71] M. Gauthier, S. Régnier, P. Rougeot, and N. Chaillet. Analysis of forces for micromanipulations in dry and liquid media. *Journal of Micromechatronics*, 3(3-4) :389–413, 2006.
- [72] M. Gauthier and S. Régnier. Pronomia project : Micro-assembly and modeling of the microworld. In *Workshop on Micro-assembly of 3D Hybrid MEMS, Int. Conf on Intelligent Robotics and Systems*, San Diego, Etats-Unis, Oct 2007.
- [73] M. Gauthier and S. Régnier. *Robotic micro-assembly*. IEEE Press, Wiley Edition, 2010.

- [74] D. Gendreau, M. Gauthier, D. Hériban, and P. Lutz. Modular architecture of the microfactories for automatic micro-assembly. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 26 :354–360, 2010.
- [75] Ivar Giaever. *Magnetic separation of biological particles*. United States Patent, Patent Number US 3 970 518, 20 July 1976.
- [76] E. Gibeau. Modélisation des trajectoires de micro-objets en diélectrophorèse. Master’s thesis, Master de l’université de Franche-Comté, 2006.
- [77] R. J. Good. *Theory of Adhesive Forces Accross Interfaces : 1. The Lifshitz - van der Waals Component of Interaction and Adhesion*. Lieng-Huan Lee, plenum press new-york edition, 1991.
- [78] R.J. Good and C.J. Van Oss. *Modern Approaches to Wettability, Theories and Applications*. Plenum Press, New York, 1992.
- [79] Chauncey F. Graetzel, Steven N. Fry, Felix Beyeler, Yu Sun, and Bradley J. Nelson. Real-time microforce sensors and high speed vision system for insect flight control analysis. *Experimental Robotics Springer Tracts in Advanced Robotics*, 39 :451–460, 2008.
- [80] Aline De Greef, Pierre Lambert, and Alain Delchambre. Towards flexible medical instruments : Review of flexible fluidic actuators. *Precis. Eng.*, 33 :311–321, October 2009.
- [81] A. Grier and W. Lopes. Apparatus and method to generate and control optical traps to manipulate small particles. *United States Patent US 7 161 140*, 9 janv. 2007.
- [82] D. G. Grier and Y. Roichman. Holographic optical trapping. *Appl. Opt.*, 45 :880–887, 2006.
- [83] H. Grutzeck and L. Kieseewette. Downscaling of grippers for micro assembly. *Microsystem Technologies*, 8(1) :27–31, 2002.
- [84] D. S. Haliyo. *Les forces d’adhésion et les effets dynamiques pour la micromanipulation*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2002.
- [85] D.S. Haliyo and S. Régnier. Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects. In *Proceedings of ICRA/IEEE Internation Conferenace on Robotics and Automation*, May 2002.
- [86] D.S. Haliyo, G. Venture, and S. Régnier. Tele-manipulation by adhesion of micro objects. In *Proc. IEEE CIRA*, Finland, 2005.
- [87] D. Heriban. Etude du lâcher actif de micro-objets par diélectrophorèse. Master’s thesis, Master de L’université de Franche-Comté, 2005.
- [88] D. Hériban, J. Agnus, and M. Gauthier. Micro-manipulation of silicate micro-sized particles for biological applications. In *Proc. IEEE IWMMF*, France, 2006.
- [89] David Heriban, Joel Agnus, Jean-René Coudevylle, Michael Gauthier, and Nicolas Chaillet. Design of silicon finger tips for a moc (microrobot on chip) microgripper. In *Proc. of the Int. Workshop on Topica Meeting on Microfactories (TMMF05)*, Tsukuba, Japan, October 2005.

- [90] David H eriban and Micha el Gauthier. Robotic micro-assembly of microparts using a piezogripper. In *Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4042–4047, Nice, France, 2008.
- [91] M. Herrmann, P. Gieschke, P. R  ther, and O. Paul. Cmos-integrated three-axis force sensor for coordinate measurement applications. In *IEEE Sensors 2010 Conference*, pages 2648–2652, Waikoloa / USA, 2010.
- [92] E. M. V. Hoek and G. K. Agarwal. Extended DLVO interactions between spherical particles and rough surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298 :50–58, June 2006.
- [93] R. Hogg, T. W. Healy, and D. W. Fuerstenau. Mutual coagulation of colloidal dispersions. *Transactions of the Faraday Society*, 62 :1638–1651, 1966.
- [94] R. E. Holmlin, M. Schiavoni, C. Y. Chen, S. P. Smith, M. G. Prentiss, and G. M. Whitesides. Light-driven microfabrication : Assembly of multicomponent, three-dimensional structures by using optical tweezers. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 39(19) :3503–3506, 2000.
- [95] D. H eriban, J. Agnus, V. P  trini, and M. Gauthier. Mechanical de-tethering technique for silicon mems etched with drie process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(5) :055011, 2009.
- [96] D. H eriban, M. Gauthier, and D. Gendreau. Modular robotic platform for silicon micromechanical components assembly. In *proc. of the 6th int. Workshop on Microfactories*, Evanston, Illinois, USA, October 2008.
- [97] D. H eriban, M. Gauthier, P. Lutz, and N. Chaillet. Station de micro-assemblage. “micron d’or” au salon industriel international des microtechniques Micronora, [http ://www.femto-st.fr/fr/Departements-de-recherche/AS2M/Equipes-de-recherche/SAMMI/Projets/PRONOMIA-Micron-d-or.php](http://www.femto-st.fr/fr/Departements-de-recherche/AS2M/Equipes-de-recherche/SAMMI/Projets/PRONOMIA-Micron-d-or.php), 2008.
- [98] D. H eriban, M. Gauthier, S. R  gnier, N. Chaillet, and P. Lutz. Automatic pick-and-place of 40 microns objects using a robotic platform. In *proc. of Proceedings of the 9th euspen International Conference*, San Sebastian, Spain, June 2009.
- [99] D. H eriban, A. Thiebault, M. Gauthier, and G. Fortier. Improving rotation behaviour of robotic structures for micro-assembly. In *proceedings of the 2008 IEEE/CASE*, pages 983–88, Washington DC, USA, ao  t 2008.
- [100] A. Ichikawa, F. Arai, H. Maruyama, T. Fukuda, and T. Katsuragi. Single cell trap on a chip using in-situ microfabrication with photo-crosslinkable resin and thermal gelation. In *Proceedings of the 2004 IEEE ICRA*, pages 2848–53, New Orleans, USA, April 2004.
- [101] J. N. Israelachvili. *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press, 2nd edition, 1992.
- [102] W Jang, C Choi, M Lee, C Jun, and Y Kim. Fabrication of mems devices by using anhydrous hf gas-phase etching with alcoholic vapor. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12 :297–306, 2002.

- [103] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. R. Soc. Lond.*, A 324 :301–313, 1971.
- [104] Yasuki Kansha and Min-Sen Chiu. Adaptive generalized predictive control based on jitl technique. *Journal of Process Control*, 19, Issue 7 :1067–1072, July 2009.
- [105] J. T. Kemshead and J. Ugelstad. Magnetic separation techniques : their application to medecine. *Molecular and cellular Biochemistry*, 67 :11–18, 1985.
- [106] M. Kharboutly. *Modélisation, réalisation et commande d'un système de micromanipulation sans contact par diélectrophorèse*. PhD thesis, Doctorat de l'Université Franche-Comté, Fev. 2011.
- [107] M. Kharboutly, M. Gauthier, and N. Chaillet. Modeling the trajectory of a micro-particle in a dielectrophoresis device. *Journal of Applied Physics*, 106 :114312, 2009.
- [108] M. Kharboutly, M. Gauthier, and N. Chaillet. Modeling and control of non-contact micromanipulations based on dielectrophoresis. In *Mechatronics*, Japan, 2010.
- [109] M. Kharboutly, M. Gauthier, and N. Chaillet. Modeling the trajectory of a micro particle in a dielectrophoresis device. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2010*, Alaska, USA, May 2010.
- [110] M. Kharboutly, M. Gauthier, and N. Chaillet. Predictive control of a micro bead's trajectory in a dielectrophoresis-based device. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, oct. 2010.
- [111] Mohamed Kharboutly, Michael Gauthier, and Nicolas Chaillet. Modeling the trajectory of a micro particle in a dielectrophoresis device. *Journal of Applied Physics*, 106 :114312, 2009.
- [112] D. Kim, D. Kang, J. Shim, I. Song, and D. Gweon. *Rev. Sci. Instr.*, 76(073706), 2005.
- [113] D. Kim, D. Y. Lee, and D. G. Gweon. *Ultramicroscopy*, 107 :322, 2007.
- [114] S. Konishi, F. Kawai, and P. Cusin. Thin flexible end-effector using pneumatic balloon actuator. *Sensors and Actuators A*, 89 :28–35, 2001.
- [115] J. Krim. *Surf. Sci.*, 500(741), 2002.
- [116] Jan Krüger, Kirat Singh, Alan O'neill, Carl Jackson, Alan Morrison, and Peter O'Brien. Development of a microfluidic device for fluorescence activated cell sorting. *Journal of micromechanics and microengineering*, 12(4) :486–494, 2002.
- [117] Y. V. Kudryavtsev, E. Gelinck, and H. R. Fischer. *Surf. Sci.*, 603 :2580, 2009.
- [118] P. Lambert and A. Delchambre. A study of capillary forces as a gripping principle. *Assembly automation*, 25(4) :275–283, 2005.
- [119] P. Lambert, F. Seigneur, S. Kroelemeijer, and J. Jacot. A case of study of surface tension gripping : the watch bearing. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(7) :1267–1276, 2006.
- [120] D. Lang, M. Tichem, and S. Blom. The investigation of intermediates for phase changing micro-gripping. In *Proc. of IEEE IWMMF*, France, October 2006.

- [121] M. J. Lang and S. M. Block. Resource letter : Lbot-1 : Laser-based optical tweezers. *American Journal of Physics*, 71(3) :201–215, March 2003.
- [122] C. Lenders. *Study of Microbubbles mechanical behavior, application to the design of an actuated table for micromanipulation in liquid media*. PhD thesis, Doctorat en co-tutelle entre l’Université Libre de Bruxelles et l’Université de Franche-Comté, sept. 2010.
- [123] C. Lenders, M. Gauthier, and P. Lambert. Microbubble generation using a syringe pump. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Intelligent Systems*, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 2009.
- [124] Ai-Qun Liu. *Photonic MEMS Devices : Design, Fabrication and Control*. CRC Press, April 2008.
- [125] J. Liu, Y-X. Zhou, and T-H. Yu. Freeze tweezer to manipulate mini/micro objects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(2) :269–276, February 2004.
- [126] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Dynamic modelling for a submerged freeze microgripper using thermal networks. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2) :025001, Feb 2010.
- [127] B. Lopez-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Dynamic modelling for thermal micro-actuators using thermal networks. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010.
- [128] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Principle of a submerged freeze microgripper. In *5th International Workshop on Microfactories (IWMF)*, Besançon, France, October 2006.
- [129] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Submerged freeze gripper to manipulate micro-objects. In *proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems - IROS’06*, pages 784–789, Beijing, Chine, oct. 2006.
- [130] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. A submerged freeze microgripper for micromanipulations. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Roma, Italy, April 2007.
- [131] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Principle of a submerged freeze gripper for microassembly. *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(4) :897–902, Aug. 2008.
- [132] Liang-Hsuan Lu, Suk Ryu Kee, and Liu Chang. A magnetic microstirrer and array for microfluidic mixing. *Journal of microelectromechanical systems*, 11(5) :462–469, 2002.
- [133] S. Regnier M. Gauthier, P. Lambert. *La microrobotique, application à la micromanipulation*, chapter Chapitre 3 - Micropréhension et Stratégies de micromanipulation. Hermes, 2008.
- [134] S. Regnier M. Gauthier, P. Lambert. *La microrobotique, application à la micromanipulation*, chapter Chapitre 1 - La physique du micromonde. Hermes, 2008.

- [135] S. Regnier M. Gauthier, P. Lambert. *Microrobotics for micromanipulation*, chapter Chapter 3 - Microhandling and Micromanipulation stratgy. Wiley Edition, Juin 2010.
- [136] S. Regnier M. Gauthier, P. Lambert. *Microrobotics for micromanipulation*, chapter Chapter 1 - Physics of the microworld. Wiley Edition, Juin 2010.
- [137] M Mastrangeli, S Abbasi, C Varel, J-P Celis, and K F Böhringer. Self-assembly from milli- to nanoscales : methods and applications c van hoof. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 083001, 2009.
- [138] Logan S. Mccarty, George M. Whitesides, and Adam Winkleman. Chemically-directed electrostatic self-assembly of materials, 2009.
- [139] Katherine A. Mirica, Filip Ilievski, Audrey K. Ellerbee, Sergey S. Shevkoplyas, and George M. Whitesides. Using magnetic levitation for three dimensional self-assembly. *Advanced Materials*, 23 :4134–4140, 2011.
- [140] Junxia Mu, David Rees, and G.P. Liu. Advanced controller design for aircraft gas turbine engines. *Control Engineering Practice*, 13, Issue 8 :1001–1015, 2005.
- [141] R. Nambiar, A. Gajraj, and J-C Meiners. All-optical constant-force laser tweezers. *Biophysical Journal*, 87 :1972–1980, September 2004.
- [142] Adrian Neild, Stefano Oberti, Felix Beyeler, Jürg Dual, and Bradley J Nelson. A micro-particle positioning technique combining an ultrasonic manipulator and a microgripper. *J. Micromech. Microeng.*, 16 :1562–1570, 2006.
- [143] A. Okuda, T. Nagasawa, S. Okawa, and A. Saito. Research on solidification of water on surface. In *Proc. of International Conference on the Properties of Water and Steam (ICPWS)*, pages 690–695, Japan, August 2004.
- [144] F. M. Orr, L. E. Scriven, and A. P. Rivas. Pendular rings between solids : meniscus properties and capillary force. *Journal of Fluids Mechanics*, 67(4) :723–742, 1975.
- [145] A.V. Parsegian, editor. *Van der Waals forces : A handbook for biologists, chemists, engineers and physicists* . Cambridge University Press, 2005.
- [146] John A. Pelesko. *Self-Assembly : The science of Things That Put Themselves Together*. Chapman and All, 2007.
- [147] J.S. Plewa, T. DelSol, R. Lancelot, W. A. Lopes, D. Mueth, K. Bradley, and L. Gruber. Prospects for holographic optical tweezers. In *Proc. of the NATO Science Program on Toxicogenomics and Proteomics*, pages 181–201, Castle Stirin, Czech REpublic, Oct. 2002.
- [148] H. A Pohl. *Dielectrophoresis*. Cambridge University Press,, Cambridge, 1978.
- [149] D. O. Popa. High yield automated mems assembly : compliant snap-fastener design, precision robotics, and assembly evaluation. In *Proc. of IEEE/RSJ IROS Workshop Robotic Microassembly of 3D Hybrid MEMS*, USA, October 2007.
- [150] K. Rabenoroosa. *Assemblage de microsystemes 3D reconfigurables par contrôle en force : Application aux MOEMS hybrides*. PhD thesis, Thèse de l’Université de Franche-Comté, 2010.

- [151] Y. I. Rabinovich, S. Daosukho, K. J. byer, H. E. El-Shall, and S. R. Khan. *J. Colloid and Interface Sci*, 325, :594, 2008.
- [152] A. Rasmussen, C. Mavriplis, M. E. Zaghloul, O. Mikulchenko, and K. Mayaram. Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor. *Sensors and actuators. A. Physical.*, 88(2) :121–132, 2001.
- [153] S. Régnier and N. Chaillet. *La microrobotique, application à la micromanipulation*. Edition Hermes, septembre 2008.
- [154] S. Régnier and N. Chaillet. *Microrobotics for micromanipulation*. Wiley Edition, Juin 2010.
- [155] D.S. Rimai and Quesnel D.J. *Fundamentals of Particle Adhesion*. Polymer Surfaces and Interfaces Series, Global Press, 2001.
- [156] A. Rosenthal and J. Voldman. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning. *Biophysical Journal*, 88, mars 2005.
- [157] Alvo S., Lambert P., Gauthier M., and Régnier S. Adhesion model for micromanipulation based on van der waals forces. *Journal of Adhesion Sciences Technology*, in Press, 2010.
- [158] J. E. Sader, S. L. Carnie, and D. Y. C. Chan. Accurate analytic formulae for the double layer interaction between spheres. *Journal of Colloid and Interface Science*, 171 :46–54, April 1995.
- [159] K. Sasaki, M. Koshio, H. Misawa, N. Kitamura, and H. Masuhara. Pattern formation and flow control pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation. *Opt. Lett.*, 16 :1463–1465, 1991.
- [160] M. Sausse Lhernould, A. Delchambre, S. Régnier, and P. Lambert. Electrostatic forces and micromanipulator design : on the importance of surface topography parameters. In *Proc. of IEEE/ASME AIM*, Switzerland, September 2007.
- [161] D. Schmid, S. Koelemeijer, J. Jacot, and P. Lambert. Microchip assembly with capillary gripper. In *Proc. of IEEE IWMMF*, France, 2006.
- [162] G. Seliger, J. Stephan, and S. Lange. Hydroadhesive gripping by using peltier effect. In *Proc. of IMECE*, pages 3–8, USA, November 2000.
- [163] Hee-Won Seo, Chang-Soo Han, Dae-Geun Choi, Keun-Soo Kim, and Young-Hee Lee. Controlled assembly of single swnts bundle using dielectrophoresis. *Microelectronic Engineering*, 81 :83–89, 2005.
- [164] Kristian Smistrup, Peter T. Tang, Ole Hansen, and Mikkel F. Hansen. Microelectromagnet for magnetic manipulation in lab-on-a-chip systems. *ournal of Magnetism and Magnetic Materials*, 300(2) :418–426, 2006.
- [165] A Subramanian, B Vikramaditya, B J Nelson, D J Bell, and L Dong. Dielectrophoretic micro/nanoassembly with microtweezers and nanoelectrodes. In *Proc. of the 12th Int. Conf. on Advanced Robotics, Seattle*, July 2005.
- [166] P. Tabeling. *Introduction à la microfluidique*. Belin, collection Echelles, Presse universitaire romande, Switzerland, 2003.

- [167] B. Tamadazte. *Techniques de vision par ordinateur pour le micro-assemblage de MEMS. Vision 3D et commande par asservissement pour la micromanipulation et le microassemblage de MEMS*. PhD thesis, Thèse de l'Université de Franche-Comté, 2010.
- [168] N. S. Tambe and B. Bhushan. *Ultramicroscopy*, 100 :359, 2004.
- [169] N. S. Tambe and B. Bhushan. *J. Phys. Appl. Phys.*, 38 :764, 2005.
- [170] Z. Tao and B. Bhushan. *Rev. Sci. Instr.*, 77(103705), 2006.
- [171] F. Temurtas, H. Temurtas, and N. Yumusak. Application of neural generalized predictive control to robotic manipulators with a cubic trajectory and random disturbances. *Robotics and Autonomous Systems*, 54, Issue 1 :Pages 74–83, 2006.
- [172] Leon W. M. M. Tersappen and Paul A. Liberti. *Methods for biological substance analysis employing internal magnetic gradients separation and an externally applied transport force*. United States Patent, Patent Number US 6 013 188, 11 janv 2000.
- [173] A. Thiebaut. Etude de l'étalonnage des robots de micro-assemblage. Master's thesis, Master de l'Université de Franche Comté, 2007.
- [174] N. Tsukada, K. Kudoh, A. Yamamoto, and T. Hichugi. Development of oocyte rotation system for biological cell manipulation. In *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics*, avril 2001.
- [175] S. Ueha, Y. Hashimoto, and Y. Koike. Non-contact transportation using near-field acoustic levitation. *Ultrasonics*, 387 :26–32, 2000.
- [176] Sjef van Gastel, Marina Nikeschina, and Rita Petit. *Fundamentals of SMD Assembly*. Assembléon Netherlands B.V., 2004.
- [177] Vincent Vandaele. *Contactless handling for micro-assembly : acoustic levitation*. PhD thesis, Université libre de Bruxelles, Brussels, Belgium, 2008.
- [178] Vincent Vandaele, Pierre Lambert, and Alain Delchambre. Non-contact handling in microassembly : acoustical levitation. *Precis. Eng.*, 29(4) :491–505, 2005.
- [179] S. Venugopal, L-C Hsu, S Malalur-Nagaraja-Rao, B.P. Wang, M. Chiago, and J-C. Chiao. Design and modeling of a high accuracy, three degree of freedom mems manipulator. In *SPIE 2005 Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology Symposium, DEvice And Process Technologies For Microelectronics, MEMS and Photonics Conference*, Brisbane, Australia, december 2005.
- [180] B-C Lopez Walle. *Etude de la micropréhension par gel pour la micromanipulation immergée*. PhD thesis, Doctorat de l'université de Franche-comté en Automatique, Février 2008.
- [181] B. Lopez Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Dynamic modelling of a submerged freeze microgripper using a thermal network. In *proceedings of the 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, sept. 2007.

- [182] Yuzhou Wang, Weixin Tang, William J. Cronin, and Paul A. Liberti. *Method for magnetic separation featuring magnetic particles in a multi-phase system*. United States Patent, Patent Number US 5 541 072, 30 jul. 1996.
- [183] John Wason, William Gressick, John T. Wen, Jason Gorman, and Nick Dagalakakis. Multi-probe micro-assembly. In *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, pages 63–68, Scottsdale, AZ, USA, Sept 2007.
- [184] S.R. Wasserman, Y.-T. Tao, and G.M. Whitesides. Structure and reactivity of alkylsiloxane monolayers formed by reaction of alkyltrichlorosilanes on silicon substrates. *Langmuir*, 5 :1074–1087, 1989.
- [185] T. Watanabe, N. Fujino, and Z. Jiang. Micromanipulation using squeeze effect. In *Proc. of IEEE IROS*, volume 4, pages 3357–3362, Japan, 2004.
- [186] G. M. Whitesides and B. Grzybowski. Self-assembly at all scales. *Science*, 295 :2418–2421, 2002.
- [187] M. Wiesendanger. *Squeeze film air bearings using piezoelectric bending elements*. PhD thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [188] J. Wu, J. Lu, and J. Chu. Handling micro objects by adhesion forces using gilt probe. In *Proc. of IEEE IWMP*, China, 2004.
- [189] W. Wu, R. F. Giese, and C.J. van Oss. Stability versus flocculation of particle suspensions in water — correlation with the extended DLVO approach for aqueous systems, compared with classical DLVO theory. *Colloids and Surfaces B : Biointerfaces*, 14 :47–55, August 1999.
- [190] H. Xie and S. Régnier. Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip gripper with multi-feedback. *J. Micromech. Microeng.*, 19 :075009, 2009.
- [191] C. Yamahata, T. Takekawa, K. Ayano, M. Hosogi, M. Kumemura, B. Legrand, D. Collard, G. Hashiguchi, and H. Fujita. Silicon nanotweezers with adjustable and controllable gap for the manipulation and characterization of dna molecules. In *Proc. of the 2006 Int. Conf. on Microtechnologies in Medicine and Biology*, Okinawa, Japan, May 2006.
- [192] D. Yao and B. Kim. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. *Journal of micromechanics and microengineering*, 12(5) :604–610, September 2003.
- [193] S. I. Zanette, A. O. Caride, V. B. Nunes, and G. L. Klimchitskaya. *Surf. Sci.*, 453(75), 2000.
- [194] Maciej Zborowski, Graciela R. Ostera, Lee R. Moore, Sarah Milliron, Jeffrey J. Chalmers, and Alan N. Schechter. Red blood cell magnetophoresis. *Biophysical Journal*, 84 :2638–2645, 2003.
- [195] Yong Zhang, Brandon K. Chen, Xinyu Liu, and Yu Sun. Autonomous robotic pick-and-place of microobjects. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 26(1), FEBRUARY 2010.

- [196] Z. W. Zheng, I. Sridhar, K. L. Johnson, and W. T. Ang. *International J. Nanoscience*, (3) :599, 2004.

Résumé

Ce document présente une synthèse de mes contributions scientifiques au domaine de la micromanipulation robotique. La manipulation d'objets de tailles microscopiques, dont le comportement est régi par des effets de surfaces, nécessite des nouvelles solutions de préhension et d'assemblage. L'approche générale proposée dans ce manuscrit repose sur la proposition d'effectuer la manipulation et l'assemblage des microcomposants *à l'intérieur d'un liquide*. Nous avons montré, en effet, que l'utilisation d'un liquide modifiait sensiblement la problématique de la micromanipulation présentant des avantages comme, par exemple, la stabilisation des comportements par effets visqueux ou le contrôle des propriétés de surface par des principes électrochimiques. La démarche scientifique présentée au chapitre 1 repose sur trois étapes mises en œuvre lors de l'étude de la *micromanipulation robotique en milieu liquide* dont le contexte bibliographique est exposée au chapitre 2. La première étape (chapitre 3) consiste en un travail de modélisation des interactions entre micro-objets afin d'en prédire et d'en simuler le comportement. Sur la base de ces modèles, des stratégies de micromanipulation (chapitre 4) ont été proposées et des travaux scientifiques ont été menés sur leur caractérisation et leur commande. Ces stratégies de micromanipulations représentent le cœur des cellules robotiques de micro-assemblages présentées au chapitre 5. Les perspectives de ces travaux portant sur l'exploration du no man's land entre microscience et nanoscience, la proposition de méthodes permettant la création de micro-assemblages complexes et fonctionnels, ainsi que l'ouverture vers la manipulation robotique de cellules biologiques, font l'objet d'un dernier chapitre.

Mots-clés : micropréhension, micromanipulation, microassemblage, micromonde.

Abstract

This manuscript deals with a synthesis of scientific contributions in the field of robotic micromanipulation. The manipulation of microscopic objects, whose behavior is driven by surface effects, requires new handling and assembly solutions. The general approach proposed in this document consists in manipulate and assemble microcomponents *inside a liquid*. Indeed, we have shown that the use of a liquid modifies significantly the problematics of micromanipulation and induces some advantages. For example, trajectories of the object are stabilized because of viscosity or surface effects can be controlled using physical chemistry principles. The scientific analysis presented in chapter 1 is based on 3 steps used during the study of *robotic micromanipulation in liquid medium* whose bibliographic context is presented in chapter 2. The first step is the modeling of the interaction forces between micro-objects in order to predict and simulate their behavior. Based on this model, micromanipulation strategies (chapter 4) have been proposed, and scientific works have been focused on their characterization and their control. These micromanipulation strategies are a key point of the construction of micro-assembly platforms reported in chapter 5. The perspectives of these works (chapter 6) deal with the exploration of the no man's land between microscience and nanoscience, the proposition of methods for complex and/or functional microassemblies, and the robotic micromanipulation of biological cells.

Keywords : microhandling, micromanipulation, microassembly, microworld.



www.femto-st.fr/~michael.gauthier/hdr.pdf