



Assemblage de microsystemes 3D reconfigurables par contrôle en force : application aux MOEMS hybrides.

Kanty Rabenorosa

► **To cite this version:**

Kanty Rabenorosa. Assemblage de microsystemes 3D reconfigurables par contrôle en force : application aux MOEMS hybrides.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2010. Français. <tel-00560186>

HAL Id: tel-00560186

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00560186>

Submitted on 28 Mar 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 : 2010

THÈSE

présentée à

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

pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTÉ**

en AUTOMATIQUE

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

**Assemblage de microsystèmes 3D reconfigurables par contrôle
en force :**

Application aux MOEMS hybrides

par :

Kanty RABENOROSOA

Soutenue le 25 novembre 2010 devant la Commission d'Examen :

Rapporteurs :

François PIERROT

Directeur de Recherche CNRS, LIRMM

Hervé Tanneguy REDARCE

Professeur, INSA de Lyon, Laboratoire Ampère

Examineurs :

Florence MARCHI

Maître de Conférences HDR, Université Joseph Fourier, Institut NÉEL

Skandar BASROUR

Professeur, Université Joseph Fourier, Laboratoire TIMA

Christophe GORECKI

Directeur de Recherche CNRS, Institut FEMTO-ST

Directeurs de thèse :

Philippe LUTZ

Professeur, Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST

Cédric CLEVY

Maître de Conférences, Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST

Il faut toujours viser la Lune car, même en cas d'échec on atterrit dans les Étoiles. [Oscar Wilde].

*À mes parents,
À Rova.*

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Nicolas Chaillet, Professeur à l'Université de Franche-Comté et directeur de département AS2M¹ de m'avoir accueilli et offert d'excellentes conditions pour effectuer ces travaux dans la sérénité.

Je remercie vivement mes directeurs de thèse, Messieurs Philippe Lutz, Professeur à l'Université de Franche-Comté, et Cédric Clévy, Maîtres de conférences à l'Université de Franche-Comté. J'ai beaucoup apprécié leur confiance et leur disponibilité, et je leur adresse ma reconnaissance car j'ai beaucoup appris de leurs conseils avisés et de nos échanges.

J'exprime tout ma gratitude à Messieurs François Pierrot et Hervé Tanneguy Redarce, Directeur de Recherche CNRS au LIRMM², Professeur à l'INSA Lyon pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ces travaux et pour le temps qu'ils ont consacré pour lire cet épais document.

Je ne peux terminer que par des vifs remerciements pour mes collègues de département AS2M, grâce à vous, j'ai passé de très belles années durant lesquelles j'ai vécu des moments conviviaux, taquins, mais toujours sérieux dans le travail. Un clin d'œil à l'équipe du repas de midi menée par quelques figures emblématiques, sensées transmettre les traditions. Un grand merci aux ITARF³ dont un relecteur infatigable et averti, Monsieur Patrick Rougeot et un mécanicien (service rapide) fan de l'OM, Monsieur David Guibert.

Bien entendu, je remercie les membres de ma famille sans qui je n'ai pu terminer ce parcours grâce à leur soutien, leur encouragement et leur aide. Vous m'avez offert l'équilibre pour m'épanouir dans mes recherches. J'adresse toute ma reconnaissance à mes parents, qui sont venus de *Madagasikara*, pour m'accompagner sur les deux derniers

¹Automatique des Systèmes Micro-Mécatronique.

²Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier

³Ingénieurs, Techniques, Administratifs de Recherche et de Formation

mois de thèse. Promis, vous visiterez un peu plus la prochaine fois. Enfin, je tire mon chapeau à Rova, ma fiancée, qui a supporté mes humeurs et mon manque de temps éternel. Je lui remercie de m'avoir toujours soutenu.

Kanty

Table des matières

Publications personnelles	xv
Introduction générale	1
1 Micro-assemblage pour la fabrication des microsystèmes	5
1.1 Les MOEMS et leur fabrication	6
1.1.1 Les besoins en MOEMS	8
1.1.2 L'apport du micro-assemblage sur la fabrication de MOEMS	15
1.2 Le micro-assemblage robotique pour la fabrication de MEMS/MOEMS	16
1.2.1 Le micro-assemblage série	18
1.2.2 Le micro-assemblage parallèle déterministe	29
1.2.3 Combinaison de techniques d'assemblage	32
1.2.4 Synthèse des techniques de micro-assemblage	34
1.3 Vers des MOEMS hybrides et l'automatisation des tâches de micro-assemblage	38
1.4 Les challenges à relever pour l'automatisation	38
1.4.1 La compréhension du micromonde	38
1.4.2 Les limites technologiques	41
1.5 Conclusion	42
2 MOEMS hybrides 3D reconfigurables par micro-assemblage robotique téléopéré	43
2.1 Introduction	44
2.2 Couple MOEMS et système de micromanipulation et/ou de micro-assemblage	44
2.2.1 Des bancs optiques pour la fabrication des MOEMS	44
2.2.2 Spécifications d'une nouvelle génération de MOEMS	56
2.3 Proposition d'un concept de MOEMS hybrides reconfigurables	60
2.3.1 L'alignement passif par sillons en V	60
2.3.2 Fixation réversible à base d'éléments flexibles	60
2.3.3 La dépose lors du positionnement sur le substrat	62
2.3.4 Le porteur de lentille	63
2.3.5 La fabrication des substrats et des supports optiques	64

2.4	Proposition d'un système d'assemblage	67
2.4.1	Choix du préhenseur	67
2.4.2	Le système robotique	70
2.4.3	La séquence d'assemblage	72
2.4.4	Les résultats obtenus	73
2.5	Vers l'automatisation de l'assemblage	76
2.6	Conclusion	79
3	Étude des forces d'interaction et prise en compte pour l'assemblage	81
3.1	Introduction	82
3.2	Capteurs de force à haute résolution	82
3.2.1	Capteurs passifs	83
3.2.2	Capteurs actifs	92
3.3	Caractérisation du micromonde	93
3.3.1	Mesure caractéristique des forces de pull-off	94
3.3.2	Mesure des forces électrostatiques	96
3.3.3	Mesures des forces capillaires	97
3.4	Nouveau système de mesure des forces d'interaction pour un contact plan/plan	99
3.4.1	Mesure des forces de pull-off pour un contact plan/plan	99
3.4.2	Résultats expérimentaux	101
3.4.3	Discussions	107
3.4.4	Conséquences sur le micro-assemblage	108
3.5	Conclusion	110
4	Système robotique pour un guidage par contrôle en force	113
4.1	Introduction	114
4.2	Système robotique pour le guidage automatisé	115
4.2.1	Intégration de mesure de force sur une station de micro-assemblage	115
4.2.2	Préhenseur à deux doigts instrumentés pour le guidage automatisé	117
4.3	Modèle de l'évolution de la force de serrage en présence de force latérale	119
4.3.1	Contact plan entre le micro-objet et l'extrémité des doigts	120
4.3.2	Contact type "edge/vertex" ou bord/plan	121
4.3.3	Relation entre le déplacement du point de contact $\Delta_y F$ et la force de contact latéral F_y	123
4.4	Validation du modèle	124
4.4.1	Simulation par la méthode des éléments finis	125
4.4.2	Validation expérimentale	127
4.5	Influence des paramètres du modèle	132
4.5.1	Influence de l'épaisseur du doigt et le décalage suivant Z	132
4.5.2	Influence de la précharge	133
4.5.3	Influence de la distance de contact ℓ	135
4.5.4	Influence de la raideur du capteur K_y et K_z	135
4.6	Conséquences sur les forces appliquées en micro-assemblage et la concep- tion d'un préhenseur	137

4.6.1	Ratio e/ℓ sur la force de serrage	137
4.6.2	Choix de la compliance du préhenseur	138
4.6.3	Choix de la précharge	139
4.6.4	Le choix de l'actionnement et de la forme des doigts	139
4.7	Intégration d'un modèle équivalent linéaire dans un simulateur	140
4.8	Conclusion	141
5	Guidage automatisé par contrôle en force	143
5.1	Introduction	144
5.2	Contrôle en force pour la micromanipulation et le micro-assemblage	144
5.2.1	Mesure de force en mode téléopéré	145
5.2.2	Asservissement de force en mode automatisé	147
5.3	Guidage par deux doigts instrumentés (GDDI)	153
5.3.1	Stabilité de la saisie	154
5.3.2	Stratégie de guidage	156
5.3.3	Mesure de la force de contact latéral	157
5.4	Commande pour l'automatisation du guidage	158
5.4.1	Commande hybride en force/position	159
5.4.2	Schéma bloc de la commande hybride force/position pour le guidage automatisé	161
5.4.3	Mise en oeuvre de la commande dans le simulateur	164
5.4.4	Résultats du simulateur	166
5.5	Validation expérimentale	166
5.5.1	Mesure de la largeur de la rainure	168
5.5.2	Mise en oeuvre du contrôleur incrémental	169
5.5.3	Guidage avec un désalignement prédéfini	171
5.5.4	Perturbations type échelon de chaque côté du rail	171
5.6	Conclusion	174
	Conclusions et perspectives	175
	Les contributions de nos travaux	175
	Perspectives	177
	Bibliographie	181

Table des figures

1.1	(a) matrice de micromiroirs utilisée sur un routeur optique comparée à une tête d'aiguille, (b) miroir inclinable sur deux angles [PAS05].	7
1.2	(a) Partie élémentaire d'un DMD avec deux miroirs inclinables [PAS05], (b) intégration du DMD dans un vidéoprojecteur [DDS03].	9
1.3	Un interféromètre de Michelson [Man02] avec un miroir de balayage pour la spectroscopie de Fourier.	10
1.4	Miroir mobile actionné par des peignes interdigités utilisé dans un spectromètre [NCD ⁺ 02].	11
1.5	L'accéléromètre par mesure différentielle de l'intensité lumineuse : (a) schéma de principe, (b) accéléromètre microfabriqué avec les rainures pour l'emplacement des fibres optiques (MM Fibers) [NCD ⁺ 02].	12
1.6	Connecteur OXC de type 2 x 2 microfabriqué : (a) son principe de fonctionnement avec les chemins optiques, (b) sa réalisation dans [NCD ⁺ 02].	13
1.7	Une tête de lecture optique à base de MOEMS [LSLW96] : (a) schéma de principe, (b) système de positionnement pour la mise au point, (c) vue rapprochée du système de verrouillage [CCC ⁺ 05].	14
1.8	Les différentes catégories de pose durant le micro-assemblage [Das09].	16
1.9	Les différentes approches pour l'automatisation des tâches de micro-assemblage.	18
1.10	Préhenseur à deux doigts de serrage exploitant la compliance pour saisir les microcomposants [DCM04].	20
1.11	Résultats obtenus utilisant le préhenseur passif à deux doigts de serrage : (a) microcomposant assemblé dans des fentes [DRL ⁺ 06], (b) microbobine assemblée [DKC04].	21
1.12	Fonctionnement de l'orthogripper pour saisir un microcomposant.	21
1.13	L'orthogripper en silicium avec son doigt type crochet et l'autre flexible.	22
1.14	(a) le système flexible recevant le microcomposant, (b) et (c) des assemblages effectués avec le préhenseur [VLP06, LSP05].	22
1.15	Préhenseur à dépression à base de (a) une pipette en verre, (b) résultats de différents tests [ZBW97].	23
1.16	Les pièces qui constituent la microvache et les opérations d'assemblage.	24

1.17	(a) La station PRONOMIA et son système de vision utilisant un microscope inversé [HG08], (b) microvache assemblée, de 500 μm de la tête à la queue, pesant 830 nanogrammes.	25
1.18	(a) le préhenseur passif dit “jammer” [TGES04], (b) le micro-objet et le substrat avec des parties flexibles [Das09].	26
1.19	(a) station de micro-assemblage de l’Institut ARRI au Texas, (b) résultat de micro-assemblage automatisé combinant l’utilisation d’un préhenseur passif rigide (jammer) et de l’étalonnage du système robotique [DZL ⁺ 07].	27
1.20	La station SAMMI équipée d’un microscope motorisé permettant l’assemblage automatisé par asservissement visuel [Tam09].	28
1.21	(a) Assemblage avec 6 micro-objets : 4 assemblés et 2 en cours d’assemblage [Tam09], (b) photo MEB d’un résultat d’assemblage montrant un jeu de 3 μm entre les deux micro-objets.	29
1.22	(a) Le système de micromanipulation, (b) le schéma du système, (c) la saisie d’une bille avec le préhenseur à deux doigts de serrage (cantilever I et II) à base de pointes AFM et (d) principe de saisie d’une microbille lors de la réalisation d’une pyramide.	30
1.23	Résultat d’assemblage vu par un grossissement de 100x.	30
1.24	Micro-assemblage parallèle déterministe type <i>wafer to wafer</i>	31
1.25	Micro-assemblage parallèle déterministe obtenu par parallélisation d’un assemblage série [PS04].	31
1.26	Micro-assemblage parallèle déterministe utilisant 12 préhenseurs à l’Institut ARRI au Texas [Pop07].	32
1.27	Déroulement de l’assemblage série combiné avec l’auto-assemblage : (a) emplacement hydrophile des gouttelettes, (b) le liquide est déposé, (c) le préhenseur tient le micro-objet et s’approche de l’emplacement, (d) le liquide mouille le micro-objet formant ainsi un ménisque, (e) le préhenseur relâche le micro-objet et la force capillaire assure l’alignement avec l’emplacement, (f) l’eau s’évapore et le micro-objet est maintenu à sa position par les forces d’adhésion et les forces de friction [SZK09].	33
1.28	Vue globale du système utilisé pour l’assemblage série combiné avec l’auto-assemblage [SZLK08].	33
1.29	Micro-assemblage par force capillaire et par <i>wafer to wafer</i> [KFT08].	34
1.30	Illustration de pont capillaire pour (a) deux surfaces planes et pour (b) une surface plane en regard avec une sphère [Lam05].	40
1.31	La prédominance des forces de surface à l’échelle microscopique.	40
2.1	Illustration d’un banc optique composé de différents éléments optiques.	45
2.2	(a) Schéma de principe d’un élément optique après la microfabrication, (b) version utilisant un verrouillage latéral, (c) banc optique obtenu par micro-usinage de surface et hybridation de diode laser [WFS00].	46
2.3	Illustration de la technique O-SMD [Scu00].	47
2.4	TRIMO composants portant : (a) un miroir, (b) une lentille, (c) une fibre optique [Scu00].	47

2.5	Les étapes d'assemblage de la technique TRIMO-SMD [Scu00].	48
2.6	Station d'assemblage utilisée pour la technique TRIMO-SMD. "SIXTIFF" équipée de 6 degrés de liberté pour un volume de travail de 100 x 100 x 50 mm ³ [Scu00].	49
2.7	Prototype d'un système de lidar optique avec 6 TRIMO composants [Scu00].	49
2.8	Vue générale de l'installation avec (a) une lame sémi-réfléchissante plate et (b) une lame séparatrice cubique.	50
2.9	(a) le concept de MOT présenté avec différents éléments, (b) un composant à ouverture digital, (c) deux éléments optiques montés et solidarisés sur un banc optique (MOT) [LDS ⁺ 99, DKRL02].	51
2.10	Microspectromètre à base de substrat NiFe utilisant un actionnement ma- gnétique pour le balayage.	52
2.11	Schéma de principe de microspectromètre.	53
2.12	Vue complète d'un système assemblé.	53
2.13	Les paramètres caractérisant le couplage de deux fibres monomodes.	57
2.14	Le positionnement d'un élément optique sur un substrat.	57
2.15	L'effet de l'erreur d'inclinaison α sur : (a) l'écartement entre la source et le faisceau réfléchi pour une autocollimation, et (b) l'écartement du faisceau lors d'une réflexion à 45°.	58
2.16	Positionnement par alignement passif des fibres optiques dans des sillons en V.	60
2.17	Dimensions et principe de fixation d'un support optique sur un substrat.	61
2.18	Simulation en éléments finis pour la conception de la partie flexible.	62
2.19	Illustration 3D du concept de microbancs optiques reconfigurables : (a) le substrat, (b) le support optique et (c) la séquence d'assemblage d'un support sur un substrat.	63
2.20	Les forces en présence lors de la dépose.	64
2.21	Principe du porteur de lentille fabriqué sur un support optique.	65
2.22	Déroulement du processus de fabrication des supports optiques.	65
2.23	Photos MEB des différents supports réalisés : a) miroir, b) matrice d'ou- verture circulaire, et c) emplacement de lentille sphérique.	66
2.24	Fabrication du substrat en combinant l'usinage sec et humide.	66
2.25	Photo du wafer contenant les substrats avant la découpe à la scie.	67
2.26	Photos MEB des résultats de la fabrication des substrats : (a) substrat avec une seule rainure droite, (b) les emplacements des sillons en V et de la règle, (c) vue en coupe montrant les sillons en V sur chaque côté de la rainure principale, (d) vue en coupe montrant un sillon en V et un V inversé.	68
2.27	Le préhenseur à 4 DDL développé à l'Institut FEMTO-ST.	69
2.28	Schéma cinématique de la station de micro-assemblage à 11 DDL.	71
2.29	La station de micro-assemblage réalisée pour effectuer l'assemblage des bancs optiques.	71

2.30	Séquence de mise en place après la microfabrication : (1) mise en position du substrat sur M_2 , (2) séparation des supports optiques du wafer et stockage dans le magasin, (3) le magasin est placé sur le substrat pour débiter l'assemblage.	72
2.31	Séquence d'assemblage d'un support de type miroir : (1) saisie sur la partie flexible par le préhenseur, (2) alignement du support par rapport à la rainure principale, (3) insertion du support, (4) guidage du support dans la rainure.	74
2.32	Séquence d'assemblage d'une lentille sphérique : (1) la lentille est saisie et alignée au porteur de lentille, (2) elle est insérée dans le porteur, (3) elle est relâchée et maintenue par le porteur.	74
2.33	Photos MEB des résultats de l'assemblage d'un démonstrateur avec un support miroir et un support avec une lentille sphérique.	75
2.34	Système assemblé : (1) vue de face de la fixation reversible, (2) vue inclinée montrant le contact entre le V inversé et les éléments flexibles	75
2.35	(a) le désalignement de l'axe du mouvement et un sillon en V, (b) les nonlinéarités d'un mouvement de translation.	77
2.36	Les créations (2-5) et les ruptures (3-6) de contact lors d'une opération de prise/dépose.	78
2.37	Les contacts entre le support optique et le substrat.	78
3.1	Principe de fonctionnement de l'AFM - Image de YKI-Institute for Surface Chemistry.	84
3.2	Capteur à lévitation magnétique : (a) sa réalisation avec le capteur laser, (b) schéma de principe avec les emplacement des aimants [BAP03].	85
3.3	(a) Schéma de fonctionnement du capteur, (b) photos MEB de la réalisation et (c) l'extrémité de la sonde [YS05].	86
3.4	(a) Capteur à jauge piézorésistive tri-axiale, (b) les emplacements des jauges sur les poutres de suspension [ASF ⁺ 99].	88
3.5	Capteur piézorésistif intégrant un préhenseur dans [FF01].	89
3.6	Configuration simple des condensateurs.	89
3.7	Configuration transverse avec une mesure différentielle (a) et la réalisation du capteur capacitif (b).	90
3.8	Schéma de principe d'un capteur PVDF à 2 DDL [SXL03].	92
3.9	La station NANOROL au département AS2M de FEMTO-ST.	94
3.10	Courbes de mesure AFM pour des interactions avec (a) le polystyrène et (b) le verre en milieu ambiant [RC08].	95
3.11	Courbes d'approche/retrait avec (a) un substrat en or et avec (b) un substrat conducteur à la masse d'après [RC08].	96
3.12	Système de mesure de la force axiale d'un pont capillaire [Lam05].	97
3.13	Variation de la force axiale en fonction de la hauteur du pont capillaire [Lam05].	98
3.14	Le positionnement de deux surfaces planes.	99

3.15	La configuration du système de mesure de la force de pull-off avec ses 11 degrés de liberté.	101
3.16	(a) photo MEB de la surface plane sur la pointe du capteur S270, (b) mesure de la rugosité de la pointe, (c) mesure de la rugosité de l'échantillon.	102
3.17	Le système développé pour la mesure de la force de pull-off pour des contacts plan/plan.	103
3.18	Une courbe d'approche/retrait réalisée sur le système de mesure.	104
3.19	Répétabilité des mesures de la force de pull-off.	104
3.20	Variation de la force de pull-off en fonction de la précharge.	105
3.21	Variation de la force de pull-off en fonction de l'angle θ	106
3.22	Prise d'un objet planaire avec les forces en présence.	109
3.23	Evolution de la force de serrage en fonction du coefficient de friction pour une force de pull-off de $196 \mu\text{N}$	109
4.1	Les 4 configurations d'une station de micro-assemblage avec retour de force.	116
4.2	(a) force de serrage à l'équilibre et (b) en présence de contact latéral ($F_{s1} < F_{s1}$).	117
4.3	Schéma général d'un préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés.	118
4.4	Illustration du système utilisé pour le guidage avec les différents axes de positionnement.	118
4.5	Système à deux doigts de serrage pour le guidage automatisé.	119
4.6	Modèle du préhenseur à deux doigts de serrage pour l'automatisation du guidage.	119
4.7	Les trois phases lors de la saisie d'un micro-objet à bords parallèles perturbé par un contact latéral : Phase 1 : pas de contact, Phase 2 : apparition du contact (mouvement de translation du micro-objet selon Y , Phase 3 : augmentation de la force de contact latéral F_y (mouvement complexe).	121
4.8	Description de l'objet lors de l'apparition de la force de contact.	122
4.9	Evolution de la force de serrage par rapport à F_y pour une précharge de $200 \mu\text{N}$	123
4.10	Déplacement du point de contact lors du guidage.	124
4.11	Angle θ et le déplacement Δ_{yF} avec $F_{yi0} = 200 \mu\text{N}$, $\ell = 975 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.	125
4.12	Dimensions d'un doigt avec ses parties flexibles pour une épaisseur de $50 \mu\text{m}$	125
4.13	Simulation sous ANSYS [®] des déformations des doigts en présence de force latérale.	126
4.14	Comparaison de la simulation avec la méthode des éléments finis (FEM) avec le modèle analytique.	126
4.15	Installation utilisant un 3 ^{ème} capteur pour générer une force de contact lateral connue.	127
4.16	Désalignement des doigts dans le plan $Y_p Z_p$ (1) et dans le plan $X_p Z_p$ (2).	128
4.17	Système robotique pour la préhension à deux doigts de serrage avec le contrôle des angles α et β	129

4.18	Installation pour la calibration du capteur piézorésistif.	129
4.19	Utilisation du capteur piézorésistif pour la validation du modèle.	130
4.20	Support utilisé pour le positionnement du micro-objet avant la saisie.	130
4.21	Résultat expérimental comparé au modèle analytique avec $F_{y10} = F_{y10} = 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \pm 5 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	131
4.22	Résultat expérimental comparé au modèle analytique avec $F_{y10} = F_{y10} = 1035 \mu\text{N}$, $\ell = 1500 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \pm 5 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	131
4.23	Décalage suivant Z entre les deux doigts entraînant la variation de l'épaisseur apparente e_p : (1) $e_p > e$, (2) $e_p < e$	133
4.24	Effet de l'épaisseur apparente e_p sur la force de serrage.	133
4.25	L'effet de la précharge sur la force de serrage pour les précharges $F_{yi0} = 450, 700, 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	134
4.26	Résultats expérimentaux de l'effet de la précharge sur la force de serrage pour les précharges $F_{yi0} = 450, 700, 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	134
4.27	Influence de la distance de contact ℓ sur la force de serrage pour une précharge $F_{yi0} = 600 \mu\text{N}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	135
4.28	Résultats expérimentaux de l'effet de la distance de contact ℓ sur la force de serrage pour une précharge $F_{yi0} = 600 \pm 50 \mu\text{N}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$	136
4.29	Effet de la variation de la raideur K_y sur la force de serrage.	136
4.30	Effet de la variation de la raideur K_z sur l'évolution de la force de serrage.	137
4.31	Evolution de la force de contact limite en fonction du ratio $\frac{e}{\ell}$ ($\frac{\min(e)}{\max(\ell)}$ à $\frac{\max(e)}{\min(\ell)}$) avec la précharge $F_{yi0} = 500 \mu\text{N}$	138
4.32	(1) forme actuelle de la partie flexible des supports optiques, (2) future conception assurant un contact plan/plan.	140
4.33	Principe de fonctionnement du simulateur intégrant le modèle d'évolution de la force de serrage.	141
4.34	Résultat de l'intégration du modèle dans un simulateur avec $F_{y\ell} = 10 \mu\text{N}$: (1) estimation de la force de contact, (2) évolution de la force de serrage, (3) position du micro-objet par rapport à la rainure.	142
5.1	L'installation utilisée pour la poussée de micro-objets avec une pointe d'AFM [ZF98].	146
5.2	(a) le préhenseur compliant utilisé pour l'insertion, (b) l'objet est maintenu par le préhenseur et (c) l'opération d'insertion du micro-objet.	147
5.3	Schéma bloc de la commande du système de micro-assemblage dans [ZNV98].	149
5.4	(1) roulement d'une bille par application d'une force verticale, (2) évolution de la force lors du roulement [GD06].	149

5.5	Contrôle en force avec une boucle interne en position [GD06].	150
5.6	Système utilisé pour la prise par pointe et l’insertion de micro-objets par contrôle en force [LCG ⁺ 06].	151
5.7	Schéma de principe du système robotique pour la saisie et l’insertion guidées par la force.	152
5.8	(a) le micro-objet se détachant du wafer, (b) l’insertion est terminée, (c) l’évolution de la force appliquée lors de la saisie et (d) l’insertion [LCG ⁺ 06].	153
5.9	Guidage d’un micro-objet rigide dans une rainure.	154
5.10	Perturbation de la saisie par les forces : (a) F_z , (b) F_y , et (c) F_x	154
5.11	Détails du schéma utilisé pour le calcul de la force F_x limite avant la rotation.	155
5.12	Apparition de la force de pull-off sur le guidage en cas de rupture de contact.	157
5.13	Système de mesure pour la validation de l’estimation de la force de contact latéral F_y	158
5.14	Validation de l’estimation de la force de contact latéral en quasi-statique.	159
5.15	Validation de l’estimation de la force de contact latéral lors d’une perturbation dynamique.	159
5.16	Schéma de commande hybride force/position d’après [FM92].	160
5.17	Schéma bloc de la commande hybride externe [RPD01].	162
5.18	Système robotique utilisé pour le guidage automatisé équipé de deux doigts de serrage et ses 14 degrés de liberté dont 5 motorisés.	162
5.19	Schéma bloc de la commande hybride externe pour le guidage automatisé avec le bloc E	163
5.20	Détail du bloc E “enable control” avec ses deux entrées F_{err} et U_x	163
5.21	Dynamique du système de positionnement et des capteurs intégrés dans le simulateur : (1) estimation de la force de contact latéral ($F_y = F_{y2} - F_{y1}$), (2) force de serrage (F_{y1}, F_{y2}), (3) position du micro-objet dans la rainure Y	165
5.22	Loi de commande en force à base d’un correcteur incrémental.	165
5.23	Validation du correcteur incrémental : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage, (3) position selon Y du micro-objet par rapport à la rainure, (4) mouvement d’avance selon l’axe X_s , (5) la correction sur l’axe Y_s	167
5.24	Suivi d’une rampe simulant le désalignement de l’axe de guidage et de la rainure : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée par une rampe, (3) position du micro-objet $Y_{micro-objet}$ par rapport à la rainure.	168
5.25	(1) Contact à droite et (2) contact à gauche pour mesurer la largeur de la rainure.	168
5.26	Résultat expérimental de la mesure de la largeur de la rainure : (1) la force de contact latéral, (2) la position suivant Y	169
5.27	Résultat expérimental de la validation de la commande : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée par une rampe de $2 \mu\text{m/s}$, (3) position du micro-objet $Y_{micro-objet}$ par rapport à la rainure, (4) mouvement d’avance suivant l’axe X_s	170

5.28	Résultat expérimental d'un guidage perturbé par une rampe de $2 \mu\text{m/s}$: (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée, (3) mouvement d'avance suivant l'axe X_s , (4) position du micro-objet $Y_{\text{micro-objet}}$ par rapport à la rainure.	172
5.29	Résultat expérimental d'un guidage avec perturbations dynamiques : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée, (3) mouvement d'avance suivant l'axe X_s , (4) position du micro-objet $Y_{\text{micro-objet}}$ par rapport à la rainure.	173
5.30	Surface de contact réduite par des pavés de surface S et de hauteur h . . .	178

Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif des avantages et des inconvénients des MOEMS par rapport à l'optique conventionnelle et l'optique guidée, d'après [SM02].	8
1.2	Résumé des différentes techniques de micro-assemblage robotique.	36
1.3	Résumé des différentes techniques d'auto-assemblage et des combinaisons de techniques.	37
2.1	Tableau récapitulatifs des travaux sur les MOEMS à base de bancs optiques.	55
2.2	Les pertes lors d'un couplage pour une longueur d'onde $\lambda = 1550$ nm et un waist $w_0 = 4,6 \mu\text{m}$ ($Z = \frac{d_{sep}}{k n_2 w_0}$).	57
2.3	Les caractéristiques de la partie flexible d'un support optique pour une épaisseur de $100 \mu\text{m}$	62
2.4	Comparatif des préhenseurs disponibles à deux doigts de serrage.	69
2.5	Les caractéristiques du préhenseur utilisé pour l'assemblage des supports optiques.	70
3.1	Caractéristiques des deux types de jauge : métallique et semi-conducteur.	87
3.2	Les capteurs de force capacitif à plusieurs axes de mesure.	91
3.3	Comparaison des différents capteurs asservis.	93
4.1	Différences entre les forces mesurées F_{s1} et F_{s2} dues au désalignement des doigts.	128

Publications personnelles

-
- Mes travaux de thèse ont conduit à diverses publications dont certains contenus apparaissent dans ce manuscrit comme suit :
 - le chapitre 2 est décrit dans [1], [3], [4], [5], [7], [12], [13], [14], [17] et [18] ;
 - le chapitre 3 est décrit dans [6] et [10] ;
 - le chapitre 4 est décrit dans [1], [2], [11] et [16] ;
 - le chapitre 5 est décrit dans [1], [8], [11] et [15].
-

Parties de livres

[1] - **Kanty Rabenoroso**, *Micro-assemblage par Contrôle en Force en vue de l'Assemblage Automatisé de Micro-Bancs Optiques Reconfigurables.*, **Prix A'doc 2010**, Presses Universitaires de Franche Comté, Juin 2010, ISBN 978-2-84867-290-8.

Reuves internationales à comité de lecture

[2] - **Kanty Rabenoroso**, Cédric Clévy, Philippe Lutz, *Study of Forces during Micro-Assembly Tasks using Two-Sensing-Fingers Gripper*, **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, (Minor revisions).

[3] - Micky Rakotondrabe, **Kanty Rabenoroso**, Joël Agnus, and Nicolas Chaillet, *Robust Feedforward-Feedback Control of a nonLinear and Oscillating 2-DOF Piezocantilever*, **Transactions on Automation Science and Engineering**, Conditionnally accepted.

[4] - **Kanty Rabenoroso**a, Sylwester Bargiel, Cédric Clévy, Christophe Gorecki, and Philippe Lutz, *Assembly of 3D reconfigurable Hybrid MOEMS through Microrobotic Approach*, **Lecture Notes in Automation, the Edition of the Selected Papers entitled “Frontiers of Assembly and Manufacturing”**, Lee, Sukhan ; Suárez, Raúl ; Choi, Byung Wook (Eds.), ISBN : 978-3-642-14115-7, October 2, 2010.

[5] - Sylwester Bargiel, **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, Christophe Gorecki, and Philippe Lutz, *Towards Micro-Assembly of Hybrid MOEMS Components on a Reconfigurable Silicon Free-Space Micro-Optical Bench*, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Vol. 20, Num. 4, March 2010, doi :10.1088/0960-1317/20/4/045012.

[6] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, Philippe Lutz, Michael Gauthier, and Patrick Rougeot, *Measurement of Pull-Off Force for Planar Contact at the Microscale*, **Micro Nano Letters**, Vol. 3, Sept. 2009, doi :10.1049/mnl.2009.0034.

Conférences internationales internationales avec actes et à comité de lecture

[7] - Sylvester Bargiel, **Kanty Rabenoroso**a, Jean Philippe Mascaro, Cédric Clévy, Christophe Gorecki and Philippe Lutz, *Technology Platform for Hybrid integration of MOEMS on Reconfigurable silicon Micro-Optical Table*, **Euroensors**, Linz, Austria, September 2010.

[8] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, and Philippe Lutz, *Hybrid Force/Position Control applied to Automated Guiding Tasks at the Microscale*, **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, Taipei, Taiwan, October 2010.

[10] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, Micky Rakotondrabe, and Philippe Lutz, *Guiding Strategies for the Assembly of Micro-Components Subjected to Planar Pull-Off Forces*, **ASME’10 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC’10) & Computers and Information in Engineering Conference (CIE’10)**, Montréal, Canada, August 2010.

[11] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, and Philippe Lutz, *Active Force Control for guiding Tasks during Micro-Assembly*, **IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**, Anchorage, Alaska, May 2010.

[12] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, Philippe Lutz, Sylwester Bargiel, and Christophe Gorecki, *A Micro-Assembly Station used for 3D Reconfigurable Hybrid MOEMS Assembly*, **IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)**, pp : 95-100, Suwon Korea, September 2009 (**Special Award**).

[13] - Micky Rakotondrabe, Joël Agnus, **Kanty Rabenoroso**a, and Nicolas Chaillet, *Characterization, Modeling and Robust Control of a Nonlinear 2-DOF Piezocantilever for Micromanipulation/Microassembly*, **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, pp : 767-774, St Louis MO USA, October 2009.

[14] - **Kanty Rabenoroso**a, Aditya N. Das, Rakesh Murthy, Cédric Clévy, Dan Popa and Philippe Lutz, *Precise motion control of a piezoelectric microgripper for microspectrometer assembly*, **ASME'09 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC'09) & Computers and Information in Engineering Conference (CIE'09)**, San Diego, United States, September 2009.

Communications nationales

[15] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, and Philippe Lutz, *Automated Micro-assembly Tasks based on Hybrid Force/Position Control*, **7th International Workshop On Microfactory**, Daejeon, Korea, Octobre 2010.

[16] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, and Philippe Lutz, *Guiding task based on sensorized grasping during micro-assembly*, **7èmes Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR, Poster)**, Bourges, Novembre 2009.

[17] - **Kanty Rabenoroso**a, Sylwester Bargiel, Cédric Clévy, Philippe Lutz, and Christophe Gorecki, *Micro-assembly of Hybride MOEMS*, **GDR Micro Nano Systèmes (Poster)**, Septembre 2009.

[18] - **Kanty Rabenoroso**a, Cédric Clévy, Philippe Lutz, Sylwester Bargiel, and Christophe Gorecki, *Micro-assembly of Micro-Optical Benches*, **Ateliers LEA d'Arc et Senans (Poster)**, Septembre 2008.

Introduction générale

En plein siècle de la technologie où l'ordinateur a pris la place de la télévision dans les foyers, la miniaturisation constitue un objectif de taille que la communauté scientifique et les industriels ont déjà abordée à bras le corps. Cette miniaturisation croissante est bien présente dans notre quotidien comme on peut le constater avec les téléphones portables, les téléviseurs à écran plat, les GPS et bien d'autres matériels qui intègrent plusieurs fonctions complexes dans un volume réduit. En effet, les systèmes de petite taille présentent bien des avantages tels que la diminution des dimensions facilitant l'amélioration des performances des systèmes, la réduction des consommations d'énergie, la possibilité de réduire les coûts de fabrication, leur stockage et leur transport. Cette course à la miniaturisation a conduit à l'avènement des MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) accompagné du développement des techniques de microfabrication. Les années de recherche aboutissent alors à la naissance de produits très connus à base de MEMS comme par exemple, l'accéléromètre de Bosch ou les têtes d'impression Hewlett Packard (HP) [TJ06]. Par la suite, la fonction optique s'est ajoutée pour obtenir des MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems) dont les applications les plus connues sont les routeurs optiques [YLG01, PAS05], les DMD (Digital Micromirror Device) [MGDS01] et les microspectromètres [TJ06].

Le département d'Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M), de l'institut FEMTO-ST⁴ de Besançon s'intéresse à la fabrication de MEMS et de MOEMS par le micro-assemblage robotique. C'est tout naturellement dans ce département que s'est déroulée cette thèse d'octobre 2007 à novembre 2010. Les recherches du département AS2M se concentrent sur l'automatique, la microrobotique et la micromécatronique pour l'équipe SAMMI⁵ et la maintenance prévisionnelle avec des outils de pronostic pour

⁴Franche-Comté Électronique, Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies

⁵Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage

l'équipe COSMI⁶.

Une partie de l'équipe SAMMI travaille sur la conception, le développement et l'automatisation de stations de micromanipulation et de micro-assemblage. Le micro-assemblage est utilisé afin de compléter les techniques de microfabrication permettant la réalisation de MEMS et de MOEMS.

Dans le cadre du projet région MIAAMI ("Étude et développement d'une cellule flexible de **MI**cromanipulation pour l'**A**ssemblage **A**utomatisé de **MI**cro-systèmes hybrides : application à la réalisation de micro-bancs optiques tridimensionnels reconfigurables"), les départements MN2S⁷ (Micro Nano Sciences et Systèmes) et AS2M de FEMTO-ST travaillent en collaboration pour la conception de bancs optiques tridimensionnels reconfigurables. Le micro-assemblage robotique est combiné avec les avantages de la microfabrication pour proposer une nouvelle génération de MOEMS intégrant des éléments venant de différentes filières de fabrication, appelée MOEMS hybrides. Cette thèse s'est déroulée dans le cadre de ce projet région et elle a été financée par une allocation de recherche ministérielle couplée avec un monitorat à l'Université de Franche-Comté (UFR-ST).

Cette thèse a pour objectif la conception et la fabrication d'une nouvelle génération de MOEMS par du micro-assemblage robotique automatisé. L'automatisation du micro-assemblage se basera sur une commande en force pour tenir compte des forces de surface dominantes à l'échelle micrométrique.

Dans le chapitre 1, nous allons définir, dans un premier temps, les besoins en MOEMS avec des exemples d'utilisation dans les principaux domaines d'application. Les voies explorées pour leur fabrication sont également discutées. L'apport du micro-assemblage dans la fabrication des MOEMS est mis en avant pour ensuite présenter les différentes techniques de micro-assemblage. Nous listons les difficultés rencontrées, les défis scientifiques et technologiques à relever en s'appuyant sur les caractéristiques du micromonde, pour accomplir le micro-assemblage automatisé.

Le chapitre 2 s'articule autour des MOEMS à base de bancs optiques, qui font l'objet d'une recherche active afin de répondre aux besoins croissants dans les domaines de la métrologie et des télécommunications. Les microbancs optiques se basent sur la propagation des faisceaux dans l'espace libre guidés par des éléments optiques positionnés perpendiculairement à un plan horizontal. Le positionnement des éléments optiques et le maintien de la position sont des critères importants pour assurer le bon fonctionnement des MOEMS. La conception et la réalisation de microbancs optiques par le micro-assemblage robotique sont proposées. Les supports optiques sont positionnés sur un substrat en exploitant un alignement passif grâce aux tolérances des composants microfabriqués. Ces nouveaux bancs optiques sont reconfigurables et permettent la fabrication de MOEMS hybrides.

⁶Conception et Sécurité de fonctionnement des systèmes MécatronIques

⁷L'équipe MIcro-systèmes et MUltiphysiques

Durant le guidage qui est le positionnement fin des supports optiques dans une rainure, des contacts apparaissent et une bonne compréhension des forces dominantes à cette échelle est alors nécessaire.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons à la mesure des forces dominantes, qui sont les forces de surface, à l'échelle micrométrique durant la micromanipulation et le micro-assemblage. Pour effectuer les mesures de force, il faut disposer de capteurs de force couvrant la plage de mesures adéquate et d'une résolution suffisante. Les capteurs de forces sont généralement montés sur un système robotique générant des déplacements nécessaires à la mesure. Dans le cadre du micro-assemblage en général, l'apparition et la rupture de contact plan/plan arrivent fréquemment, surtout durant le guidage. Nous proposons alors la mesure des forces de pull-off pour un contact plan/plan sur un nouveau système.

Dans le chapitre 4, l'importance des forces de pull-off pour un contact plan/plan nous amène à l'étude de l'intégration de mesures de force sur les stations de micro-assemblage. Pour effectuer des tâches telles qu'un guidage, il est important de pouvoir mesurer et contrôler la force de contact latéral tout en évitant une forte augmentation de la force de serrage. Un système robotique équipé de retour de force est proposé. La modélisation du système proposé conduit à un modèle analytique de l'évolution de la force de serrage en présence de force de contact latéral. Le modèle est validé par des simulations basées sur la méthode des éléments finis et par des expérimentations. L'influence des paramètres de celui-ci est étudié pour ensuite donner lieu à des recommandations sur les forces appliquées et sur la conception de préhenseur.

Le chapitre 5 est dédié à l'automatisation du guidage avec un système robotique utilisant un préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés. Une stratégie de guidage est établie en prenant en compte la stabilité et les spécificités du micromonde. Une commande hybride force/position effectue le contrôle de la position dans l'axe de guidage et de la force de contact latéral. La stratégie établie intègre la structure de commande. Le fonctionnement de celle-ci est d'abord testé sur un simulateur qui intègre le modèle statique de la préhension et le comportement dynamique des axes motorisés. Cette dernière est appliquée au système robotique pour accomplir un guidage de micro-objets rigides par un système de contrôle temps réel.

Après une synthèse des principaux résultats obtenus, nous proposons des perspectives à nos travaux.

Micro-assemblage pour la fabrication des microsystèmes

Dans ce chapitre nous étudions les MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) et leur fabrication. Les besoins en MOEMS dans différents domaines d'applications sont identifiés et accompagnés d'exemples. La limite de l'approche monolithique, qui est la plus utilisée pour la fabrication des microsystèmes est discutée. Nous mettons ensuite en avant l'apport du micro-assemblage pour la fabrication des MOEMS pour ensuite proposer une nouvelle conception de MOEMS hybrides. Les techniques de micro-assemblage sont présentés avec des exemples de résultats et l'automatisation des tâches de micro-assemblage est discutée. Ce chapitre se conclut par l'identification des challenges à relever pour l'automatisation du micro-assemblage et la description des objectifs visés de cette thèse.

Sommaire

1.1 Les MOEMS et leur fabrication	6
1.1.1 Les besoins en MOEMS	8
1.1.2 L'apport du micro-assemblage sur la fabrication de MOEMS	15
1.2 Le micro-assemblage robotique pour la fabrication de MEMS/MOEMS	16
1.2.1 Le micro-assemblage série	18
1.2.2 Le micro-assemblage parallèle déterministe	29
1.2.3 Combinaison de techniques d'assemblage	32
1.2.4 Synthèse des techniques de micro-assemblage	34
1.3 Vers des MOEMS hybrides et l'automatisation des tâches de micro-assemblage	38
1.4 Les challenges à relever pour l'automatisation	38
1.4.1 La compréhension du micromonde	38
1.4.2 Les limites technologiques	41
1.5 Conclusion	42

1.1 Les MOEMS et leur fabrication

L'évolution croissante du nombre de microsystèmes disponibles sur le marché montre l'intérêt que portent les scientifiques et les industriels à leur développement. La miniaturisation de nombreux produits conduit à la réduction des coûts grâce à la fabrication en grande quantité. Les microsystèmes présentent les avantages d'être plus petits en taille et plus légers en masse permettant ainsi une haute densité d'intégration sur un seul substrat, en silicium généralement [YLG01]. Parmi les microsystèmes, nous allons nous intéresser particulièrement aux MOEMS.

Les MOEMS qui sont des microsystèmes combinant les fonctions mécaniques, électriques, et optiques tendent à être de plus en plus présents dans notre société. La matrice de micromiroirs (*cf.* FIG. 1.1) que Lucent Technologies utilise sur un routeur optique est un exemple de MOEMS. On retrouve les fonctions mécanique, électrique et optique à des dimensions micrométriques. Ce dernier regroupe 256 fibres optiques en entrée et 256 fibres optiques en sortie qui sont organisées en une matrice 16 x 16. L'adressage s'effectue par un jeu de 256 micromiroirs mobiles, implantés sur un substrat de silicium de $2,5 \text{ cm}^2$ [APB⁺00]. Il est 16 fois plus rapide que les commutateurs électroniques utilisés dans certains réseaux.

Les microsystèmes, nés dans les années 1980, ont ensuite connu un début d'industrialisation au début des années 1990 grâce à la combinaison de la micro-électronique et des technologies de microfabrication. L'ajout de la fonction optique au milieu des années 1990 sur ces systèmes exclusivement mécaniques et électriques, constitue aujourd'hui une approche pertinente afin d'obtenir des systèmes plus complets et plus efficaces. En effet, la fonction optique offre les avantages présentés ci-dessous :

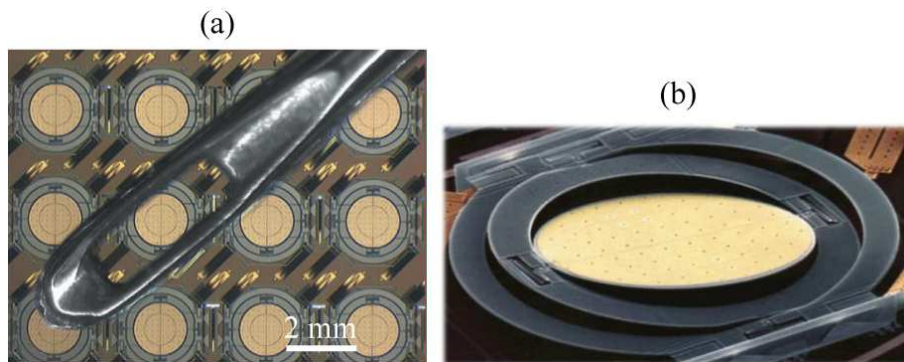


FIG. 1.1 – (a) matrice de micromiroirs utilisée sur un routeur optique comparée à une tête d'aiguille, (b) miroir inclinable sur deux angles [PAS05].

1. le signal optique peut apporter plusieurs informations en même temps telles que l'intensité lumineuse, la fréquence ou longueur d'onde, le déphasage, la polarisation, la vitesse de groupe et la direction de propagation ;
2. les MOEMS constituent à l'heure actuelle, la seule technologie capable de répondre de façon satisfaisante aux besoins croissants en flux de données transférées pour le téléchargement de vidéos, d'images via le réseau internet. Les systèmes de commutation actuellement utilisés dans les nœuds de réseaux et basés sur des technologies optiques/ électriques/optiques (OEO) sont des goulots d'étranglement pour le transport de l'information. Des systèmes de commutation tout-optique permettront d'augmenter considérablement les débits de données ;
3. le rapport signal sur bruit est très favorable et permet ainsi un traitement aisé de l'information.

Le professeur Richard Syms de l'*Imperial College London* résume les avantages et les inconvénients des MOEMS par rapport à l'optique conventionnelle et l'optique guidée dans le tableau TAB. 1.1 tiré de [SM02]. Grâce aux avantages que présentent les MOEMS et les avancées techniques, leur présence au quotidien tend à augmenter de plus en plus.

Pour expliquer les phénomènes optiques, il existe trois approches :

- l'approche géométrique qui est utilisée pour comprendre des phénomènes simples en traçant les droites matérialisant les chemins optiques et en calculant les angles de réflexion/réfraction sur une interface. La limite de cette approche apparaît, quand les dimensions des éléments qui interagissent, sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde ;

Avantages	Inconvénients
Faible perte	Fabrication complexe
Faible couplage	Sensibilité aux vibrations
Insensibilité de la polarisation	Sensibilité aux changements de température
Insensibilité de la longueur d'onde	Faible puissance
Compact et évolutif	Faible dynamique
Faible consommation d'énergie	Haute tension

TAB. 1.1 – Tableau comparatif des avantages et des inconvénients des MOEMS par rapport à l'optique conventionnelle et l'optique guidée, d'après [SM02].

- l'approche ondulatoire qui est plus adaptée pour décrire tout phénomène optique d'interférence¹ et de diffraction². En effet, elle se base sur le fait que la lumière est une onde. Par conséquent, les théories des ondes électromagnétiques sont applicables. Dans le cas des MOEMS utilisant des sources laser, il est évident que les dimensions des motifs/éléments sont assez proches des longueurs d'onde donc l'optique ondulatoire doit être utilisée pour comprendre et exploiter les phénomènes ;
- l'approche quantique qui est proposée par Niels Bohr et Albert Einstein, se base sur un modèle de la lumière comme un ensemble de photons. Ces derniers se comportent comme des corpuscules dans leurs interactions avec la matière et comme des ondes pour leur propagation. Cette approche permet d'expliquer le fonctionnement des diodes lasers.

Le fonctionnement des MOEMS s'explique par l'une de ces approches prenant en compte la dimension des composants, les sources, les longueurs d'onde et les phénomènes exploités. Il est possible que le système combine simultanément deux voir trois approches.

1.1.1 Les besoins en MOEMS

L'utilisation de MOEMS conduit à la réalisation de fonctions diverses et variées. Plusieurs fonctions sont répertoriées par le réseau européen NEMO (Network of Excellence on Micro-Optics³). Elles sont citées dans ce qui suit et accompagnées de la description d'exemples de MOEMS correspondant aux applications. Les exemples existent dans le commerce ou sont en cours de développement dans des laboratoires de pointe au niveau international.

Les systèmes d'affichage

Ils sont utilisés pour visualiser ou pour faciliter l'interface sur un matériel. On peut les rencontrer dans les vidéoprojecteurs, les téléphones portables, les modules GPS et les

¹Résultat de la rencontre et de l'interaction de deux ondes de même type

²Résultat de la diffusion d'une onde par les points d'un obstacle

³<http://www.micro-optics.org/>

caméras digitales.

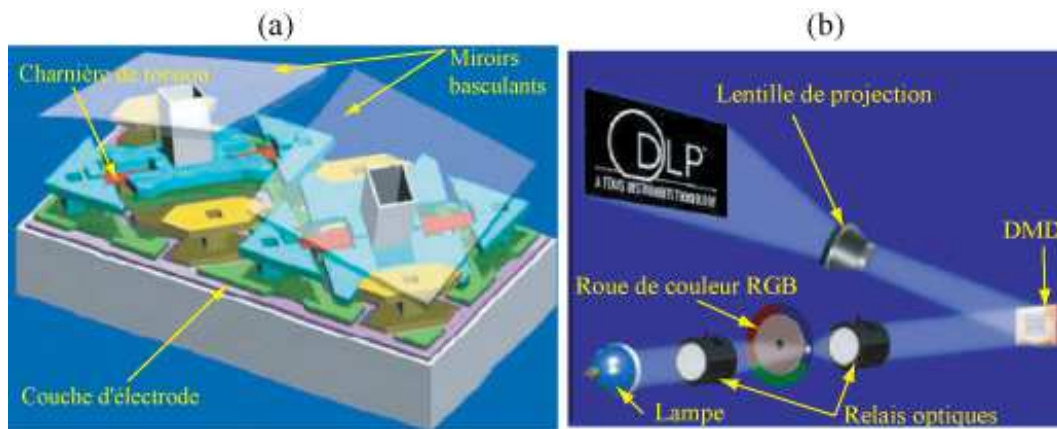


FIG. 1.2 – (a) Partie élémentaire d'un DMD avec deux miroirs inclinables [PAS05], (b) intégration du DMD dans un vidéoprojecteur [DDS03].

Le DMD (*Digital Micromirror Device*) de Texas Instruments est un MOEMS utilisé comme brique de base des vidéoprojecteurs. Il a été développé par la société américaine en 1987. Il a ensuite été amélioré pour arriver en une version aboutie en 1996. En octobre 2002, il a été vendu 1,5 Millions d'unités [MGDS01, DDS03]. Le DMD est une matrice de micromiroirs actionnés, qui dirigent les faisceaux dans les vidéoprojecteurs de haute résolution. Comme montré sur la figure FIG. 1.2 -(a), une partie élémentaire du DMD est constituée de deux miroirs inclinables. La matrice de micromiroirs permet de réfléchir ou non la lumière venant de la source (cf. FIG. 1.2 -(b)) pour constituer l'image projetée sur un écran. Les DMD ont permis d'augmenter la résolution tout en diminuant la consommation électrique des vidéoprojecteurs.

Les systèmes de mesure

Ils sont utilisés pour le contrôle de distance dans les voitures, l'activation automatique d'essuie-glace, la surveillance sanitaire, le contrôle de qualité de produits alimentaires, la lecture de codes barres, les nouveaux systèmes chirurgicaux et les instruments médicaux. Le microspectromètre optique est un exemple de MOEMS utilisé pour des applications de mesure. Initialement, c'est un appareil permettant de décomposer un faisceau lumineux en ses différentes longueurs d'onde pour obtenir son spectre. Dans certains cas, la comparaison du spectre initial (source) avec celui passant dans l'échantillon (modifié par absorption d'une partie du spectre, décalage du spectre) permet alors de déterminer la présence d'un gaz, la qualité d'un produit alimentaire, le diagnostic médical, la mesure de couleurs,... Pour réaliser un spectromètre, deux configurations existent : la première dépendant du temps en utilisant un balayage pour faire varier la différence de marche δ^4

⁴Écart entre le chemin optique de deux faisceaux.

et la seconde stationnaire qui exploite la réflexion sur un plan incliné. La figure FIG. 1.3 montre une configuration à base d'un interféromètre de Michelson⁵ avec A : source ; B : collimateur ; C : séparateur de faisceau ; D1 : miroir fixe ; la différence de marche est générée par un déplacement du miroir (D2) ; F collimateur ; G photodétecteur. Pour obtenir un interférogramme symétrique, l'utilisation d'un compensateur (E) est nécessaire.

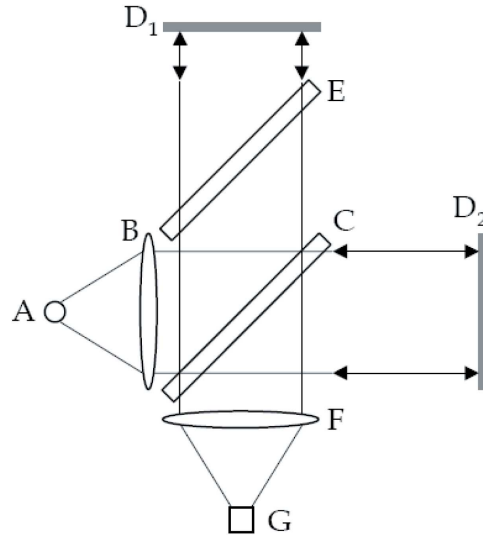


FIG. 1.3 – Un interféromètre de Michelson [Man02] avec un miroir de balayage pour la spectroscopie de Fourier.

Le microspectromètre dépendant du temps possède un système mobile pour réaliser une variation de la différence de marche. Si on prend le cas d'un Michelson, il est souvent observé que l'un des miroirs est actionné pour le balayage. La plage de déplacement du miroir définit la résolution spectrale du système pour une longueur d'onde donnée (source monochromatique). La figure FIG. 1.4 est un miroir mobile actionné par un système de peignes interdigités en *push-pull* utilisé pour un spectromètre présenté dans [Man02]. La configuration *push-pull* de l'actionneur permet de réduire les non linéarités du déplacement du miroir. Dans ce spectromètre, un déplacement de $80 \mu\text{m}$ du miroir (générant une différence de marche $\delta_{max}=160 \mu\text{m}$) permet d'obtenir une résolution de $2,5 \text{ nm}$ pour une longueur d'onde de 633 nm (la résolution est calculée par $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\delta_{max}}$). Le système

⁵Prix Nobel de physique de 1907, Physicien Américain d'origine Allemande. Il a été primé par ses travaux "pour ses instruments optiques de précision et les études spectroscopiques et métrologiques qu'il a menés grâce à ces appareils".

est fabriqué à partir de wafer SOI⁶. La maîtrise des techniques de microfabrication est la clé principale du fonctionnement de ce microspectromètre.

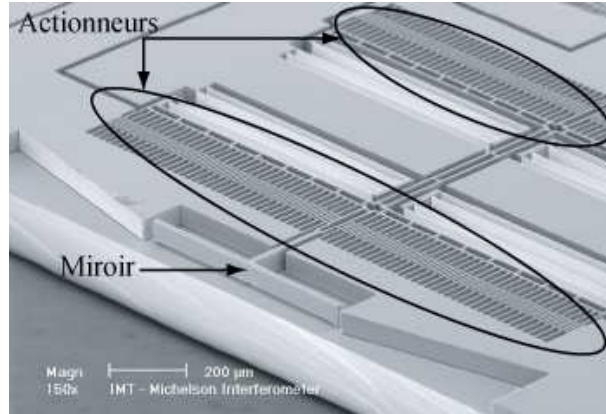


FIG. 1.4 – Miroir mobile actionné par des peignes interdigités utilisé dans un spectromètre [NCD⁺02].

Les accéléromètres sont largement utilisés dans des applications automobiles et récemment dans les *smartphones*. Une solution à base de MOEMS a été étudiée et proposée dans [NCD⁺02] et son fonctionnement est décrit sur la figure FIG. 1.5 -(a). Il est fondé sur une mesure différentielle de l'intensité lumineuse entre deux faisceaux obtenus par la division d'une source. Sans mouvement du micromiroir lié à la masse, les intensités mesurées s'équilibrent. Il permet de mesurer l'accélération voir la vibration de la masse suspendue. L'intensité lumineuse mesurée sur chaque photodétecteur dépend de la position de la structure suspendue séparant le faisceau provenant de la source. Une réalisation (*cf.* FIG. 1.5 -(b)) à partir des techniques de microfabrication à base de wafer SOI est présentée dans [NCD⁺02]. La plage de fonctionnement du système est réduite pour assurer une mesure linéaire. Par conséquent, ce système est conçu pour effectuer une mesure sur la plage $\pm 0,8 \mu\text{m}$, qui ne correspond qu'au dixième de la largeur de l'espace vide servant à l'amortissement et à une faible fraction de l'amplitude possible pour la modulation. Malgré la limitation mécanique, le rapport signal sur bruit est de l'ordre de 40 dB (pour $\pm 6 \text{ g}$ d'accélération) avec une résolution de 0,06 nm. L'effet du bruit thermique est négligeable et les performances obtenues sont comparables à des systèmes bien plus complexes et plus chers basés sur un principe d'interférométrie Fabry Pérot par exemple.

La réalisation des microsystèmes uniquement par microfabrication a permis leur émer-

⁶Silicon On Insulator : type de wafer composé de trois couches qui sont la couche *device* en silicium, la couche de silicium oxydé et la couche *handle* en silicium.

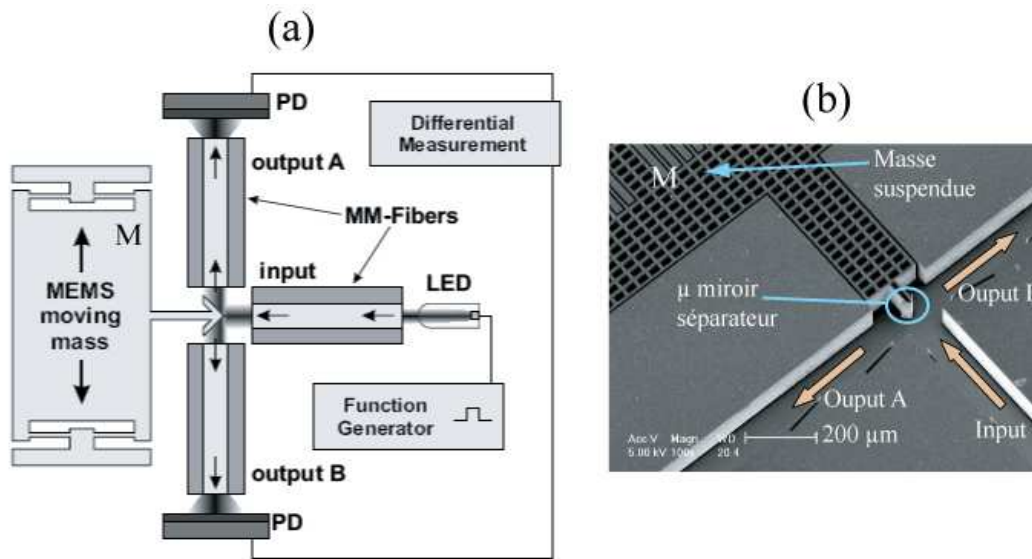


FIG. 1.5 – L'accéléromètre par mesure différentielle de l'intensité lumineuse : (a) schéma de principe, (b) accéléromètre microfabriqué avec les rainures pour l'emplacement des fibres optiques (MM Fibers) [NCD⁺02].

gence mais constitue également une limite à leur développement. En effet, un compromis sur la performance doit être fait lors de la conception et la microfabrication pour assurer le bon fonctionnement de ces systèmes. Ainsi l'utilisation de la tranche usinée en DRIE engendre du scaloping qui peut détériorer la qualité optique. Sur les microspectromètres, l'utilisation d'un actionneur (type électrothermique ou électrostatique) intégré sur le substrat subit le compromis sur la course et la surface occupée. La résolution du spectromètre sera moins bonne pour une petite course car elle est inversement proportionnelle à la plage de déplacement du miroir mobile.

Les systèmes de communication et de stockage de données

Les MOEMS sont aussi présents dans les communications de données optiques et dans les systèmes de stockage type lecteurs de CD/DVD. L'avènement des fibres optiques en télécommunication a notamment conduit à une forte demande en commutateurs optiques et/ou routeurs optiques.

Le connecteur OXC (*Optical Cross Connector*) est un exemple utilisé pour assurer la liaison entre des fibres optiques. Il joue le rôle de routeur optique qui permet alors l'adressage de la lumière sur les différentes fibres optiques. Sur la figure FIG. 1.6, on peut voir l'emplacement de 4 fibres optiques placées en croix, ce qui correspond à une configuration 2 x 2 c'est-à-dire 2 entrées et 2 sorties. L'exemple montré correspond à un connecteur développé dans [NCD⁺02], il est réalisé à partir d'un wafer SOI en utilisant les différentes techniques de microfabrication. Le connecteur en lui-même est donc monolithique mais

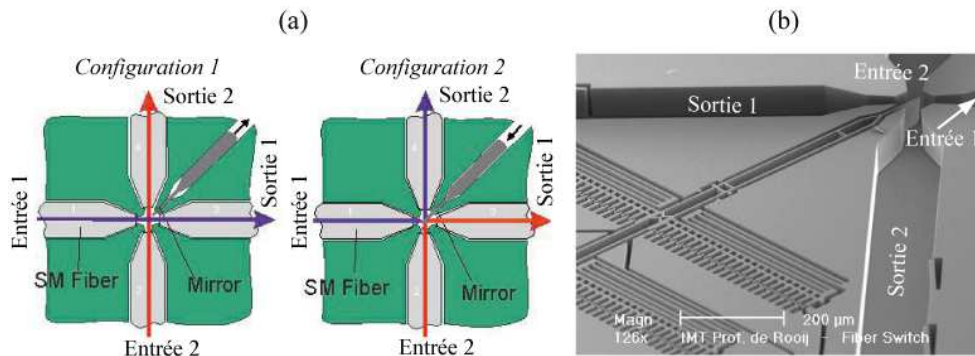


FIG. 1.6 – Connecteur OXC de type 2 x 2 microfabriqué : (a) son principe de fonctionnement avec les chemins optiques, (b) sa réalisation dans [NCD⁺02].

l'intégration des fibres optiques dans chaque emplacement fait intervenir des opérations de saisie, d'insertion et de positionnement (*cf.* FIG. 1.6). Les connecteurs OXC monolithiques ont apporté une réponse efficace aux besoins en communication haut débit et ils ont ouvert la possibilité de fabriquer des connecteurs avec une configuration 4 x 4 et 8 x 8 [Zic06].

Les têtes de lecture pour CD/DVD utilisent également des MOEMS. Une équipe de recherche de National Chiao Tung University de Taiwan, mène des travaux pour la réalisation d'une tête de lecture pour CD/DVD fondée sur les MOEMS (*cf.* FIG. 1.7 -(a)). En effet pour la miniaturisation de ces systèmes, l'approche combinant la microfabrication et une phase d'assemblage a été proposée. Ce MOEMS utilise des éléments optiques hors plan pour permettre la propagation d'un faisceau dans l'espace libre et ainsi constituer un microbanc optique. Une phase d'assemblage est indispensable pour assurer le positionnement des éléments hors plan. Les résultats présentés sont concentrés sur la réalisation d'une lentille de Fresnel, qui se déplace grâce à un actionneur électrostatique hors plan pour faire la mise au point et le suivi de la commande (*cf.* FIG. 1.7 -(b),(c)). Les techniques de microfabrication habituelles à savoir l'usinage de surface (déposition de couches minces et gravure de couches sacrificielles), l'usinage de volume (sculpture de motifs dans le substrat) et le *flip chip bonding* sont exploitées [LSLW96, CCC⁺05].

D'autres domaines comme l'astronomie sont des champs d'applications des MOEMS. Ainsi l'Agence Spatiale Européenne (ASE) et d'autres laboratoires français s'intéressent à l'utilisation de MOEMS sous forme de micromiroirs ou de microfentes, qui permettront de combiner deux types d'instruments scientifiques en un seul d'un nouveau type [RR02, Zam03] tels que les spectrographes à fentes variables et les micromiroirs déformables.

La variété des informations contenues dans un signal optique est l'un des avantages que

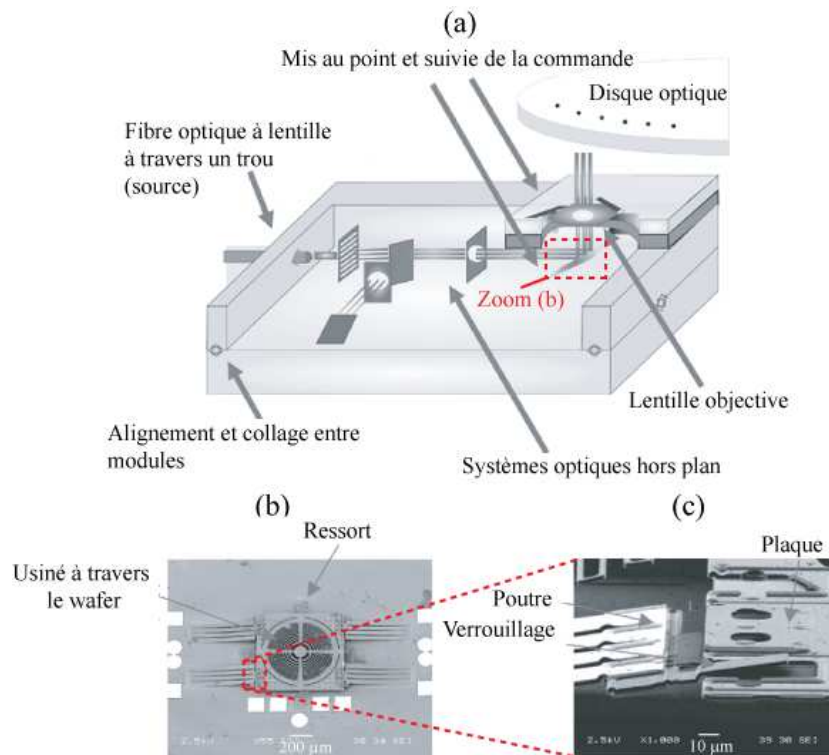


FIG. 1.7 – Une tête de lecture optique à base de MOEMS [LSLW96] : (a) schéma de principe, (b) système de positionnement pour la mise au point, (c) vue rapprochée du système de verrouillage [CCC+05].

représente les MOEMS. Le marché des MOEMS est en augmentation croissante, ainsi il est estimé à plus de 3154 Millions de dollars pour l'année 2010 [TJ06]. Ce marché présente une augmentation de presque 250% de 2005 à 2010. La microfabrication est de mieux en mieux maîtrisée et de nouveaux principes sont développés. En revanche, les incompatibilités entre certaines filières de fabrication demeurent et la reproductibilité peut être améliorée : la fabrication de MOEMS devant être capable de réaliser des composants très variés (microlentilles, micromiroirs, fentes, etc.) et en 3D sur un même substrat.

Nous venons de présenter divers produits MOEMS qui couvrent des domaines d'applications très variées. Leur fabrication utilise les techniques de microfabrication et des phases de micro-assemblage. Nous allons maintenant discuter de l'apport du micro-assemblage sur la fabrication des MOEMS.

1.1.2 L'apport du micro-assemblage sur la fabrication de MOEMS

D'abord, nous allons définir le micro-assemblage, puis la micromanipulation afin de bien situer l'intervention du micro-assemblage sur la fabrication des MOEMS.

Définition 1 : “le micro-assemblage est l'ensemble des opérations effectuées pour assembler des objets de taille caractéristique comprise entre $1\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$. Ces différentes opérations sont la prise et la dépose, l'insertion, le guidage et le maintien en position ou la solidarisation”.

Définition 2 : “la micromanipulation est l'ensemble des moyens qui visent à réaliser la manipulation d'objets de taille comprise entre $1\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$, d'après [RC08]. Les opérations effectuées durant la micromanipulation sont généralement la prise, le déplacement avec ou sans contact et la dépose ou le lâcher des micro-objets.”.

Dans la communauté des microsystèmes, la fabrication des MOEMS par l'approche monolithique est privilégiée afin de contourner les problématiques de micro-assemblage et de packaging. En effet, la microfabrication garantit le positionnement relatif et évite la manipulation d'objets fragiles. Cette approche consiste à faire appel à des techniques de micro-usinage dans lesquelles les fonctions mécaniques, électroniques et optiques sont fabriquées sur un même substrat. Pour ce faire, une succession de processus de gravure et de dépôts est appliquée une fois que les composants sont pré-alignés par photolithographie. Les gravures peuvent être isotropes ou anisotropes. Leur maîtrise et leur compatibilité sont des conditions nécessaires à la réalisation de microsystèmes monolithiques. La technologie de micro-usinage MEMS, dite filière silicium, a apporté une solution intéressante en utilisant des techniques planaires de micro-usinage de surface pour fabriquer des composants micro-optiques [MWP97, Ste98], des micro-actionneurs [NCD⁺02] et l'électronique associée [MGDS01] en utilisant des technologies compatibles. Elle autorise la réduction considérable de la taille des éléments micro-optiques tels que les microlentilles, les micromiroirs, etc.

La difficulté majeure lors de la fabrication de MOEMS est l'incompatibilité des filières de fabrication qui conduit irrémédiablement à des compromis sur la qualité du système. En effet, il est difficile de réaliser l'intégration de matériaux de type alliages semi-conducteurs, polymères, verre, silicium et autres sur un même microsystème sans faire des compromis sur les étapes de fabrication. D'autre part, les MOEMS tendent à être de plus en plus complexes, en intégrant davantage de fonctionnalités faisant appel à une variété de microcomposants miniaturisés. Le micro-assemblage offre la possibilité d'optimiser la fabrication des microcomposants pour ensuite les intégrer dans le système final. La fabrication de MOEMS hybrides 3D basés sur des éléments optiques en hors plan semble aujourd'hui incontournable pour réaliser les fonctions optiques avec un faisceau se propageant dans un espace libre. Il est difficile voire impossible de viser le monolithisme complet des microsystèmes et spécialement avec des éléments en hors plan et en 3D. L'intervention d'une phase d'assemblage devient par conséquent indispensable pour fabriquer des MOEMS hybrides 3D. Les récents résultats confirment la pertinence des microsystèmes obtenus par micro-assemblage [CCC⁺05, DRL⁺06, Ven06, DSPS08a]. De

nombreux progrès ont permis d'effectuer des micro-assemblage en mode téléopéré mais aussi en mode automatique.

La fabrication de MOEMS par une approche utilisant les avancées en microfabrication et l'apport du micro-assemblage constitue une approche qui mérite d'être étudiée. La réduction des coûts et l'amélioration de la flexibilité des technologies utilisées tout en gardant les qualités requises demeurent des objectifs à atteindre.

La section suivante introduit le micro-assemblage et présente les catégories de micro-assemblage argumentées d'exemples de réalisations.

1.2 Le micro-assemblage robotique pour la fabrication de MEMS/MOEMS

Le micro-assemblage consiste à effectuer le positionnement relatif de deux composants et de maintenir cette position dans le but de fabriquer des microsystèmes. On peut classer le micro-assemblage en trois catégories : le micro-assemblage manuel, l'auto-assemblage et le micro-assemblage robotique. Le positionnement du micro-objet avant et après le processus de micro-assemblage conduit à trois catégories de pose (*cf.* FIG. 1.8) : 2D, $2D\frac{1}{2}$ et 3D.

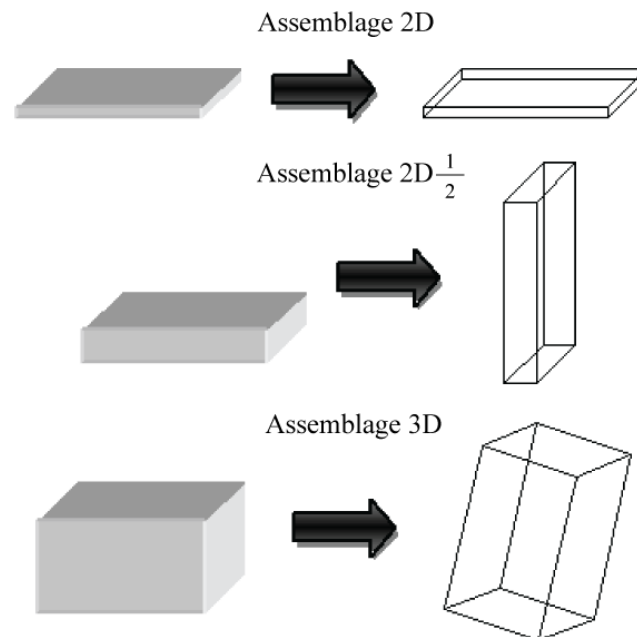


FIG. 1.8 – Les différentes catégories de pose durant le micro-assemblage [Das09].

L'assemblage manuel

L'assemblage manuel fait intervenir un opérateur humain équipé d'un outil de préhension,

par exemple une micropinçe, qui travaille généralement sous une binoculaire. Ce travail requiert beaucoup de dextérité de l'opérateur et le fatigue rapidement car il nécessite une longue formation mais également un niveau élevé de concentration. Pour réaliser les opérations très précises qui impliquent de très petits objets, l'opérateur doit apprendre un geste. En effet, en dynamique, nous sommes capables d'accomplir de meilleurs niveaux de précision car on évite nos tremblements. L'assemblage manuel présente l'inconvénient de générer beaucoup de pertes et les objets doivent être plus grands que $50 \mu\text{m}$. La précision de positionnement et la répétabilité des opérations constituent les points faibles de l'assemblage manuel. Il est difficile de contrôler les forces d'interaction car l'opérateur ne peut pas ressentir des niveaux de force de l'ordre du μN à quelques mN . Le risque de casser les micro-objets est donc très élevé à cause du niveau de sensibilité de l'homme.

L'auto-assemblage ou *self assembly*

Il est caractérisé par l'utilisation d'un ensemble de micro-objets en vrac qui sous l'action d'un champ de forces extérieures vont s'assembler par eux-mêmes [Boh98, PS04]. Les champs de forces peuvent être électrostatiques [BGC+98], magnétiques, mécaniques [CBN+98, Boh98] ou issus d'une réaction chimique. L'auto-assemblage s'applique largement pour le dépôt et l'organisation de molécules [WMS91]. Des applications chimiques et biologiques sont les terrains de prédilection de l'auto-assemblage. Pour la fabrication des microsystèmes, les techniques d'auto-assemblage utilisées sont :

- l'auto-assemblage par vibration [CBN+98, Boh98, PB08] ;
- le positionnement par forces capillaires [SLH01, FB06] ;
- le soulèvement de structure par tension de surface [Sym99, SYBW03, Hon06].

Nous ne détaillons pas les techniques d'auto-assemblage car nous allons nous concentrer sur le micro-assemblage robotique. En effet, nous pouvons remarquer que les techniques d'auto-assemblage sont très contraintes par la forme des micro-objets et conduisent généralement à des assemblages 2D ou $2D\frac{1}{2}$. Nous voulons une technique flexible assurant une pose 3D donc l'auto-assemblage ne nous convient pas.

Le micro-assemblage robotique

L'assemblage robotique utilise un robot qui intervient à la place de l'homme pour accomplir des tâches complexes en utilisant un système robotique, des préhenseurs, des systèmes de visualisation de la scène, des systèmes de mesure, une interface homme machine, etc. Les recherches menées ces 20 dernières années ont mis en avant deux approches pour réaliser le micro-assemblage robotique :

- le micro-assemblage série ;
- le micro-assemblage parallèle déterministe.

Le micro-assemblage série utilise un préhenseur monté sur un système robotique pour effectuer un assemblage à la fois. Le micro-assemblage parallèle déterministe réalise des assemblages simultanément. Ces deux approches peuvent s'effectuer suivant 2 modes : le mode téléopéré et le mode automatique. Le mode téléopéré consiste à permettre l'intervention d'un opérateur à travers une interface homme-machine. Il convient à des assemblages pour la validation d'un microsystème et la réalisation d'assemblages com-

plexes. L'automatisation de l'assemblage s'oriente vers la production en grande série et les opérations qui nécessitent des sensibilités que l'humain ne possède pas. L'assemblage automatisé peut se réaliser suivant 2 principes :

- l'automatisation en boucle ouverte (c'est-à-dire pas de capteurs extéroceptifs) qui se base sur l'étalonnage du système robotique pour compenser les défauts, la maîtrise des tolérances des objets manipulés et de la précision de robot [PMD09, PLM⁺07];
- l'automatisation en boucle fermée qui utilise un retour d'information pour vérifier l'état de l'assemblage [ZNV98, SXL03, SXRC05, RWMS07, KDN09, Tam09]. Il existe deux types d'informations qui sont utilisées : l'information de position (position de l'objet manipulé, du substrat et position du manipulateur) et l'information de force (force de serrage, forces d'interaction). Une combinaison de ces deux types d'information conduit alors à un assemblage hybride force/position.

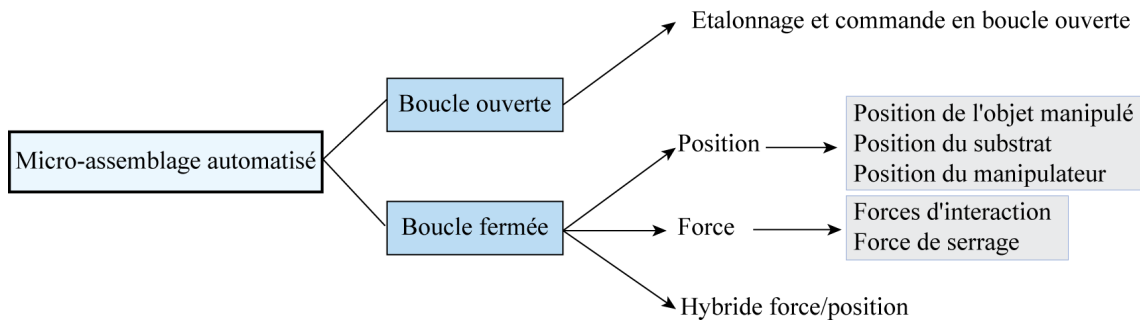


FIG. 1.9 – Les différentes approches pour l'automatisation des tâches de micro-assemblage.

La figure FIG. 1.9 résume les différentes approches pour réaliser le micro-assemblage automatisé. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au micro-assemblage robotique pour la fabrication des MOEMS. Nous allons donc voir plus en détails les différentes techniques de micro-assemblage robotique accompagnées d'exemples illustrant les résultats obtenus.

1.2.1 Le micro-assemblage série

L'approche sérielle repose sur les opérations de prise et de dépose, mais également sur des opérations plus complexes comme l'insertion. Le micro-assemblage série dépend du succès de ces opérations et nécessite alors l'utilisation d'un système de préhension qui doit être adapté aux micro-objets (forme, caractéristique, etc), aux contraintes de temps de cycle et aux forces appliquées. L'étude des préhenseurs a fait l'objet de nombreux travaux de recherche et continue d'intéresser les chercheurs du monde entier [Lan08]. Souvent le choix du préhenseur est en accord avec une stratégie d'assem-

blage et avec les contraintes durant les tâches d'assemblage. Les préhenseurs peuvent être passifs ou actifs. Le préhenseur est passif s'il n'utilise pas de système d'actionnement pour effectuer la saisie. Généralement la compliance est introduite soit sur le préhenseur [DCM04, DKC04, BMS05, TLS05] soit sur les micro-objets manipulés [TGES04, DZL⁺07]. Les préhenseurs actifs exploitent différents types d'actionneurs (électrostatique [BNO⁺07], électrothermique [LKO⁺03, ACP⁺08, KLZS08b], alliage à mémoire de forme [KKJ02], magnétique [CWW03], piézoélectrique [CEM⁺00, PAC⁺05] et pneumatique [BSB02, ZBW97], etc.) pour saisir les micro-objets. L'utilisation de plusieurs pointes [WGW⁺07] montées sur des systèmes de positionnement motorisés est classée dans la catégorie des préhenseurs actifs.

Pour réaliser l'assemblage série, l'utilisation d'un porteur possédant un certain nombre de degrés de liberté, sur lequel est monté le préhenseur, est indispensable. Le porteur est composé d'un ensemble d'axes de positionnement reliés entre eux et formant une cinématique pouvant couvrir l'espace de travail requis. Des systèmes de vision et de mesure de forces sont souvent utilisés afin d'assurer la perception de la scène et des interactions. Le micro-assemblage série peut s'effectuer en mode téléopéré ou en mode automatisé.

Micro-assemblage série en mode téléopéré

Les différents préhenseurs ont été utilisés pour effectuer des opérations de micro-assemblage. En mode téléopéré, un opérateur commande les mouvements des axes de positionnement pour saisir et ensuite déposer les micro-objets. Il utilise des caméras et/ou des mesures de force pour garantir la mise en position et l'intégrité des micro-objets. Une fois la position désirée atteinte, le micro-objet doit être maintenu à cette position par des techniques de solidarisation (micro-objet flexible, substrat flexible, fente, rainure, colle UV, etc.). Nous allons présenter les exemples montrant l'utilisation de différents préhenseurs et les techniques de solidarisation mises en œuvre.

L'utilisation d'un préhenseur passif à deux doigts de serrage

Ce préhenseur a été étudié au Department of Mechanical and Industrial Engineering à l'Université de Toronto au Canada par Dr. Nikolaï Dechev. Le préhenseur passif est fabriqué par la technologie d'usinage de surface à base de silicium et il possède 2 doigts déformables dont l'écartement initial est de $14 \mu\text{m}$ (*cf.* FIG. 1.10). Il est monté sur un système robotique possédant 5 degrés de liberté pour assembler des microstructures 3D [DCM04, DKC04]. Les microcomposants manipulés possèdent une interface où le préhenseur vient saisir le microcomposant. Afin d'obtenir les microstructures 3D, une séquence d'assemblage série est appliquée. Des résultats d'assemblage sont montrés sur la figure FIG. 1.11 -(a) utilisant des bras flexibles qui s'insèrent dans des emplacements dédiés et sur la figure FIG. 1.11 -(b) utilisant des fentes pour positionner les micro-objets.

Les résultats présentés exploitent la compliance pour effectuer la saisie. Des liaisons flexibles et/ou des fentes sont proposées pour le maintien en position des micro-objets

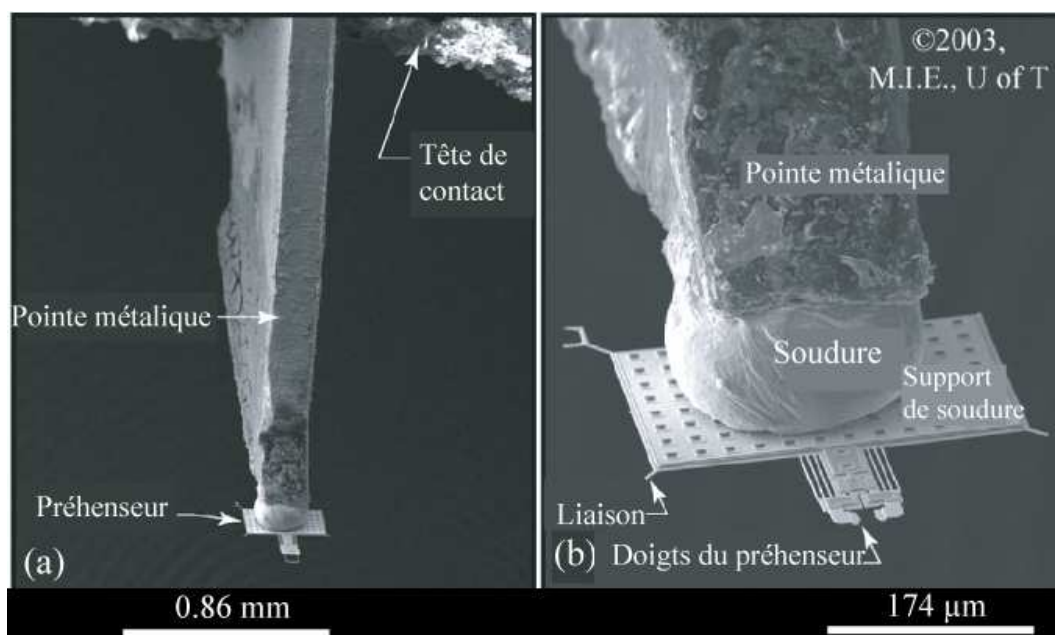


FIG. 1.10 – Préhenseur à deux doigts de serrage exploitant la compliance pour saisir les microcomposants [DCM04].

assemblés.

D'autres travaux [BMS05, TLS05] proposent l'utilisation de préhenseur passif, mais ceux de Toronto se distinguent par les dimensions (inférieures à $200\ \mu\text{m}$ de côté) du préhenseur et des objets manipulés mais aussi par le système de maintien en position.

L'utilisation de préhenseur passif à deux doigts orthogonaux

Il a été étudié par l'équipe du Professeur Pister de l'University of California, Berkeley. Cette équipe utilise un préhenseur à deux doigts de serrage, mais disposés perpendiculairement l'un à l'autre d'où le nom d'*orthogripper* (cf. FIG. 1.12 et FIG. 1.13). Ce type de préhenseur trouve son origine dans les travaux présentés dans [TF01]. Le préhenseur, les micro-objets et le substrat de fixation sont faits en silicium. L'orthogripper permet la rotation passive d'un micro-objet rigide une fois la liaison sécable entre le micro-objet et le substrat cassée. Le préhenseur dont un doigt est flexible, est collé sur une pointe en tungstène qui est montée sur un système à 3 degrés de liberté.

La fixation du micro-objet sur le substrat s'effectue grâce à un système de verrouillage par des éléments flexibles intégré au substrat comme indiqué sur la figure FIG. 1.14 dans [VLP06]. Les éléments flexibles se déforment pour laisser glisser un carré de $20\ \mu\text{m}$ x $20\ \mu\text{m}$. Une fois un chanfrein passé, le micro-objet est positionné et le système de verrouillage peut être poussé pour mettre en place la pince triangulaire afin de renforcer la

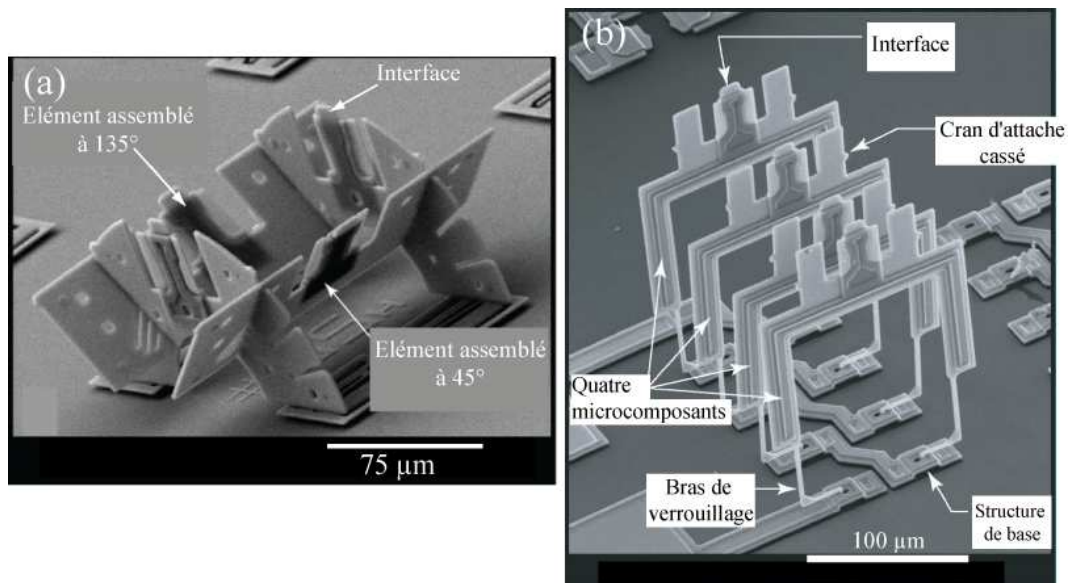


FIG. 1.11 – Résultats obtenus utilisant le préhenseur passif à deux doigts de serrage : (a) microcomposant assemblé dans des fentes [DRL⁺06], (b) microbobine assemblée [DKC04].

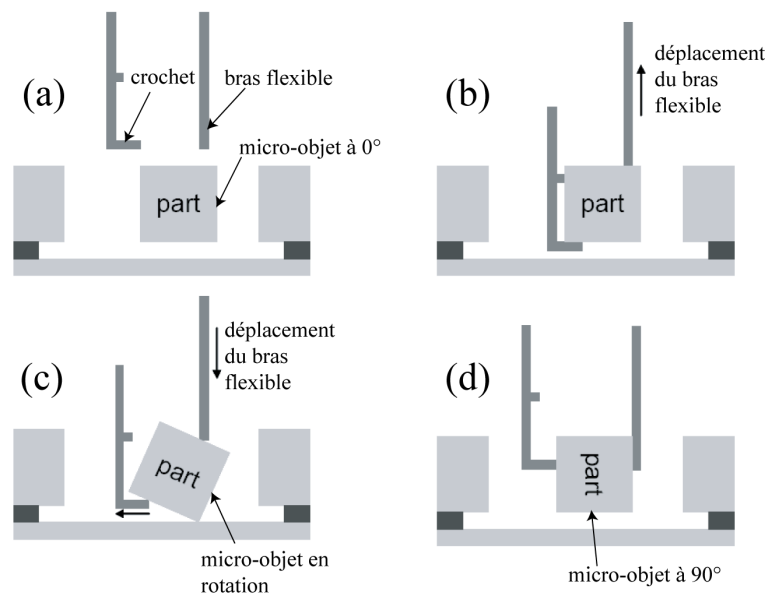


FIG. 1.12 – Fonctionnement de l'orthogripper pour saisir un microcomposant.

liaison micro-objet/substrat. Sur la figure FIG. 1.14 -(b), on observe la déformation des

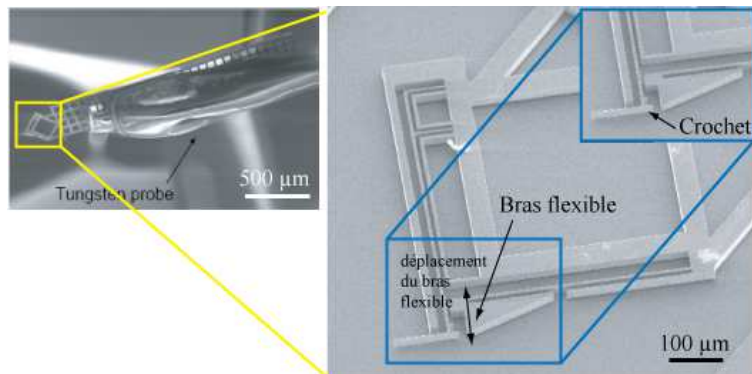


FIG. 1.13 – L’orthogripper en silicium avec son doigt type crochet et l’autre flexible.

éléments flexibles et la trace du déplacement du système de verrouillage. Ce concept uti-

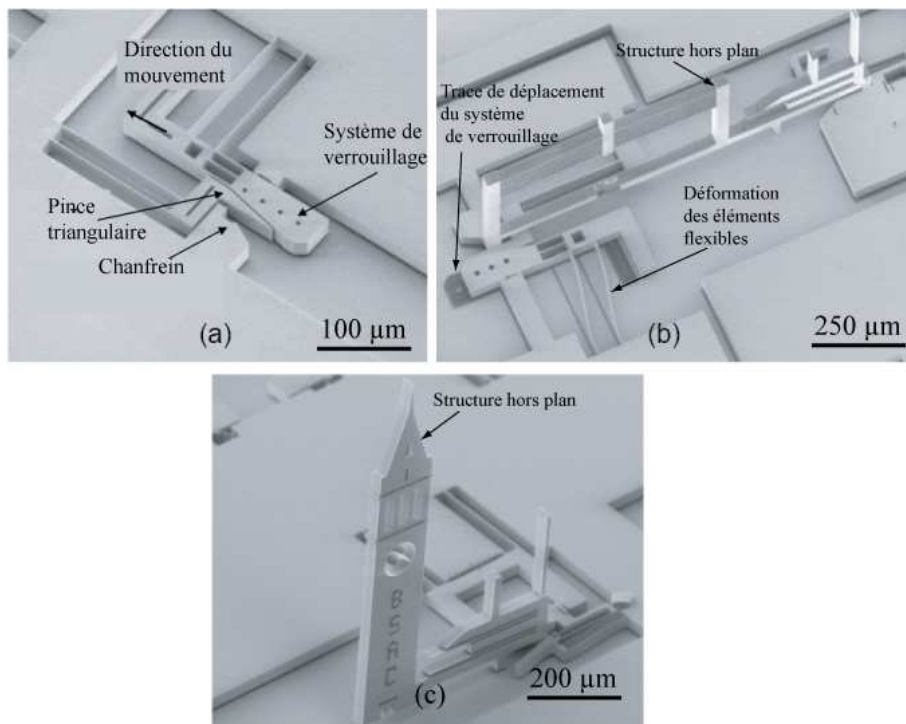


FIG. 1.14 – (a) le système flexible recevant le microcomposant, (b) et (c) des assemblages effectués avec le préhenseur [VLP06, LSP05].

lise l’orthogripper et un système de maintien à base d’éléments flexibles sur le substrat. L’utilisation d’éléments flexibles pour le maintien est souvent utilisé en micro-assemblage d’éléments en silicium. Il permet d’assembler des micro-objets en hors plan ($2D\frac{1}{2}$) sans

effectuer une opération de rotation robotique à 90° . Par contre le nombre d'opérations durant l'assemblage augmente car il est nécessaire d'insérer le micro-objet dans l'emplacement pour ensuite pousser le système de verrouillage.

L'utilisation d'un préhenseur à dépression

Le préhenseur à dépression est très répandu dans l'industrie de la micro-électronique pour la saisie de composants plats car il est simple, fiable et rapide. Par contre il ne peut s'appliquer qu'à des formes de micro-objet particulières et généralement limitées à des micro-objets de $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$. Il fait également l'objet d'investigations dans [ZBW97] pour des objets plus petits. Une pipette en verre (cf. FIG. 1.15 -(a)) équipée de système à dépression permet de réaliser des opérations de prise et de dépose d'objets de $50\ \mu\text{m}$ à $300\ \mu\text{m}$, dépassant ainsi la limitation en taille (les forces de surfaces sont prépondérantes en dessous de $100\ \mu\text{m}$). Les pipettes utilisées peuvent avoir des diamètres compris entre $25\ \mu\text{m}$ et $50\ \mu\text{m}$. Le système est intégré sur la station ETHZ NanoRobot et a permis d'atteindre un taux de succès de 75 %. Des résultats obtenus avec l'utilisation du préhenseur à dépression sont montrés sur la figure FIG. 1.15 -(b).

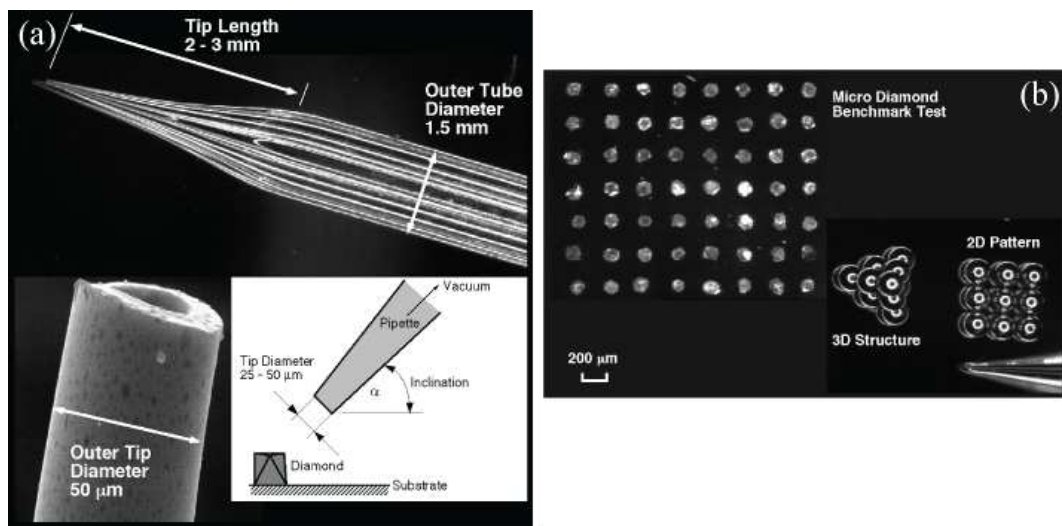


FIG. 1.15 – Préhenseur à dépression à base de (a) une pipette en verre, (b) résultats de différents tests [ZBW97].

La solidarisation des micro-objets assemblés n'est pas abordée car c'est la capacité du préhenseur à les saisir qui est démontrée dans le cadre de la micromanipulation.

L'utilisation d'un préhenseur actif à actionnement piézoélectrique

Il est largement proposé pour accomplir des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage [LKO⁺03, CEM⁺00, KKKJ03, BNO⁺07, ACP⁺08, HG08] car il présente

l'avantage de pouvoir saisir des formes et des dimensions de micro-objets variables, il est réversible et permet de contrôler la force. Il est notamment proposé au département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) de l'Institut Femto-ST. Plusieurs stations de micro-assemblage (3D) ont été développées afin de manipuler des micro-objets ayant des dimensions de $5\ \mu\text{m}$ à $500\ \mu\text{m}$. La station PRONOMIA (Principes et Outils Nouveaux pour le Micro-Assemblage Automatisé), réalisée dans le cadre d'un projet ANR du même nom, a permis d'assembler une microvache en résine photo-sensible négative (SU8) constituée de 5 pièces microfabriquées de $5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur (cf. FIG. 1.16).

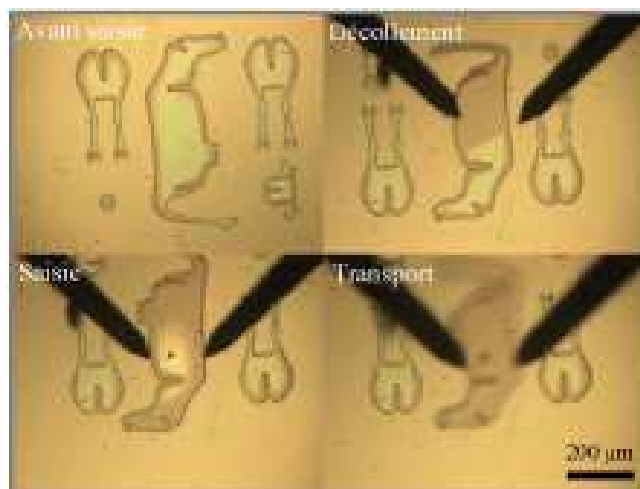


FIG. 1.16 – Les pièces qui constituent la microvache et les opérations d'assemblage.

La station de micro-assemblage est équipée de 6 degrés de liberté, de deux vidéomicroscopes⁷ et d'une micropince à actionnement piézoélectrique [HG08](cf. FIG. 1.17 -(a)). Le résultat est montré sur la figure FIG. 1.17 -(b). La plus petite pièce, qui est le mufle fait $50 \times 50 \times 5\ \mu\text{m}^3$.

Le maintien en position des éléments de la microvache est assuré par des fentes dans lesquelles les pièces s'insèrent grâce à la présence de jeux. L'épaisseur des pièces et la largeur des fentes doivent être contrôlées durant la microfabrication pour assurer la solidité du système assemblé.

Les opérations en mode téléopéré peuvent utiliser l'information de force pour aider l'opérateur sur la perception des interactions comme dans [ZF98, TF01, YGN01, CPK09, KS09, XAHR09].

⁷dont un inversé

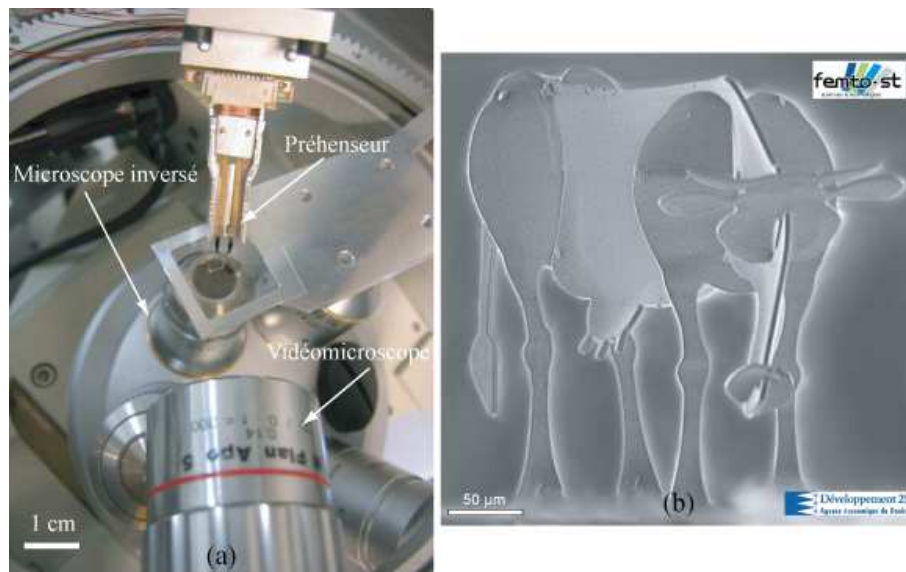


FIG. 1.17 – (a) La station PRONOMIA et son système de vision utilisant un microscope inversé [HG08], (b) microvache assemblée, de 500 μm de la tête à la queue, pesant 830 nanogrammes.

Le micro-assemblage série automatisé

L'automatisation est utilisée afin de garantir la précision de positionnement, d'assurer la répétabilité des opérations et d'augmenter la cadence d'assemblage qui est le nombre d'assemblage par unité de temps. Comme mentionné auparavant, le micro-assemblage automatisé peut se faire soit en boucle ouverte, soit en boucle fermée. Ces deux approches sont illustrées par les exemples suivants.

L'utilisation de préhenseur passif rigide pour le micro-assemblage automatisé en boucle ouverte

Il est proposé par l'équipe de recherche de Dr. Dan Popa à l'Institut ARRI au Texas. Ils utilisent un préhenseur passif rigide appelé "jammer" pour saisir les micro-objets sur une partie flexible lors du micro-assemblage 3D. Le maintien en position est assuré par les forces générées par la déformation des éléments flexibles du micro-objets et du substrat (cf. FIG. 1.18). Ce principe a été initialement développé par le département recherche de l'entreprise américaine Zyvex⁸ [TGES04].

Définition 3 inspiré de [Dom98] : "l'étalonnage est l'ensemble des opérations effectuées pour établir la carte d'identité d'un robot afin de maîtriser les incertitudes dues aux

⁸<http://www.zyvexlabs.com/>

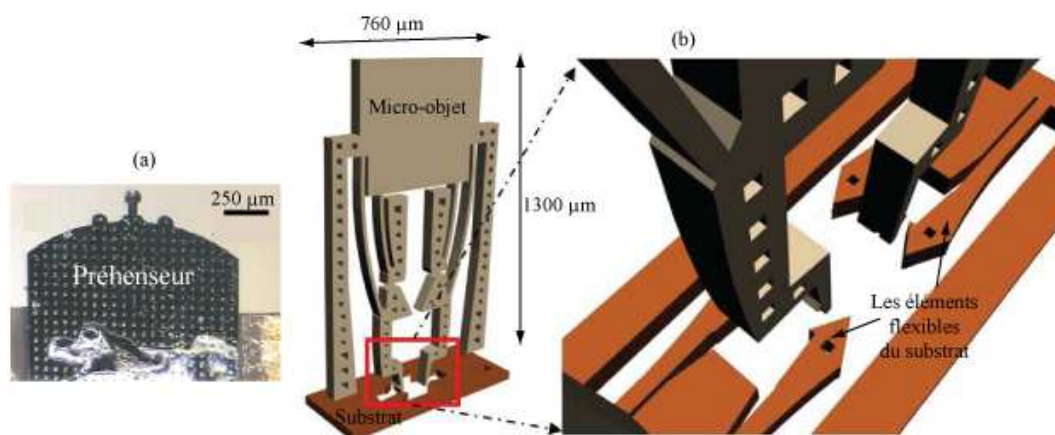


FIG. 1.18 – (a) le préhenseur passif dit “jammer” [TGES04], (b) le micro-objet et le substrat avec des parties flexibles [Das09].

imperfections de structure des mécanismes et des objets manipulés. Il se déroule en quatre étapes : modéliser, mesurer, identifier et compenser”.

Un manipulateur équipé d’un jammer permet alors l’assemblage de microcomposants en mode automatique après l’étalonnage du système microrobotique [PS04, DZL⁺07]. Ces travaux ont été réalisés sur la station de micro-assemblage appelé μ^3 (cf. FIG. 1.19 - (a)). Elle est dotée de 19 degrés de liberté répartis sur 3 manipulateurs. Le manipulateur M1 est équipé du préhenseur. Le manipulateur M3 est le porteur de substrat contenant les micro-objets. Ces derniers sont faits en silicium à partir d’un wafer SOI. A la fin de la procédure de fabrication, ces microcomposants sont maintenus par un élément flexible qu’on peut casser avec un mouvement latéral du *jammer*. Ainsi, l’emplacement des différents micro-objets est connu avec une incertitude. Dans [DZL⁺07], les dimensions des microcomposants sont de $760 \mu\text{m} \times 1300 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ correspondant aux objets de la figure FIG. 1.19 -(b).

Une rangée de 12 composants a été assemblée après l’étalonnage du système robotique. La solidarisation est faite par une colle époxy délivrée par le manipulateur M2. L’ensemble des opérations a pris quelques minutes avec un taux de réussite pouvant atteindre 100 % avec un défaut d’inclinaison inférieur à $1,6^\circ$. L’utilisation d’une partie souple sur les micro-objets est caractérisée par sa déformation σ_1 , la maîtrise des tolérances de fabrication et la variation de la localisation du micro-objet après la rupture de la liaison sécable par σ_2 , et la précision du système robotique σ_3 conduisent à l’établissement de la condition pour la réussite de l’automatisation. Cette condition appelée HYAC (*High Yield Assembly Condition*) correspond à l’équation (1.1) et elle doit être respectée pour

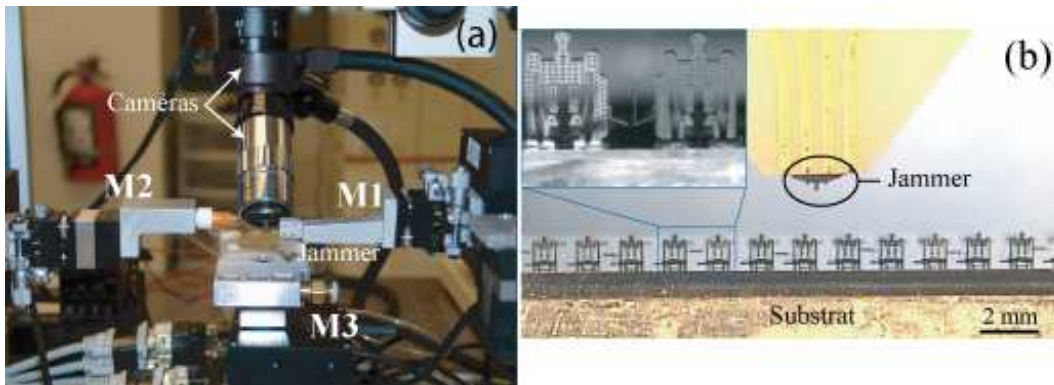


FIG. 1.19 – (a) station de micro-assemblage de l’Institut ARRI au Texas, (b) résultat de micro-assemblage automatisé combinant l’utilisation d’un préhenseur passif rigide (jammer) et de l’étalonnage du système robotique [DZL⁺07].

garantir le succès du micro-assemblage en boucle ouverte.

$$\sigma_1^2 > \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (1.1)$$

Cette condition repose sur le *lemma* énoncé dans [Das09] :

Lemma : “Under Gaussian uncertainty assumptions, a 99 % (3σ) assembly yield can be guaranteed if the combined uncertainty of locating and positioning of microparts and end-effector is smaller than the assembly tolerance.”.

L’assemblage automatisé en boucle ouverte dépend fortement de l’étalonnage de la structure microrobotique. Cette étape d’étalonnage n’est pas aisée et doit être renouvelée à chaque remplacement du substrat. L’usure du préhenseur par frottement peut conduire à la diminution de la déformation des parties flexibles, qui peut mener à l’échec de l’assemblage.

Le point critique concerne la précision du système robotique σ_3 qui, pour couvrir l’ensemble du substrat, doit avoir une course de plus de 10 mm. Les tables de positionnement offrant ces courses sont souvent à actionnement par moteur à courant continu et ont des jeux sur le système de transmission de plus de $2 \mu\text{m}$. L’utilisation d’un robot peu précis nécessite une augmentation de la compliance σ_1 et une diminution de la variation de la localisation du micro-objet σ_2 .

L’utilisation de préhenseur actif pour le micro-assemblage automatisé par asservissement visuel

Elle est proposée au département AS2M de l’Institut FEMTO-ST dans le cadre du projet européen HYDROMEL⁹. Ces travaux ont permis de réaliser un micro-assemblage automatisé en boucle fermée par asservissement visuel [Tam09]. La station SAMMI (Systèmes

⁹<http://www.hydromel-project.eu/>

Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage), équipée de 3 translations et 2 rotations (*cf.* FIG. 1.20), a été utilisée car la mise au point et le zoom motorisé permettent de percevoir des micro-objets de $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$.

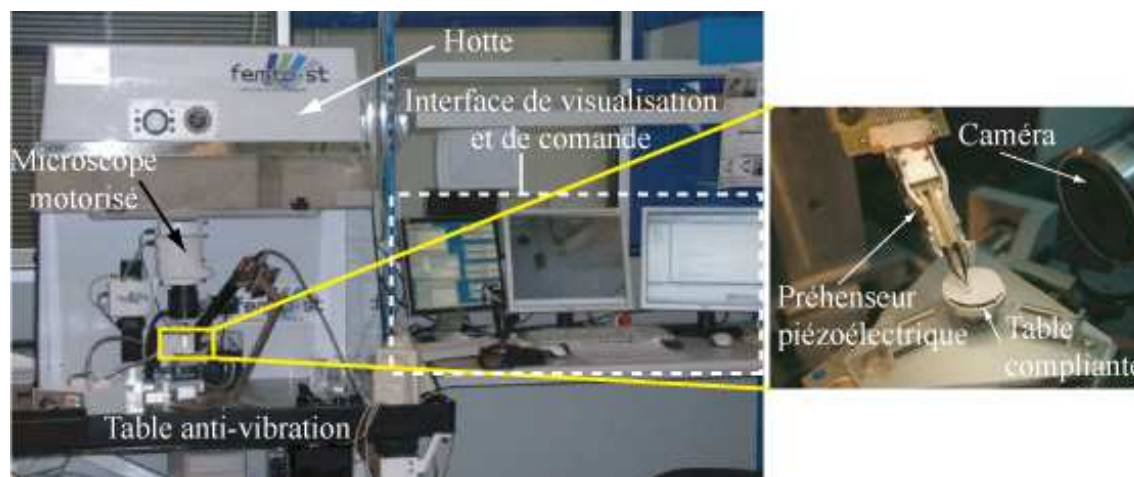


FIG. 1.20 – La station SAMMI équipée d'un microscope motorisé permettant l'assemblage automatisé par asservissement visuel [Tam09].

Après l'étalonnage de la station avec le système de vision, un micro-assemblage 3D utilisant un modèle 3D des micro-objets et la correspondance de ce modèle avec la scène par point caractéristique, permet d'obtenir un système de LEGO avec des micro-objets à encoches. Une séquence d'assemblage est montrée sur la figure FIG. 1.21 -(a). La mise en place d'un micro-objet sur un autre dure en moyenne 40.8 secondes suivant la technique d'asservissement visuel utilisée. Un résultat est présenté sur la figure FIG. 1.21 -(b). Les jeux des axes de positionnement à grande course, les forces d'adhésion, les forces électrostatiques et l'occultation peuvent conduire à des échecs lors du micro-assemblage (28 %). Par exemple, le micro-objet manipulé colle sur un des doigts lors de la dépose et entraîne l'échec de l'assemblage.

L'utilisation de deux pointes AFM pour la micromanipulation automatisée par vision et mesure force

L'utilisation des pointes d'AFM pour la micro et nanomanipulation permet de prendre en compte les phénomènes qui apparaissent à ces échelles [MUFM04, MUM+05, Sit07, XR09]. Elle est étudiée par l'équipe du Professeur Stéphane Régnier à l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) de l'Université Paris VI. Ils travaillent sur la micromanipulation 3D automatisée de microbilles de diamètre 3 à $4 \mu\text{m}$ [XR09]. Ils utilisent un préhenseur à deux doigts de serrage à base de pointes AFM avec retour de force par mesure optique. Ainsi, la force de serrage appliquée par chaque pointe est mesurée

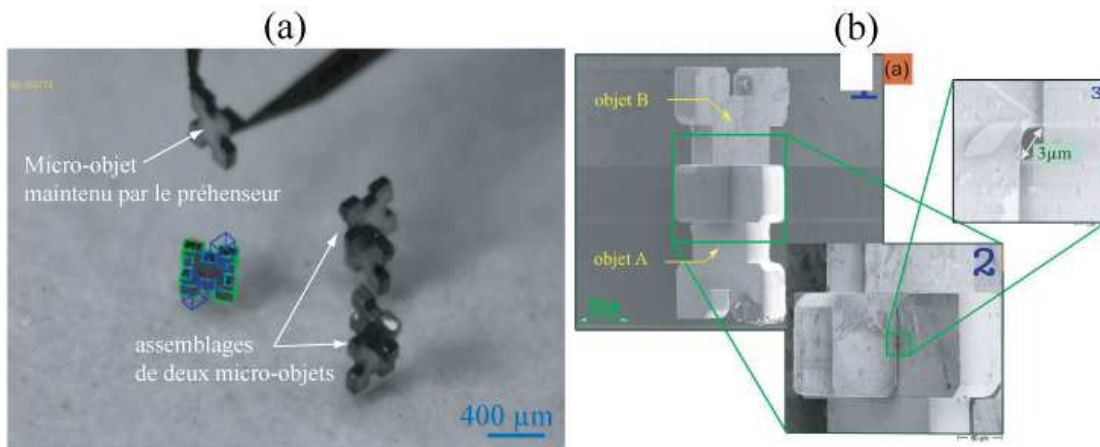


FIG. 1.21 – (a) Assemblage avec 6 micro-objets : 4 assemblés et 2 en cours d'assemblage [Tam09], (b) photo MEB d'un résultat d'assemblage montrant un jeu de $3 \mu\text{m}$ entre les deux micro-objets.

en temps réel pour permettre la saisie, le transport et le lâcher des microbilles. Cette mesure de force permet de vérifier l'interaction préhenseur/micro-objet et de détecter les forces s'exerçant sur la microbille. L'ensemble est monté sur une station de micro-manipulation utilisant des tables de positionnement à grande course combinées avec des tables à haute résolution. Ce système est équipé d'un microscope optique pour permettre la visualisation de la scène (cf. FIG. 1.22).

Un traitement d'images permet de localiser les microbilles et de planifier l'assemblage. Le cycle automatisé a permis de réaliser des pyramides de 4 microbilles comme nous montre la figure FIG. 1.23. Ce résultat de 5 pyramides a été obtenu au bout de 16 minutes de manipulation [XR09]. Ce qui correspond à 48 s de manipulation par microbille.

Les différentes techniques de micromanipulation et de micro-assemblage série offrent la possibilité de manipuler différentes formes de micro-objets, de les positionner en hors-plan (en $2D\frac{1}{2}$ et en 3D) et d'assurer un positionnement précis.

1.2.2 Le micro-assemblage parallèle déterministe

L'idée de base est de réaliser plusieurs assemblages en même temps. Il y a deux manières d'y parvenir soit on effectue du *wafer to wafer* (cf. FIG. 1.24), soit on utilise plusieurs préhenseurs pour réaliser l'assemblage (cf. FIG. 1.25). Ce dernier cas découle de la parallélisation de l'assemblage série et par conséquent, les problématiques traitées sont plus complexes car il faut fabriquer des rangées ou matrices de préhenseurs et assurer le positionnement des préhenseurs par rapport au substrat.

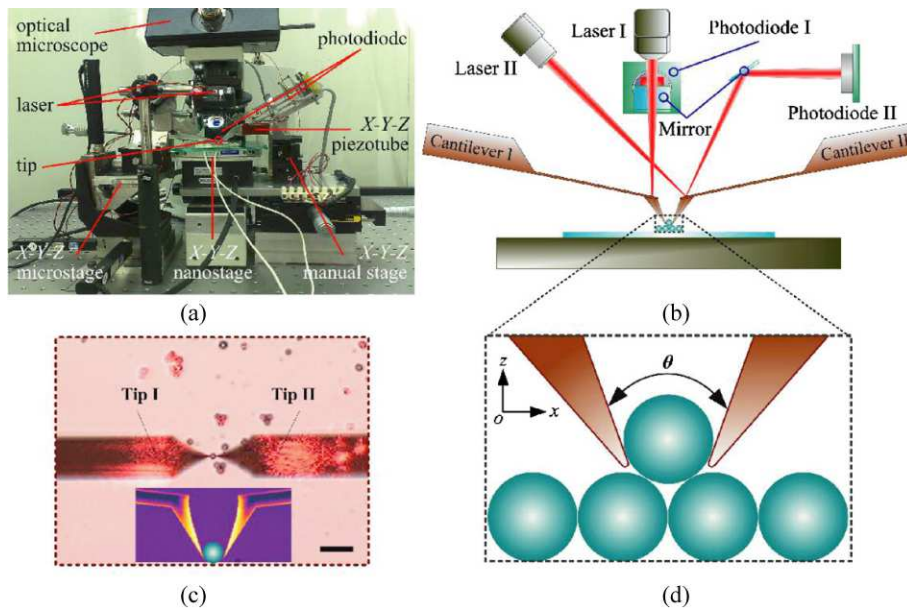


FIG. 1.22 – (a) Le système de micromanipulation, (b) le schéma du système, (c) la saisie d'une bille avec le préhenseur à deux doigts de serrage (cantilever I et II) à base de pointes AFM et (d) principe de saisie d'une microbille lors de la réalisation d'une pyramide.

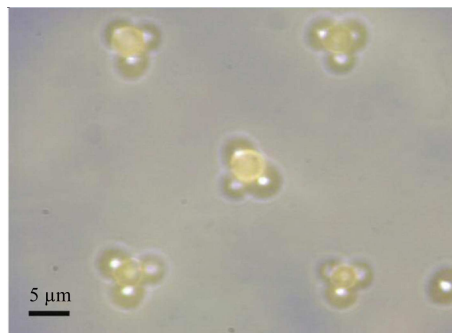


FIG. 1.23 – Résultat d'assemblage vu par un grossissement de $100x$.

Wafer to wafer

Cette technique consiste à aligner deux substrats contenant des microcomposants afin de les superposer. Les emplacements des microcomposants sur chaque substrat étant prédéfinis [CH97, SHC+99], il ne reste alors que le positionnement relatif des 2 wafers pour obtenir un assemblage 2D. Ce positionnement relatif est assuré par l'utilisation de marqueurs gravés sur chaque wafer. Elle est très répandue en micro-électronique. La fabrication de circuits possédant plusieurs couches fabriquées séparément permet la réalisation de plusieurs fonctions électroniques.

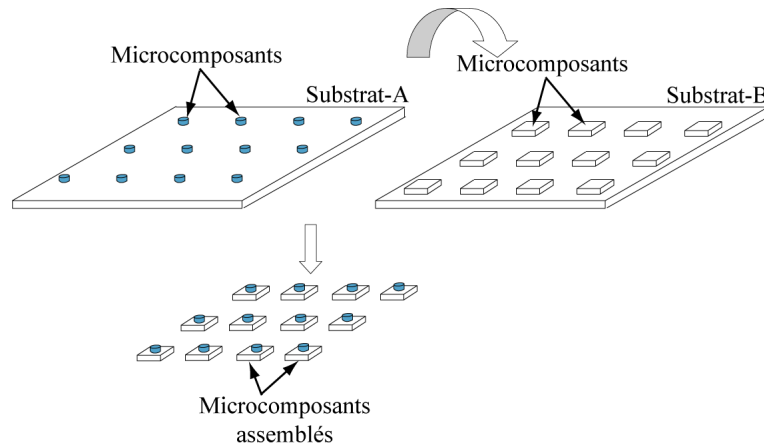


FIG. 1.24 – Micro-assemblage parallèle déterministe type *wafer to wafer*.

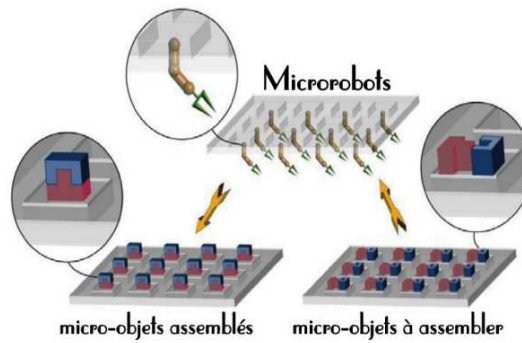


FIG. 1.25 – Micro-assemblage parallèle déterministe obtenu par parallélisation d'un assemblage série [PS04].

La parallélisation du micro-assemblage série

Elle a été proposée par l'équipe de Dr. Dan Popa de l'Institut ARRI au Texas. L'utilisation du jammer monté sur un manipulateur (*cf.* FIG. 1.19) est reprise mais cette fois 12 jammers sont utilisés simultanément. Les jammers sont fixés grâce au principe de verrouillage par élément flexible. Ainsi, l'assemblage de 12 microcomposants s'effectue en même temps comme montré sur la figure FIG. 1.26. Cette technique présente l'avantage d'augmenter la cadence d'assemblage. Elle dépend de la qualité de l'assemblage des préhenseurs. L'inclinaison du substrat par rapport au support des préhenseurs peuvent engendrer l'échec de l'assemblage parallèle.

Les techniques d'assemblage parallèle offrent clairement une cadence d'assemblage plus élevée, mais des améliorations restent à faire pour atteindre de meilleures qualités d'assemblage. En mettant 12 préhenseurs assemblés, σ_3 (inclinaison de la rangée de préhenseurs par rapport au substrat, défauts d'assemblage de chaque jammer) augmente ce qui

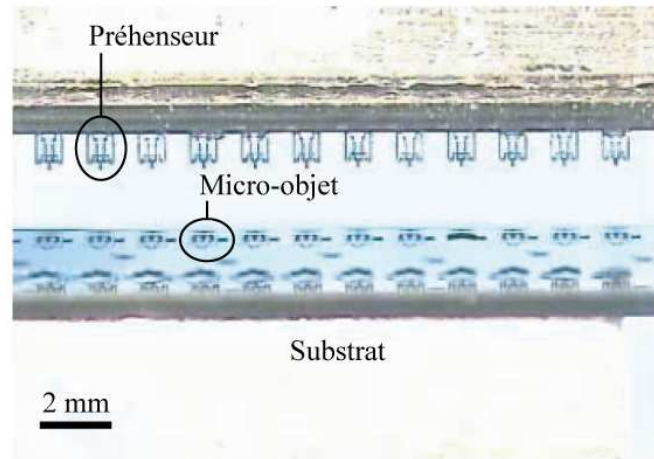


FIG. 1.26 – Micro-assemblage parallèle déterministe utilisant 12 préhenseurs à l’Institut ARRI au Texas [Pop07].

engendre des modifications sur σ_1 et σ_2 pour assurer le HYAC (*High Yield Assembly Condition*).

1.2.3 Combinaison de techniques d’assemblage

Il arrive que les différentes techniques de micro-assemblage soient combinées afin de profiter des avantages de chacune.

L’assemblage série avec l’auto-assemblage par force capillaire

La combinaison de deux techniques de micro-assemblage est proposée par l’équipe de Dr. Quan Zhou du “*Department of Automation and Systems Technology*” de Aalto University [SZK09]. Pour réaliser le positionnement précis des micro-objets en $2D\frac{1}{2}$, le micro-assemblage série est complété par l’auto-assemblage par force capillaire. Cette technique utilise l’assemblage par préhenseur pour un positionnement grossier et un positionnement fin (ou autocentrage) par une gouttelette d’eau. L’emplacement des gouttelettes étant microfabriqué, l’erreur de positionnement est plus faible. La gouttelette permet de corriger l’erreur de positionnement introduite par un système robotique à faible précision. Le déroulement de l’assemblage est montré sur la figure FIG. 1.27. Les premiers résultats ont été réalisés sur le système robotique présenté sur la figure FIG. 1.28. Les dimensions des micro-objets sont de $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ à $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ pour une épaisseur de $40\ \mu\text{m}$. Ils sont fabriqués en SU8, un matériau qui a une propriété hydrophile favorisant le contact avec la gouttelette d’eau.

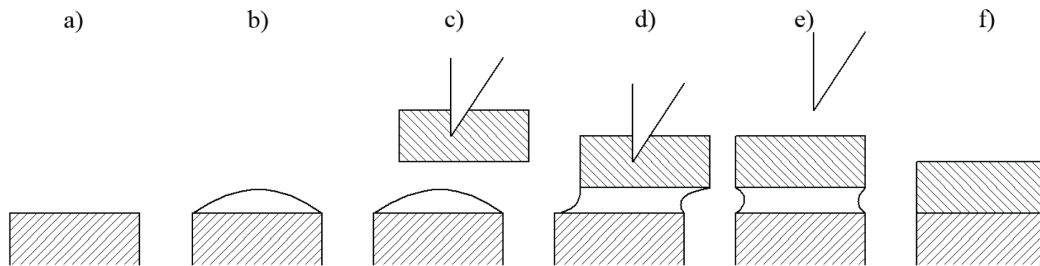


FIG. 1.27 – Déroulement de l’assemblage série combiné avec l’auto-assemblage : (a) emplacement hydrophile des gouttelettes, (b) le liquide est déposé, (c) le préhenseur tient le micro-objet et s’approche de l’emplacement, (d) le liquide mouille le micro-objet formant ainsi un ménisque, (e) le préhenseur relâche le micro-objet et la force capillaire assure l’alignement avec l’emplacement, (f) l’eau s’évapore et le micro-objet est maintenu à sa position par les forces d’adhésion et les forces de friction [SZK09].

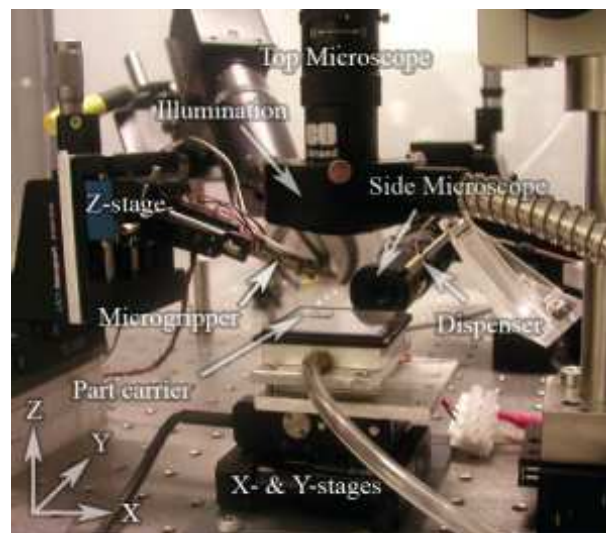


FIG. 1.28 – Vue globale du système utilisé pour l’assemblage série combiné avec l’auto-assemblage [SZLK08].

L’auto-assemblage par force capillaire combinée avec du Wafer to Wafer

Cette technique est proposée dans [KFT08] par une équipe du Department of Bioengineering and Robotics, Tohoku University au Japon. Ainsi, la combinaison des techniques de positionnement par force capillaire et du wafer to wafer permet d’obtenir une structure 2D. Les différentes phases de l’assemblage sont décrites sur la figure FIG. 1.29. Cette technique ouvre la perspective de fabriquer une variété de fonctions électroniques en limitant la surface occupée [FKY⁺07]. L’alignement des wafers, la maîtrise des di-

mensions des gouttelettes, le décalage généré par les contraintes lors du collage sont des points à améliorer. Un positionnement précis est indispensable pour assurer la connexion électrique entre les couches.

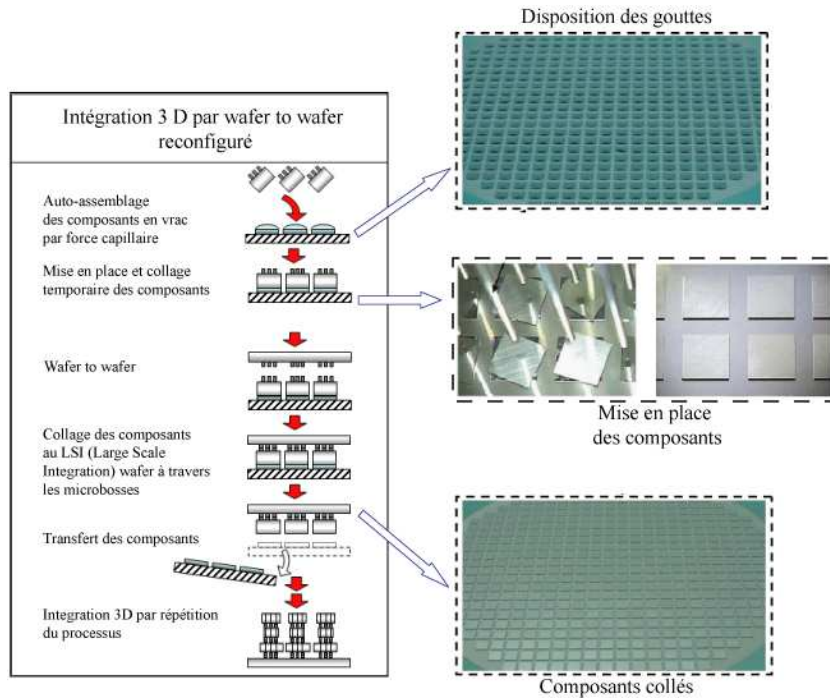


FIG. 1.29 – Micro-assemblage par force capillaire et par wafer to wafer [KFT08].

La combinaison de techniques de micro-assemblage permet de garantir de bonnes précisions de positionnement ($\approx 1 \mu\text{m}$) tout en augmentant la cadence d'assemblage grâce à la parallélisation. Les résultats obtenus montrent que les techniques se limitent à des assemblages 2D voire $2D\frac{1}{2}$.

1.2.4 Synthèse des techniques de micro-assemblage

Le tableau TAB. 1.2 résume les différentes techniques de micro-assemblage robotique et le tableau TAB. 1.3 les différentes techniques d'auto-assemblage et des combinaisons de techniques.

Le micro-assemblage série en mode téléopéré peut s'effectuer par différents types de préhenseur qui sont différenciés dans le tableau. En mode automatique, les préhenseurs utilisés sont parmi ceux déjà cités et les techniques d'automatisation sont mises en avant.

Nous avons pu voir à travers des exemples les différentes techniques de micro-assemblage

pour la fabrication des microsystèmes. Des avancées significatives ont été faites dans les systèmes de micromanipulation et de micro-assemblage. Des approches intéressantes ont permis de valider la manipulation de micro-objets inférieurs à $100\ \mu\text{m}$ et l'automatisation du micro-assemblage. La variété des techniques fournit de nombreuses solutions pour la fabrication des microsystèmes mais toutes ne sont pas adaptées aux MOEMS. Dans le cas de MOEMS, le micro-assemblage série constitue une technique flexible capable d'assurer la manipulation de différentes formes de micro-objets, d'assurer la mise en position des éléments optiques en hors plan ($2\text{D}\frac{1}{2}$ et 3D) et d'atteindre des précisions de positionnement micrométriques compatibles à la fabrication de MOEMS. Les techniques de micro-assemblage 2D (auto-assemblage et combinaison de techniques) n'offrent pas la possibilité de mettre des micro-objets en hors plan, mais assurent une bonne précision de positionnement tout en augmentant la vitesse d'assemblage.

Micro-assemblage robotique	Micro-assemblage série	Mode téléopéré	Préhenseur passif compliant à deux doigts de serrage [DCM04, BMS05, TLS05]
			Préhenseur passif rigide [TGES04, LCG+06]
			Orthogripper [LSP05, VLP06]
			Préhenseur pneumatique [ZBW97, BSB02]
			Préhenseur actif [CEM+00, KKKJ03, BNO+07, HG08, ACP+08]
		Mode automatisé	Boucle ouverte [PS04, DZL+07]
		Boucle fermée [Tam09, XR09]	
	Micro-assemblage parallèle	Wafer to wafer [CH97, SHC+99]	
	Parallélisation de l'assemblage série [Pop07]		

TAB. 1.2 – Résumé des différentes techniques de micro-assemblage robotique.

Auto-assemblage	Forces mécaniques [CBN ⁺ 98, Boh98, PB08]	
	Forces capillaires	Positionnement précis par une gouttelette [SLH01, FB06]
		Soulèvement de structure par tension de surface [Sym99, SYBW03, Hon06]
Combinaison de techniques d'assemblage	L'assemblage série avec l'auto-assemblage par force capillaire [SZLK08, SZK09]	
	L'auto-assemblage par force capillaire avec du wafer to wafer [FKY ⁺ 07, KFT08]	

TAB. 1.3 – Résumé des différentes techniques d'auto-assemblage et des combinaisons de techniques.

1.3 Vers des MOEMS hybrides et l'automatisation des tâches de micro-assemblage

La fabrication de microsystèmes par le micro-assemblage constitue une alternative au tout microfabriqué. Une variété de techniques de micro-assemblage existe, toutefois nous pouvons remarquer sur ces travaux que les micro-objets manipulés sont propres à chacune d'elle. Une technique autorisant l'assemblage de diverses tailles, formes et natures de micro-objets est très peu développée. Les différents éléments optiques obtenus à partir de filières de fabrication non compatibles entre elles seront alors les briques de bases d'une nouvelle génération de MOEMS appelés MOEMS hybrides.

Pour assurer un niveau de production en moyenne voire grande série et un coût minimal, l'automatisation devient indispensable. Elle assure également la précision de positionnement et la répétabilité des opérations. Elle peut être effectuée en boucle ouverte après étalonnage par un préhenseur passif rigide [PS04, DZL⁺07] et en boucle fermée par des préhenseurs à deux doigts de serrage sur des micro-objets rigides [Tam09, XR09]. Le micro-assemblage automatisé de micro-objets flexibles par un préhenseur actif ne semble pas être résolue à l'heure où ce manuscrit est écrit. L'intérêt de la flexibilité est d'assurer le maintien en position sur un substrat rigide comme dans [DCM04].

Pour fabriquer les MOEMS hybrides, le micro-assemblage automatisé assurant un positionnement 3D des éléments optiques constitue une réponse à la fabrication de nouvelles générations de MOEMS. Les contraintes du système d'assemblage sont intégrées lors de la conception de ces MOEMS. Pour y parvenir des verrous restent à lever et ils sont décrits dans ce qui suit.

1.4 Les challenges à relever pour l'automatisation

Pour des besoins de rendement et d'intérêts économiques, l'automatisation des tâches de micro-assemblage intéresse la communauté scientifique. Elle est actuellement en face de challenges tels que la compréhension du micromonde, afin de proposer des stratégies prenant en compte les spécificités à l'échelle micrométrique et les limites technologiques. Il est primordial de relever ces challenges afin d'accomplir des micro-assemblages automatisés et d'aller vers de nouveaux produits plus complexes.

1.4.1 La compréhension du micromonde

Les exemples d'automatisation du micro-assemblage 3D montrent que des difficultés liées à l'échelle peuvent conduire à l'échec de l'automatisation. Afin de maîtriser les tâches de micro-assemblage, les phénomènes qui se produisent à l'échelle micro doivent être compris, mesurés et pris en considération lors de la conception de MOEMS et de systèmes de micro-assemblage. Partant de ce constat, des travaux ont été menés et se regroupent dans ce qu'on appelle aujourd'hui : la physique du micromonde. Les phénomènes physiques sont souvent décrits par la grandeur des forces. Les mêmes forces régissent tous les objets quelques soient leurs dimensions mais leurs prédominances varient. A l'échelle

macroscopique, les forces de gravité et d'inertie sont les plus prépondérantes car elles dépendent du volume de l'objet. Par contre à l'échelle microscopique, les forces dépendant des surfaces deviennent prépondérantes.

D'après la littérature [RC08, Lam07], on considère deux catégories de forces intimement liées qui sont prépondérantes à l'échelle microscopique :

- les forces de surface ;
- les forces de contact.

Les forces de surfaces

Elles sont essentiellement les forces électrostatiques, les forces de van der Waals (vdW) et les forces capillaires.

- Les forces électrostatiques : elles proviennent essentiellement de l'interaction de Coulomb due à la présence de particules chargées ou par apparition de charges par triboélectrification. Les forces électrostatiques sont inversement proportionnelles à la distance de séparation, elles sont donc prépondérantes à faible distance. Il devient commode de mettre les éléments en interaction à la masse pour éliminer les phénomènes électrostatiques [RC08]. Durant le micro-assemblage, l'apparition des charges par triboélectrification n'est pas contrôlable et engendre des déplacements non contrôlés des micro-objets.
- Les forces de van der Waals (vdW) : elles représentent l'interaction de faible intensité interatomique ou intermoléculaire. La compréhension des forces de van der Waals repose sur des théories de la physique quantique. Ces forces ont été nommées en l'honneur du physicien hollandais Johannes Diderik van der Waals (1837 - 1923), prix Nobel de physique en 1910. Les forces de van der Waals dépendent de la géométrie du contact et des données physiques des matériaux. Pour une interaction entre une sphère et un plan infini, l'intégration de la force de van der Waals est décrite par l'équation (1.2).

$$F_{vdW}(D) = -\frac{A_{12}R}{6D^2} \quad (1.2)$$

où R est le rayon du sphère, D est la distance de séparation et A_{12} est la constante d'Hamaker. R et D sont des paramètres géométriques. La connaissance de A_{12} demeure une approximation qui peut varier de [0.4 à 4] x 10^{-19} J d'après [Lee91, Rol00, Isr91].

- Les forces capillaires : elles apparaissent à l'interface de deux objets soit par condensation due à l'hygrométrie ambiante, soit par la création d'un ménisque à partir d'une gouttelette. Suivant la géométrie des surfaces en regard, différents modèles sont proposés et ils dépendent de la forme du pont capillaire qui lie les deux surfaces (cf. FIG. 1.30) [Lam05],[CRDL07].

Les hypothèses considérées pour formuler les modèles des forces capillaires sont [Lam07] :

- la géométrie des surfaces ;
- l'approximation de l'arc de l'interface (où ρ est le rayon de courbure) ;
- la formulation énergétique ;

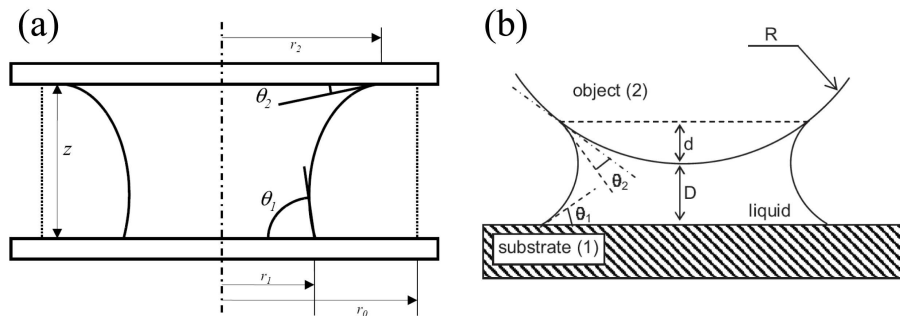


FIG. 1.30 – Illustration de pont capillaire pour (a) deux surfaces planes et pour (b) une surface plane en regard avec une sphère [Lam05].

– les rayons r_1 et r_2 à chaque ligne de contact sont très petits devant R^{10} .

La figure FIG. 1.31 décrit la prédominance des forces en fonction de la distance de séparation. Nos références à l'échelle macroscopique laissent place à de nouvelles références où les forces de surface sont prédominantes. La fourmi transportant une charge largement plus grande que son poids illustre parfaitement le faible impact du poids à cette échelle. Et les insectes aquatiques marchant sur l'eau montrent que les tensions de surface ont pris le dessus sur leur poids.

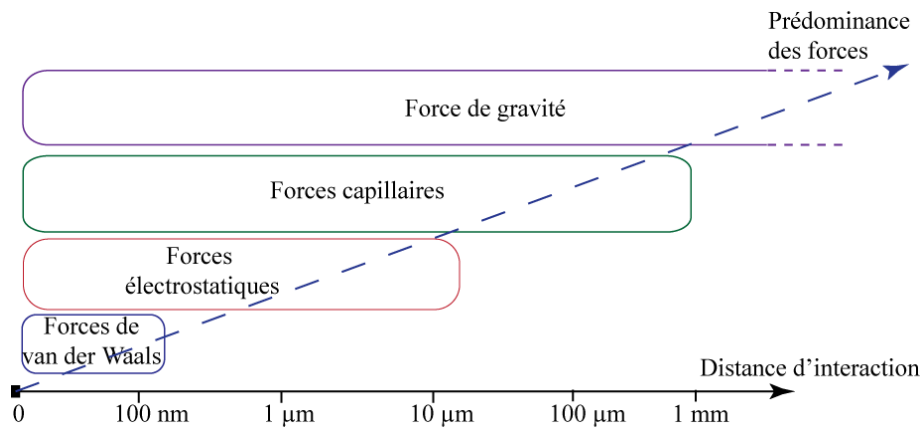


FIG. 1.31 – La prédominance des forces de surface à l'échelle microscopique.

Les forces de contact

Elles apparaissent lors d'un contact entre deux surfaces ce qui arrive fréquemment en micro-assemblage. Elles sont la conséquence des déformations locales lors du contact et sont caractérisées par l'énergie nécessaire pour rompre le contact [RC08]. Dans le cadre du micro-assemblage et de la micromanipulation, on considère la force de pull-off qui

¹⁰pour une surface sphérique

correspond à la force nécessaire pour rompre un contact entre deux objets.

Une approche basée sur les théories de contact mécanique permet de faire une première approximation de la force de pull-off par les modèles de Hertz, JKR (Johnson, Kendall, Roberts) et DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) [RC08]. Il faut noter que la contribution des forces de surface est aussi importante sur la force de pull-off. Celle-ci dépend de nombreux paramètres tels que le type des matériaux, les rugosités et les formes des surfaces en contact, la température et l'humidité de l'environnement. Dans le cadre du micro-assemblage, la rupture d'un contact se produit régulièrement, soit entre le substrat et le composant, soit entre le composant et le préhenseur. De plus, les surfaces en contact sont souvent des surfaces planes alors que les estimations de la force de pull-off sont souvent faites pour des contacts sphère/plan. Ce qui conduit au constat qu'il y a un réel manque de connaissances sur les forces de pull-off pour des contacts plan/plan.

1.4.2 Les limites technologiques

Des limites technologiques freinent l'automatisation du micro-assemblage. Parmi ces limitations, on peut citer :

- le manque de système de positionnement à grande course et à haute précision subsiste. En effet, il est difficile de réaliser des systèmes possédant des courses millimétriques voir centimétriques avec des précisions nanométriques. Ainsi, les systèmes à actionnement par moteur à courant continu offrent des grandes courses mais présentent des jeux de plus de $2 \mu\text{m}$ (par exemple les tables de positionnement Physik Instrumente série M-11x.1DG et M-11x.1xS). En plus, les systèmes de positionnement sont souvent choisis en faisant un compromis entre la dynamique et la force de blocage. Ainsi, des activités de recherche se concentrent sur le développement de micro-actionneurs, l'étude des systèmes robotiques et la commande des systèmes non linéaires ;
- les limitations des systèmes de perception adaptés au micromonde freinent l'automatisation. Pour la mesure en position, les microscopes optiques sont caractérisés par leur encombrement, leur faible profondeur de champ, leur champ de vue extrêmement réduit et leur forte sensibilité à l'éclairage. La perception par MEB (Microscope Electronique à Balayage) offre une profondeur de champ infinie mais avec un temps de réponse de quelques centaines de millisecondes [RC08]. Pour la mesure de force dans la plage caractéristique du micromonde (nN à quelques mN), on observe très peu de techniques de mesure multi-axes disponibles sur le marché car la calibration de ces capteurs est encore en cours d'étude. Les capteurs existant sont encore à l'état de prototype de laboratoire [BMN09b, BMN09a, Che09] ;
- plus généralement, les outils de mesure ne foisonnent pas pour l'échelle micro. En effet, quand il s'agit de réaliser des mesures sur des échantillons de taille submillimétrique, les systèmes de métrologie conventionnels ne sont pas adaptés et surtout ils sont très chers. Il faut recourir à l'adaptation des systèmes ou à l'utilisation d'outils très peu flexibles. Par exemple pour des mesures d'angle sur un échantillon millimétrique, on ne peut pas utiliser un interféromètre à plusieurs têtes

car la distance qui sépare les têtes est de plus de 15 mm donc plus grande que l'échantillon.

Pour parvenir à l'automatisation des tâches de micro-assemblage, des verrous, tant scientifiques que technologiques, restent à lever. Des recherches sont en cours dans le monde entier sur ces différents points et les avancées sont attendues.

1.5 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté les MOEMS et leur fabrication. Le réel besoin en MOEMS dans des domaines d'applications divers et variés a été mis en avant. Des MOEMS commerciaux et au stade de la recherche ont été pris pour exemple. Leur fonctionnement et leur fabrication ont surtout attiré notre attention. L'apport du micro-assemblage sur la fabrication des microsystèmes a été discuté et les différents résultats de micro-assemblage montrent la pertinence de cette approche. Le micro-assemblage constitue une réponse prometteuse sur la fabrication de MOEMS hybrides 3D avec des éléments optiques hors plan. Pour répondre aux besoins de systèmes génériques pour la fabrication des MOEMS, un nouveau concept de MOEMS qui combine les avantages de la microfabrication et l'apport du micro-assemblage est étudié dans le chapitre 2. Les MOEMS à faisceau se propageant dans l'espace libre font l'objet d'une attention particulière.

Des verrous tels que la compréhension du micromonde et les limites technologiques restent à lever pour l'automatisation des tâches complexes de micro-assemblage. La présence des contacts plan/plan durant le micro-assemblage implique la nécessité d'estimer la force de pull-off pour des contacts plan/plan. L'estimation de la force de pull-off pour un contact plan/plan et leurs conséquences sur le micro-assemblage sont abordées dans le chapitre 3.

Afin de préserver les micro-objets et accomplir des tâches automatisées, ajoutée à cela l'importance des forces d'interaction, le choix d'un système robotique et une étude fine de la force de serrage lors de présence de perturbation sont proposés dans le chapitre 4. L'automatisation des tâches permet d'augmenter les cadences d'assemblage, d'améliorer la précision et la répétabilité des opérations. La maîtrise des forces d'interaction entre le micro-objet et son environnement et le positionnement fin des micro-objets en général, des éléments optiques en particulier, sont essentiels durant le micro-assemblage. Le chapitre 5 propose une structure de commande permettant le positionnement automatisé d'un micro-objet dans une rainure tout en détectant les interactions entre le micro-objet et la rainure.

Chapitre 2

MOEMS hybrides 3D reconfigurables par micro-assemblage robotique téléopéré

Dans ce chapitre, l'assemblage des MOEMS à faisceau se propageant dans l'espace libre est étudié. Un état de l'art des MOEMS existants est fait et un cahier des charges d'un système générique permettant la conception de différents MOEMS est établi. Il fait apparaître le manque de bancs optiques génériques et reconfigurables pour la fabrication de divers systèmes optiques et qui feront l'objet de notre étude. Un concept de banc reconfigurable à faisceau se propageant dans l'espace libre est présenté. Le besoin d'intégrer divers éléments venant de filières de fabrication différentes est résolu par l'apport du micro-assemblage. Les premiers résultats d'assemblage en mode téléopéré sont présentés et l'automatisation des tâches d'assemblage est discutée.

Sommaire

2.1	Introduction	44
2.2	Couple MOEMS et système de micromanipulation et/ou de micro-assemblage	44
2.2.1	Des bancs optiques pour la fabrication des MOEMS	44
2.2.2	Spécifications d'une nouvelle génération de MOEMS	56
2.3	Proposition d'un concept de MOEMS hybrides reconfigurables	60
2.3.1	L'alignement passif par sillons en V	60
2.3.2	Fixation réversible à base d'éléments flexibles	60
2.3.3	La dépose lors du positionnement sur le substrat	62
2.3.4	Le porteur de lentille	63
2.3.5	La fabrication des substrats et des supports optiques	64
2.4	Proposition d'un système d'assemblage	67
2.4.1	Choix du préhenseur	67
2.4.2	Le système robotique	70
2.4.3	La séquence d'assemblage	72
2.4.4	Les résultats obtenus	73
2.5	Vers l'automatisation de l'assemblage	76
2.6	Conclusion	79

2.1 Introduction

La réalisation des MOEMS peut se faire par la conception de banc optique sur lequel le faisceau lumineux se propage dans l'espace libre. Les différents éléments optiques sont alors positionnés sur un substrat pour guider et modifier le faisceau optique depuis une source lumineuse jusqu'aux détecteurs (*cf.* FIG. 2.1). Dans le chapitre précédent, nous avons vu l'intérêt des MOEMS faisant intervenir une étape de micromanipulation ou de micro-assemblage lors de leur fabrication. Ces étapes autorisent la fabrication de MOEMS 3D à base d'éléments venant de différentes filières de fabrication. Dans ce sens, les bancs optiques existants de l'échelle meso à micro sont présentés.

2.2 Couple MOEMS et système de micromanipulation et/ou de micro-assemblage

2.2.1 Des bancs optiques pour la fabrication des MOEMS

Pour la fabrication de MOEMS, plusieurs solutions ont été proposées et l'utilisation de bancs optiques, sur lesquels un substrat de référence permet d'intégrer les différents éléments optiques constitue une solution déjà utilisée. La réalisation d'un microbanc optique est une problématique complète rassemblant les challenges de préhension, de

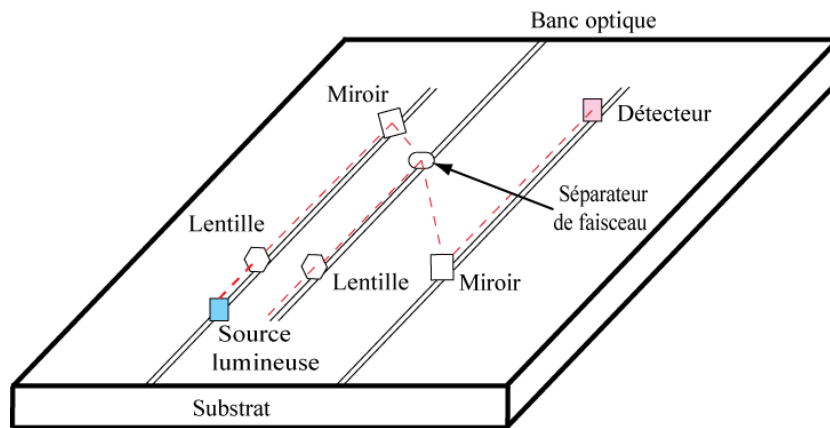


FIG. 2.1 – Illustration d’un banc optique composé de différents éléments optiques.

positionnement 3D, d’alignement de plusieurs éléments, d’intégration et de commande d’actionneurs pour scanner ou dévier un faisceau, de solidarisation et le dernier, mais non le moindre, de fabrication des éléments optiques. Pour assurer le bon fonctionnement des MOEMS, l’alignement des éléments optiques sur le banc est une phase critique à cause de la miniaturisation croissante [BB05]. Deux techniques d’alignement peuvent être utilisées :

- l’alignement passif qui se base sur l’utilisation de références pour garantir la position d’un élément optique ;
- l’alignement actif qui optimise un critère optique pour évaluer le positionnement d’un élément optique.

Des travaux ont été réalisés dans ce sens, ils sont présentés successivement dans ce qui suit.

L’équipe du Professeur M. C. Wu & le Professeur K. S. J. Pister

Cette équipe du Berkeley Sensor & Actuator Center aux Etats-Unis mène des travaux sur la fabrication de bancs optiques à faisceau se propageant dans l’espace libre (“ *Free Space Micro Optical Bench* ”). Ils utilisent un substrat de référence pour positionner les composants optiques tels que des lentilles de Fresnel, miroirs, séparateurs de faisceau et des systèmes de positionnement précis [WYLP95, LSLW97, MWP97]. Les lentilles, les miroirs et les lames semi-réfléchissantes sont microfabriqués sur le substrat par micro-usinage de surface. Ils sont ensuite soulevés à l’angle désiré (45° ou 90°) par un système à base de ressort de torsion, de verrouillage flexible et d’une liaison entre le substrat et le support optique par un axe et une charnière (cf. FIG. 2.2 -(a)). Une version avec un verrouillage latéral (cf. FIG. 2.2 -(b)) obtenu par deux fixations supplémentaires sur chaque côté de l’élément optique permet de rigidifier le système. La mise en place de l’ensemble nécessite une phase de manipulation lors de laquelle il faut soulever les éléments microfabriqués. Un défaut d’inclinaison inférieur à $0,5^\circ$ peut être obtenu. Comme

le montre la figure FIG. 2.2 -(c), un banc optique utilisant une source par hybridation de diode laser a été réalisé. Cette source est assemblée par un alignement passif sur le substrat. Le diamètre des lentilles de Fresnel est de $280 \mu\text{m}$ et la hauteur du faisceau par rapport au substrat est de $254 \mu\text{m}$.

A partir de ce concept, une tête de lecture optique a été réalisée [LSLW96] mais égale-

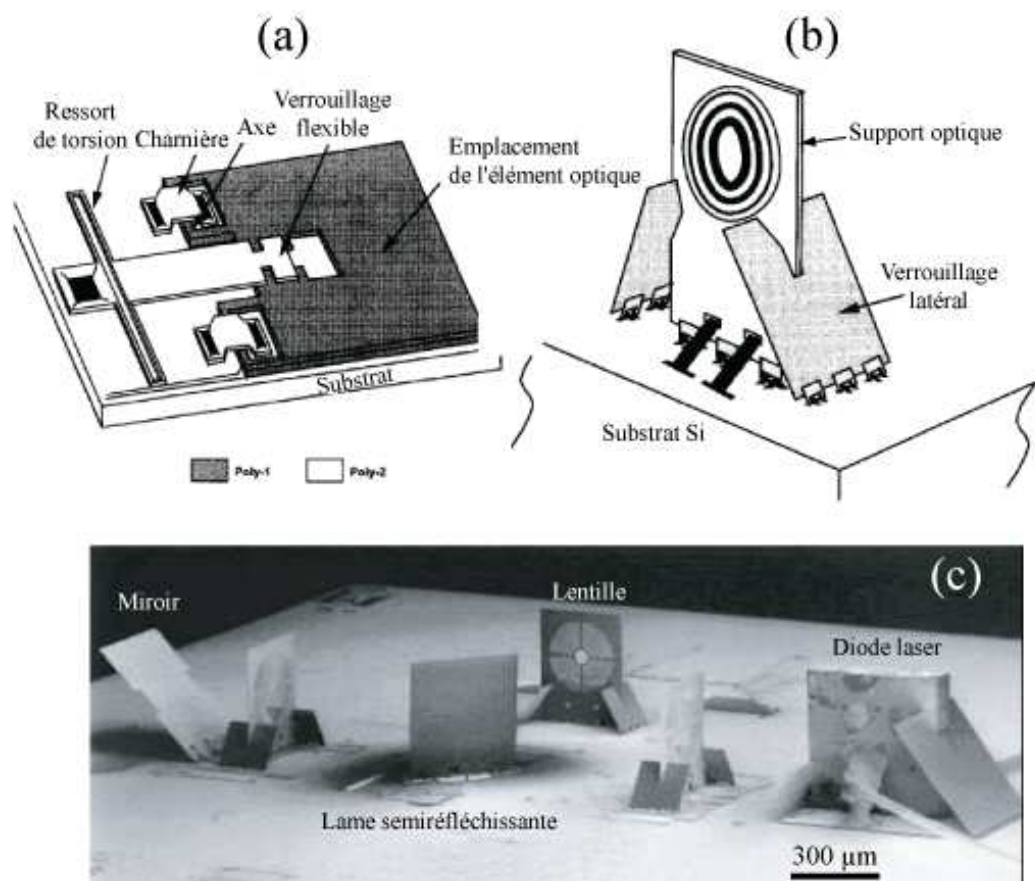


FIG. 2.2 – (a) Schéma de principe d'un élément optique après la microfabrication, (b) version utilisant un verrouillage latéral, (c) banc optique obtenu par micro-usinage de surface et hybridation de diode laser [WFS00].

ment, un système de diffraction et un interféromètre de Fabry Pérot utilisant un support rotatif intégré sur le substrat et portant un motif de diffraction ou un miroir semi réfléchissant [LA95, WYLP95].

L'utilisation de cette technique pour la fabrication des bancs optiques nécessite le choix préalable des composants et de leurs emplacements. Elle n'autorise pas l'intégration des éléments non planaires (comme une lentille sphérique) et l'adaptation de ce système pour réaliser d'autres fonctions sans faire une nouvelle conception. La phase de manipulation se limite au soulèvement des éléments microfabriqués.

L'équipe du Professeur R. Clavel

Cette équipe de l'EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) en Suisse a développé l'O-SMD ("Optical Surface Mounted Device") qui est un composant optique obtenu par une technique d'assemblage. Elle dérive de la technique SMD utilisée en électronique où un substrat d'acier inox reçoit des composants fixés par soudure. Les dimensions des composants (miroirs, fibres optiques, lentilles, lames séparatrices, etc.) sont de quelques millimètres et nécessitent une haute précision de positionnement. Ainsi, ils sont montés dans une monture (10 mm x 10 mm x 4 mm) équipée de trois calottes sphériques à sa base assurant la liaison avec le substrat (cf. FIG. 2.3). Afin de favoriser la miniaturisation et améliorer le positionnement, la technique TRIMO-SMD (*Tridimensionnalisé Miniaturized Optical Surface Mounted Device*) repousse les limites de la technique O-SMD.

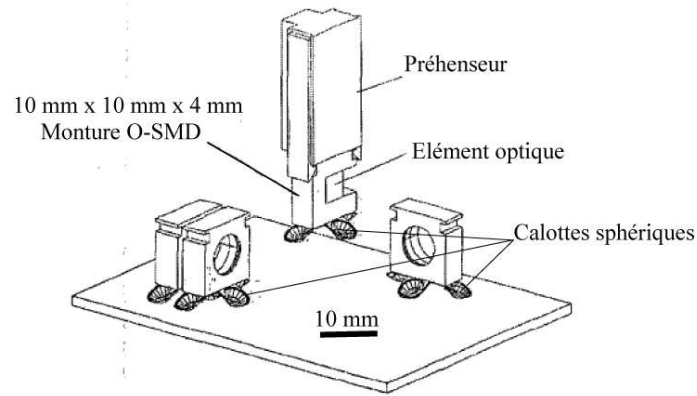


FIG. 2.3 – Illustration de la technique O-SMD [Scu00].

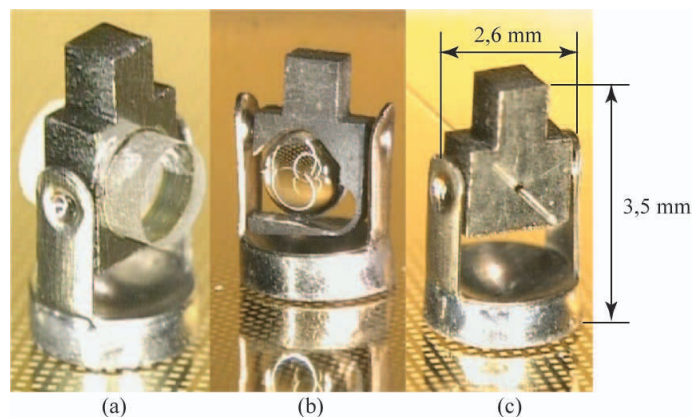


FIG. 2.4 – TRIMO composants portant : (a) un miroir, (b) une lentille, (c) une fibre optique [Scu00].

Les dimensions de la monture sont réduites à 3,5 mm x 2,6 mm x 2 mm (*cf.* FIG. 2.4). Une technique de fixation utilisant la fonte d'une goutte ("bump") d'étain par chauffage laser permet la solidarisation de la monture sur le substrat après un alignement actif [Scu00, SWG⁺05]. Les étapes d'assemblage et de solidarisation sont montrées sur la figure FIG. 2.5. Elles sont effectuées sur une station d'assemblage nommée SIXTIFF, équipée de 6 degrés de liberté (*cf.* FIG. 2.6).

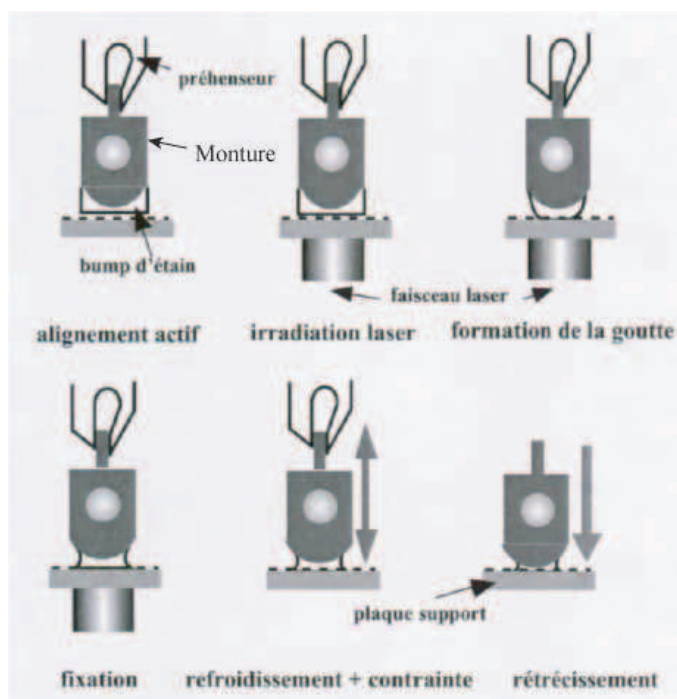


FIG. 2.5 – Les étapes d'assemblage de la technique TRIMO-SMD [Scu00].

La caractérisation des éléments assemblés effectuée par mesure laser et théodolite a permis d'obtenir des défauts de positionnement linéaires de $0,7 \mu\text{m}$ (3σ) et angulaires de $300 \mu\text{rad}$ ou $0,017^\circ$ (3σ). Cette technique a permis de réaliser des prototypes chez *Leica Geosystems* comme le lidar optique¹ montré sur la figure FIG. 2.7.

Cette technique présente l'avantage d'être flexible car les emplacements des éléments optiques ne sont pas définis à l'avance. La dimension des montures avec un élément

¹Système de mesure de distance basé sur l'analyse des propriétés optiques d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. Il est utilisé en archéologie, géographie, géologie, ...

optique qui fait plus de 3,5 mm x 2,6 mm x 2 mm constitue le point faible de cette technique. La haute température pour assurer la fonte de la goutte d'étain peut dégrader les éléments optiques. Ce système peut être réversible en réalisant la refonte de l'étain.

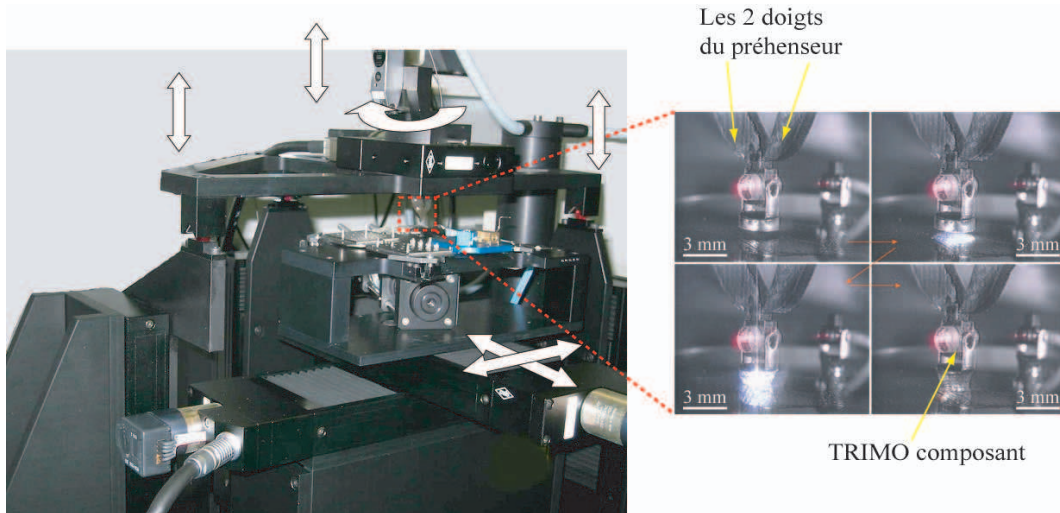


FIG. 2.6 – Station d'assemblage utilisée pour la technique TRIMO-SMD. "SIXTIFF" équipée de 6 degrés de liberté pour un volume de travail de $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ [Scu00].

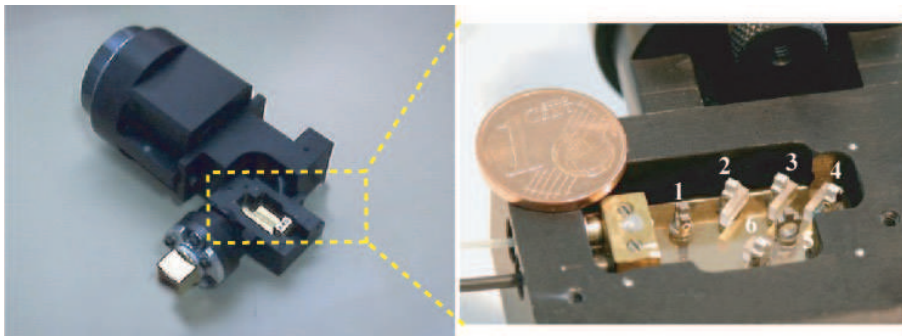


FIG. 2.7 – Prototype d'un système de lidar optique avec 6 TRIMO composants [Scu00].

L'équipe du Professeur H. P. Herzig

Cette autre équipe de l'EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) en Suisse travaille sur la conception de microspectromètres miniatures à base de transformée de Fourier par l'intermédiaire d'un interféromètre de Michelson. Deux modes de fonctionnement ont été proposés (cf. FIG. 1.3) : le premier utilise un miroir incliné à un angle connu

qui est un Michelson stationnaire et le second à base de miroir mobile actionné par un système capacitif pour effectuer le balayage [Man02]. Le microspectromètre stationnaire exploite l'étalement des franges d'interférence obtenu par une variation de différence de marche (δ) due à l'inclinaison d'un miroir. Pour mesurer les franges d'interférence (utiles à l'analyse du spectre), un capteur linéaire est utilisé. Il est de type Hamamatsu 1024 pixels (40,6 mm x 10,4 mm) couvrant la gamme de longueurs d'onde de 360 nm à 1100 nm avec une résolution de 10 nm. Il présente l'inconvénient d'avoir une dimension dictée par le capteur linéaire c'est-à-dire centimétrique. En plus, l'introduction d'un angle connu sur un miroir (M_2 de la figure FIG. 1.3) rend complexe la réalisation du système.

Sur le Michelson à balayage, l'idée est d'exploiter les techniques de microfabrication afin de réaliser un miroir mobile actionné par des peignes interdigités type push-pull [NS⁺02]. Le microspectromètre utilise 2 configurations : la première avec un cube semi réfléchissant de 3 mm de côté pour une longueur d'onde visible et la seconde avec une lame semi-réfléchissante en silicium pour une longueur d'onde infra rouge (cf. FIG. 2.8). Le système présenté utilise des emplacements fixes des éléments optiques, en effet les miroirs sont fabriqués sur la tranche du substrat de silicium. Le système est fortement dépendant de la qualité de la microfabrication et les surfaces actives des éléments optiques sont aussi limitées car elles sont fabriquées sur la tranche du silicium.

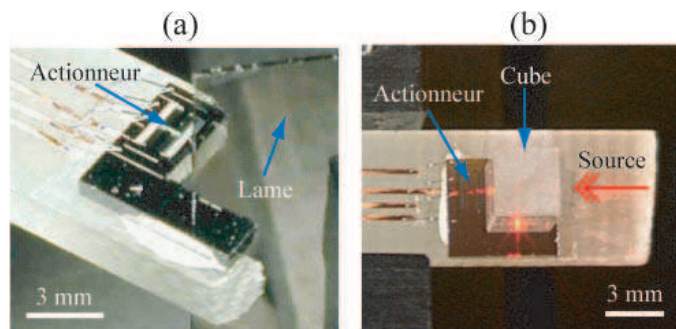


FIG. 2.8 – Vue générale de l'installation avec (a) une lame sémi-réfléchissante plate et (b) une lame séparatrice cubique.

L'équipe du Professeur Descours

Cette équipe de l'University of Arizona aux Etats-Unis propose le développement d'un banc optique appelé MOT ("Micro Optical Table") afin d'assurer la miniaturisation des éléments optiques et leur positionnement grâce à l'alignement passif [LDS⁺99]. Un substrat avec des emplacements dédiés (cf. FIG. 2.9 -(a)) permet de recevoir les éléments optiques fabriqués par procédé sol-gel² comme montré sur la figure FIG. 2.9 -(b).

Les résultats montrés sur la figure FIG. 2.9 - (c) ont été réalisés en utilisant la station d'assemblage de Sandia National Laboratories. Elle est équipée d'un préhenseur à 2 doigts

²Technique permettant d'obtenir des matériaux vitreux par polymérisation de précurseurs moléculaires

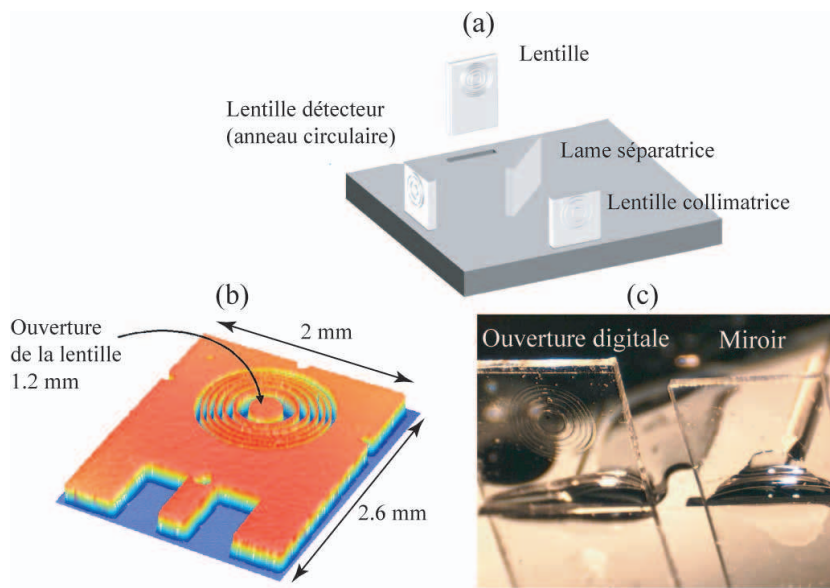


FIG. 2.9 – (a) le concept de MOT présenté avec différents éléments, (b) un composant à ouverture digitale, (c) deux éléments optiques montés et solidarisés sur un banc optique (MOT) [LDS⁺99, DKRL02].

de serrage fabriqués par LIGA³. La solidarisation est effectuée par une colle UV⁴. Des résultats de caractérisation ont également été obtenus par l'utilisation de photos MEB du miroir assemblé sur la figure FIG. 2.9 -(c). Des erreurs de positionnement linéaire de plus de 4 μm et angulaire de plus de 2° ont été obtenues [LDS⁺99].

Le MOT peut être utilisé pour la fabrication d'un microscope sous forme de stylo pour la détection précoce de cancer [DKRL02]. Le concept est proposé dans [DKRL02] avec un substrat de 3 mm x 9 mm et les éléments qui font 2 mm x 2 mm.

Le système d'emplacement dédié n'offre pas une flexibilité des systèmes donc ce concept ne permet pas de réaliser un système générique. Par ailleurs, l'utilisation de la colle UV assure une liaison définitive d'un élément optique au substrat donc le système est non reconfigurable.

L'équipe du Dr. Wolffenbuttel

Cette équipe de Delft University of Technology aux Pays-Bas a étudié un spectromètre de Michelson utilisant un actionnement magnétique pour le balayage [Wol05, WSMK05]. Le substrat contenant les éléments optiques est fabriqué par LIGA [SMW03]. Le miroir mobile se déplace sur une plage de 300 μm permettant ainsi une résolution théorique de 10 nm ($\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\delta_{max}}$) pour une longueur d'onde proche de l'infrarouge (1540 nm). Les dimensions du séparateur de faisceau sont de 3,3 mm et le système complet

³RöntgenLithographie, Galvanoformung, Abformung

⁴ultra-violet

occupe une surface de 11,5 mm x 9,4 mm (cf. FIG. 2.10). Le faisceau de 380 μm de diamètre se propage à 235 μm de haut par rapport au substrat. Le système proposé

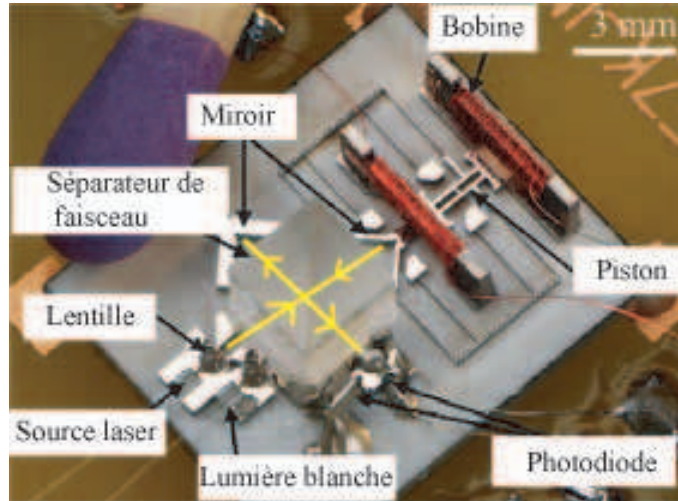


FIG. 2.10 – Microspectromètre à base de substrat NiFe utilisant un actionnement magnétique pour le balayage.

a permis d'obtenir une résolution de 25 nm à la longueur d'onde de 1540 nm. L'imperfection des éléments optiques et la résolution du déplacement du miroir mobile sont les causes principales de la baisse de la résolution du système. Dans [SMW03], les bobines, les deux lentilles (diamètre 650 μm) et le séparateur de faisceau sont assemblés de manière passive. Les emplacements des miroirs et des lentilles sont prédéfinis dès la conception du système. La qualité des miroirs, qui sont usinés sur la tranche du substrat en nickel, dépend fortement de la qualité d'usinage.

L'équipe du Dr. Popa

Cette équipe de l'Institut ARRI au Texas, États-Unis, a développé un microspectromètre de type Michelson sur un substrat de silicium de 1 cm x 1 cm. Les éléments optiques sont assemblés par l'intermédiaire d'une station de micro-assemblage nommé μ^3 possédant 19 degrés de liberté. Les miroirs (1000 x 800 μm^2), les porte-lentilles et le séparateur de faisceau pour l'infra rouge sont assemblés par l'intermédiaire d'un préhenseur passif rigide "jammer". Les lentilles de 800 μm et le séparateur de faisceau pour le visible (cube de 1,5 mm de côté) sont assemblés par un préhenseur à dépression [DZL⁺07, DSPS08a]. Une phase de solidarisation définitive est réalisée par colle UV. Le balayage est effectué par un actionneur électrothermique (course de 45 μm pour 24 V d'alimentation) permettant de déplacer le miroir mobile (cf. FIG. 2.11 et FIG. 2.12).

L'assemblage du microspectromètre s'effectue en suivant la séquence d'assemblage suivante :

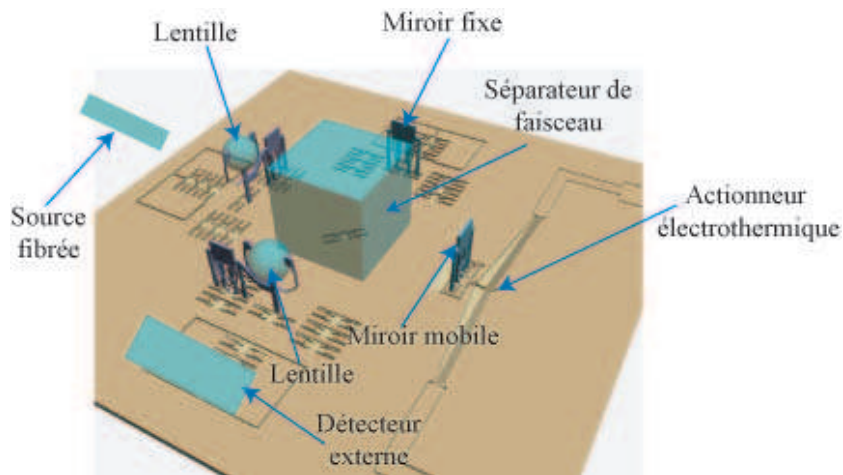


FIG. 2.11 – Schéma de principe de microspectromètre.

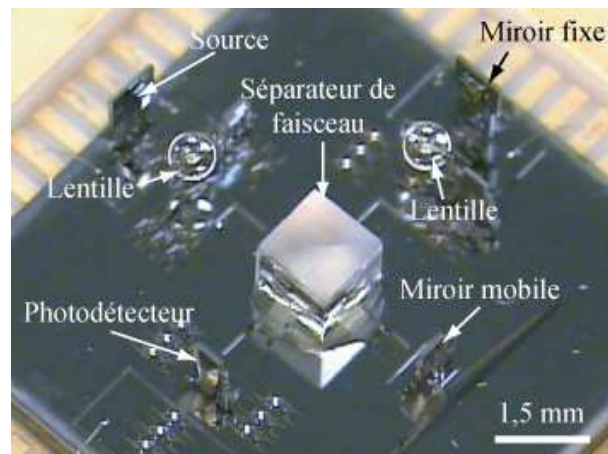


FIG. 2.12 – Vue complète d'un système assemblé.

- mise en position des deux porte-lentilles par le jammer ;
- insertion des lentilles dans les portes lentilles par le préhenseur à dépression ;
- mise en position des deux miroirs par le jammer ;
- mise en position du séparateur de faisceau par le préhenseur à dépression.

Les défauts de positionnement des différents éléments sont corrigés par la position du séparateur de faisceau. Ces défauts de positionnement sont dus aux tolérances de fabrication du substrat, des éléments assemblés et à la précision du système robotique. En effet, le séparateur de faisceau étant libre dans les 6 degrés de liberté, il peut être positionné dans une configuration permettant de superposer les deux spots venant des deux miroirs sur l'écran d'observation [DSPS08b, RDM⁺09].

Le système présenté dispose d'emplacements fixes le rendant peu flexible. Les fixations

entre les éléments optiques et le substrat sont irréversibles donc le système est non reconfigurable. Une phase de solidarisation définitive est appliquée en utilisant de la colle UV et s'avère très délicate pour la solidarisation du miroir mobile sur l'actionneur.

Le tableau [TAB. 2.1](#) propose un récapitulatif des travaux décrits auparavant. On observe que les emplacements des éléments optiques sont souvent définis dès la conception du MOEMS et que les systèmes existants n'offrent pas une réversibilité des liaisons entre le substrat et les supports optiques. Seule la technique TRIMO-SMD autorise une variation des emplacements après la conception et la liaison peut être réversible en effectuant la refonte de l'étain.

On a pu observer que les bancs optiques présentés utilisent une source laser avec différentes longueurs d'onde. Les dimensions des éléments optiques peuvent varier de quelques centaines de μm à quelques mm. Pour les systèmes à faisceau visible, les dimensions des éléments optiques sont limitées par le séparateur de faisceau de 1,5 mm.

Les différents résultats présentés montrent que les systèmes réalisés utilisent et dépendent plus ou moins des différentes techniques de microfabrication.

La majorité des résultats présentés traite de la fabrication de microspectromètre qui est un outil de mesure très utilisée dans diverses applications.

Afin de développer un concept de MOEMS proposant de nouvelles fonctionnalités et se basant sur un système générique, nous allons établir un cahier des charges.

Equipe de recherche/ Références	Fonction	Dimensions des éléments optiques	Phase de manipulation ou de micro-assemblage/Liaison	Défauts de positionnement	Actionneur intégré sur le substrat	Dépendance à la micro-fabrication
Pr. Wu et Pr. Pister [WYLP95, LSLW97, WFS00]	Tête de lecture, interféromètre Fabry Pérot	inf. 500 μm de côté	Soulever les éléments/Non réversible	inclinaison inf. 0,5°	Oui	Élevée
Pr. Clavel [Scu00, SWG+05]	Lidar	2 mm 2,6 mm x 3,5 mm	Micro-assemblage/Réversible	0,7 $\mu\text{m}/$ 0,017°	Non	Aucune
Pr. Herzig [Man02, NCD+02]	Microspectromètre	3 mm/-	Mise en place du BS/Non réversible	-	Oui	Très élevée
Pr. Descours [LDS+99, DKRL02]	Microscope miniature	2 mm x 2 mm	Micro-assemblage/Non réversible	inf. 4 $\mu\text{m}/$ inf. 2°	Non	Faible
Pr. Wolfenbuttel [Wol05, WSMK05]	Microspectromètre	3,3 mm	Micro-assemblage/Non réversible	-	Oui	Élevée
Dr. Popa [DSPS08a, DSPS08b, RDM+09]	Microspectromètre	1,5 mm	Micro-assemblage/Non réversible	inf. 1,5°	Oui	Élevée

TAB. 2.1 – Tableau récapitulatifs des travaux sur les MOEMS à base de bancs optiques.

2.2.2 Spécifications d'une nouvelle génération de MOEMS

Le concept de MOEMS à base de banc optique sera proposé en respectant un cahier des charges que nous allons établir. Ce cahier des charges est composé de trois catégories de contraintes :

- les propriétés des bancs optiques ;
- les contraintes de positionnement des éléments optiques sur le substrat ;
- les dimensions des éléments optiques.

Les propriétés des nouveaux bancs optiques

Deux points non couverts par les systèmes existants seront traités avec attention : la flexibilité et la reconfigurabilité. La flexibilité se traduit par des emplacements d'éléments optiques sur un intervalle et non un emplacement fixe. Ainsi, le banc optique est capable de prendre en compte les défauts des éléments optiques sans dégrader les performances du système. La reconfigurabilité est la propriété des bancs optiques permettant la modification des positions des éléments optiques (souvent sur des supports optiques) malgré sa mise en position. Elle dépend surtout de la nature de la liaison entre le substrat et le support optique. Pour assurer une reconfigurabilité, cette liaison doit être réversible. La flexibilité et la reconfigurabilité ouvrent la perspective de fabriquer des bancs optiques servant à l'étalonnage mais également à la caractérisation des éléments optiques. De tels nouveaux bancs optiques seront alors génériques et permettront la fabrication de diverses fonctions optiques.

Les contraintes de positionnement des éléments optiques sur le substrat

La précision de positionnement des éléments constituant le banc optique est un critère important lors de sa conception afin d'assurer les performances des systèmes optiques. Afin de mieux comprendre les contraintes de positionnement, nous allons nous intéresser au couplage de deux fibres optiques monomodes. Soit une fibre source⁵ avec un diamètre de cœur de $8,5 \mu\text{m}$ et un diamètre de cladding de $125 \pm 0,7 \mu\text{m}$. La fibre réceptrice possède les mêmes caractéristiques. Le positionnement relatif des deux fibres est caractérisé par un décalage d_{dec} , une distance de séparation d_{sep} et un angle d'inclinaison θ (cf. FIG. 2.13). Lors d'un positionnement d'élément optique sur un banc (cf. FIG. 2.14), on peut interpréter la distance de séparation par un défaut axial (suivant l'axe X), le décalage par un défaut latéral et un vertical (suivant l'axe Y et Z) et l'inclinaison par un défaut d'orientation sur un plan donné (roulis ou tangage ou lacet).

Le faisceau sortant de la source possède un profil de propagation gaussien typique d'une source laser. Son expression est donnée par l'équation (2.1) avec r la distance par rapport à l'axe du faisceau, w_z la distance par rapport à l'origine de l'axe du faisceau et I_0

⁵Les faisceaux dans les fibres optiques sont issus de source laser

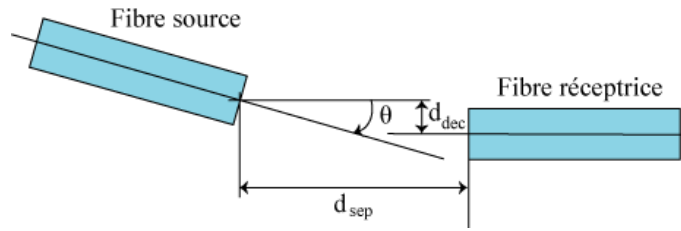


FIG. 2.13 – Les paramètres caractérisant le couplage de deux fibres monomodes.

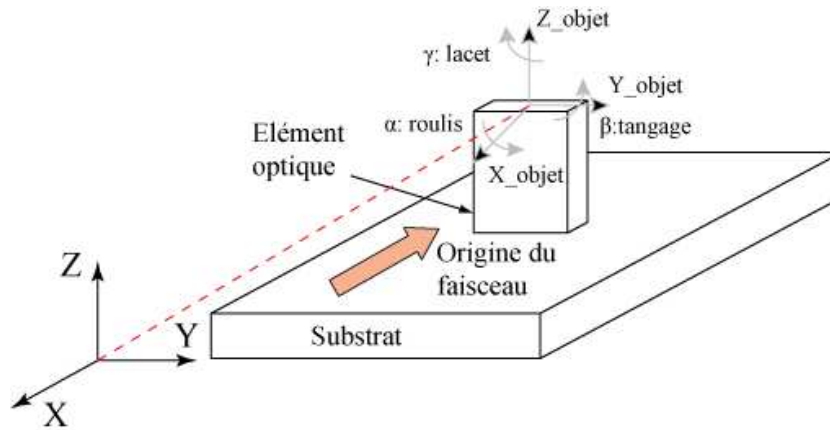


FIG. 2.14 – Le positionnement d'un élément optique sur un substrat.

l'intensité initiale à la sortie.

$$I(w_z) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{w_z^2}\right) \quad (2.1)$$

Le tableau TAB. 2.2 résume les pertes induites par les défauts de positionnement lors d'un couplage de fibres optiques.

On observe la faible influence de la distance de séparation d_{sep} sur les pertes. Par contre, une faible erreur de décalage et d'inclinaison induit une perte de même ordre de grandeur ($\approx 0,25$ dB). On retient le défaut de décalage d_{dec} qui représente la précision

Type de défauts	Expression	Perte
Décalage d_{dec}	$P_{dB} = 4,34 \frac{d_{dec}^2}{w_0}$	Pour $d_{dec} = 1 \mu\text{m}$, $P_{dB} = 0,2$ (4,5%)
Séparation d_{sep}	$P_{dB} = -10 \log \frac{1+4Z^2}{(1+2Z^2)^2+Z^2}$	Pour $d_{sep} = 20 \mu\text{m}$, $P_{dB} = 0,12$ (2,7%)
Inclinaison θ	$P_{dB} = 4,34 \left(\frac{\pi n_2 w_0 \theta}{\lambda}\right)^2$	Pour $\theta = 1^\circ$, $P_{dB} = 0,25$ (5,6%)

TAB. 2.2 – Les pertes lors d'un couplage pour une longueur d'onde $\lambda = 1550$ nm et un waist $w_0 = 4,6 \mu\text{m}$ ($Z = \frac{d_{sep}}{k n_2 w_0}$).

de positionnement latérale des éléments optiques sur un banc. Sa valeur limite de $1 \mu\text{m}$ est retenue pour la conception de notre futur banc optique.

Pour l'inclinaison, nous nous intéressons à l'autocollimation d'une source laser sur un miroir. Si α est l'inclinaison du miroir dans un plan donné (cf. FIG. 2.15 -(a)), et L est la distance du centre du miroir par rapport à la source, alors l'écartement entre la source et le faisceau réfléchi est régi par l'équation (2.2) :

$$D_{spot} = 2L \sin \alpha \quad (2.2)$$

Pour $L = 2500 \mu\text{m}$ et $\alpha = 0,2^\circ$, l'écartement vaut $D_{spot} = 17,4 \mu\text{m}$. Pour un diamètre de faisceau $d_{faisceau} = 10 \mu\text{m}$, la distance entre la source et le faisceau réfléchi correspond à une non superposition des faisceaux. Dans ces conditions, l'autocollimation n'est pas assurée.

Si on considère une réflexion sur un miroir placé idéalement à 45° . Le faisceau réfléchi forme un angle de 90° avec le faisceau incident comme montré sur la figure FIG. 2.15 -(b). Dans le cas d'une erreur d'inclinaison $\alpha = 0,2^\circ$ du miroir et d'une distance entre la source et le miroir $L = 2500 \mu\text{m}$, l'écartement de la position du faisceau est $D_{spot} = L \tan 2\alpha = 17,4 \mu\text{m}$. Si le faisceau de diamètre initial $10 \mu\text{m}$ doit passer dans une ouverture pour réduire son diamètre alors il n'y a aucune proportion du faisceau qui passe à travers.

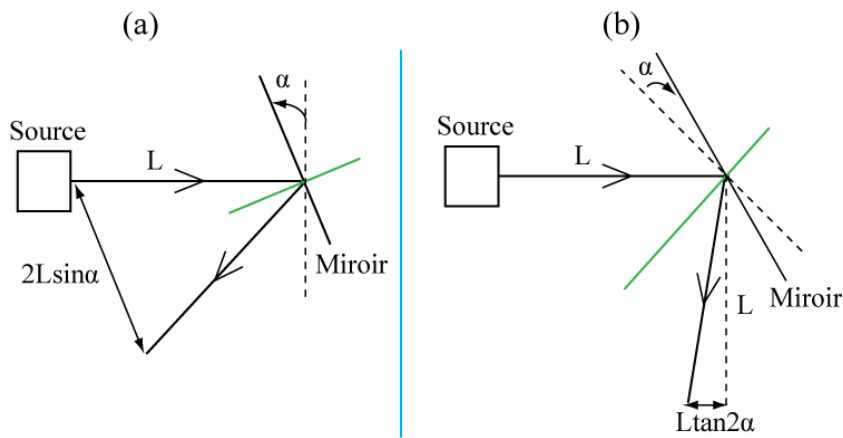


FIG. 2.15 – L'effet de l'erreur d'inclinaison α sur : (a) l'écartement entre la source et le faisceau réfléchi pour une autocollimation, et (b) l'écartement du faisceau lors d'une réflexion à 45° .

Sur les bancs optiques, le positionnement des éléments optiques ne doit pas dégrader le fonctionnement du système. Ainsi, les fonctions simples comme l'autocollimation et la réflexion doivent être assurées. Nous retenons la précision d'inclinaison de $0,1^\circ$ pour le positionnement des éléments optiques.

Appliquons cette valeur d'inclinaison à l'application la plus rencontrée qui est le microspectromètre. Dans le cas d'un microspectromètre (Michelson), le défaut d'inclinaison β d'un miroir introduit une augmentation Δd (cf. 2.3) de la différence de marche δ [Das09].

$$\Delta d = 2D \sin \beta \quad (2.3)$$

Pour ne pas dégrader les figures d'interférence, cette augmentation doit respecter la condition d'interférence décrite par l'équation 2.4.

$$\Delta d = 0,1\lambda \quad (2.4)$$

Ce qui conduit à une condition sur l'inclinaison limite sur l'équation (2.5).

$$\beta < \frac{\lambda}{20D} \quad (2.5)$$

Pour $D = 10 \mu\text{m}$ et $\lambda = 650 \text{ nm}$, on obtient $\beta < 0,2^\circ$. La valeur limite pour le bon fonctionnement du microspectromètre est donc supérieure à l'objectif fixé pour notre nouveau banc optique. On peut envisager de l'utiliser pour fabriquer un microspectromètre.

Les dimensions des éléments optiques

La fabrication des composants optiques à des dimensions millimétriques et submillimétriques a été montrée dans [WFS00, MWP97, DKRL02, DSPS08a]. Généralement, ils sont fabriqués à base de silicium micro-usiné sur lequel les motifs optiques sont sculptés. Le substrat peut être également réalisé par des techniques de microfabrication. Les différents processus de microfabrication sur silicium permettent d'obtenir des tolérances de fabrication très fines, qui peuvent alors être exploitées pour assurer un alignement passif. L'objectif visé est un substrat centimétrique et des supports optiques ayant des dimensions allant de quelques centaines de μm à environ 2 mm. Ces dimensions sont dictées par la limite technologique de la fabrication de certains éléments optiques comme le séparateur de faisceau pour le spectre visible de 1,5 mm.

En résumé, nous proposons que la conception du banc optique suive le cahier des charges suivant :

1. flexibilité et reconfigurabilité ;
2. solidarisation réversible ;
3. possibilité d'intégrer des éléments tridimensionnels et venant de différentes filières de fabrication sur le banc optique ;
4. système générique offrant un prototypage rapide ;
5. précision de positionnement linéaire inférieure à $1 \mu\text{m}$ et angulaire inférieure à $0,2^\circ$;
6. dimensions des éléments optiques élémentaires inférieures à 2 millimètres.

2.3 Proposition d'un concept de MOEMS hybrides reconfigurables

À partir de ce cahier des charges, nous proposons un concept de banc optique reconfigurable à faisceau se propageant dans l'espace libre ou RFS-MOB (*Reconfigurable Free Space Micro Optical Bench*). Il se base sur la technique de l'alignement passif par sillons en V, la fixation réversible par microressorts et l'utilisation du micro-assemblage dont l'apport a été discuté auparavant.

2.3.1 L'alignement passif par sillons en V

La technique de l'alignement passif par sillons en V a pris son essor lors de l'alignement et du couplage des fibres optiques [BB05]. Les sillons en V ont été microfabriqués pour assurer le positionnement des fibres optiques (cf. FIG. 2.16). Ils sont obtenus par usinage humide anisotrope dans une solution d'hydroxyde de potassium (*KOH*). Les surfaces ayant subi les gravures *KOH* possèdent une inclinaison de $54,74^\circ$ typique du plan cristallin $\langle 111 \rangle$ du silicium. Elle a permis de réduire considérablement le coût de ces opérations tout en assurant des précisions de positionnement à la limite des tolérances de fabrication.

Dans notre conception, deux sillons en V du substrat et des V saillants du support permettent l'alignement du support par rapport au substrat (cf. FIG. 2.17). L'alignement passif par les sillons en V améliore la précision sur le positionnement du support optique : le lacet, le roulis, la position latérale et verticale (cf. FIG. 2.14). Ils servent aussi de guide lors de la phase de positionnement fin. La largeur du sillon en V est fixée à $70 \mu\text{m}$ et leur profondeur à $50 \mu\text{m}$.

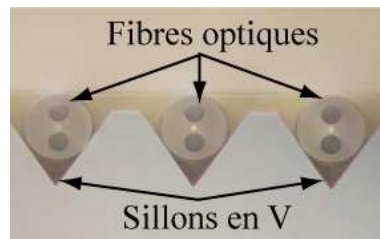


FIG. 2.16 – Positionnement par alignement passif des fibres optiques dans des sillons en V.

2.3.2 Fixation réversible à base d'éléments flexibles

Le support optique est la partie qui porte la fonction optique telle qu'une lentille, un miroir, une ouverture circulaire, etc. Pour assurer la fixation avec le substrat, il dispose d'une partie flexible permettant de générer une force de blocage suffisante une fois relâchée contre le V inversé de chaque côté de la rainure principale. Cela permet de plaquer les V saillants du support dans les sillons en V du substrat. La saisie d'un

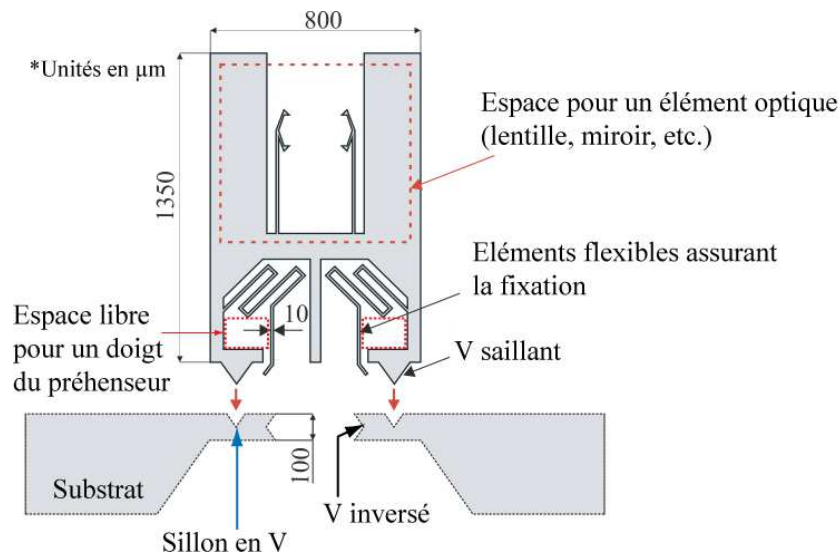


FIG. 2.17 – Dimensions et principe de fixation d'un support optique sur un substrat.

support s'effectue sur cette partie flexible lors des phases d'assemblage. L'espace libre pour chaque doigt du préhenseur est montré sur la figure FIG. 2.17 et mesure $168 \mu\text{m}$ de large et $112 \mu\text{m}$ de haut.

La fabrication de ces V inversés est une combinaison maîtrisée d'une technique de gravure sèche isotrope appelée DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) et d'une technique de gravure humide anisotrope par une solution d'hydroxyde de potassium (KOH). Cette technique est une première en microfabrication et a été réalisée par M. Sylwester BARGIEL dans le cadre du projet MIAAMI. Ces V inversés serviront de surface de contact avec l'élément flexible du support optique.

Pour définir les dimensions des supports optiques, nous choisissons une épaisseur de la couche device du wafer de $100 \mu\text{m}$. Cette valeur assure une très bonne qualité de gravure en DRIE du point de vue de l'inclinaison des tranches (*sidewall*). Elle constitue un compromis entre une largeur suffisante pour assurer une bonne stabilité du composant et une pas trop grande épaisseur pour garder la qualité des tranches. Elle est alors choisie comme épaisseur des supports optiques. La force de maintien est ensuite fixée à 2 mN et s'exerce sur une surface de contact de $45 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, une valeur que nous estimons suffisante pour attacher le support optique sur le substrat. Le maintien en position est également assuré par les forces de friction générées par les surfaces en contact (sillons en V/V saillants, V inversés/partie flexible). La force de serrage maximale est fixée à $2,6 \text{ mN}$ en accord avec les forces de blocage des actionneurs en micro.

Une étude par éléments finis a permis de définir les dimensions et la forme de cette partie flexible, la force maximale que l'on peut appliquer pour saisir le support optique et les contraintes maximales admissibles. Ces données sont regroupées dans le tableau TAB. 2.3.

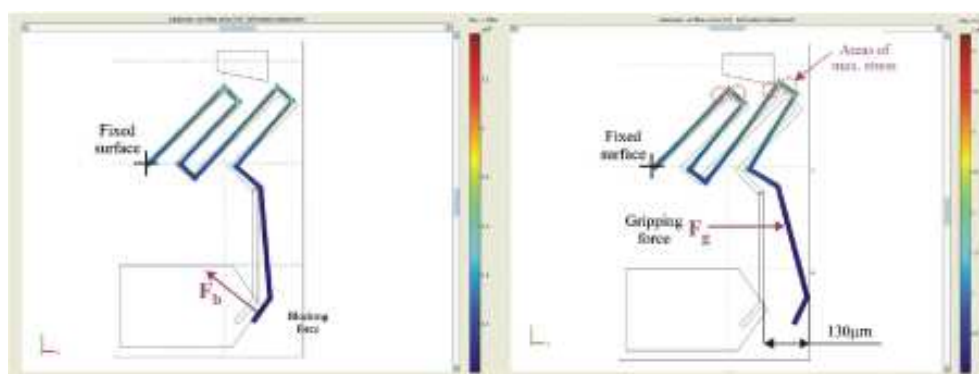


FIG. 2.18 – Simulation en éléments finis pour la conception de la partie flexible.

Déflexion max	130 μm
Force de serrage maximale	2,6 mN
Contrainte maximale	125 MPa
Force de maintien	2 mN

TAB. 2.3 – Les caractéristiques de la partie flexible d'un support optique pour une épaisseur de 100 μm .

Différents types de substrats ont été conçus afin de réaliser une variété de fonctions optiques :

- substrat à rainure droite ;
- substrat à rainure en croix avec un emplacement de séparateur de faisceau de 1,5 mm et 3 mm.

La figure FIG. 2.19 montre le concept de banc optique reconfigurable à faisceau se propageant dans l'espace libre. Ce concept favorise l'optimisation de la fabrication de chaque élément optique avant leur intégration par micro-assemblage sur un substrat.

2.3.3 La dépose lors du positionnement sur le substrat

L'utilisation des éléments flexibles offre plus que la réversibilité des liaisons supports optiques/substrat. Généralement la dépose de micro-objets est rendue difficile par les forces d'adhésion. Lorsque les doigts du préhenseur relâchent les éléments flexibles, la partie inclinée de ces derniers va toucher le V inversé et génère donc des forces de blocage supérieures aux force d'adhésion. La figure FIG. 2.20 montre les forces en présence lors de l'écartement des doigts pour relâcher le support optique.

La dépose s'effectue alors sans encombre et le maintien en position est assuré grâce aux forces générées par les éléments flexibles déformés et les forces de friction.

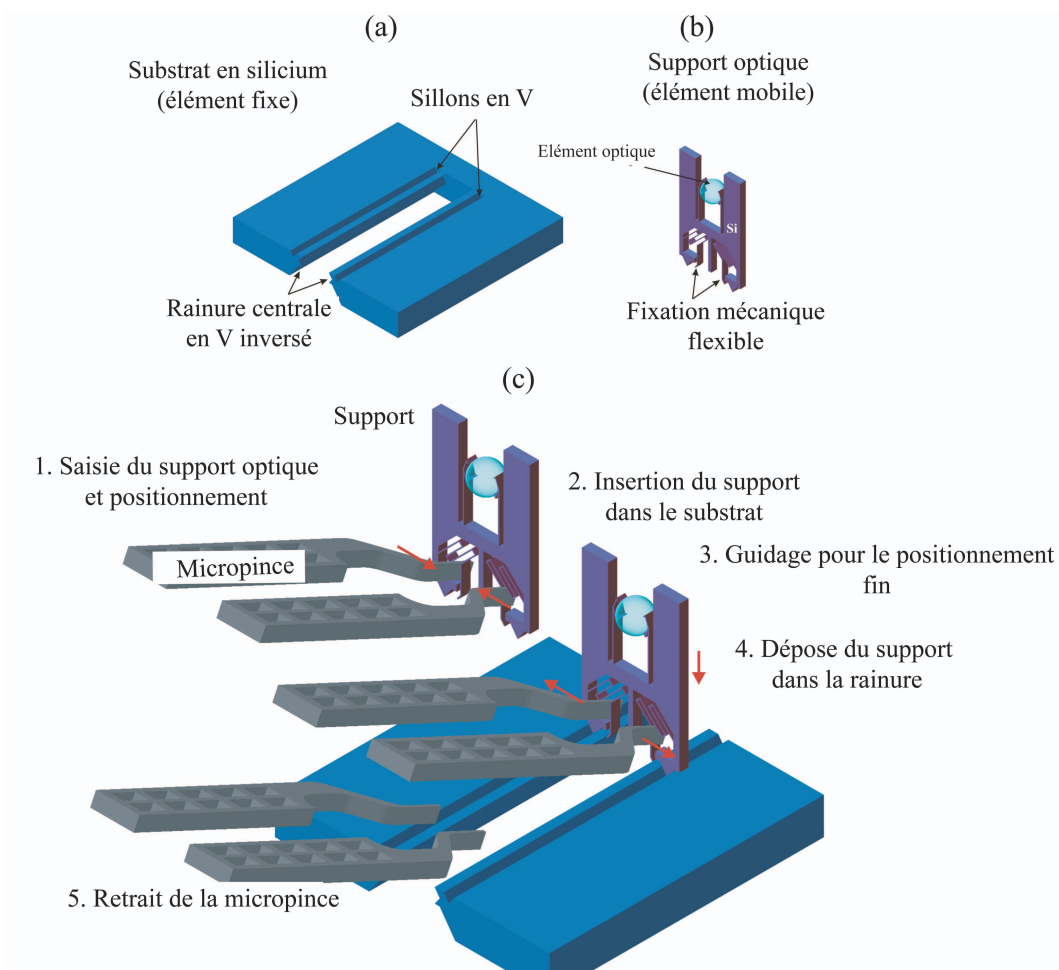


FIG. 2.19 – Illustration 3D du concept de microbancoptiques reconfigurables : (a) le substrat, (b) le support optique et (c) la séquence d'assemblage d'un support sur un substrat.

2.3.4 Le porteur de lentille

Afin d'intégrer une lentille sphérique sur un support optique, un système compliant en forme de double croche est mis sur l'espace dédié à l'élément optique. Le porteur de lentille est conçu pour maintenir une lentille sphérique de diamètre $258 \pm 5,9 \mu\text{m}$ (Whitehouse Scientific, UK). Malgré la tolérance sur le diamètre de la lentille, le maintien de cette dernière est assurée par la compliance du porteur. La figure FIG. 2.21 décrit les dimensions du porteur de lentille. Chaque bras du porteur fléchit de $30 \mu\text{m}$ pour insérer la lentille par le haut. Une fois insérée, une force de $1,5 \text{ mN}$ correspondant à une déflexion de $15 \mu\text{m}$ de chaque bras assure le maintien de la lentille.

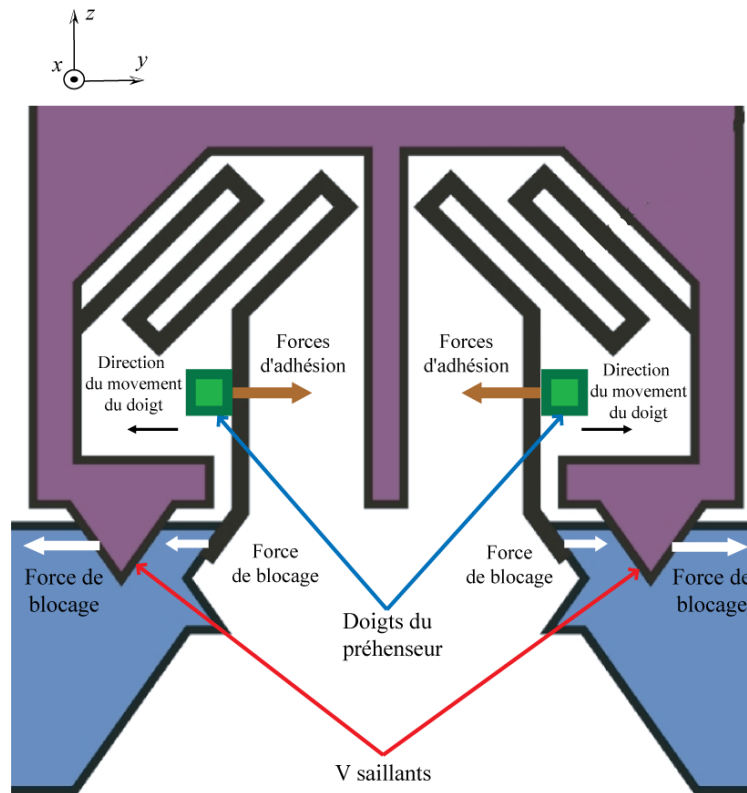


FIG. 2.20 – Les forces en présence lors de la dépose.

2.3.5 La fabrication des substrats et des supports optiques

Dans le cadre du projet MIAAMI, la réalisation des supports et des substrats est faite en collaboration avec le département MN2S de FEMTO-ST. La fabrication des supports optiques était à ma charge et les substrats ont été réalisés par Dr. Sylwester Bargiel, chercheur temporaire au département MN2S.

La fabrication des supports optiques

Les supports optiques sont fabriqués à partir d'un wafer SOI possédant une couche device de $100\ \mu\text{m}$, une couche handle de $400\ \mu\text{m}$ et d'une couche de SiO_2 de $2\ \mu\text{m}$. L'utilisation d'un wafer SOI permet de contrôler précisément l'épaisseur des composants qui sont fabriqués sur la couche device. Pour ce faire, on applique successivement des techniques de micro-usinage sec (DRIE) pour sculpter les composants sur la couche device et humide (KOH et BHF) sur la partie handle afin de libérer les composants. Pour assurer le maintien des supports sur le substrat à la fin du processus de fabrication, une liaison sécable est conçue. Elle assure le lien avec le reste du wafer. La technique utilisée dans [HAPG09] consiste à réduire la largeur du trait de gravure sur la partie

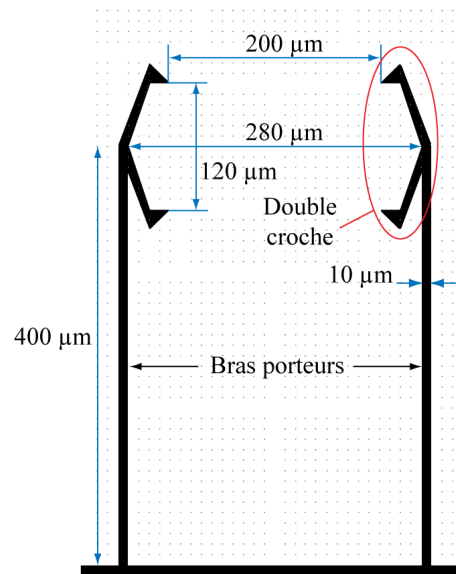


FIG. 2.21 – Principe du porteur de lentille fabriqué sur un support optique.

de la liaison sécable. Ainsi, le silicium ne sera pas usiné jusqu'à la couche de SiO_2 sur cette zone. Cette zone représente une amorce de rupture qui est exploitée comme liaison sécable. Le déroulement du processus de fabrication est montré sur la figure FIG. 2.22.

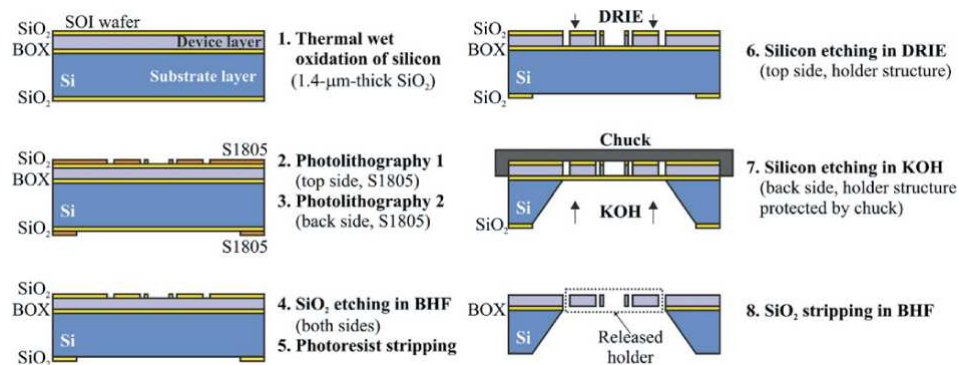


FIG. 2.22 – Déroulement du processus de fabrication des supports optiques.

Le résultat de la fabrication dépend de la qualité de la partie flexible dont la largeur est de $10 \mu m$. Afin de prendre en compte la surgravure, des largeurs de $12 \mu m$ et $14 \mu m$ ont été intégrées sur le masque. La maîtrise des techniques d'usinage au sein de la centrale de technologie MIMENTO (MIfabrication pour la MEcanique, les Nanotechnologies, la Thermique et l'Optique) nous a permis d'obtenir des tolérances de fabrication inférieures

à $2 \mu\text{m}$ mesurées à la fin de la microfabrication. Notre prise en compte de la surgravure s'avère réaliste et la largeur de $12 \mu\text{m}$ sur le masque donne $\approx 10 \mu\text{m}$ à la fin de la fabrication.

La figure FIG. 2.23 présente les résultats obtenus lors de la fabrication des supports optiques.

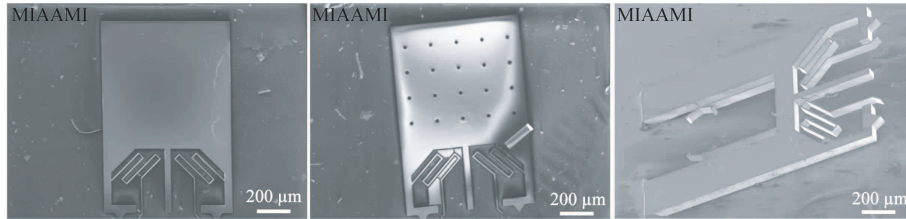


FIG. 2.23 – Photos MEB des différents supports réalisés : a) miroir, b) matrice d'ouverture circulaire, et c) emplacement de lentille sphérique.

La fabrication des substrats

Le déroulement du processus de fabrication du substrat est décrit sur la figure FIG. 2.24. Les substrats sont fabriqués sur un wafer de 4 pouces. Ils sont séparés par découpe à la scie suivant un motif prédéfini à la fin des processus de microfabrication. Les

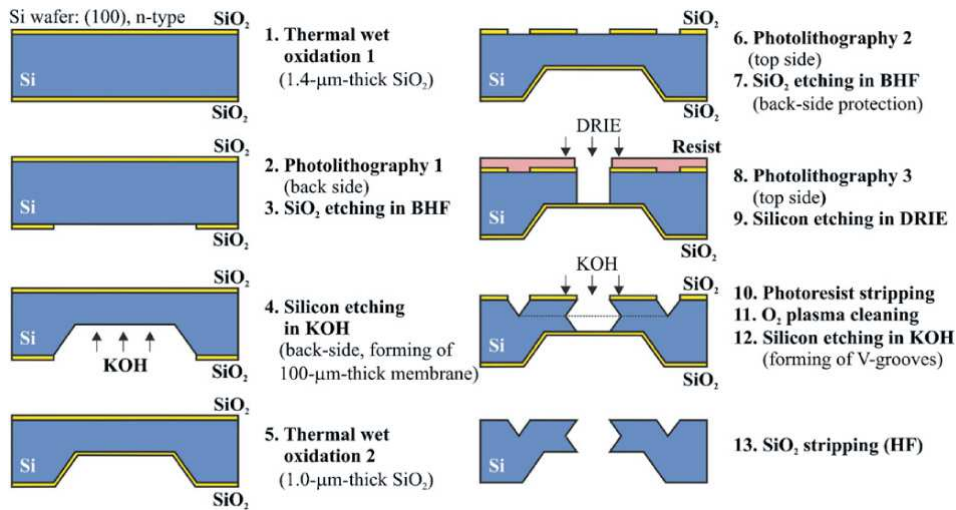


FIG. 2.24 – Fabrication du substrat en combinant l'usinage sec et humide.

figures FIG. 2.25 et FIG. 2.26 présentent les résultats obtenus lors de la fabrication des

substrats. Ils ont été réalisés par Sylwester BARGIEL dans le cadre du projet MIAAMI.

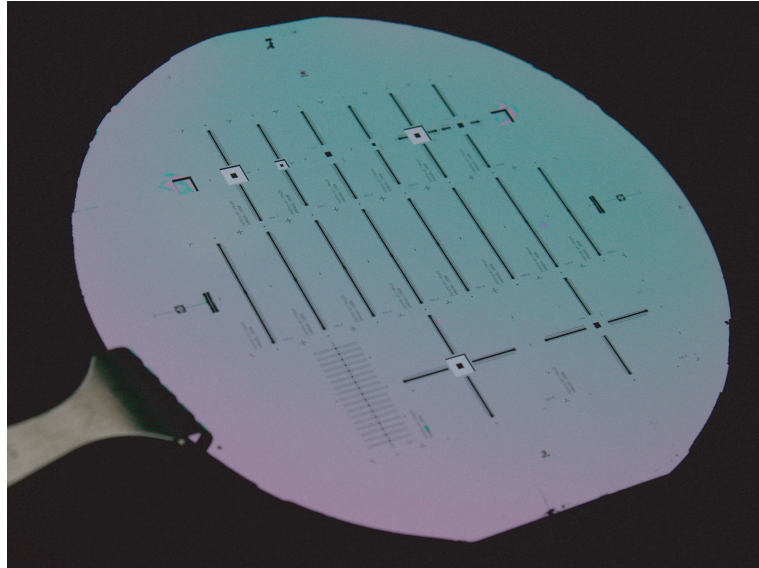


FIG. 2.25 – Photo du wafer contenant les substrats avant la découpe à la scie.

2.4 Proposition d'un système d'assemblage

Le banc optique proposé utilise les capacités offertes en micro-assemblage pour positionner les supports optiques sur le substrat. Une station de micro-assemblage capable de répondre aux contraintes spécifiques des composants est développée simultanément avec les éléments microfabriqués. Une station de micro-assemblage est composée d'un système microrobotique, d'un préhenseur, des éléments périrobotiques tels que les caméras, les capteurs de forces, etc. Le contrôle des éléments de la station de micro-assemblage est effectué par des ordinateurs. Afin d'assurer la flexibilité et la reconfigurabilité des micro-bancs, le choix du préhenseur et la disposition de la structure microrobotique doivent être considérés avec attention. Une séquence d'assemblage est ensuite proposée afin d'obtenir les premiers résultats d'assemblage.

2.4.1 Choix du préhenseur

L'utilisation d'un préhenseur actif à deux doigts de serrage est indispensable pour l'assemblage d'un support optique sur un substrat. Le préhenseur actif assure la réversibilité de la fixation entre le substrat et le support optique. Le préhenseur doit avoir une course en ouverture/fermeture supérieure à $260 \mu\text{m}$ pour couvrir la déflexion des éléments flexibles d'un support optique (*cf.* TAB. 2.3). Il doit également être capable de générer une force de blocage supérieure à $2,6 \text{ mN}$ (*cf.* TAB. 2.3) pour saisir les supports

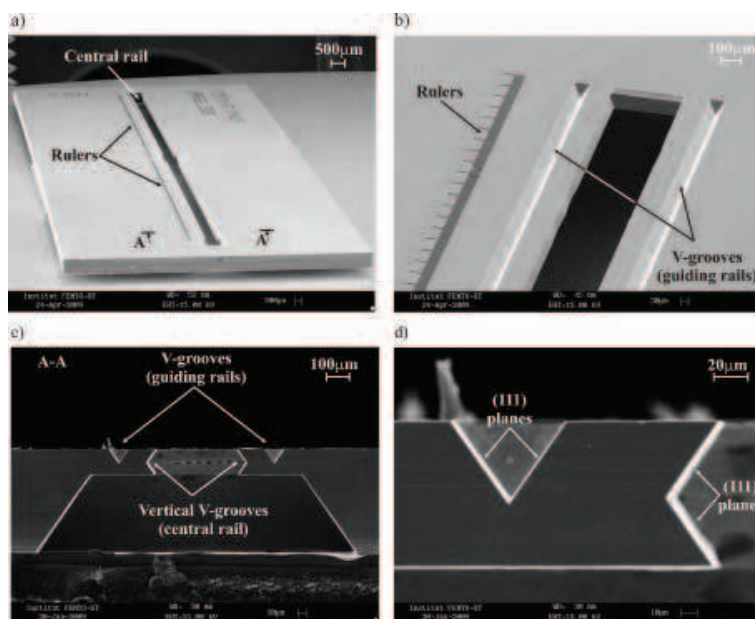


FIG. 2.26 – Photos MEB des résultats de la fabrication des substrats : (a) substrat avec une seule rainure droite, (b) les emplacements des sillons en V et de la règle, (c) vue en coupe montrant les sillons en V sur chaque côté de la rainure principale, (d) vue en coupe montrant un sillon en V et un V inversé.

optiques sur la partie flexible. Le préhenseur doit aussi assurer une flexibilité pour réaliser l'assemblage d'autres types de composants (lame séparatrice, lentille sphérique). Le choix du préhenseur doit alors se faire parmi les différents développements disponibles dans l'état de l'art en prenant en compte essentiellement le type d'actionneur, la course en ouverture/fermeture, les dimensions des doigts et la force de blocage. Le tableau [TAB. 2.4](#) résume les récents résultats obtenus sur la fabrication des micropréhenseurs.

Pour obtenir une course suffisante et pour assurer plus de flexibilité, les préhenseurs à actionnement piézoélectrique permettent de couvrir une course de $500 \mu\text{m}$ avec une force de blocage élevée. Le préhenseur à deux doigts de serrage à base d'actionneur piézoélectrique proposé dans [[ANC05](#)] est choisi dans sa version la plus récente (*cf.* [FIG. 2.27](#)) avec des doigts en silicium appelés SiFit (*Silicon Finger Tips*) [[HAPG09](#)]. Ce préhenseur a été proposé au département AS2M et continue de bénéficier des avancées en termes de modélisation, de compensation des non-linéarités et de commande [[RRANss](#)]. Son efficacité durant une opération de prise/dépose a été largement démontrée dans [[HG08](#), [TDFP10](#)]. Ce préhenseur est constitué de 2 poutres bimorphes assurant 4 degrés de liberté (Y_1 et Z_1 pour le doigt 1 et Y_2 et Z_2 pour le doigt 2). La configuration des électrodes sur chaque poutre et l'application d'une tension sur les électrodes conduisent à différentes polarisations du matériau piézoélectrique. Une fois polarisée, la poutre est sous contrainte et

Actionneur	Référence	Structure	Course	Force de blocage
Capacitif	[VHR02, MBR ⁺ 04, CTTF06, BNO ⁺ 07, ZCLS10]	Microfabriqué	100 μm	< 1mN
Électrothermique	[MZL ⁺ 07, KLZS08b, CL05, ACP ⁺ 08, MH05, DLC ⁺ 08, VMET09, SGW09]	Microfabriqué	60 μm	15 mN
Piézoélectrique	[CEM ⁺ 00, PAC ⁺ 05, WW04, ZKLS06, BFG ⁺ 08, ZST09]	Microfabriqué/ Assemblé	500 μm	< 1 N
AMF (Alliage à Mémoire de Forme)	[KKHC08, LCK ⁺ 96, BCG ⁺ 98, KKJ02, PKK ⁺ 05]	Microfabriqué/ Assemblé	300 μm	35 mN
Magnétique	[GHAB08, KLKS05, CHC ⁺ 06]	Microfabriqué/ Assemblé	250 μm	130 μN

TAB. 2.4 – Comparatif des préhenseurs disponibles à deux doigts de serrage.

génère une déformation maximale à son extrémité libre. Pour réaliser la saisie des microcomposants, des outils spécifiques ont été développés suivant la forme et les dimensions des microcomposants :

- outils en nickel [Cle05] pour manipuler des pièces de roulements et de montres ;
- outils en silicium version 1 [HG08] pour des objets millimétriques à 200 μm ;
- outils en silicium version 2 [HAPG09] pour des objets inférieurs à 200 μm .

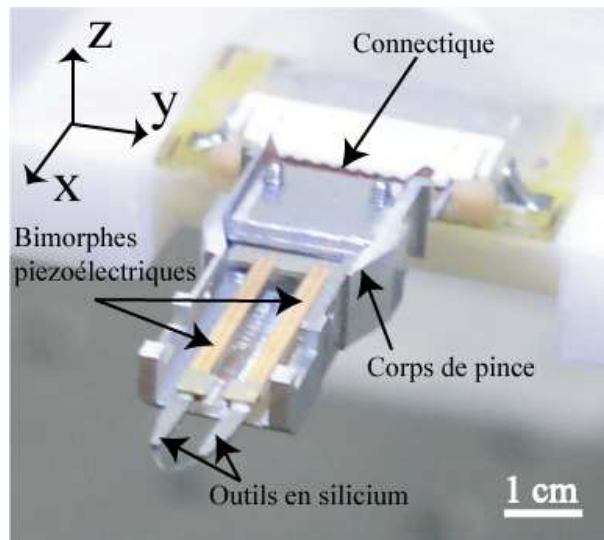


FIG. 2.27 – Le préhenseur à 4 DDL développé à l'Institut FEMTO-ST.

Les caractéristiques du préhenseur sont regroupés dans le tableau TAB. 2.5.

Courses	Ouverture/Fermeture (axe Y)	320 μm
	Montée/Descente (axe Z)	400 μm
Forces de blocage	Ouverture/Fermeture (axe Y)	55 mN
	Montée/Descente (axe Z)	10 mN
Autres	Résolution en Y et en Z	10 nm
	Temps de réponse en boucle ouverte	Inférieur à 10 ms
	Ecartement des outils	Réglable
	Épaisseur des outils	12 μm - 100 μm

TAB. 2.5 – Les caractéristiques du préhenseur utilisé pour l’assemblage des supports optiques.

2.4.2 Le système robotique

La station de micro-assemblage doit permettre le positionnement des supports sur le substrat. Ainsi, on doit définir le nombre de degrés de liberté du système robotique. Comme le plan du substrat limite le roulis du support optique, il faut donc au minimum 5 degrés de liberté. La difficulté de réussir un positionnement fin sur une grande course nous conduit à l’utilisation d’axes redondants à grande course - faible résolution $X_c Y_c Z_c$ et à petite course - haute résolution $X_f Y_f Z_f$. Ce qui ramène à huit le nombre de degrés de liberté motorisés de la station de micro-assemblage (*cf.* FIG. 2.28). Au total, la station est équipée de 11 degrés de liberté en comptant la table de positionnement manuelle $X_1 Y_1 Z_1$ pour faciliter la mise en place de l’assemblage. La disposition de ces axes de positionnement se fera sur deux manipulateurs :

- manipulateur M2 avec $X_f Y_f Z_f$, $X_1 Y_1 Z_1$ et α pour le lacet ;
- manipulateur M1 avec $X_c Y_c Z_c$ portant le préhenseur et β pour le tangage.

Le manipulateur M1 est composé par une table de positionnement venant de Physik Instrumente[®]. La série P-611.3 Nanocube[®] assurant trois axes de translation est choisi avec une course de 100 μm et une résolution de 1 nm en boucle fermée. Les axes rotatifs (θ et β) sont des SmarAct[®] SR-3610-S assurant des résolutions de 1,1 μ° . Le manipulateur M2 utilise une table Physik Instrumente[®] M112.1 DG avec une course de 25 mm sur les trois axes de translation. La rotation β est conçue pour assurer la rotation autour des doigts du préhenseur ce qui est nécessaire pour contrôler l’orientation des objets manipulés.

Cette station est commandée grâce à un logiciel développé au département AS2M et programmé sous C++ appelé AP2M (Application pour MicroManipuler). Les cartes d’entrées-sorties et les axes de positionnement sont contrôlés par l’opérateur grâce à un joystick (mode téléopéré). L’opérateur peut aussi contrôler les mouvements des axes en entrant des consignes sur l’interface graphique du logiciel AP2M. Pour le mode automatique, l’AP2M offre la possibilité d’exécuter une liste d’actions préprogrammées. Ce système robotique est capable de couvrir les précisions requises pour la fabrication des bancs optiques.

La station doit être équipée de caméras afin de visualiser la scène et suivre les opérations

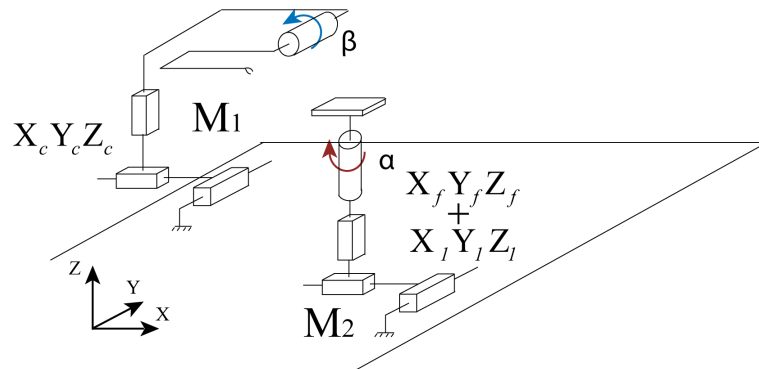


FIG. 2.28 – Schéma cinématique de la station de micro-assemblage à 11 DDL.

durant l'assemblage. Les différentes vues permettent à l'opérateur de gérer la séquence d'assemblage. Dans notre cas, l'utilisation de deux caméras donne une vue de dessus et une de côté de la scène. La station développée est présentée sur la figure FIG. 2.29.

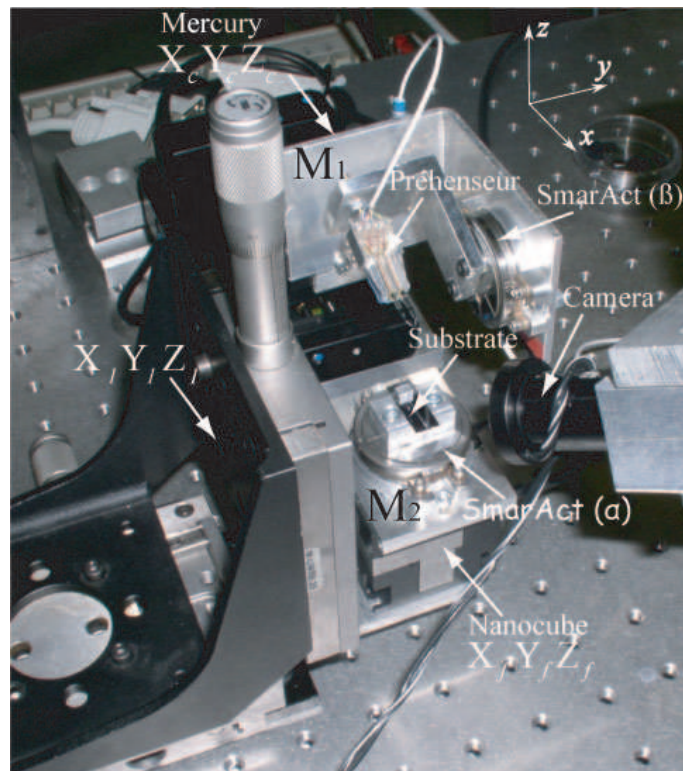


FIG. 2.29 – La station de micro-assemblage réalisée pour effectuer l'assemblage des bancs optiques.

2.4.3 La séquence d'assemblage

Pour la réalisation d'un banc optique, le substrat et les supports optiques sont d'abord positionnés grossièrement et manuellement sur le manipulateur M_2 . Ensuite l'assemblage d'un support optique sur le substrat est effectué en mode téléopéré.

La mise en place des éléments microfabriqués sur la station de micro-assemblage nécessite une attention particulière. Nous proposons dans un premier temps une solution temporaire. Le substrat est positionné sur le manipulateur M_2 et il va servir de référence pour l'assemblage des autres éléments du banc optique. Ensuite, la liaison sécable liant le support optique au wafer est cassée et le support est saisi par une pince brucelle pour être positionné sur un système de stockage. Une fois les supports optiques positionnés dans le système de stockage, ce dernier est placé sur le substrat pour permettre l'assemblage des supports dans les rainures du substrat (*cf.* FIG. 2.30).

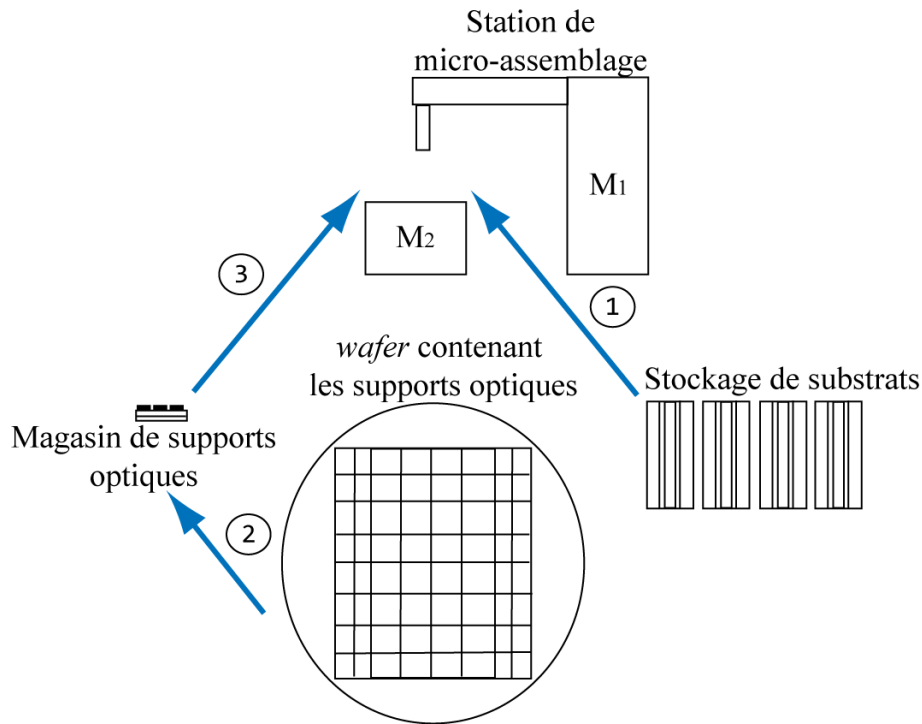


FIG. 2.30 – Séquence de mise en place après la microfabrication : (1) mise en place du substrat sur M_2 , (2) séparation des supports optiques du wafer et stockage dans le magasin, (3) le magasin est placé sur le substrat pour débuter l'assemblage.

La séquence de micro-assemblage est l'ensemble des processus réalisés pour mettre

en position les supports optiques sur un substrat. Chaque support est assemblé de manière séquentielle en utilisant la station de micro-assemblage et en suivant les 5 étapes suivantes :

1. le support est saisi par le préhenseur par la partie flexible ;
2. il est ensuite retiré du système de stockage et orienté perpendiculairement au substrat ;
3. il est aligné à la rainure et inséré dans l'ouverture d'entrée ;
4. il est guidé puis positionné dans la rainure ;
5. il est enfin relâché une fois la position désirée atteinte.

La phase de guidage est très délicate et nécessite beaucoup de dextérité de l'opérateur afin d'éviter la casse de l'objet et/ou sa perte. En effet, l'opérateur gère le guidage du support grâce aux vues provenant des caméras qui ne donnent qu'une information partielle de la scène (une partie est occultée). Une fois le support optique positionné, l'assemblage d'une lentille sphérique est possible sur les supports équipés de porteur de lentille. La flexibilité du préhenseur permet de l'utiliser pour saisir une lentille de diamètre $258 \pm 5,9 \mu\text{m}$ et l'insérer dans le porteur.

2.4.4 Les résultats obtenus

Les séquences d'assemblage proposées ont été appliquées pour l'assemblage des supports optiques sur les substrats réalisés. La station de micro-assemblage développée a été utilisée en mode téléopéré durant lequel un opérateur commande les mouvements à travers un joystick. La séquence d'assemblage d'un support est présentée sur la figure [FIG. 2.31](#).

L'assemblage d'une lentille sphérique a aussi été réalisé en utilisant le préhenseur avec les mêmes outils comme montré sur la figure [FIG. 2.32](#). Ces séquences d'assemblage ont permis de réaliser les démonstrateurs comme celui présenté sur la figure [FIG. 2.33](#). Il est basé sur un support miroir et un support avec une lentille sphérique. L'assemblage de ce démonstrateur a été réalisé en une demi-heure. Le positionnement des supports peut être effectué en se repérant sur la graduation microfabriquée sur le support.

D'autres assemblages ont été réalisés en mode téléopéré et les résultats obtenus permettent de valider l'efficacité de la fixation réversible par éléments flexibles (*cf.* [FIG. 2.34](#)). La pince permet de désassembler un support optique et de le positionner à un endroit différent. Les résultats obtenus montrent la flexibilité et la reconfigurabilité du banc optique développé. Cela ouvre la possibilité de caractériser des éléments optiques et de concevoir différentes fonctions à partir de ce microbanc optique.

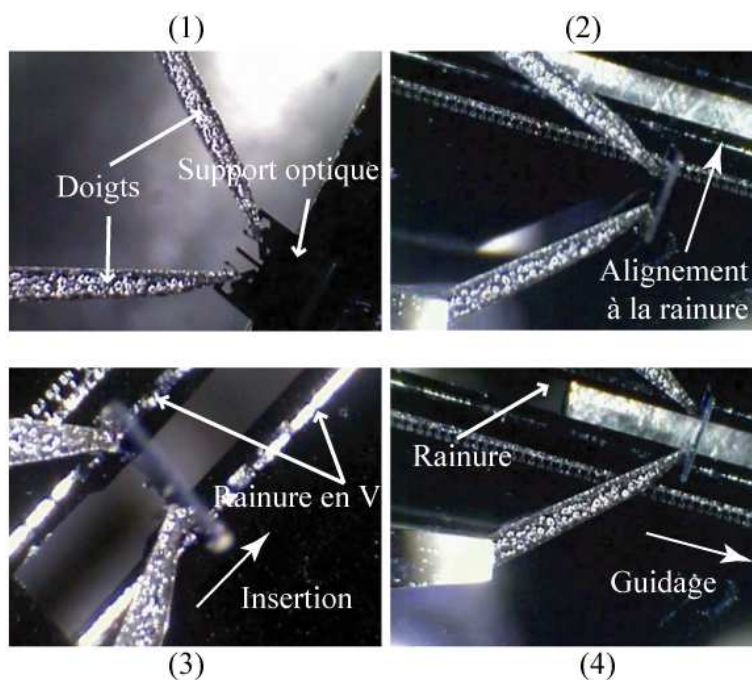


FIG. 2.31 – Séquence d’assemblage d’un support de type miroir : (1) saisie sur la partie flexible par le préhenseur, (2) alignement du support par rapport à la rainure principale, (3) insertion du support, (4) guidage du support dans la rainure.

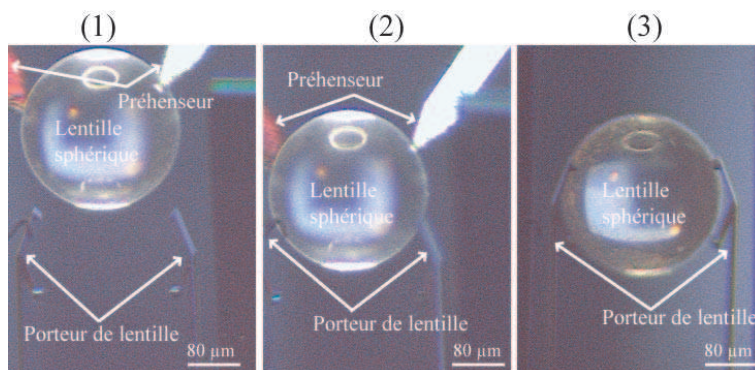


FIG. 2.32 – Séquence d’assemblage d’une lentille sphérique : (1) la lentille est saisie et alignée au porteur de lentille, (2) elle est insérée dans le porteur, (3) elle est relâchée et maintenue par le porteur.

Les premiers résultats obtenus ont permis de valider les solutions proposées pour assurer le positionnement et la réversibilité des fixations. Des tolérances de fabrication inférieures

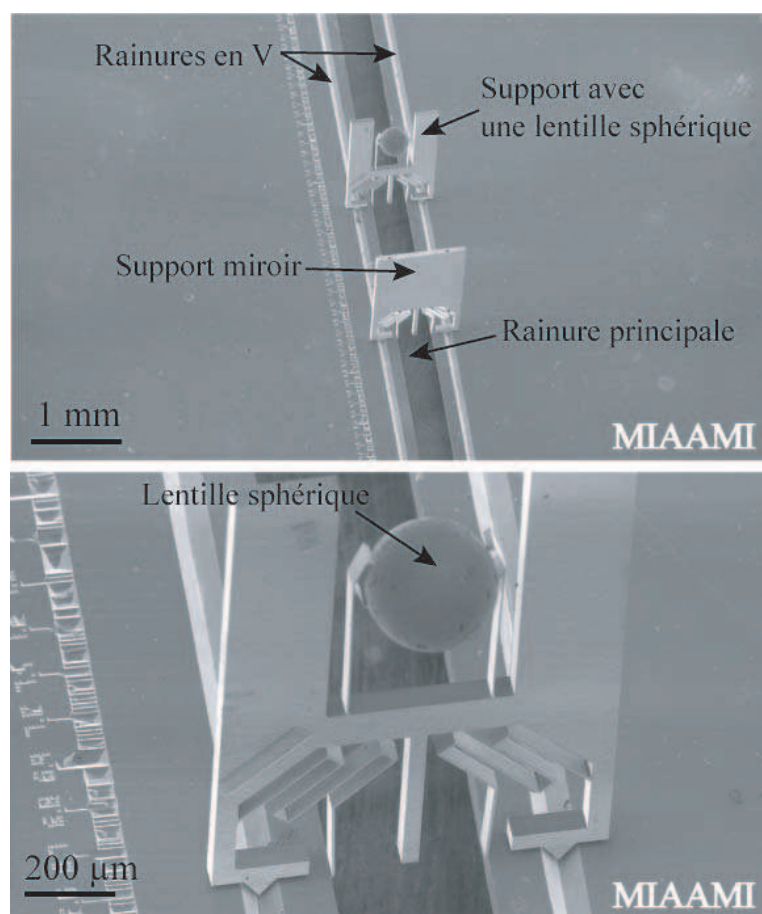


FIG. 2.33 – Photos MEB des résultats de l'assemblage d'un démonstrateur avec un support miroir et un support avec une lentille sphérique.

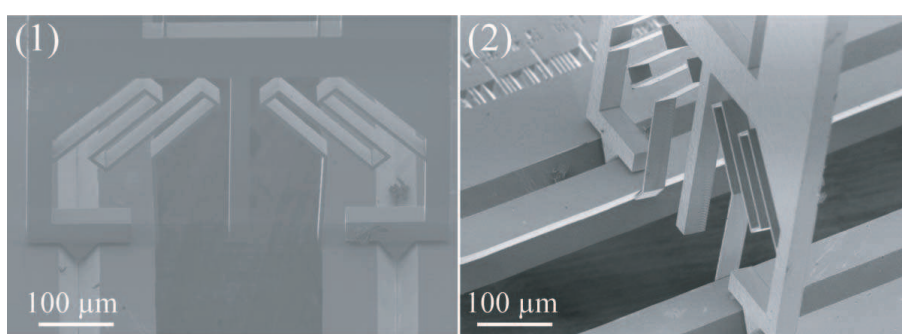


FIG. 2.34 – Système assemblé : (1) vue de face de la fixation réversible, (2) vue inclinée montrant le contact entre le V inversé et les éléments flexibles .

à 2 μm ont été observées lors des mesures effectuées à la fin de la microfabrication. La tolérance de fabrication des masques, le temps de révélation et la surgravure sont des causes possibles.

Lors des opérations d'assemblage, il a été observé que l'espace libre (*cf.* FIG. 2.17) pour l'insertion des doigts est trop juste pour les outils de 100 μm alors que les outils de 12 μm sont trop flexibles. Une augmentation de l'espace libre doit être prise en compte lors d'une prochaine série de fabrications.

Les supports optiques assemblés tiennent sur le substrat grâce à la force de maintien et aux forces de friction. Le système de maintien choisi conduit à une souplesse de la liaison substrat/support optique. On observe sur les assemblages effectués que cette liaison est très souple. La tolérance de fabrication engendre une diminution de la largeur de la partie flexible et par conséquent de la raideur donc la force de maintien. Afin d'assurer un maintien plus ferme entre le support optique et le substrat, les dimensions de la partie flexible seront modifiées pour intégrer les tolérances de fabrication. L'augmentation de l'épaisseur du substrat peut conduire également à une plus grande force de maintien et une meilleure stabilité. Il faut alors faire un compromis car si elle trop grande, la qualité et l'inclinaison des tranches usinées en DRIE peuvent conduire à des défauts d'assemblage.

La caractérisation des supports assemblés est en cours d'étude. En effet, les dimensions des supports optiques rendent difficiles les mesures avec des outils conventionnels. Les outils disponibles ne permettent pas d'effectuer les mesures et d'obtenir les résolutions attendues. La caractérisation se concentre sur le tangage, le lacet, la position axiale et latérale du support optique. Généralement, la position verticale et le roulis n'influencent pas les qualités optiques en raison de la symétrie des composants optiques.

2.5 Vers l'automatisation de l'assemblage

Les tâches de micro-assemblage effectuées ont permis de valider le concept de banc optique reconfigurable. Durant l'assemblage, l'opérateur utilise les images venant des deux caméras pour observer les interactions et modifier la position relative du support manipulé par rapport au substrat. Il doit être très vigilant afin d'éviter le risque de casser ou perdre le support manipulé. En se basant sur la séquence d'assemblage proposée auparavant, les 5 étapes peuvent être automatisées en équipant la station d'outils périphériques et en utilisant les retours d'information adéquats :

- comme les objets manipulés sont flexibles, l'automatisation de la saisie et de la dépose nécessite un retour d'information sur l'état de la déformation des éléments flexibles ;
- les tâches à mouvement libre et l'insertion peuvent se baser sur l'asservissement en position de l'objet manipulé, type asservissement visuel comme montré dans [Tam09] malgré l'occultation et les défauts (non-linéarités, jeux, etc.) des axes de positionnement ;
- la principale difficulté rencontrée était la phase de positionnement fin d'un support dans la rainure par un guidage. Durant cette opération, des contacts peuvent appa-

raître et ils sont difficilement détectables par l'opérateur en utilisant seulement les vues provenant des caméras. Son automatisation sera étudiée dans ce qui suit afin d'assurer un positionnement fin des supports optiques tout en réduisant le temps d'assemblage.

Durant le guidage, le support entre en contact avec le substrat à cause du désalignement de l'axe du mouvement et les sillons en V (cf. FIG. 2.35 -(a)), des non-linéarités du mouvement de translation (cf. FIG. 2.35 -(b)), de l'orientation du support optique (lacet) par rapport à la rainure. Le contact peut apparaître entre les sillons en V du substrat et les V saillants du support optique comme montré sur la figure FIG. 2.37. Le support optique subit alors, lors du guidage, une série de créations et de ruptures de contact qui peut engendrer sa perte ou sa dégradation.

Durant la manipulation des micro-objets, une partie des opérations consiste également

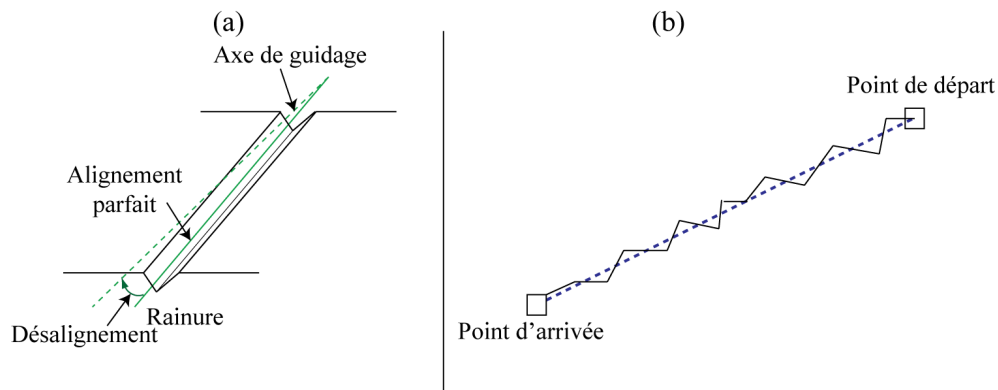


FIG. 2.35 – (a) le désalignement de l'axe du mouvement et un sillon en V, (b) les non-linéarités d'un mouvement de translation.

à la création et la rupture d'un contact. Prenons l'exemple élémentaire d'une opération de prise & dépose (cf. FIG. 2.36). Soit un micro-objet cubique M localisé au point A et devant être déplacé au point B. L'opération doit être réalisée par un préhenseur P à deux doigts de serrage (D_1 et D_2). Deux contacts (C_1 et C_2) se forment entre D_1 et la face gauche de M et D_2 et la face droite de M. Ensuite, le contact entre le micro-objet et le substrat C_{prise} est rompu et le micro-objet est déplacé du point A au point B. Il est positionné au point B en créant un contact micro-objet/substrat C_{depose} . Enfin les contacts doigts/micro-objet sont rompus et le préhenseur se retire.

L'automatisation de la phase de guidage doit permettre de contrôler ces risques tout en réduisant le temps d'assemblage. Les forces d'interaction apparaissant lors d'un contact constituent des difficultés à l'automatisation. Les ruptures de contact requièrent l'application d'une force supérieure à la force de pull-off. Le système de micro-assemblage et les lois de commande doivent prendre en compte cette spécificité liée à l'échelle mi-

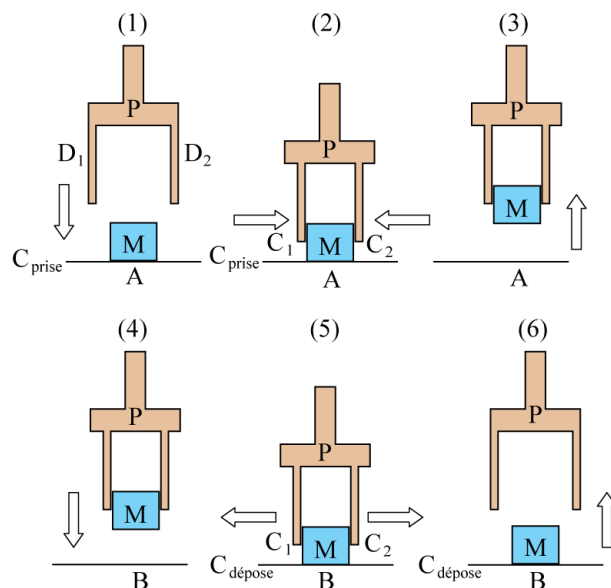


FIG. 2.36 – Les créations (2-5) et les ruptures (3-6) de contact lors d’une opération de prise/dépose.

crométrique considérée. Les surfaces en contact lors du micro-assemblage correspondent souvent [DCM04, LSP05, DZL⁺07, BRC⁺10] à une interaction de surface plan/plan. Une évaluation des forces d’interaction pour ce type de contact, une structure de manipulation adéquate et une commande efficace doivent être étudiées afin d’assurer l’automatisation des tâches de micro-assemblage. Dans notre cas, les contacts entre les sillons en V et les V saillants sont de types plan/plan tout comme les contacts entre les doigts du préhenseur et le support optique. L’évaluation de la force de pull-off pour un contact plan/plan avec une surface inférieure à 1 mm² doit être investiguée.

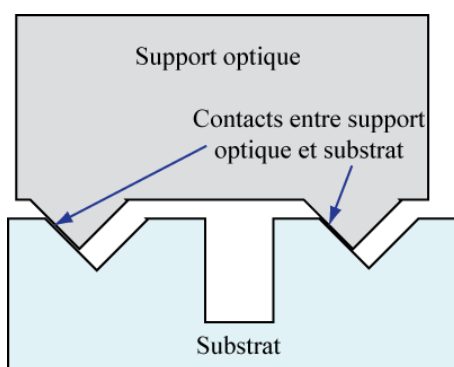


FIG. 2.37 – Les contacts entre le support optique et le substrat.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un concept de banc optique reconfigurable permettant la réalisation de MOEMS hybrides. Il se base sur des supports optiques ($800 \mu\text{m} \times 135 \mu\text{m}$) en silicium qui se fixent sur un substrat grâce à des éléments flexibles et des techniques d'alignement passif. L'utilisation d'un préhenseur actif à actionnement piézo-électrique, capable de générer une force de serrage et une course en fermeture/ouverture suffisantes, permet de manipuler les supports optiques. Une station de micro-assemblage équipée de 11 DDL a été développée pour assurer l'assemblage en mode téléopéré des supports optiques sur le substrat. La flexibilité du préhenseur permet de l'utiliser pour manipuler les supports optiques et les lentilles sphériques de $258 \pm 5,9 \mu\text{m}$ de diamètre. La structure redondante à grande course/haute résolution de la station assure l'assemblage des éléments sur tout le substrat avec une très bonne précision de positionnement. Les résultats obtenus ont permis de valider le concept de banc optique reconfigurable et prouve notre capacité à réaliser de tels bancs par micro-assemblage. A partir des bancs optiques reconfigurables, il est possible d'imaginer des fonctions optiques nécessitant le positionnement précis des éléments optiques dans l'espace. Les bancs optiques reconfigurables constituent également un outil de caractérisation et d'étalonnage des éléments optiques sur lesquels on effectue des tests avant d'intégrer définitivement ceux-ci sur un substrat. Les difficultés rencontrées lors de l'assemblage, en particulier la tâche de guidage, ont été identifiées. Les ruptures de contact lors des différentes étapes de micro-assemblage conduisent à l'apparition des forces de pull-off. L'évaluation des forces d'interaction, plus particulièrement durant le micro-assemblage, doit être étudiée et fera l'objet du chapitre 3.

Étude des forces d'interaction et prise en compte pour l'assemblage

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les techniques de mesure de forces à haute résolution et leur utilisation pour la caractérisation des forces présentes dans le cadre du micro-assemblage. Les spécificités du micromonde telles que les forces de surfaces sont méconnues et les modèles fiables ne couvrent que des cas bien précis. L'étude des contacts plans, type de contact très courant en micro-assemblage, n'est pas couverte dans la littérature ni de point de vue théorique ni du point de vue expérimental. Nous proposons un système de mesure permettant de caractériser les forces de pull-off pour des surfaces de contact planes. Les résultats obtenus et les conséquences sur le micro-assemblage sont discutés. L'utilisation de l'information de force pour la micromanipulation et le micro-assemblage est alors mise en avant.

Sommaire

3.1	Introduction	82
3.2	Capteurs de force à haute résolution	82
3.2.1	Capteurs passifs	83
3.2.2	Capteurs actifs	92
3.3	Caractérisation du micromonde	93
3.3.1	Mesure caractéristique des forces de pull-off	94
3.3.2	Mesure des forces électrostatiques	96
3.3.3	Mesures des forces capillaires	97
3.4	Nouveau système de mesure des forces d'interaction pour un contact plan/plan	99
3.4.1	Mesure des forces de pull-off pour un contact plan/plan	99
3.4.2	Résultats expérimentaux	101
3.4.3	Discussions	107
3.4.4	Conséquences sur le micro-assemblage	108
3.5	Conclusion	110

3.1 Introduction

Nous avons identifié les forces d'interaction comme un des challenges à relever pour réaliser le micro-assemblage automatisé (*cf.* chapitre 1). Ces forces d'interaction, plus particulièrement les forces de surfaces spécifiques à l'échelle microscopique, doivent être étudiées afin de comprendre leurs influences pour ensuite les prendre en compte durant l'automatisation. La démarche commence par l'évaluation des forces d'interaction pour ensuite proposer une structure microrobotique équipée de retour de force pour le micro-assemblage. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux capteurs de force à haute résolution, ensuite aux techniques de mesure permettant de caractériser les forces spécifiques à l'échelle microscopique.

3.2 Capteurs de force à haute résolution

La non maîtrise des forces d'interaction rend l'automatisation des tâches de micro-assemblage très difficile. Leurs importances à l'échelle microscopique n'est plus à démontrer [RC08]. Afin d'appréhender ces forces, des capteurs capables de les mesurer ont été développés. Nous allons nous intéresser aux technologies de capteur de force offrant des résolutions de l'ordre du nanonewton (10^{-9} N) à une dizaine de micronewtons (10^{-6} N). Ces résolutions sont dictées par les niveaux de force régissant le micromonde et les forces d'interaction durant le micro-assemblage. Les capteurs de force sont classés en deux grandes catégories : les capteurs passifs et les capteurs actifs.

3.2.1 Capteurs passifs

La grandeur de force est déterminée de deux manières, soit par la déformation d'un corps d'épreuve, soit par un déplacement d'une masse sismique. La déformation du corps d'épreuve peut être mesurée :

- directement par jauge extensométrique ou par capteur de déformation ;
- indirectement par mesure d'une des propriétés électriques du matériau dépendant de la déformation.

Les mesures de déplacement sont souvent effectuées selon des principes sans contact afin d'éviter que des effets (tels que les frottements secs, etc.) puissent biaiser la force à déduire.

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux capteurs de force utilisant une mesure directe. Les différents capteurs sont décrits suivant le principe de mesure du déplacement.

Les capteurs de force par mesure optique

Ils exploitent la variation de l'intensité lumineuse obtenue par la réflexion sur un élément déformable ou la triangulation ou l'interférométrie. La force est déduite par la mesure de la déformation et l'estimation de la force s'exprime sous la forme $\|\vec{F}\| = K\delta$, avec K la raideur de la poutre et δ la déformation.

L'AFM (*Atomic Force Microscopy*)

Le microscope à force atomique a été introduit en 1986 par G. Binnig, C.F. Quate et C. Gerber [BQG86] comme une application d'un microscope à effet tunnel (STM : *Scanning Tunneling Microscope*) afin d'étudier des surfaces de matériaux isolants à l'échelle microscopique [RF05]. La technologie a depuis bien évolué pour que l'AFM puisse travailler dans différents environnements tels que le vide, le milieu liquide, les basses températures, les champs magnétiques et aussi pour des applications en chimie ou en biologie. L'AFM utilise une sonde appelée "cantilever" qui se déforme suivant les forces entre sa pointe et la surface étudiée. La déformation du cantilever est mesurée par la déviation d'un faisceau laser réfléchi sur l'extrémité du cantilever [MN88] et détecté sur une photodiode 4 cadrans (*cf.* FIG. 3.1).

La mesure de force s'effectue sur l'AFM en utilisant l'intensité lumineuse récupérée sur les différents cadrans pour déterminer la déflexion du cantilever. En se basant sur le principe d'une poutre encastree, il est possible alors de remonter à la force appliquée sur la pointe sous l'hypothèse des petites déformations.

On peut fixer la raideur de la poutre afin de choisir l'étendue de la mesure et/ou la résolution du capteur. Typiquement, la raideur d'un cantilever varie de 0.1 N/m à 100 N/m et est pré-calibrée chez le fabricant (Nanosensors, Budget Sensors, etc.). Généralement, le système optique offre une résolution de 0,1 nm ce qui correspond à une résolution de 10^{-11} N à 10^{-8} N suivant la raideur du cantilever utilisé.

La modélisation et la calibration des systèmes de mesure AFM font l'objet d'une recherche active [Bhu07, XRR09, RR09]. Elle se concentre sur la déformation du cantilever et la manière avec laquelle se déroule le contact lors des mesures. La prise en compte

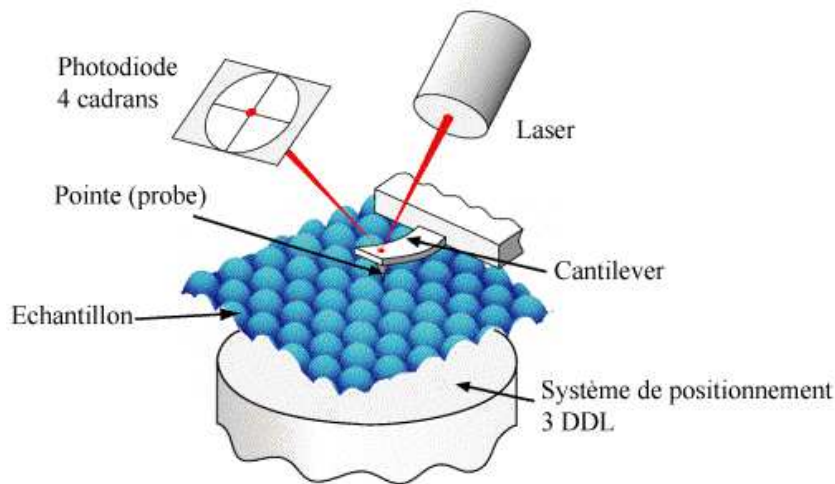


FIG. 3.1 – Principe de fonctionnement de l'AFM - Image de YKI-Institute for Surface Chemistry.

des phénomènes dynamiques est également traitée en vue de réaliser des opérations en mode "tapping" [DMM+03].

La raideur magnétique

Elle est exploitée par exemple sur le capteur de force développé dans [BAP03, BPA03]. Il se base sur la lévitation d'une tige passive équipée de deux aimants permanents. Quatre aimants placés sur un support exercent des forces magnétiques permettant la mise en lévitation de la tige (*cf.* FIG. 3.2).

Pour équilibrer la tige dans la direction X , elle est placée entre deux plaques de graphite diamagnétiques. Le système dispose alors d'un ressort magnétique et est caractérisé par une raideur minimale de $0,02 \text{ N/m}$ dans le plan YOZ . Cette raideur est ajustable en modifiant les positions des aimants porteurs sur le support. Le déplacement de la tige selon l'axe Y est mesuré par un capteur laser à triangulation avec une résolution nanométrique. Le capteur obtenu est capable de couvrir la gamme de $\pm 100 \mu\text{N}$ avec une résolution de 20 nN .

Le capteur développé est utilisé pour la poussée de microbilles en polystyrène de $50 \mu\text{m}$ de diamètre ou pour tester l'élasticité des zones pellucides des ovocytes avant l'injection des spermatozoïdes lors des fécondations *in vitro*.

D'autres exemples de réalisation utilisent ce principe tels que le préhenseur à deux doigts de serrage dans [ZNV98]. La mesure de déformation d'un doigt permet de déduire la force appliquée sur le micro-objet.

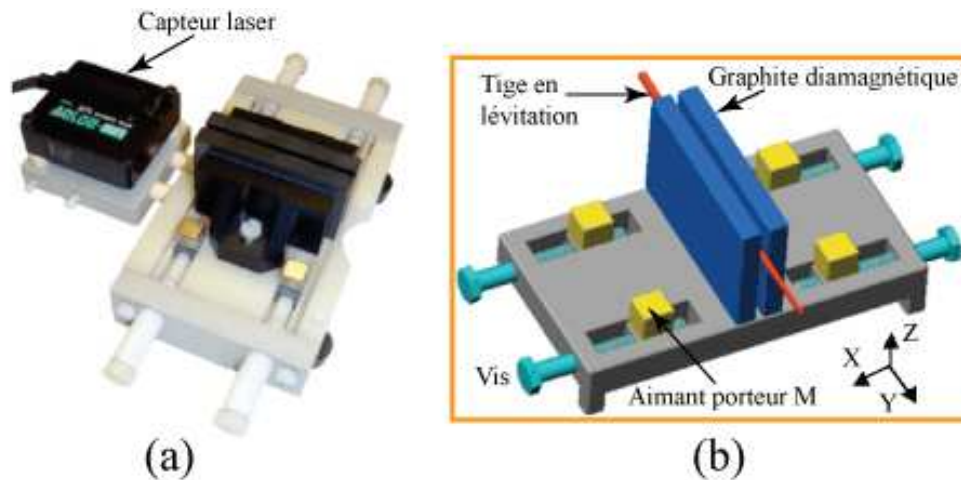


FIG. 3.2 – Capteur à lévitation magnétique : (a) sa réalisation avec le capteur laser, (b) schéma de principe avec les emplacements des aimants [BAP03].

Les capteurs de force par vision

La vision permet de mesurer la déformation d'une structure flexible, qui, sous l'action d'une force extérieure, se déforme. La connaissance de la raideur de la structure conduit alors à la détermination de la force ($F = K\delta$). Nombreuses sont les réalisations [AMC06, YS05, CPK09] et elles dépendent essentiellement du matériau (PDMS¹, silicium, SU8, etc) utilisé pour réaliser la structure flexible, la raideur de la structure, le nombre de degrés de liberté mesurés et la sensibilité du système de vision.

Les travaux dans [YS05] montrent la réalisation d'un capteur de force par vision utilisant une structure flexible en silicium à base de 2 poutres bi-encastées ($L \times b \times h = 1,96 \text{ mm} \times 10,5 \mu\text{m} \times 0,77 \mu\text{m}$). Elle permet de maintenir en suspension une sonde (cf. FIG. 3.3).

La mesure s'effectue à l'extrémité de la sonde et le système de vision offre une sensibilité de $0,27 \mu\text{m}/\text{pixel}$. La raideur de la structure dans l'axe de mesure est de $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ pour couvrir une gamme de forces de quelques nN. Le capteur de force développé est utilisé pour indenter et étirer des cellules biologiques. La mise en cascade de plusieurs structures flexibles et la modification des dimensions des poutres sont discutées afin d'obtenir des raideurs pouvant aller de $1 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}$ à 1 N/m .

Les capteurs utilisant la vision sont limités en dynamique car cette technique nécessite le traitement d'image pour mesurer les déformations. Une limitation sur la résolution est inhérente au système de vision à cause du critère de Rayleigh². Cette limitation concerne les systèmes photoniques mais pas les microscopes électroniques à balayage

¹Polydiméthylsiloxane.

²Il définit la limite de résolution d'un système de vision qui correspond à la distance minimale entre deux objets pouvant être distingués.

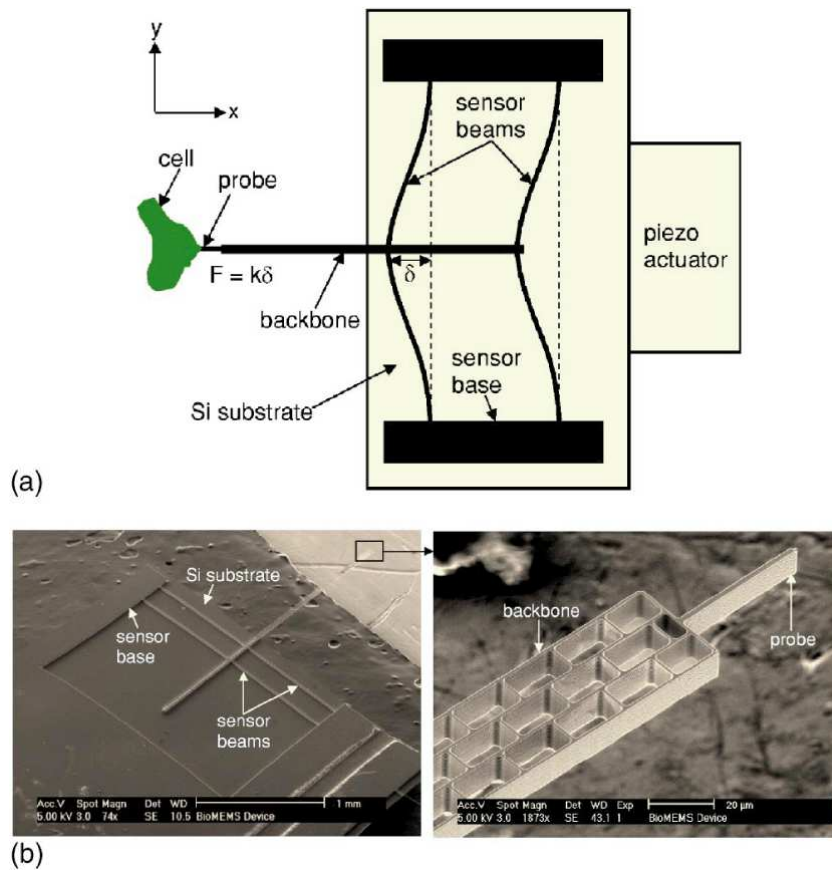


FIG. 3.3 – (a) Schéma de fonctionnement du capteur, (b) photos MEB de la réalisation et (c) l'extrémité de la sonde [YS05].

comme dans [GN04]. La vitesse d'acquisition des caméras utilisées est aussi un paramètre important qui doit être pris en compte suivant l'application. La taille des systèmes de vision (caméra ou MEB) freine l'utilisation massive de cette technique de mesure.

Les capteurs à jauge de déformation

Ils se basent sur la variation de leur résistance électrique lorsque le corps d'épreuve est déformé. Il existe deux catégories de jauges : les jauges métalliques et les jauges piézorésistives. La première exploite l'effet géométrique et la seconde l'effet électronique (c'est-à-dire la variation des porteurs de charge). La résistance est régie par $R = \frac{\rho \ell}{S}$ avec ρ la résistivité du matériau, ℓ la longueur du fil et S la section.

Pour les jauges métalliques, la variation de longueur du fil (effet traction/compression) engendre la variation de la résistance. Pour les jauges semi-conductrices, la variation de la résistivité est l'origine de la mesure. En effet, cette dernière vient de la modification de la mobilité des porteurs de charge sous l'effet et dans la direction des contraintes

appliquées. Les caractéristiques de chaque type de jauge sont résumées dans le tableau [TAB. 3.1](#). Le critère de choix des jauges repose la dimension des jauges et le facteur de jauge G . Ce dernier représente la variation relative de résistance sur la variation relative de longueur ($G = \frac{\delta R}{R} / \frac{\delta \ell}{\ell}$).

Type de jauge	Métallique	Semiconducteur
Variation de la résistance	$\frac{\delta R}{R} = G \frac{\delta \ell}{\ell}$, G étant le facteur de jauge	$\rho = \frac{1}{en\mu}$, avec e la charge, n le nombre de porteurs par unité de volume, μ la mobilité des porteurs
Facteur de jauge	entre 2 et 4	jusqu'à 200

TAB. 3.1 – Caractéristiques des deux types de jauge : métallique et semi-conducteur.

Ce type de mesure de force est largement répandu grâce au fait qu'il dispose d'une très bonne dynamique et de sa facilité de fabrication. Les capteurs à jauge de déformation représentent 80 % du marché [\[MB08\]](#) mais les jauges piézorésistives sont les plus utilisées en micro grâce à la microfabrication offrant une surface occupée réduite et leur constante de jauge élevée.

Dans le domaine de la micromanipulation et du micro-assemblage, ces capteurs ont été intégrés sur des systèmes robotiques tels que les préhenseurs et les cantilevers d'AFM. Un exemple de réalisation est le capteur à 3 DDL proposé dans [\[ASF⁺99\]](#) pour la micromanipulation biologique. Ce capteur est équipé de 8 jauges piézorésistives disposées sur 4 structures déformables (200 μm x 500 μm x 50 μm) avec un arrangement particulier (*cf.* [FIG. 3.4](#)).

Il est capable de couvrir une plage de mesure de 8 mN suivant X, 4 mN suivant Y et 9 mN suivant Z. Le capteur est réalisé par gravure de silicium et ses dimensions sont de 4,5 mm x 5 mm x 0,525 mm, ce qui permet de l'intégrer aisément sur un microrobot.

Un préhenseur à deux doigts de serrage a été proposé dans [\[FF01\]](#). Il utilise un actionnement piézoélectrique pour mouvoir un doigt mobile, l'autre doigt est constitué de poutres piézorésistives (*cf.* [FIG. 3.5](#)). Une plage de mesure allant jusqu'à 600 μN est couverte par le capteur avec une résolution de 2 nN. Comme la réalisation des jauges piézorésistives se fait par des techniques de microfabrication, leur intégration sur des cantilevers d'AFM a été proposée dans [\[GSS⁺99, GGR05, PMAM⁺07\]](#). Leur utilisation se concentre sur l'évaluation des forces d'interaction, la caractérisation de surface et l'analyse de cellules biologiques dans l'air ou dans un liquide. Les gammes de forces mesurées sont dans ce cas de quelques dizaines de nN à quelques μN .

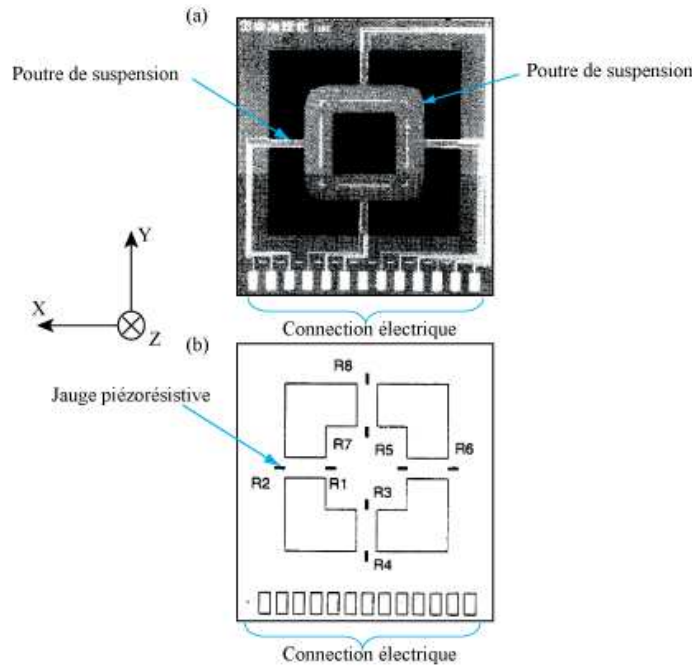


FIG. 3.4 – (a) Capteur à jauge piézorésistive tri-axiale, (b) les emplacements des jauges sur les poutres de suspension [ASF⁺99].

Les capteurs de force capacitifs

Ils exploitent le principe électrostatique pour mesurer la force. Ils utilisent la variation de capacité entre deux armatures conductrices qui constituent un condensateur. Un système de plusieurs condensateurs microfabriqués est constitué d'armatures fixes et d'armatures mobiles suspendues. Sous l'action d'une force extérieure, les armatures mobiles se déplacent et créent une variation de capacité. La capacité d'un condensateur est exprimée par l'équation (3.1), avec n le nombre de condensateurs, ϵ_0 la conductivité du vide, L la longueur de l'armature, d la distance variable qui fait varier la capacité et h la hauteur de l'armature.

$$c = n \epsilon_0 \frac{Lh}{d} \quad (3.1)$$

Il est alors possible d'utiliser un circuit électronique spécifique pour déterminer la variation de capacité (par exemple le circuit MS3110³).

Supposant un capteur capacitif où chaque armature mesure $400 \mu\text{m}$ de longueur, $50 \mu\text{m}$ de hauteur et $5 \mu\text{m}$ séparant les armatures au repos. La distance de séparation entre les armatures peut diminuer jusqu'à $3 \mu\text{m}$. Pour une configuration simple, placement en face à face des armatures (cf. FIG. 3.6), la variation de capacité peut atteindre $3,54 \text{ pF}$ pour un nombre de condensateurs $n = 100$ (si $d_1 \ll d_2$). Cette grandeur est largement mesurable par le circuit MS3110 qui assure une plage de mesure de $0,25$ à 10 pF .

³www.irvine-sensors.com/pdf/MS3110DatasheetUSE.pdf.

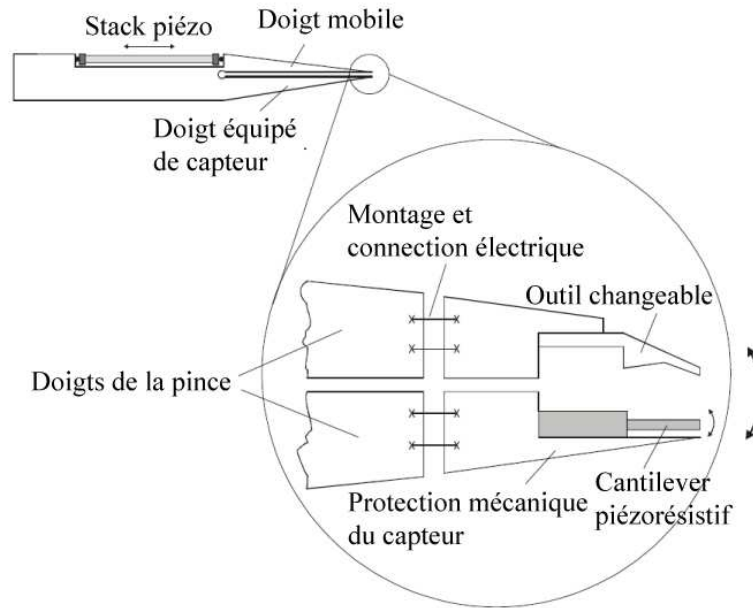


FIG. 3.5 – Capteur piézorésistif intégrant un préhenseur dans [FF01].

Dans [Gra08], les auteurs présentent un capteur capacitif qui dispose d'une étendue de

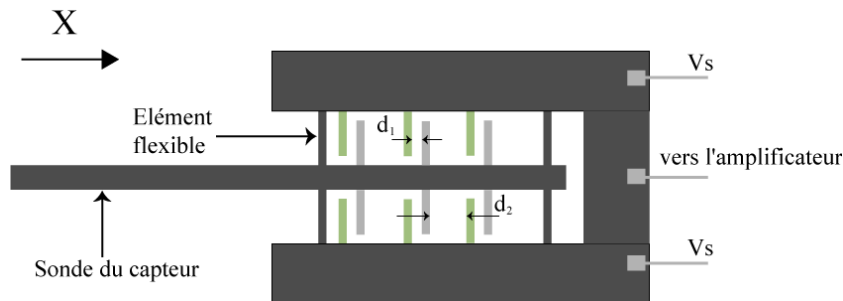


FIG. 3.6 – Configuration simple des condensateurs.

mesure de ± 2 mN avec une résolution de $0.4 \mu\text{N}$. Pour augmenter la sensibilité du capteur et réduire les problèmes de non-linéarité, une configuration transverse, placement en alternance des armatures, avec une mesure différentielle est proposée. Sur la figure FIG. 3.7, le capteur est caractérisé par deux ensembles de condensateurs C_1 et C_2 dont les expressions sont régies par les équations (3.2) et (3.3) avec A la surface des armatures, d_1 , d_2 et d_3 les distances séparant les armatures, δ_d le déplacement du à la force appliquée sur la sonde (si $d_1 \ll d_3$ et $d_1 \ll d_2$).

$$C_1 = \epsilon_0 A n \left(\frac{1}{d_1 + \delta_d} - \frac{1}{d_2 - \delta_d} \right) \quad (3.2)$$

$$C_2 = \epsilon_0 A n \left(\frac{1}{d_2 + \delta d} - \frac{1}{d_1 - \delta d} \right) \quad (3.3)$$

Le même principe a été utilisé pour effectuer des mesures de forces sur des préhenseurs

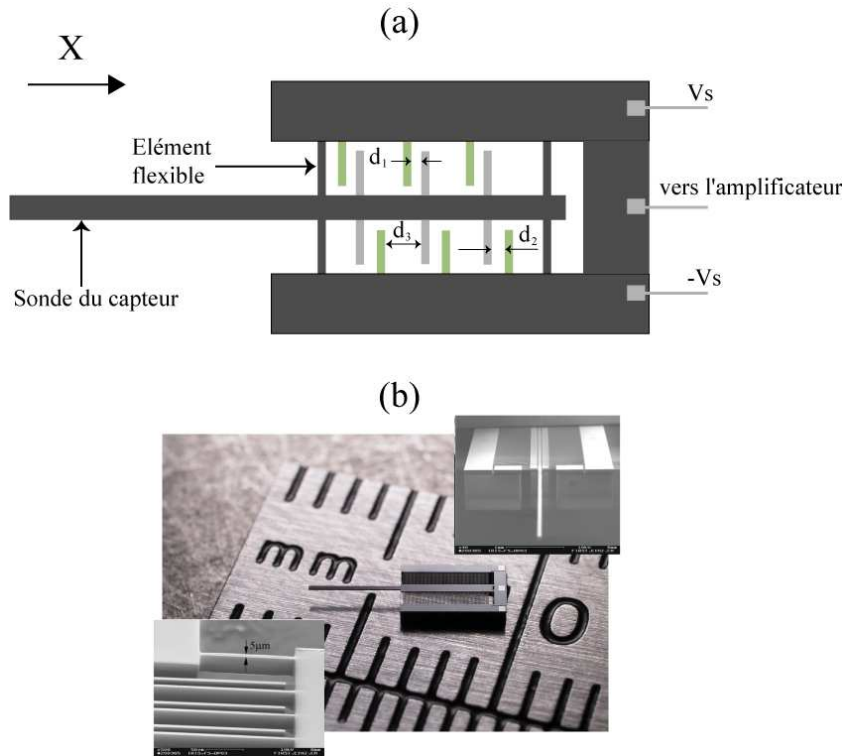


FIG. 3.7 – Configuration transverse avec une mesure différentielle (a) et la réalisation du capteur capacitif (b).

microfabriqués à deux doigts de serrage à actionnement électrostatique [BNO⁺07] et électrothermique [KLZS08b]. Un arrangement spécifique de plusieurs condensateurs permet de réaliser des capteurs de plusieurs axes qui sont résumés dans le tableau TAB. 3.2. Les capteurs capacitifs sont soumis également au compromis entre la plage de mesure et la résolution. Ils possèdent une très bonne dynamique mais restent sensibles à la variation du milieu (ϵ). La qualité de la microfabrication est primordiale pour assurer le bon fonctionnement de ce type de capteur.

Les capteurs utilisant une mesure indirecte se basent sur des propriétés électriques du matériau. Sous l'effet de la force, une des propriétés du matériau varie et permet alors de déduire la force. Les systèmes les plus utilisés exploitent les effets piézoélectriques.

Références	Nombre d'axes de mesure	Performances (Course/Résolution/axe)
[SPP ⁺ 03]	2 DDL	490 μN /0,01 μN /X, 900 μN /0,24 μN /Y
[SN07]	2 DDL	25 μN /0,01 μN /X, 110 μN /0,24 μN /Y
[BMN ⁺ 07]	3 DDL	700 μN /0,5 μN /X et Y, 750 nNm/0,5 nNm/ M_z
[BMN09a, BMN09b]	6 DDL	1000 μN /1,4 μN /X, Y et Z, 2600 nN.m/3,6 mN.m/Cx, Cy et Cz
[BMN ⁺ 08]	3 DDL	1500 μN /2,2 μN /X et Y, 3500 nN.m/8,4 nN.m/Cz
[MBN10]	3 DDL	± 20 à ± 200 μN / 30 nN/ X, Y et Z
[KLZS08a, KLZS08b] (sur un préhenseur)	2 DDL	± 50 μN /19,9 nN/X, ± 96 μN , 38,5 nN/Y

TAB. 3.2 – Les capteurs de force capacitif à plusieurs axes de mesure.

Capteurs piézoélectriques

Il existe des capteurs de force piézoélectriques qui se basent sur l'apparition ou la variation d'une polarisation électrique sous l'effet d'une contrainte appelé effet direct. Ce phénomène est exploité en déposant des électrodes sur deux faces opposées d'un matériau piézoélectrique. Une différence de potentiel proportionnelle à la contrainte appliquée apparaît alors entre les électrodes.

Les matériaux piézoélectriques sont anisotropes par conséquent l'emplacement des électrodes et l'orientation des contraintes doivent être pris en compte pour détecter le signe et l'intensité de l'effet piézoélectrique. Nombreux sont les matériaux piézoélectriques, on peut mentionner les travaux significatifs sur la mesure de force utilisant la piézoélectricité. Trois matériaux sont souvent utilisés :

- le PVDF (*PolyVinylidène Fluoride*) est un film de polymère utilisé dans le cadre des travaux mentionnés dans [SXL03]. Les auteurs proposent la mesure de force sur 2 DDL en utilisant des poutres constituées de films de PVDF. Un capteur constitué de deux poutres recouvertes de film de PVDF de 28 μm permet d'obtenir une sensibilité de 6,0245 V/ μN (cf. FIG. 3.8). Le système permet d'atteindre une résolution sub- μN avec un temps de réponse de 2 ms ;
- le PZT (Titano-Zirconate de Plomb) est connu pour ses propriétés permettant de l'utiliser en tant qu'actionneur. L'intégration du courant traversant une poutre bimorphe piézoélectrique avec des électrodes en cuivre ou en nickel permet de mesurer le déplacement et la force appliquée à son extrémité [IRLC09]. Un circuit électrique retient les charges pour assurer des mesures en statique. Une gamme de force de 1,15 mN est obtenue avec une erreur d'estimation de 0,16 mN ;

- l'IPMC (*Ionic Polymer Metal Composite*) est un polymère électroactif qui possède des caractéristiques piézoélectriques permettant de l'utiliser en tant que capteur et actionneur. Dans [BK04], une poutre IMPC équipée d'électrodes en cuivre est utilisée pour contrôler la force et la position permettant de couvrir une étendue de mesure de 2 mN avec une résolution de 8 μN .

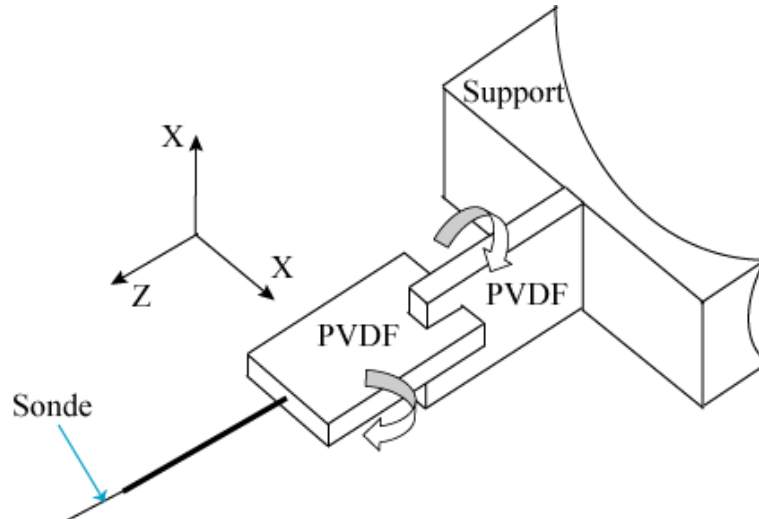


FIG. 3.8 – Schéma de principe d'un capteur PVDF à 2 DDL [SXL03].

Les capteurs piézoélectriques possèdent une très bonne dynamique ce qui peut convenir pour certaines applications. Leur utilisation en mode statique reste limitée par la difficulté de maintenir les charges sur une longue durée et les non-linéarités inhérentes aux matériaux.

3.2.2 Capteurs actifs

La mesure de la force se base sur un contrôle actif utilisant les forces de rappel électromagnétiques, électrostatiques ou mécaniques. Le principe tire son origine de la balance de Roberval. L'idée est de contrôler une grandeur d'opposition afin de garder une sortie à l'équilibre ou à "zéro". D'où une complexité supplémentaire car le système de mesure intègre à la fois un capteur et un actionneur. Le principe des capteurs utilisés sont parmi ceux cités auparavant. Les actionneurs peuvent être piézoélectriques, magnétiques et électrostatiques.

Dans la littérature, il existe 4 types de capteurs asservis :

- l'IFM (*Interfacial Force Microscope*) ;
- le SFA (*Surface Force Apparatus*) ;
- le Capteur Capacitif Asservi (CCA) ;
- le Capteur Magnétique Asservi (CMA).

Nom	Les axes de mesure	Capteurs	Actionneurs (principe)	Surface en contact
IFM	[JH91] $\rightarrow K_x$ [BK08] $\rightarrow K_x$	\rightarrow Capacitif \rightarrow Optique	Capacitif Piézoélectrique	Pointe Pointe
SFA	[IMA ⁺ 10] $\rightarrow K_x$ [Ste00] $\rightarrow K_x$	\rightarrow Optique \rightarrow Capacitif	Piézoélectrique Magnétique	Cylindre Cylindre
CCA	[SPP ⁺ 03] $\rightarrow K_x$	\rightarrow Capacitif	Électrostatique	Plan
CMA	[Che09] $\rightarrow K_x, K_y$	\rightarrow Optique	Magnétique	Sphère

TAB. 3.3 – Comparaison des différents capteurs asservis.

Les différents capteurs de force asservis se distinguent par le nombre d’axes de mesure, le type de capteur, le type d’actionneur et de surfaces en contact. Ces capteurs présentent l’avantage d’effectuer des mesures sans déformation. Le tableau TAB. 3.3 résume les caractéristiques des capteurs actifs.

3.3 Caractérisation du micromonde

Les différentes forces régissant les objets à l’échelle microscopique ont été explicitées dans le chapitre 1. Nous avons mis en avant la nécessité de les comprendre afin de mieux les appréhender pour réussir un micro-assemblage automatisé. Deux techniques sont généralement utilisées pour mesurer les forces d’interactions : l’AFM et le SFA. L’AFM permet de réaliser les mesures entre une surface plane de l’échantillon et une bille ou une pointe à l’extrémité de la poutre cantilever. Le SFA mesure les forces entre deux cylindres offrant l’équivalent d’un contact sphère/plan. Le modèle sphère/plan est le plus utilisé car des modèles de connaissance des forces sont disponibles et les validations expérimentales sont possibles grâce à l’utilisation d’un AFM ou d’un SFA.

Prenons un cycle de mesure typique de l’AFM qui conduit à l’évolution de force mesurée en fonction du déplacement de l’échantillon ou du levier. Dans [RC08], les forces qui apparaissent lors d’une séquence d’approche/retrait sont discutées. Durant une mesure, un mouvement relatif entre le substrat et le levier peut être généré par le tube piézo-électrique de l’AFM ou un système de positionnement lié au substrat. Une séquence d’approche/retrait se décompose en 4 phases :

1. un mouvement sans contact du levier ou du substrat avec le levier dans son état libre. Au cours du mouvement, une déformation du levier en forme concave apparaît due à l’action des forces à faible distance telles que van der Waals et/ou capillaires, et à plus grande distance les forces électrostatiques suivant les conditions de l’expérience ;
2. un mouvement avec contact accompagné d’une augmentation de la force jusqu’à l’établissement de la précharge. Le levier fléchit dans sa forme convexe. On retrouve alors le lien liant la force mesurée, la raideur du levier et le déplacement. Une fois la précharge atteinte, le mouvement s’arrête pendant la durée du contact ;

3. un mouvement de retrait démarre. Un décalage entre les courbes aller et retour est observé du à la rotation du levier autour de sa pointe entre les deux phases. Le mouvement avec contact se poursuit et le levier passe par son état sans déflexion, puis fléchit en forme concave à cause des forces d'adhésion. La force permettant la séparation du contact, qui est la force de pull-off, est observée ;
4. un mouvement sans contact avec le levier à l'état libre jusqu'à la position initiale finit la séquence.

3.3.1 Mesure caractéristique des forces de pull-off

La station NANOROL (NANOanalyser pour micROmanipuLer) montrée sur la figure FIG. 3.9 est utilisée pour effectuer une séquence d'approche/retrait. Un exemple de résultat pour un contact sphère/plan obtenu est montré sur la figure FIG.3.10 mettant en évidence la force de van der Waals et la force de pull-off en milieu ambiant.

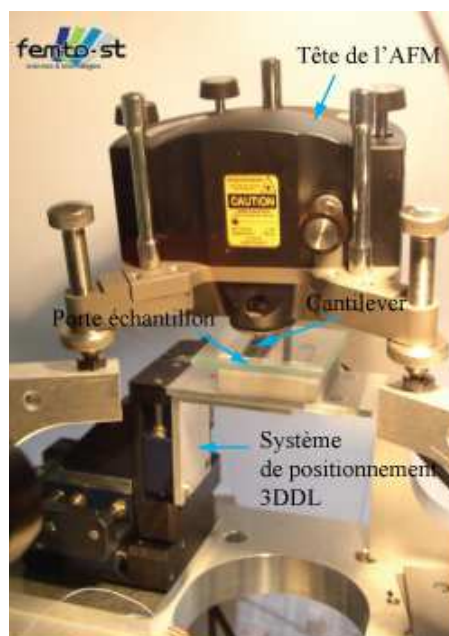


FIG. 3.9 – La station NANOROL au département AS2M de FEMTO-ST.

On peut ainsi voir sur la figure FIG.3.10 l'apparition d'une force d'attraction qui correspond à une force d'attraction (*pull-in*) lors de la phase d'approche. La portée de la force est la distance numérotée 3, ce qui est de l'ordre d'une centaine de nanomètres (nm). Cette force résulte d'une combinaison non quantifiée des forces de van der Waals et des forces électrostatiques.

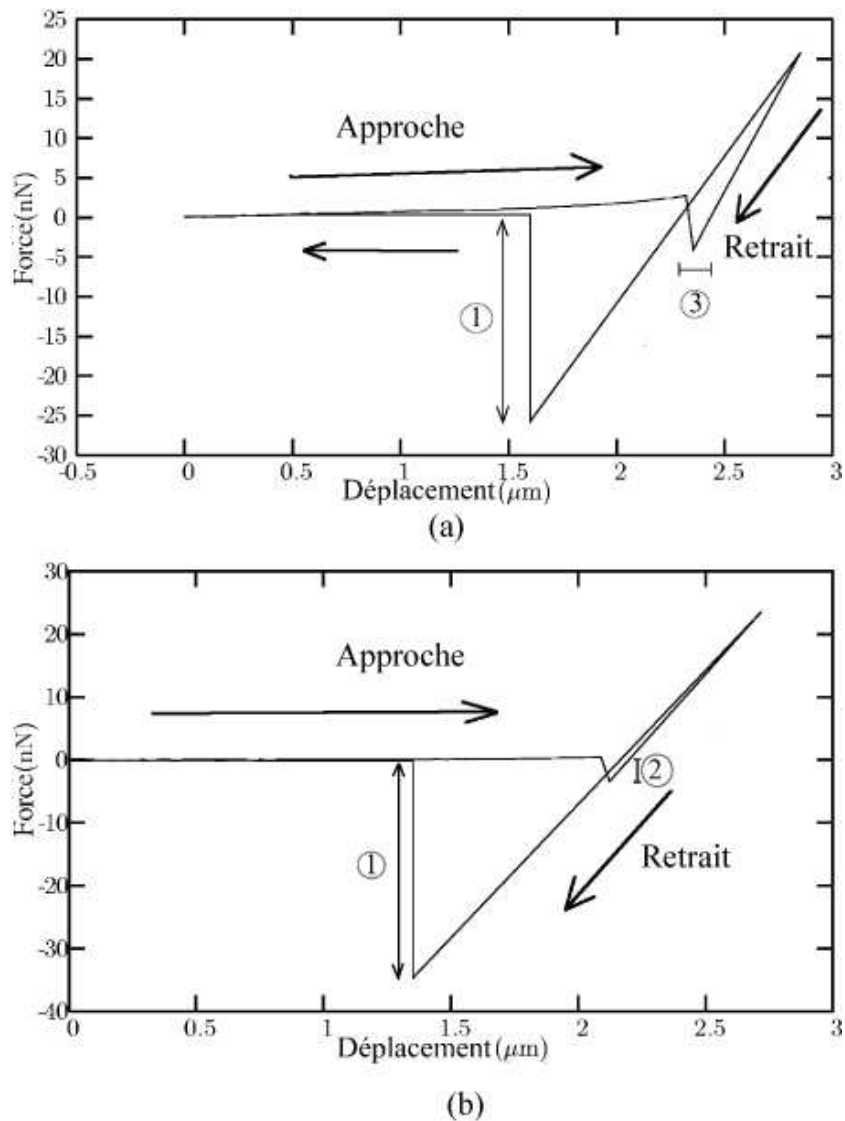


FIG. 3.10 – Courbes de mesure AFM pour des interactions avec (a) le polystyrène et (b) le verre en milieu ambiant [RC08].

Lors de la phase de retrait, la poutre reste en contact avec l'échantillon malgré le dépassement du niveau 0 de force. Cette force négative correspond aux forces d'adhésion qui sont quantifiés, par l'amplitude de détachement du contact correspondant à la force de pull-off. Cette dernière est observée sur les deux courbes avec son amplitude numérotée 1. Pour le polystyrène, on obtient $P_{mes} = 26,2$ nN et pour le verre $P_{mes} = 34,7$ nN.

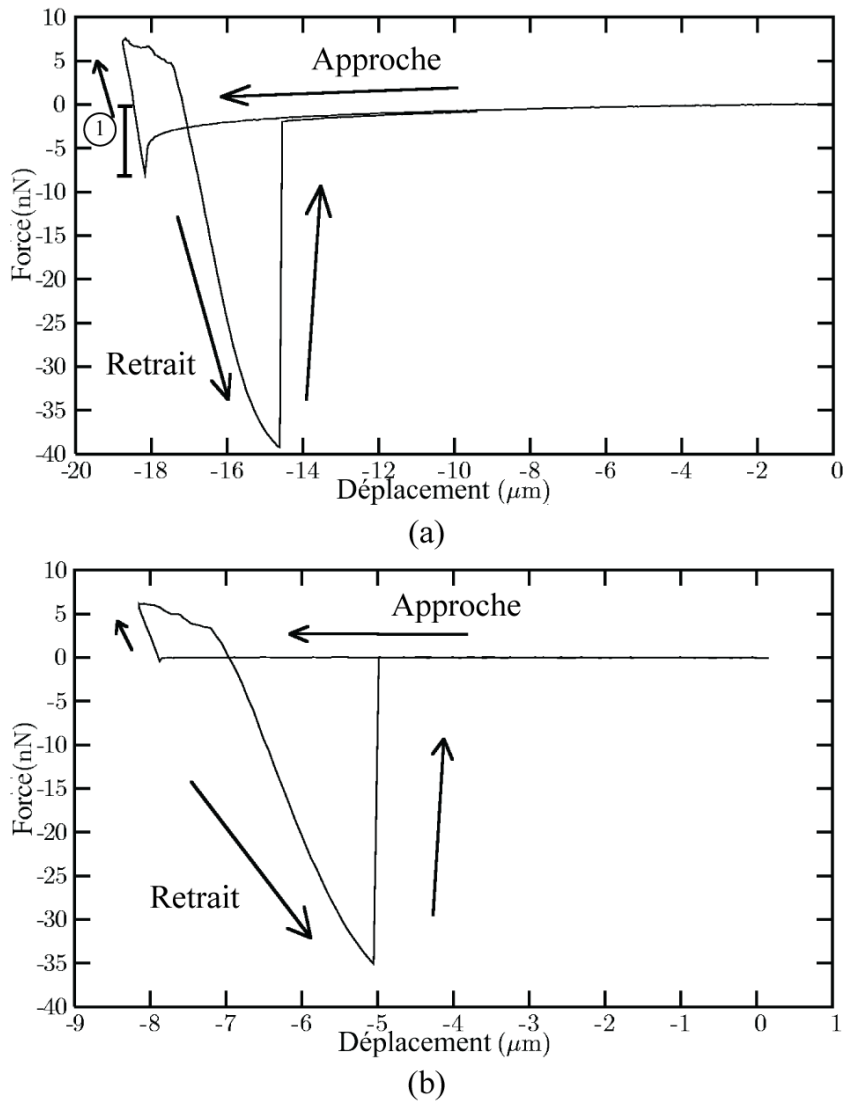


FIG. 3.11 – Courbes d’approche/retrait avec (a) un substrat en or et avec (b) un substrat conducteur à la masse d’après [RC08].

3.3.2 Mesure des forces électrostatiques

Pour observer les forces électrostatiques, une séquence d’approche/retrait est appliquée mais cette fois c’est le substrat qui bouge pour couvrir une plage de déplacement plus grande (de l’ordre de 20 μm). En effet, les forces électrostatiques agissent à une plus grande distance que la force de van der Waals. Un résultat obtenu dans [RC08] pour un contact sphère/plan avec un substrat en or est montré sur la figure FIG. 3.11 -(a).

On observe que les forces électrostatiques, représentées par la grandeur numérotée 1 (ici inférieure à 10 nN), agissent à une grande distance qui est de l'ordre d'une dizaine de micromètres. Elles peuvent être annulées par une mise à la masse du substrat (*cf.* FIG. 3.11 -(b)) qui est une pratique répandue. Cette stratégie de mise à la masse est bien pratique lors de la micromanipulation et le micro-assemblage, elle permet d'éviter les mouvements non contrôlés des micro-objets.

3.3.3 Mesures des forces capillaires

Lors des séquences d'approche/retrait avec l'AFM, les forces capillaires sont comprises dans la force de pull-off. Néanmoins il est difficile de distinguer la proportion de la force capillaire car la taille des ménisques est estimée entre 1 à 10 nm donc difficilement mesurable.

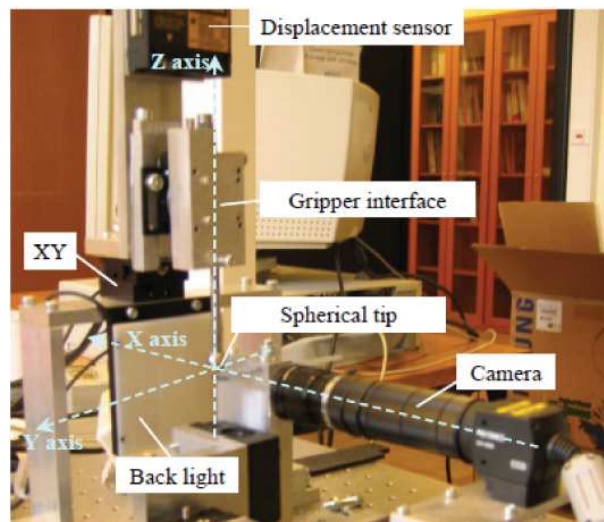


FIG. 3.12 – Système de mesure de la force axiale d'un pont capillaire [Lam05].

L'étude de la force axiale générée par un pont capillaire est proposée dans [Cha07]. L'intérêt de telle étude est de comprendre l'influence de la force capillaire. Pour l'échelle de 100 μm - 1 mm, un système de mesure a été développé pour la mesure des forces capillaires (*cf.* FIG. 3.12). C'est un dispositif macroscopique basé sur la mesure de la déflexion d'une poutre de raideur connue par mesure laser. Il permet la mesure des forces capillaires axiales. Durant les expérimentations, le volume de liquide qui constitue le pont capillaire ou ménisque est contrôlé. L'étude se concentre sur une pointe sphérique ($R = 3,95 \text{ mm}$) et un objet plan lié par un pont capillaire de $0,5 \mu\text{L}$ (équivalent d'un cube d'eau de $0,8 \text{ mm}$ de côté). La variation de la force axiale en fonction de la hauteur du

pont a été étudiée. Il a été montré que la force axiale décroît en fonction de la hauteur du ménisque. Pour une hauteur variant de 0 à 800 μm , elle varie de 0 à 1 mN (cf. FIG. 3.13). Une bonne correspondance entre la simulation effectuée par le logiciel Surface Evolver⁴ et l'expérimentation est observée. La mesure des forces capillaires pour des dimensions de

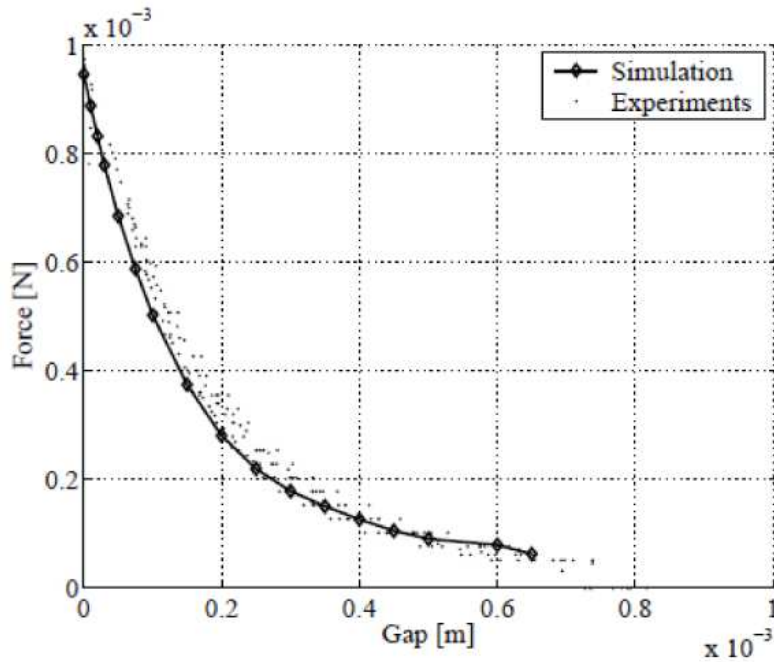


FIG. 3.13 – Variation de la force axiale en fonction de la hauteur du pont capillaire [Lam05].

ménisque entre 10 - 100 μm n'est pas couverte par l'état de l'art.

L'objectif principal des résultats présentés est la compréhension des forces qui régissent le micromonde. On observe que les travaux correspondent à des surfaces de contact de type sphère/plan pour les forces électrostatiques, les forces de van der Waals et les forces de pull-off, et des surfaces planes millimétriques pour les forces capillaires.

Nous avons vu auparavant que le contact sphère/plan n'est pas représentatif des contacts en micromanipulation et en micro-assemblage. Les surfaces planes sub-millimétriques sont fréquentes en micro-assemblage, mais les modèles fiables et les mesures des forces d'interaction pour un contact plan/plan à ces dimensions, n'est pas couvert par l'état de l'art.

⁴Logiciel de simulation numérique pour la modélisation d'un liquide soumis à une contrainte ou une force

3.4 Nouveau système de mesure des forces d'interaction pour un contact plan/plan

Pour réussir les tâches de micro-assemblage, une meilleure compréhension des forces régissant les interactions à l'échelle microscopique est indispensable. Le manque de modèles fiables et de mesures nous conduit à la mesure des forces de pull-off pour des contacts plan/plan car il est nécessaire de rompre des contacts durant le micro-assemblage. Un système capable de réaliser des mesures de pull-off pour un contact plan/plan avec une surface inférieure à $0,1 \text{ mm}^2$ n'existe pas pour le moment. Dans ce qui suit, nous allons proposer un système microrobotique capable d'orienter deux surfaces planes l'une par rapport à l'autre et de réaliser des mesures de pull-off.

3.4.1 Mesure des forces de pull-off pour un contact plan/plan

L'objectif principal est de réaliser des mesures de pull-off entre deux surfaces planes. Dans un premier temps, le système doit être capable de positionner deux surfaces l'une par rapport à l'autre (*cf.* FIG. 3.14).

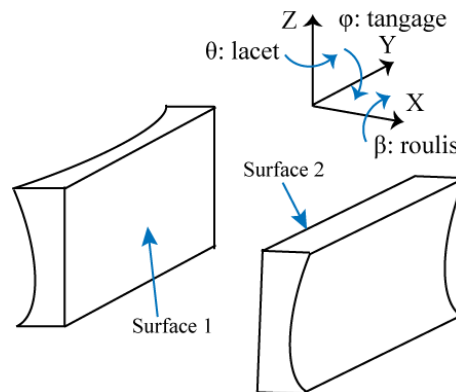


FIG. 3.14 – Le positionnement de deux surfaces planes.

Cette opération n'est pas triviale car les surfaces en regard sont de quelques dizaines de μm à quelques centaines de μm de côté. Des systèmes de positionnement à haute précision doivent être utilisés pour contrôler le contact entre les deux surfaces. Afin de réaliser cette opération de positionnement et en tenant compte de l'invariabilité du contact entre les surfaces en cas d'un défaut de roulis (rotation autour de l'axe normal à la surface), il est nécessaire d'utiliser une structure microrobotique possédant au minimum 5 degrés de liberté (X , Y , Z , θ et φ). Afin d'assurer une procédure d'approche/retrait, un axe de translation assurant une résolution nanométrique doit être utilisé. Afin de faciliter la mise en place des échantillons, un axe de positionnement grossier à grande course doit être installé sur la structure robotique.

Lors des mesures de pull-off, on observe dans les différents travaux traitant de la force de pull-off que les paramètres qui peuvent influencer son amplitude [EZ96, ALO⁺96, GRR06, RC08, YLP08, Lec08] sont le type de contact, la précharge, la vitesse d'approche/retrait, la surface de contact, la rugosité des surfaces en contact, l'hygrométrie, la température et les caractéristiques des matériaux. Le contrôle simultané de tous les paramètres est difficilement réalisable et les travaux se concentrent sur certains paramètres influents bien définis.

Afin de choisir le capteur utilisé pour la mesure de pull-off pour un contact plan/plan, la plage de mesure doit être comprise entre les forces de pull-off par mesure AFM (quelques μN) et les forces capillaires pour une surface millimétrique (1 mN). Par conséquent, le capteur doit mesurer sur une plage allant jusqu'au mN avec une résolution proche du μN . Il doit également avoir une surface de contact plane comprise entre $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ à $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$. Cette plage couvre les dimensions des surfaces en contact lors du micro-assemblage robotique.

Nous proposons d'utiliser un capteur de force capacitif venant de FemtoTools[®], un start-up suisse qui propose des capteurs de force issus des travaux de recherche. Le capteur choisi est de type S270 qui couvre une étendue de mesure de $\pm 2\ \text{mN}$ avec une résolution de $0.4\ \mu\text{N}$. La raideur du capteur est de $1000\ \text{N/m}$. Il délivre une tension de sortie proportionnelle à la force appliquée dans la direction de mesure. Chaque capteur est calibré chez le fabricant et est fourni avec sa sensibilité propre. Le déplacement maximum de la partie déformable est de $2\ \mu\text{m}$. Il est alors nécessaire de contrôler un déplacement de l'ordre du nm pour obtenir une résolution de force de l'ordre du μN . Cette grandeur est largement assurée par des axes de positionnement à faible course mais à grande résolution. En revanche, en terme de précision de positionnement (et par conséquent en terme de précision de force), $1\ \text{nm}$ ($1\ \mu\text{N}$) est difficilement réalisable.

Le système de mesure développé se base sur deux robots manipulateurs (cf. FIG. 3.15) :

- R1 est un robot équipé d'axe de positionnement fin à 4 DDL dont 3 DDL en translation ($X_1Y_1Z_1$) et 1 DDL en rotation (θ). On utilise pour cela un axe venant de chez Physik Instrumente[®], P-611.3 NanoCube[®] avec des capteurs intégrés. Il a une course de $100\ \mu\text{m}$ avec des résolutions de $1\ \text{nm}$ en XYZ. La rotation est assurée par un axe venant de chez SmarAct[®] (SR-3610-S avec $1.1\ \mu^\circ$ de résolution). Les deux axes disposent de capteurs incrémentaux et sont commandés en boucle fermée. Le capteur de force est monté sur ce robot. Un système de positionnement à 3 DDL à grande course $X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$, table Newport[®] manuelle, assure la mise en place rapide des mesures ;
- R2 assure la grande course avec un axe de positionnement venant de chez Physik Instrumente[®], Mercury[®] M112.1 DG avec une course de $25\ \text{mm}$ ($X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$) sur lequel est monté un axe rotatif (SR-3610-S) assurant le tangage (φ) de l'échantillon. L'échantillon est un morceau de silicium découpé d'un wafer et nettoyé au piranha (mélange d'acide sulfurique et peroxyde d'hydrogène).

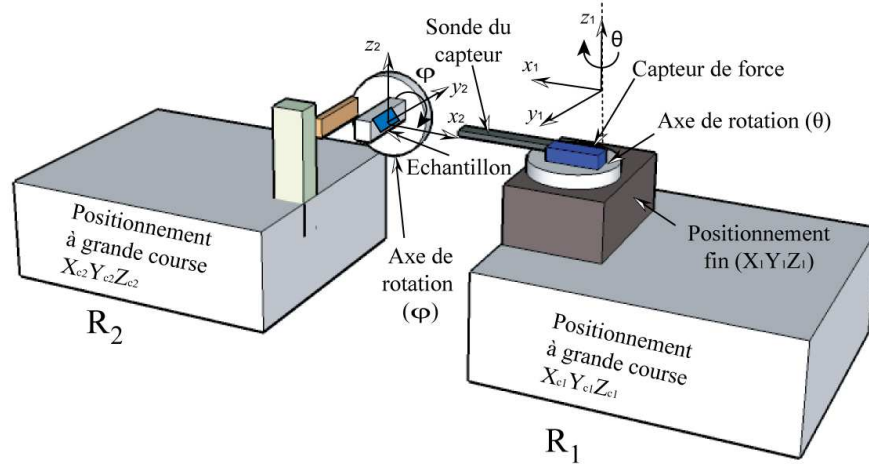


FIG. 3.15 – La configuration du système de mesure de la force de pull-off avec ses 11 degrés de liberté.

L'extrémité de la pointe du capteur et l'échantillon constituent alors deux surfaces planes sur lesquelles la mesure de pull-off va être effectuée. La surface de contact qui correspond à la surface de l'extrémité du capteur est de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. Les caractéristiques des surfaces en contact sont des paramètres très importants [AAN⁺98]. Une mesure des rugosités des surfaces a été effectuée par image topographique AFM (cf. FIG. 3.16) :

- la pointe du capteur est caractérisée par une rugosité moyenne R_q de 24,31 nm (rms) et une rugosité maximale pic à pic R_t de 162 nm. Ce type de surface correspond typiquement à la tranche verticale (sidewall) du silicium usiné par DRIE. On observe le *scaloping* obtenu à cause de la succession de gravures en hexafluoroéthane CF_6 et de dépôts de C_4F_6 (hexafluorocyclobutène) pour rendre la surface passive ;
- l'échantillon est un morceau de silicium provenant d'une découpe de wafer possédant une rugosité moyenne R_q de 6,60 nm et une rugosité maximale pic à pic R_t de 31 nm.

Le système de mesure développé est montré sur la figure FIG. 3.17. Durant la phase de mesure, la vitesse d'approche et de retrait est fixée à 800 nm/s.

3.4.2 Résultats expérimentaux

Durant les expérimentations, la variation naturelle de l'hygrométrie et de la température dans la salle de mesure a été consignée. L'hygrométrie a été mesurée entre 35 % et 45 % et la température est comprise entre 24° et 28°. En utilisant le système développé, on effectue une séquence d'approche/retrait permettant d'observer la force de pull-off sur la phase de retrait. La figure FIG. 3.18 montre une courbe d'approche/retrait. On peut

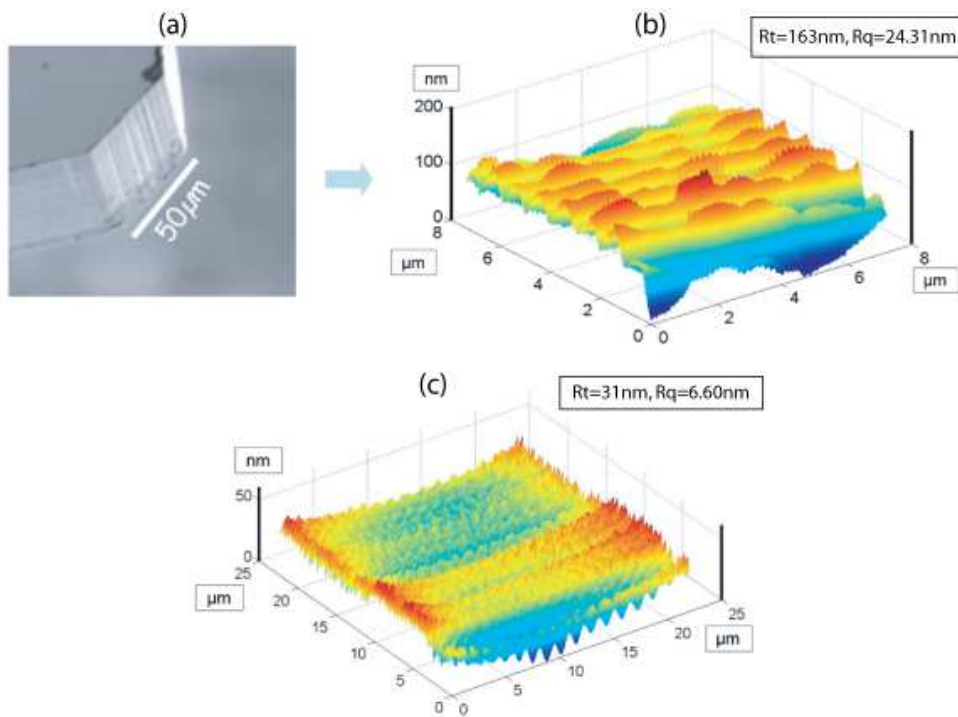


FIG. 3.16 – (a) photo MEB de la surface plane sur la pointe du capteur S270, (b) mesure de la rugosité de la pointe, (c) mesure de la rugosité de l'échantillon.

observer que la raideur du capteur est bien de $K_{\text{capteur}} \approx 1000 \text{ N/m}$. La précharge qui vaut $1535 \mu\text{N}$ correspond à la force maximale appliquée à la fin de la phase d'approche. La force de pull-off correspond au saut de force lors de la phase de retrait, elle est estimée à $25 \mu\text{N}$ sur cet exemple.

Répétabilité de la mesure

Pour valider la procédure de mesure, on effectue une campagne permettant de vérifier la répétabilité des mesures. Des essais avec différents angles de contact sont réalisés afin d'obtenir un niveau de force de pull-off significatif. Une amplitude de force de pull-off au dessus de $50 \mu\text{N}$ est choisie et la campagne de répétabilité peut commencer. La précharge est fixée à $150 \mu\text{N} \pm 50 \mu\text{N}$ et la vitesse d'approche/retrait est maintenue à 800 nm/s . Le résultat obtenu est montré sur la figure FIG. 3.19. Quinze mesures ont été réalisées et donnent une moyenne de $73,90 \mu\text{N}$ avec une variation inférieure à $10 \mu\text{N}$.

Une variation de moins de 28% a été observée sur un même point de contact et avec tous les paramètres fixés. Ce résultat n'est pas satisfaisant en tant que mesure mais constitue un très bon résultat dans le domaine des mesures des forces de surface. De même,

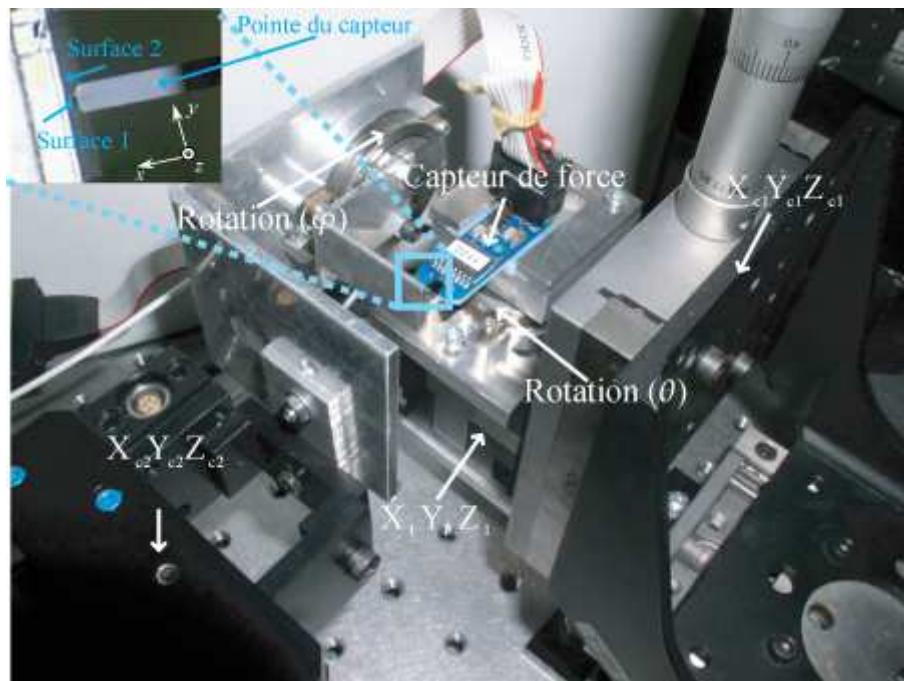


FIG. 3.17 – Le système développé pour la mesure de la force de pull-off pour des contacts plan/plan.

le déplacement du contact sur l'échantillon donne des mesures répétables des forces de pull-off. Les résultats obtenus permettent de valider le bon fonctionnement du système de mesure et la procédure de mesure.

Plusieurs mesures ont été effectuées avec différents paramètres (angle de contact, précharge, vitesse d'approche/retrait). Les résultats obtenus montrent que la force de pull-off peut varier entre $0 \mu\text{N}$ et $196 \mu\text{N}$. On peut conclure que la force de pull-off est loin d'être négligeable à l'échelle microscopique et ses conséquences sur le micro-assemblage doivent être étudiées : la force de pull-off maximum de $196 \mu\text{N}$ représente 84 fois le poids d'un micro-objet de $100 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ en silicium.

La variation de la force de pull-off en fonction de deux paramètres importants du point de vue de l'assemblage est présentée dans ce qui suit. Les deux paramètres en question sont l'angle de contact (θ ou φ) et la précharge. En effet, le contrôle de l'orientation des micro-objets par rapport aux doigts du préhenseur ou d'un substrat arrive souvent durant les opérations de micro-assemblage. Dans le cadre du guidage, l'influence de l'orientation du support optique par rapport à la rainure sur la force de pull-off doit être étudiée. De même, l'influence de la précharge sur la force de séparation du contact entre les sillons en V et les V saillants mérite une attention particulière.

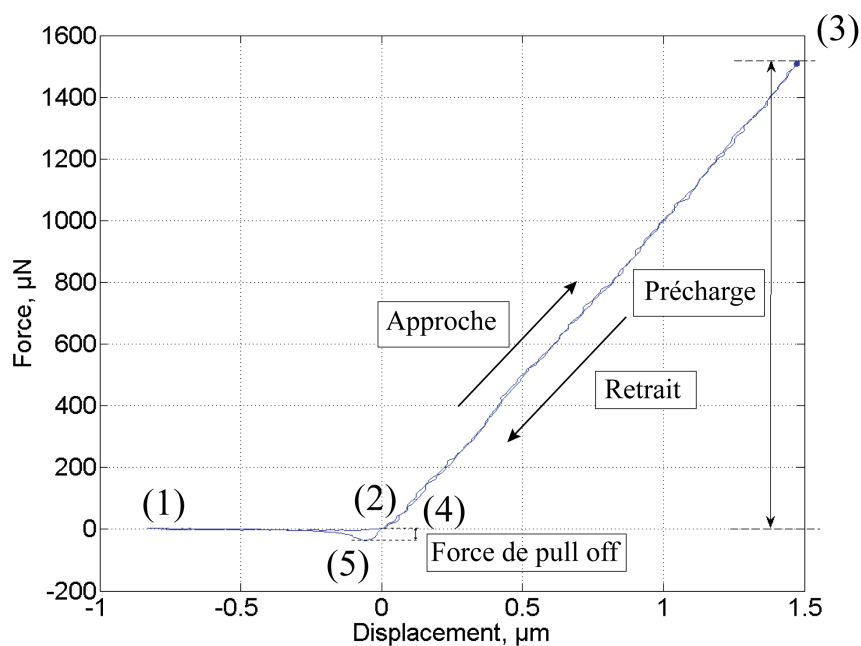


FIG. 3.18 – Une courbe d’approche/retrait réalisée sur le système de mesure.

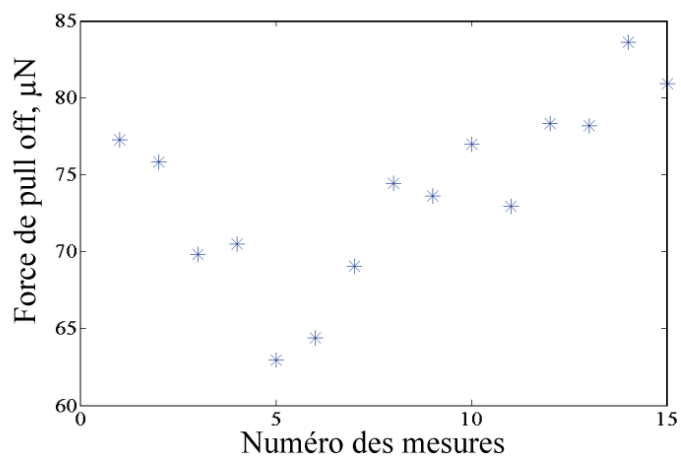


FIG. 3.19 – Répétabilité des mesures de la force de pull-off.

Effet de la précharge

L’effet de la précharge sur la force de pull-off est aussi étudié. On choisit arbitrairement un point de contact avec un angle de contact permettant d’observer une force

de pull-off supérieure à $50 \mu\text{N}$. Ensuite, nous faisons varier la précharge sur plusieurs séquences d'approche/retrait. Le résultat obtenu est montré sur la figure FIG. 3.20.

On observe une faible variation de la force de pull-off pour une précharge au dessus de

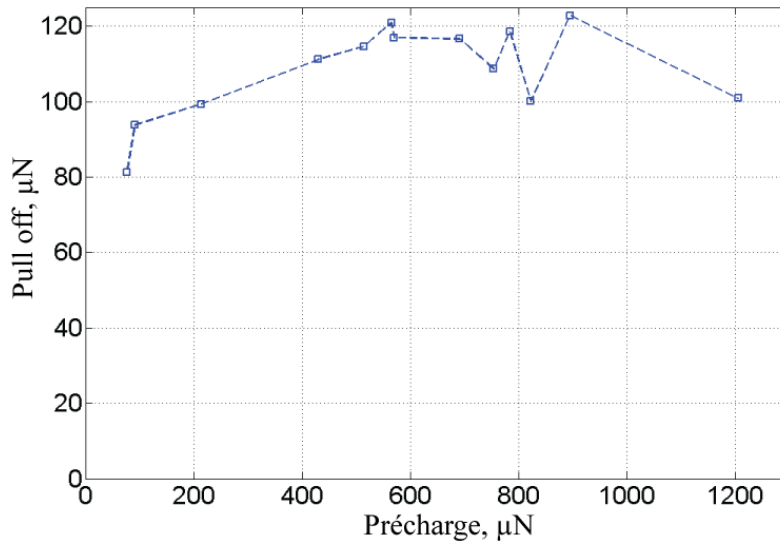


FIG. 3.20 – Variation de la force de pull-off en fonction de la précharge.

$200 \mu\text{N}$. En dessous de $200 \mu\text{N}$, la force de pull-off croît avec la précharge en passant de $82 \mu\text{N}$ à $125 \mu\text{N}$. Ces variations raisonnables (variation pic à pic de 41,55 %) nous conduisent à conclure que la plastification et l'indentation entre les deux surfaces ne se produisent pas. Ces résultats sont très importants pour les stratégies de micro-assemblage. En effet, les éléments à l'échelle micro sont souvent flexibles (préhenseur, actionneur, capteurs) et la force de pull-off peut engendrer des déplacements indésirés.

Effet de la variation de l'angle de contact

Dans un premier temps, l'effet de la variation d'un seul angle de contact (lacet θ) est étudié. On utilise la procédure de mesure que nous venons de valider. Nous faisons d'abord varier le tangage φ afin d'obtenir une configuration donnant la plus grande force de pull-off. Le lacet θ est maintenu fixe durant cette opération. Une fois la plus grande force de pull-off obtenue, le tangage est maintenue fixe par la suite. Le balayage du lacet peut alors commencer et nous allons passer par le contact parfait entre les deux surfaces. On observe alors une variation de la force de pull-off comme montré sur la figure FIG. 3.21.

Ces mesures montrent l'influence du lacet θ sur la force de pull-off en maintenant la valeur de la précharge autour de $200 \mu\text{N} \pm 50 \mu\text{N}$. Cette imprécision est due au fait

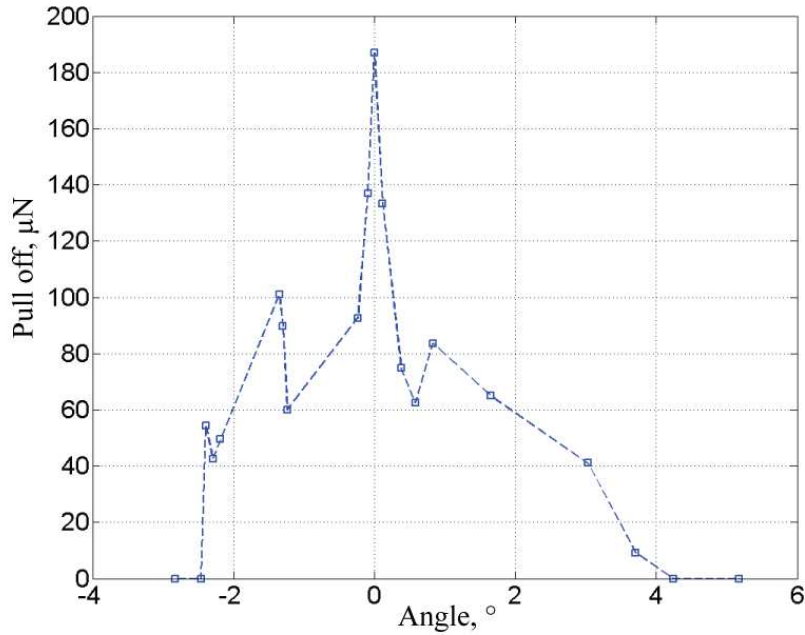


FIG. 3.21 – Variation de la force de pull-off en fonction de l'angle θ .

que lorsqu'on génère une rotation, la compensation du décalage induit n'est pas parfaite. Les $\pm 50 \mu\text{N}$ d'imprécision correspond à $\pm 50 \text{ nm}$ d'erreur en position. En effet pour calculer précisément la compensation, le système robotique doit être calibré. La force de pull-off présente un pic de $190 \mu\text{N}$ et elle décroît quand le lacet s'éloigne de l'angle où est apparu le pic. Elle est même nulle au-delà de $-2,45^\circ$ et $4,24^\circ$. On peut déduire que le pic obtenu correspond à une configuration qui maximise la surface de contact entre les deux surfaces planes. Ces résultats sont très importants pour le micro-assemblage robotique. En effet, la force de pull-off est présente à chaque rupture de contact durant les phases de micro-assemblage telles que le contact entre deux micro-objets ou le contact micro-objet et les outils d'un préhenseur. Le contrôle de l'angle de contact entre deux surfaces planes permet de contrôler la force de pull-off. Ainsi lors d'une opération de prise/dépose, il est possible d'introduire un angle entre le micro-objet et les doigts d'un préhenseur pour réduire la force de pull-off.

La variation des deux angles n'est pas proposée car elle nécessite l'étalonnage du système robotique qui ne fait l'objet de cette thèse. Dans ce cas précis, il nous faut déplacer le centre de rotation des deux axes sur le centre de la surface de contact de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. L'étalonnage des systèmes microrobotiques nécessite des investigations afin de mettre en place des algorithmes, développer des techniques et des outils. Ces investigations ne rentrent pas dans le cadre de cette thèse mais ont conduit à d'autres travaux au sein du laboratoire.

3.4.3 Discussions

Les forces mesurées peuvent être comparées à l'expression des forces à l'échelle micro dans la littérature. D'abord nous vérifions si lors de l'application de la précharge, on observe l'indentation entre les deux surfaces. Une précharge de $1200 \mu\text{N}$ est appliquée (cf. FIG. 3.20), ce qui correspond à une force de surface de $\frac{F_{Prcharge}}{S} = 0,48 \text{ MPa}$. Cette valeur est largement inférieure à la limite d'élasticité du silicium (120 MPa) ce qui explique la faible influence de la précharge.

Deux forces constituent la force de pull-off : la force de van der Waals et la force capillaire [EZ96, CZK03].

La première comparaison porte sur la force capillaire. L'expression analytique de la force capillaire pour un contact plan existe dans la littérature [Lam07]. Mais le modèle proposé ne prend pas en compte la rugosité des surfaces qui est un paramètre influent d'après [CS86, RAE⁺02, But08]. Néanmoins, il est intéressant de noter qu'en référence à [EZ96, CZK03], une hygrométrie comprise entre 3 à 60 % conduit à une force capillaire constante. Nous pouvons considérer que la force capillaire n'est pas influencée par l'hygrométrie durant notre expérience car le taux d'hygrométrie mesuré est compris entre 35 à 45 %. La seconde porte sur la force de van der Waals pour un contact plan/plan. Son expression est donnée dans [HP91] :

$$f_{vdw} = \frac{A}{6\pi z^3} \quad (3.4)$$

où A est la constante d'Hamaker, z la distance entre les deux plans qui vaut typiquement $0,3 \text{ nm}$.

Les dimensions de la surface ($50 \mu\text{m}$ de côté) sont plus grandes que z , on peut considérer que la force de van der Waals est proportionnelle à la surface S [GR09] :

$$F_{vdw} = \frac{A \cdot S}{6\pi z^3} \quad (3.5)$$

La rugosité des surfaces ne peut pas être négligée d'après [ALO⁺96]. Plusieurs modèles existent pour quantifier l'impact de la rugosité sur la force de van der Waals. Dans [AAN⁺98], le modèle suivant est proposé :

$$F_{vdw}^{rough} = \left(\frac{z}{z + \frac{R_t}{2}} \right)^2 \cdot F_{vdw} \quad (3.6)$$

Avec R_t la hauteur maximum des profils. Les mesures de rugosité ont permis d'estimer $R_t = 163 \text{ nm}$ (cf. FIG. 3.16). La constante de Hamaker A entre deux surfaces de silicium est comprise entre 143 and 173 zJ [BGK06], la valeur théorique de la force de van der Waals peut alors être déduite :

$$F_{vdw}^{rough} \in [9; 11] \mu\text{N} \quad (3.7)$$

Les forces de pull-off mesurées sont largement supérieures (mais restent dans le même ordre de grandeur) à l'estimation théorique des forces de van der Waals. Elles constituent

donc une partie des forces de pull-off. D'après ces résultats, les forces capillaires représentent une plus grande partie. La proportion des forces de van der Waals peut être plus conséquente si le modèle intègre les déformations locales (sans plastification) [ALGR10]. Des investigations peuvent être menées pour approfondir le modèle.

3.4.4 Conséquences sur le micro-assemblage

Du point de vue du micro-assemblage, les valeurs des forces de pull-off obtenues et l'influence des deux paramètres étudiés (précharge et angle de contact) constituent des informations vitales lors de la conception des systèmes et des stratégies de commande. Nous identifions les conséquences des forces de pull-off sur le micro-assemblage.

Prédominance des forces d'adhésion

La prédominance de la force de pull-off à l'échelle microscopique a été observée (84 fois le poids d'un micro-objet de $100 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$). Elle représente la force nécessaire pour séparer un contact c'est-à-dire pour vaincre les forces d'adhésion. La conséquence de cela est la difficulté de contrôler précisément la position d'un micro-objet (effet de collage lorsqu'un contact apparaît). Lors des opérations de micro-assemblage, les contacts apparaissent entre les outils de préhension et le micro-objet ou entre le micro-objet et le substrat. Ainsi, il est nécessaire de définir la force de serrage appliquée à l'objet lors d'une saisie. La connaissance de la force de pull-off pour une surface de contact donnée nous conduit à la force de serrage à appliquer. Prenons le cas d'un micro-objet parallélépipédique posé sur un substrat dont la surface de contact est de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. Le préhenseur utilisé est à deux doigts de serrage et le contact entre chaque doigt et l'objet est un contact plan comme montré sur la figure FIG. 3.22.

F_{y1} et F_{y2} sont les forces appliquées par le doigt 1 et le doigt 2 suivant Y. F_{z1} et F_{z2} sont les forces de friction. L'équilibre de l'objet nous donne :

$$F_{y1} = F_{y2} = F_{yi} \quad (3.8)$$

$$F_{z1} = \mu F_{y1} \quad (3.9)$$

$$F_{z2} = \mu F_{y2} \quad (3.10)$$

La condition pour rompre le contact, c'est-à-dire vaincre la force de pull-off F_{po} , est donnée par l'équation (3.12).

$$F_{z2} + F_{z1} > F_{po} \quad (3.11)$$

$$2\mu F_y > F_{po} \quad (3.12)$$

Le figure FIG. 3.23 montre l'évolution des valeurs possibles des forces de serrage en fonction du coefficient de friction pour une force de pull-off de $196 \mu\text{N}$.

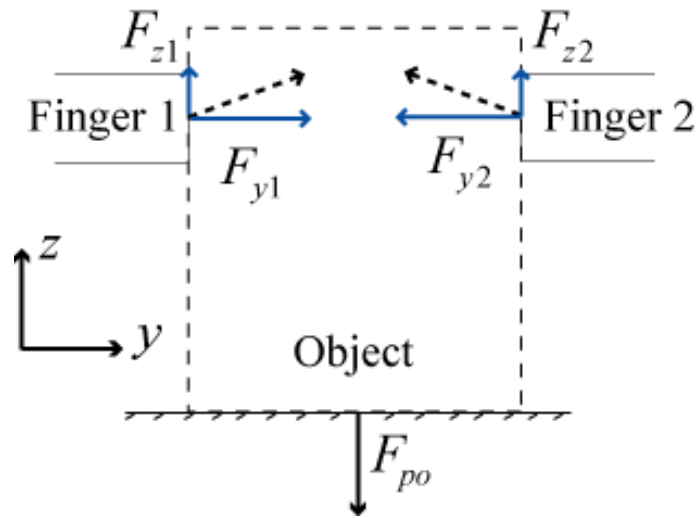
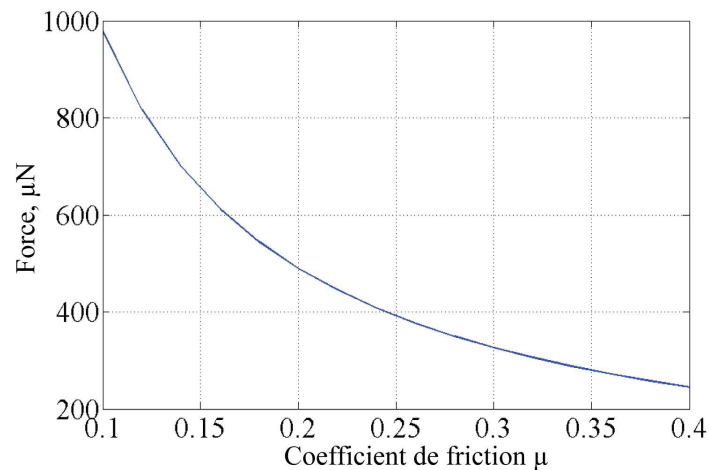


FIG. 3.22 – Prise d'un objet planaire avec les forces en présence.

FIG. 3.23 – Evolution de la force de serrage en fonction du coefficient de friction pour une force de pull-off de $196 \mu\text{N}$.

Compromis sur les surfaces en contact

L'amplitude des forces de pull-off mesurées pour un contact plan/plan est largement plus grande que pour un contact sphère/plan (inférieure à $1 \mu\text{N}$). La dépendance de la force de pull-off à la taille de surface de contact est une explication possible. Étant donné que la force de pull-off est la résultante des forces capillaires et des forces de van der Waals, tous les deux dépendant de la surface en regard, il est donc possible de considérer que la force de pull-off l'est aussi. La difficulté de séparer deux cédérômes collés en est une

illustration. La solution adoptée est souvent de glisser l'un des cédéroms pour ensuite les séparer par pelage. Si on considère une opération de prise/dépose par un préhenseur à deux doigts de serrage, la rupture d'un contact s'effectue 3 fois (*cf.* FIG. 2.36). Pour annuler les forces de pull-off, la réduction des surfaces en contact constitue une approche possible. Par contre, la stabilité de la saisie passe par une surface de contact minimale pour éviter le positionnement aléatoire de l'objet entre les doigts et le glissement de l'objet. Un compromis sur la surface en contact doit être fait pour assurer la rupture des contacts et la stabilité des tâches. Le contrôle de la rugosité des surfaces en contact constitue une approche permettant de réduire les forces d'adhésion [AAN⁺98].

La stratégie consistant à introduire un angle et séparer le contact par pelage est délicat en micro-assemblage. En effet pour une saisie, le préhenseur doit être équipé de degrés de liberté permettant d'introduire l'angle et le risque de perdre le micro-objet lors du mouvement est non négligeable.

Mesure et contrôle en force lors du guidage

La présence des forces de pull-off, lors de la rupture d'un contact, doit être prise en compte lors du guidage des supports optiques. Nous avons vu durant le guidage que le support subit une série de créations et de ruptures de contacts. Pour éviter la perte du support optique par glissement, le système de manipulation doit détecter le contact et mesurer les forces de serrage et d'interaction. Lors de la rupture du contact, la présence de la force de pull-off nécessite un jeu minimal entre les V saillants et les sillons en V pour réussir la rupture du contact. Ce jeu dépend donc de l'amplitude de la force de pull-off et de la raideur globale des éléments en contact.

La mesure et le contrôle des forces de serrage et d'interaction constituent des moyens pour automatiser les tâches de micro-assemblage. La mesure de force doit donc intégrer la station de micro-assemblage. La réalisation du contrôle en force sur une structure robotique nécessite des investigations. Pour accomplir le guidage automatisé, la conception et la modélisation d'une structure robotique constituent des étapes à ces investigations.

3.5 Conclusion

Après la présentation des capteurs de force à haute résolution, nous avons vu l'utilisation des capteurs pour la caractérisation du micromonde. Ces capteurs montés sur un système de mesure permet de mesurer les forces caractéristiques du micromonde telles que la force électrostatique, la force de van der Waals, les forces capillaires et la force de pull-off. Malgré les nombreux travaux, l'évaluation de la force de pull-off pour un contact plan/plan avec une surface inférieure à 1 mm² manquait dans la littérature. Ce type de contact étant fréquent en micro-assemblage, elle a été proposée pour comprendre le comportement des micro-objets manipulés afin de réussir l'automatisation des tâches. Nous avons proposé un nouveau système de mesure capable de caractériser les forces de pull-off pour un contact plan/plan et qui repose sur l'utilisation d'un nouveau type de capteur. Une évaluation des forces de pull-off pour un contact de 50 μm x 50 μm de deux surfaces en silicium, typique en micro-assemblage, a été effectuée montrant que

la force de pull-off peut atteindre $196 \mu\text{N}$. L'influence de la précharge et de l'angle de contact a été étudiée montrant une faible variation en fonction de la précharge et une forte influence de l'angle de contact. Les niveaux des forces de pull-off mesurés montrent la prédominance des forces d'adhésion. L'effet de l'angle de contact conduit à un compromis entre la surface de contact et la stabilité lors d'une saisie. La force de pull-off induit une force de serrage minimale à appliquer, qui dépend aussi du coefficient de friction, pour accomplir la saisie d'un micro-objet. Le besoin de mesurer et de contrôler les forces de serrage et d'interaction ont été mis en avant. Le contrôle en force appliqué au guidage automatisé passe par la conception et la modélisation d'une structure robotique.

Systeme robotique pour un guidage par contrôle en force

L'importance des forces d'interaction en micromanipulation et en micro-assemblage conduit à l'utilisation de la mesure de force. L'intégration de la mesure de force sur un système robotique est étudiée dans ce chapitre. La configuration choisie est modélisée pour comprendre le comportement du micro-objet en présence d'un contact latéral. Un modèle statique est établi et validé par des simulations par des méthodes des éléments finis et des résultats expérimentaux. L'étude de l'influence des paramètres du modèle analytique conduit à l'établissement de recommandations sur les forces appliquées et la conception de préhenseur pour le micro-assemblage. Un simulateur est ensuite développé dans lequel un modèle linéaire de la force de serrage en présence de contact latéral est intégré.

Sommaire

4.1	Introduction	114
4.2	Système robotique pour le guidage automatisé	115
4.2.1	Intégration de mesure de force sur une station de micro-assemblage	115
4.2.2	Préhenseur à deux doigts instrumentés pour le guidage automatisé	117
4.3	Modèle de l'évolution de la force de serrage en présence de force latérale	119
4.3.1	Contact plan entre le micro-objet et l'extrémité des doigts	120
4.3.2	Contact type "edge/vertex" ou bord/plan	121
4.3.3	Relation entre le déplacement du point de contact Δ_{yF} et la force de contact latéral F_y	123
4.4	Validation du modèle	124
4.4.1	Simulation par la méthode des éléments finis	125
4.4.2	Validation expérimentale	127
4.5	Influence des paramètres du modèle	132
4.5.1	Influence de l'épaisseur du doigt et le décalage suivant Z	132
4.5.2	Influence de la précharge	133
4.5.3	Influence de la distance de contact ℓ	135
4.5.4	Influence de la raideur du capteur K_y et K_z	135
4.6	Conséquences sur les forces appliquées en micro-assemblage et la conception d'un préhenseur	137
4.6.1	Ratio e/ℓ sur la force de serrage	137
4.6.2	Choix de la compliance du préhenseur	138
4.6.3	Choix de la précharge	139
4.6.4	Le choix de l'actionnement et de la forme des doigts	139
4.7	Intégration d'un modèle équivalent linéaire dans un simulateur	140
4.8	Conclusion	141

4.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent l'importance des forces d'interaction lors du micro-assemblage. Pour accomplir les différentes tâches, les systèmes de micro-manipulation ou de micro-assemblage doivent être capables de contrôler les forces d'interaction. Dans le cadre du guidage automatisé par contrôle en force, un système robotique assurant la mesure de la force de serrage tout en contrôlant la force de contact latéral doit être étudié. La modélisation du système robotique utilisé est nécessaire pour comprendre le comportement du micro-objet manipulé, l'influence des différents paramètres et pour assurer l'automatisation du guidage.

4.2 Système robotique pour le guidage automatisé

Pour accomplir la commande des robots en interaction avec son environnement, il est possible d'effectuer une commande sans consigne de force et une commande avec consigne de force [KD99]. La commande sans consigne de force, regroupant la compliance passive, la commande par raideur active et la commande en impédance, est adaptée pour une tâche bien connue, unique et répétitive. Dans le cas du micro-assemblage, le caractère variable et la méconnaissance de l'environnement ou des raideurs des éléments en interaction nous conduisent vers une commande avec consigne de force, connue aussi sous le nom de contrôle en force explicite.

L'intégration des mesures de force sur une station de micro-assemblage doit être étudiée afin de choisir un système robotique capable d'effectuer le guidage d'un micro-objet en mode automatisé. Il est alors possible de choisir l'emplacement des capteurs et les axes robotiques pour la correction.

4.2.1 Intégration de mesure de force sur une station de micro-assemblage

On s'intéresse à un système robotique capable de réaliser les tâches de micro-assemblage par retour de force. Pour cela, la connaissance du type de force à mesurer est indispensable. Lors du micro-assemblage, les forces en présence sont les forces de contact ou d'interaction entre le manipulateur et son environnement, l'environnement et le micro-objet manipulé, la force de serrage et les forces de perturbation à rejeter.

Dans le cas du guidage, les perturbations latérale et frontale doivent être maîtrisées tout en maintenant la force de serrage à des valeurs acceptables. Les emplacements des capteurs et des axes de correction sur une station de micro-assemblage peuvent se faire suivant quatre configurations comme le montre la figure FIG. 4.1. Les 4 configurations sont :

- le manipulateur est équipé de capteurs de force et la correction s'effectue sur le support de travail ;
- le manipulateur est équipé de capteurs de force et effectue la correction ;
- le support de travail est équipé de capteurs de force et la correction s'effectue par le manipulateur ;
- les capteurs de force sont sur le support de travail et la correction est assurée par le support de travail.

Le choix d'une configuration par rapport à une autre dépend des contraintes imposées par la tâche à réaliser c'est-à-dire des forces à mesurer ou à contrôler et les positions à atteindre pour réussir la tâche. L'analyse de la tâche conduit à l'établissement d'un ensemble de directions avec des mouvements libres et des mouvements contraints [Mas79, Lef03]. Les mesures de force sont alors appliquées sur les directions à mouvement contraint. Dans notre cas, une force de contact latéral apparaît entre le micro-objet manipulé et la rainure (cf. FIG. 2.37). Elle génère également une force frontale due à la friction. Les mouvements selon l'axe Y et Z sont alors contraints, contrairement au mouvement d'avance selon l'axe X . Le contrôle de la force de contact latéral lors du guidage doit être assuré par la configuration choisie. Pour contrôler cette force, il est d'abord né-

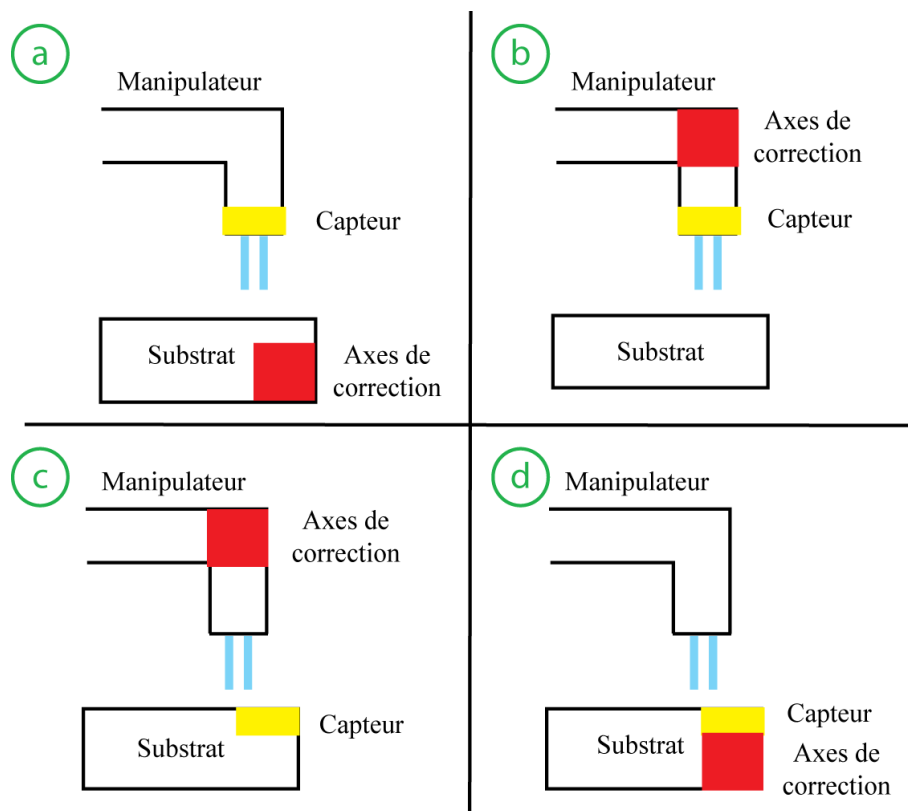


FIG. 4.1 – Les 4 configurations d’une station de micro-assemblage avec retour de force.

cessaire de la mesurer. Les configurations (c) et (d) sont intuitives car la force de contact sera mesurée par un support instrumenté. Les configurations (a) et (b) peuvent aussi assurer la mesure de la force de contact latéral. En effet, un préhenseur à deux doigts instrumentés donne deux informations provenant de chaque doigt. Ces deux forces sont égales en l’absence de contact latéral. Un déséquilibre apparaît en présence de la force de contact latéral (*cf.* FIG. 4.2). Elle est alors déduite par une différence entre les deux forces mesurées par les doigts suivant l’axe Y en statique.

Pour préserver l’intégrité des objets manipulés, la force de serrage doit être contrôlée. Le contrôle de la force de serrage permet également d’assurer le succès des tâches de prise et de dépose en mode automatisé. Afin d’utiliser un seul système de mesure de force pour accomplir le guidage, une configuration type (a) est choisie en utilisant un préhenseur à deux doigts instrumentés. Il permettra de contrôler la force de serrage et de mesurer la force de contact latéral. Pour assurer les tâches de micro-assemblage (la prise/dépose, le transport des micro-objets, l’insertion et le guidage), un préhenseur actif avec un retour de force sur chaque doigt constitue la solution idéale car elle sera compacte et utilisable sur d’autres stations de micro-assemblage. Ce type de préhenseur avec une gamme de force de quelques mN avec une résolution de quelques μN , et des doigts assurant un contact plan avec le micro-objet manipulé, n’existe pas dans la littérature

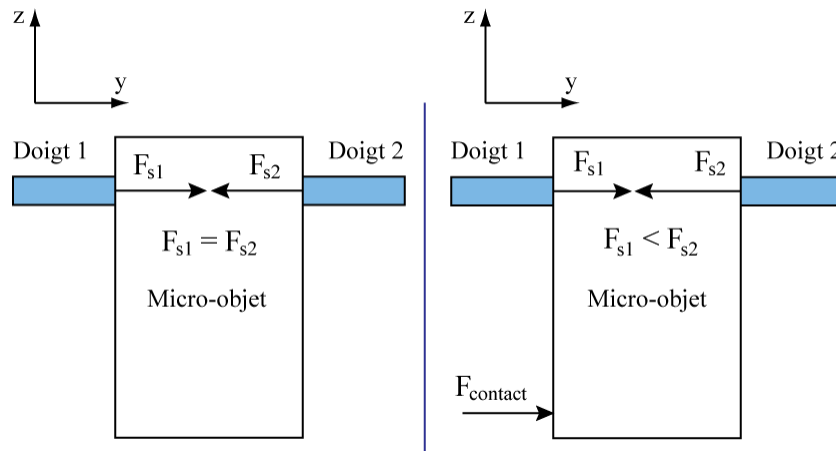


FIG. 4.2 – (a) force de serrage à l'équilibre et (b) en présence de contact latéral ($F_{s1} < F_{s2}$).

et n'est pas disponible sur le marché. Les préhenseurs dans l'état de l'art n'assurent pas simultanément la plage de mesure, la résolution et le contact plan avec les micro-objets. Une structure à deux doigts mobiles (cf. FIG. 4.3) grâce à des axes de positionnement est proposée pour assurer la saisie et le guidage. Ceci constitue une étape intermédiaire permettant d'étudier, développer et valider les outils de contrôle en force pour le micro-assemblage.

Les supports optiques utilisés pour réaliser les bancs optiques reconfigurables présentés sont saisis par le préhenseur sur la partie flexible, mais l'application de la force de serrage maximale amène les parties déformables sur une butée. La saisie du support optique se ramène donc à la manipulation de micro-objet rigides. Afin de nous focaliser sur le problème du guidage, nous allons considérer des micro-objets rigides.

4.2.2 Préhenseur à deux doigts instrumentés pour le guidage automatisé

Le principe utilisé se base sur deux doigts qui constituent un préhenseur avec un mouvement d'ouverture et de fermeture (cf. FIG. 4.3). Pour assurer le déplacement de chaque doigt, des axes de positionnement doivent générer les mouvements (cf. FIG. 4.4). Des capteurs de forces capacitifs, FemtoTools[®] FT-S270, sont utilisés comme doigt du préhenseur afin d'assurer la plage de mesure de quelques mN avec une résolution de quelques μN . L'extrémité du capteur est une surface carrée de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ donc le contact avec le micro-objet manipulé est plan. La raideur théorique du capteur dans l'axe de saisie est de 1000 N/m assurant une plage de mesure de $\pm 2 \text{ mN}$ avec une résolution de $0,4 \mu\text{N}$.

Le système est organisé en trois robots : R_1 , R_2 et R_3 (cf. FIG. 4.5). Chaque capteur est monté sur une table de positionnement manuelle ($X_1Y_1Z_1$, $X_2Y_2Z_2$) qui permet alors de contrôler la position de chaque doigt et la force de serrage pour la saisie du micro-objet.

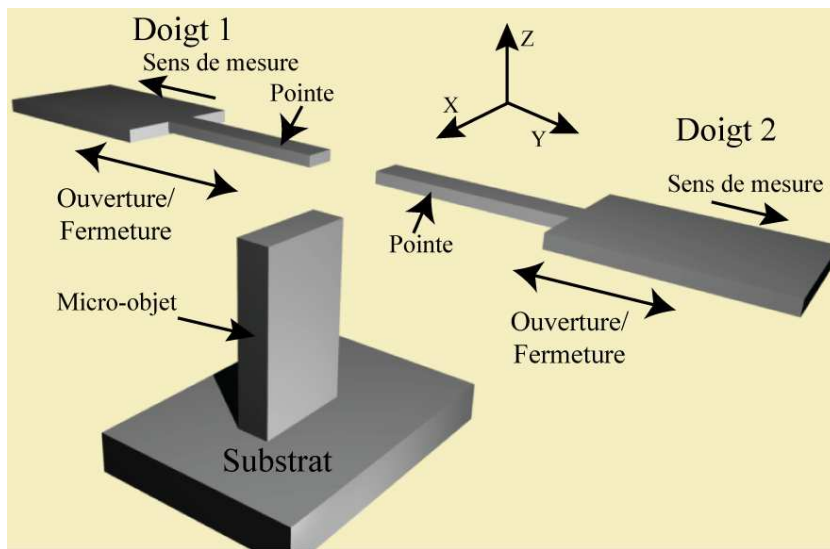


FIG. 4.3 – Schéma général d'un préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés.

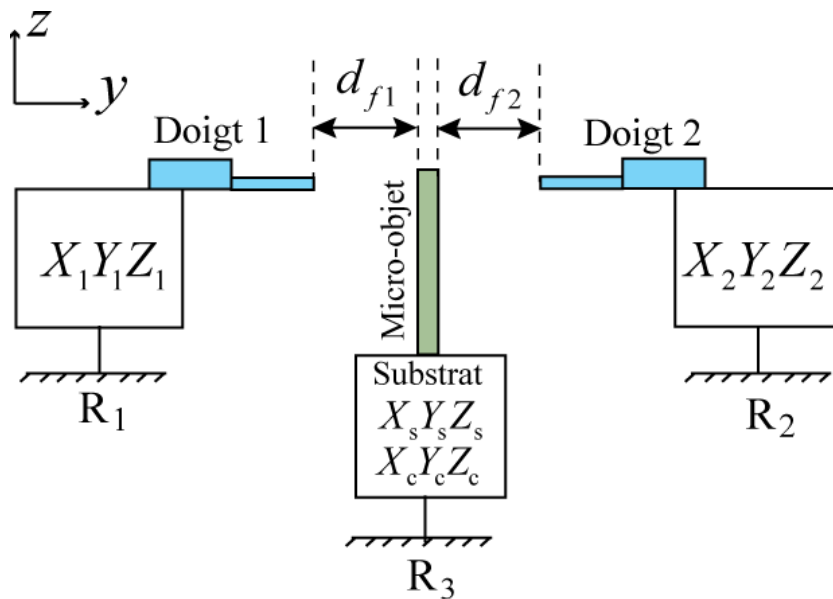


FIG. 4.4 – Illustration du système utilisé pour le guidage avec les différents axes de positionnement.

Le micro-objet est mis en place sur un substrat, puis saisi par l'application d'une force de serrage. Le substrat est positionné par un ensemble de tables de positionnement à grande course ($X_c Y_c Z_c$) - pour la mise en place rapide et à grande résolution pour le guidage ($X_s Y_s Z_s$). Les tables de positionnement à grande course sont des tables manuelles Newport[®], M-642 Series assurant une course de 25 mm avec un entraînement

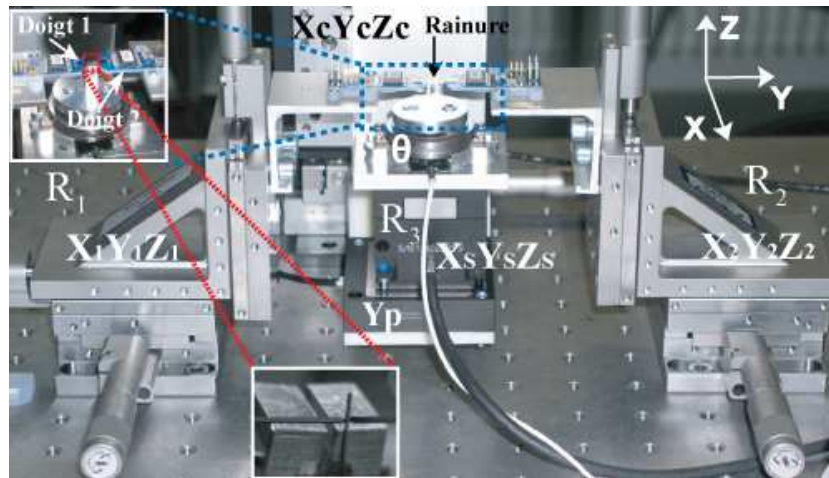


FIG. 4.5 – Système à deux doigts de serrage pour le guidage automatisé.

manuel de $1 \mu\text{m}$ de sensibilité. Pour contrôler le guidage, une table de positionnement piézoélectrique à 3 axes NanoCube[®] est utilisée. Durant le guidage, des forces latérales (F_y) apparaissent. On considère que les robots sont infiniment rigides en regard des corps d'épreuve des capteurs.

4.3 Modèle de l'évolution de la force de serrage en présence de force latérale

Un modèle général de préhenseur est défini pour comprendre les effets des différents paramètres de la saisie et du contact latéral sur la variation de la force de serrage. Il est fondé sur deux doigts avec une pointe et des parties flexibles caractérisées par les raideurs dans l'espace $[K_x, K_y, K_z]$ (cf. FIG. 4.6). La direction de saisie et de mesure est l'axe Y .

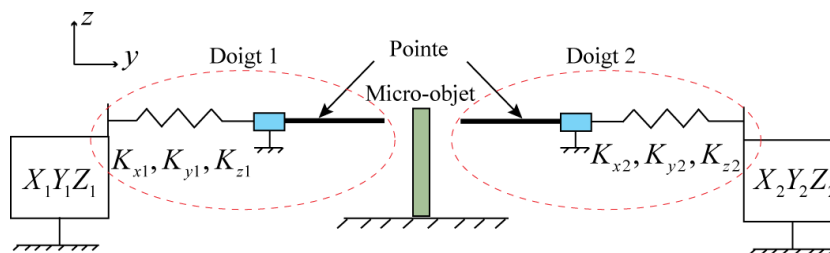


FIG. 4.6 – Modèle du préhenseur à deux doigts de serrage pour l'automatisation du guidage.

Dans cette partie, on considère que l'objet est saisi entre les doigts du préhenseur et qu'il est déjà inséré dans le rail. Lors de l'avancement selon l'axe X , l'objet peut entrer en contact avec le bord du rail à cause des défauts de l'axe de guidage, du désalignement entre l'axe de guidage et le rail et des défauts de fabrication du rail. Le contact génère alors une force de contact $F = [F_x, F_y, F_z]$ à une distance ℓ du doigt. Lors de ce contact, on fait l'hypothèse que la composante de la force de contact en Z est négligeable et que la composante en X n'influence pas les mesures tout en préservant la stabilité de la saisie. Il est aussi important de noter que le bord sur lequel le contact s'effectue est rigide (c'est-à-dire le point de contact garde une trajectoire horizontale). On considère par la suite le problème dans le plan YZ . Le modèle statique qui sera établi, nous servira à connaître l'évolution de la force de serrage sur chaque doigt F_{y1} et F_{y2} en fonction de l'entrée F_y et des paramètres :

- F_{y10} et F_{y20} les précharges sur les deux doigts ;
- $K_y = K_{y1} = K_{y2}$ la raideur des doigts en Y ;
- ℓ la distance entre le contact et le point bas de l'extrémité d'une pointe avant déformation du doigt ;
- e l'épaisseur d'un doigt à l'extrémité d'une pointe ;
- c_1 la largeur du micro-objet ;
- L la longueur de la pointe ;
- w la largeur de la pointe ;
- h l'épaisseur de la pointe ;
- I le moment quadratique de la pointe par rapport à l'axe OZ .

La saisie d'un micro-objet lors du guidage se déroule en trois phases comme montré sur la figure [FIG. 4.7](#) : la situation initiale sans perturbation (phase 1), l'apparition d'un contact latéral qui induit deux phases de mouvement - une translation du micro-objet (phase 2) et un mouvement combiné translation/rotation (phase 3).

Les trois phases sont explicitées ci-dessous afin d'établir un modèle comportemental d'une saisie perturbée par un contact latéral.

4.3.1 Contact plan entre le micro-objet et l'extrémité des doigts

Durant la phase 1, le micro-objet ne subit que les deux forces appliquées par les doigts du préhenseur. Un contact plan parfait est observé entre les extrémités des doigts et le micro-objet. Les forces équivalentes sont considérées au milieu de chaque doigt ($A_1 - B_1$) et on observe $F_{y1} = F_{y2}$. La répartition de la précharge sur les surfaces des doigts est uniforme.

Durant la phase 2, l'apparition de la force de contact engendre un déséquilibre des contraintes sur la surface de contact entre le micro-objet et les doigts. Un mouvement de translation du micro-objet suivant l'axe Y est alors observé et le contact plan/plan est maintenu. Les points où sont considérées les forces équivalentes, se déplacent alors du milieu du doigt vers le bord ($A_2 - B_2$). Durant cette phase, on considère que $\Delta_{zi} = 0$ en raison du contact plan/plan et de la raideur du doigt. La continuité entre la phase 2 et 3 s'effectue quand les forces équivalentes sont localisées sur chaque extrémité opposée

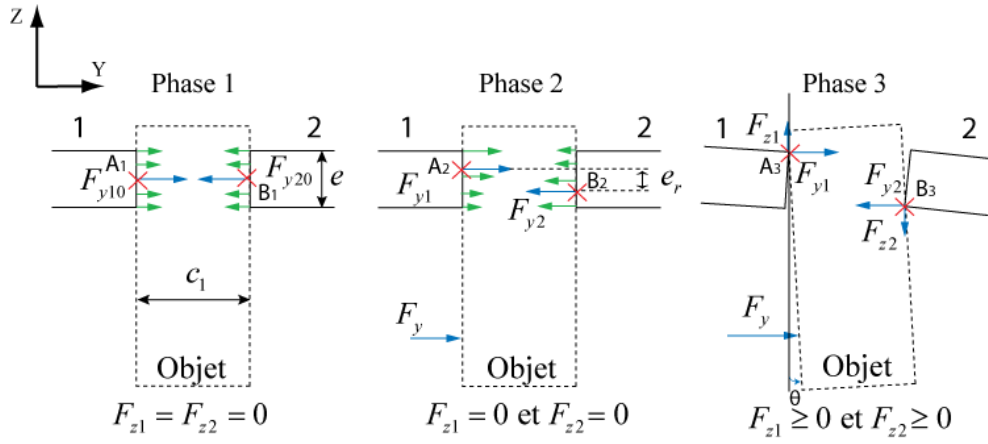


FIG. 4.7 – Les trois phases lors de la saisie d'un micro-objet à bords parallèles perturbé par un contact latéral : Phase 1 : pas de contact, Phase 2 : apparition du contact (mouvement de translation du micro-objet selon Y , Phase 3 : augmentation de la force de contact latéral F_y (mouvement complexe).

($A_3 - B_3$). La force de contact latéral limite $F_{y\ell}$ dépend des précharges $F_{y10} = F_{y20}$, la distance de contact ℓ et l'épaisseur de la pointe e comme exprimé par l'équation (4.1), obtenue par l'équilibre des moments sur le micro-objet manipulé.

$$F_{y\ell} = F_{yi0} \left(\frac{2e}{2\ell + e} \right) \quad (4.1)$$

Pendant cette phase, la force de serrage sur chaque doigt est :

$$F_{y1} = F_{y10} - \frac{F_y}{2} \quad (4.2)$$

$$F_{y2} = F_{y20} + \frac{F_y}{2} \quad (4.3)$$

4.3.2 Contact type "edge/vertex" ou bord/plan

Durant la phase 3, la force de contact est supérieure à $F_{y\ell}$. Un mouvement complexe du micro-objet apparaît et le calcul de la force de serrage peut être effectué par un système de 5 équations. Il permet de déterminer les 5 inconnues Δ_{y2} , Δ_{y1} , $\Delta_z = \Delta_{zi}$, F_{za} , et $\Delta_{yf1} = \Delta_{yf2}$. Ces différentes variables sont explicitées sur la figure FIG. 4.8.

- $\Delta_{y1} + \Delta_{yf1}$ le déplacement du point A selon Y ($\left\| \vec{AA}_3 \cdot \vec{y} \right\|$);
- $\Delta_{y2} + \Delta_{yf2}$ le déplacement du point B selon Y ($\left\| \vec{BB}_3 \cdot \vec{y} \right\|$);
- Δ_z le déplacement des points A et B selon Z du à la flexion de la pointe selon Z ;
- F_{za} la composante de la force de serrage selon Z aux points A' et B' ;
- $\Delta_{yf1,2}$ le raccourcissement selon Y de la pointe élancée du à la flexion.

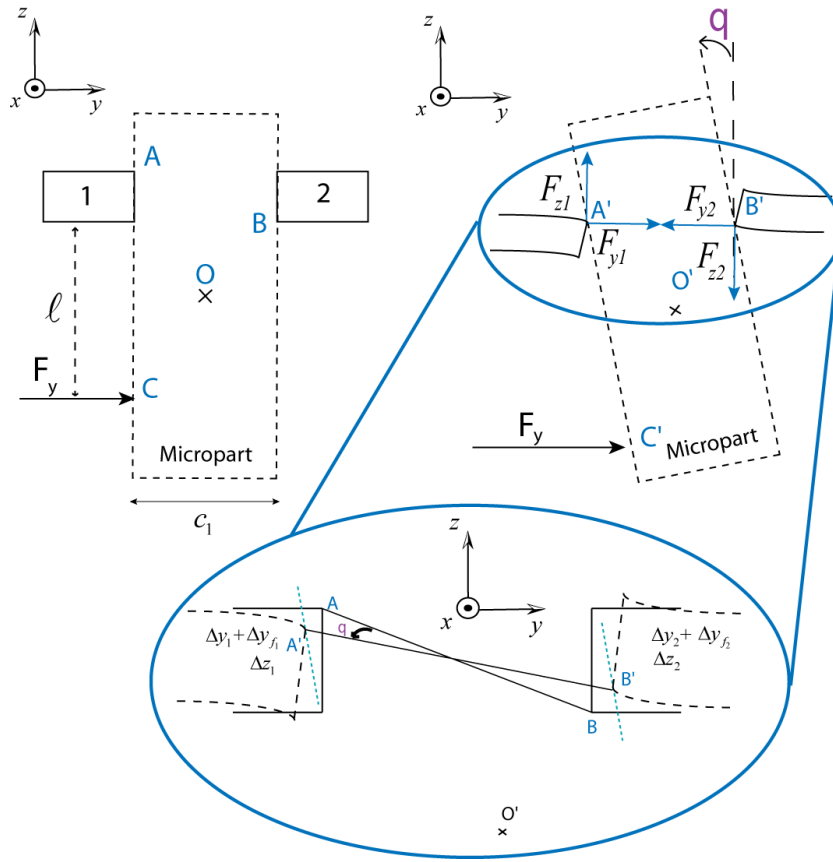


FIG. 4.8 – Description de l'objet lors de l'apparition de la force de contact.

L'équilibre des forces appliquées sur l'objet selon Y donne :

$$F_y = K_y(\Delta_{y2} - \Delta_{y1}) \quad (4.4)$$

L'expression de la flexion selon Z donne [How01] :

$$\Delta_z = 0.85L \sin\left(\frac{0.85F_{za}L^2}{2.25EI}\right) \quad (4.5)$$

Le raccourcissement en Y dû à la flexion selon Z donne [How01] :

$$\Delta_{yf} = 0.85L\left(1 - \cos\left(\frac{0.85F_{za}L^2}{2.25EI}\right)\right) \quad (4.6)$$

L'équilibre des moments en A_3 nous donne :

$$\left\| \vec{F}_y \right\| \wedge \left\| \vec{C'A_3} \right\| = \left\| \vec{F}_{za} \right\| \wedge \left\| \vec{B_3A_3} \right\| + \left\| \vec{F}_{y2} \right\| \wedge \left\| \vec{B_3A_3} \right\| \quad (4.7)$$

$$F_y(\ell + e - \Delta_z) = F_{za}(c_1 + \Delta_{y1} + \Delta_{y2} + 2\Delta_{yf}) + (F_{y20} + K_y\Delta_{y2})(e - 2\Delta_z) \quad (4.8)$$

La condition de non glissement de l'objet, $\|\vec{AB}\| = \|\vec{A_3B_3}\|$ nous donne :

$$4e\Delta_z - 4\Delta_z^2 = (\Delta_{y1} + \Delta_{y2} + 2\Delta_{yf})^2 + 2c_1(\Delta_{y1} + \Delta_{y2} + 2\Delta_{yf}) \quad (4.9)$$

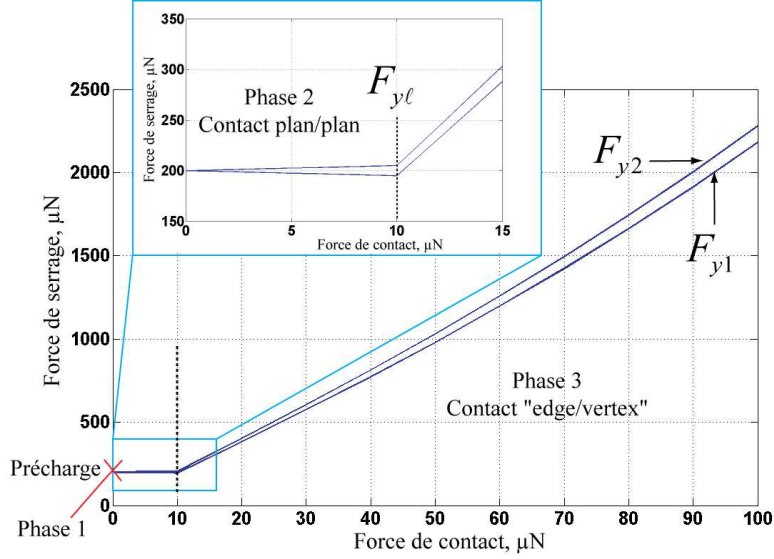


FIG. 4.9 – Evolution de la force de serrage par rapport à F_y pour une précharge de $200 \mu\text{N}$.

La résolution de ces équations non linéaires ne peut se faire que par une approche numérique. Les valeurs des paramètres sont estimés et fixés : $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $\ell = 800 \mu\text{m}$ et $e = 50 \mu\text{m}$. La variation de la force de serrage en présence de contact latéral est montrée sur la figure FIG. 4.9 pour une précharge $F_{y0} = 200 \mu\text{N}$ et F_y variant entre 0 à $100 \mu\text{N}$. La résolution numérique est réalisée sous MATLAB[®] en utilisant la fonction *fsolve*.

4.3.3 Relation entre le déplacement du point de contact Δ_{yF} et la force de contact latéral F_y

La force de contact latéral apparaît quand le micro-objet entre en contact avec son environnement (substrat, trou, rainure, etc.). Considérant le cas d'un environnement rigide, l'angle de rotation du micro-objet dans le plan YZ peut être estimé par les équations (4.10) et (4.11).

$$\tan\theta = \frac{\Delta_{yF}}{\ell + e - \Delta_z} \quad (4.10)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{e}{c_1}\right) - \text{atan}\left(\frac{e - 2\Delta_z}{c_1 + \Delta_{y1} + \Delta_{y2} + 2\Delta_{yF}}\right) \quad (4.11)$$

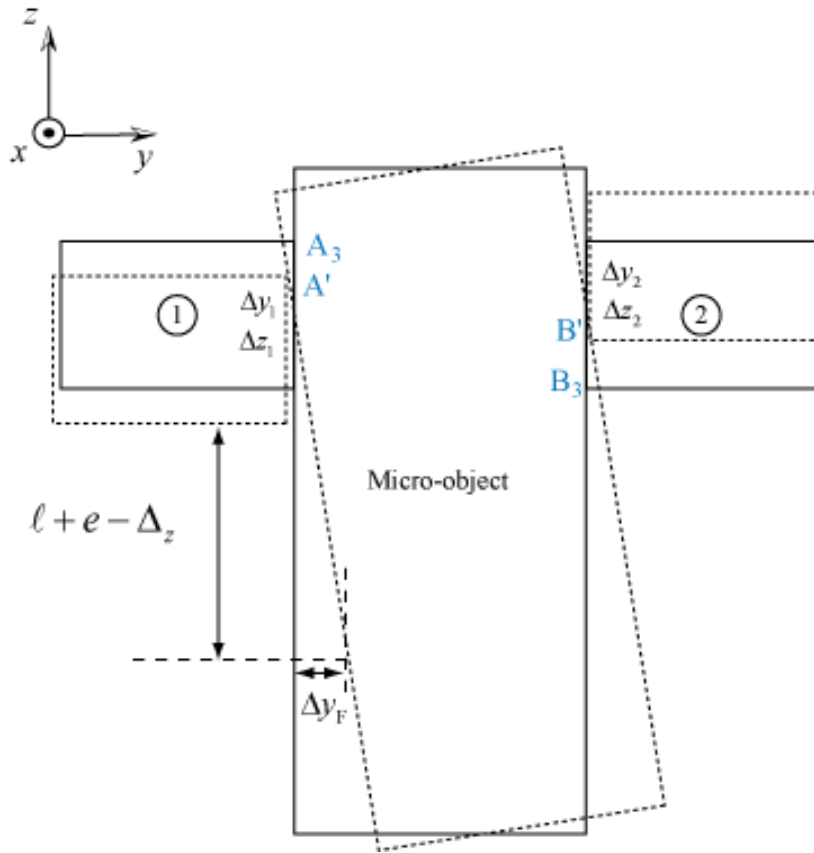


FIG. 4.10 – Déplacement du point de contact lors du guidage.

avec Δ_{yF} le déplacement horizontal du point de contact (cf. FIG. 4.10). La combinaison des équations (4.10) et (4.11) donne l'évolution de Δ_{yF} en fonction de e , c_1 , ℓ , Δ_{y1} , Δ_{y2} et Δ_z . Les évolutions de l'angle θ et de Δ_{yF} sont présentées sur la figure 4.11.

Le modèle nous permet ainsi de déduire la position du micro-objet à partir de la mesure de deux forces de serrage (F_{y1} et F_{y2}).

4.4 Validation du modèle

Le modèle de l'évolution de la force de serrage en présence d'une force de contact latéral est un modèle de connaissance. Afin de le valider ainsi que les hypothèses qui ont servi à son établissement, nous allons le comparer à des simulations par des méthodes des éléments finis puis à des mesures expérimentales. Les observations des différentes phases de contact et de la variation de la force de serrage sont les objectifs principaux de la validation du modèle analytique.

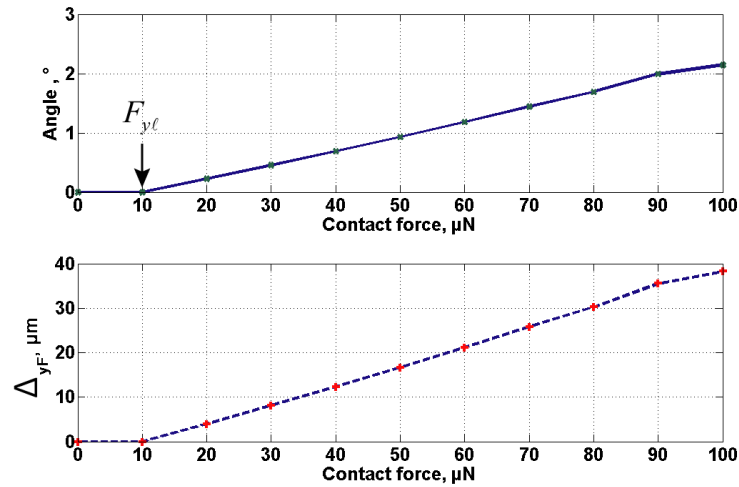


FIG. 4.11 – Angle θ et le déplacement Δ_{yF} avec $F_{yi0} = 200 \mu\text{N}$, $\ell = 975 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

4.4.1 Simulation par la méthode des éléments finis

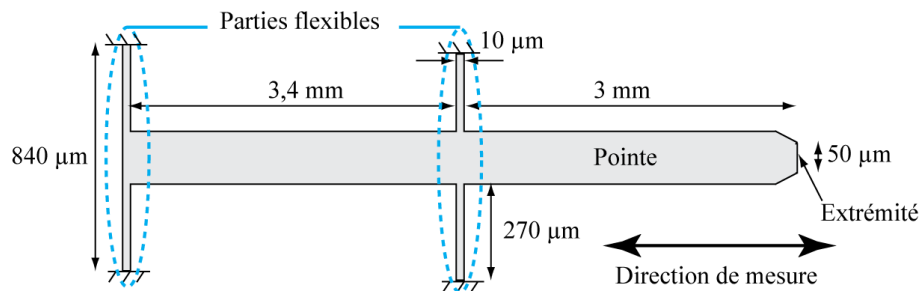


FIG. 4.12 – Dimensions d'un doigt avec ses parties flexibles pour une épaisseur de $50 \mu\text{m}$.

Le modèle est dans un premier temps comparé à une simulation par la méthodes des éléments finis. La simulation se base sur la mesure de la déformation des parties flexibles des doigts (*cf.* FIG. 4.12) et la connaissance de la raideur dans la direction de mesure (K_y). On intègre alors sous ANSYS® le modèle des deux doigts du préhenseur et du micro-objet. Le mouvement d'un doigt permet d'établir la précharge pour ensuite perturber la saisie par un contact latéral. La figure FIG. 4.13 montre le modèle pour la simulation sous ANSYS® intégrant le micro-objet et les deux doigts du préhenseur.

On observe les déformations des doigts lorsque la force de contact latéral est appliquée (F_y). Les forces appliquées par chaque doigt sont déduites des déformations puis compa-

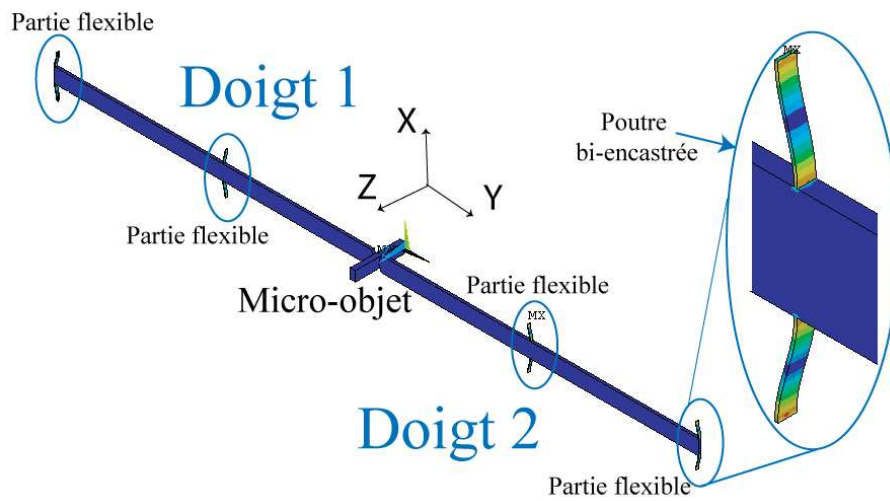


FIG. 4.13 – Simulation sous ANSYS® des déformations des doigts en présence de force latérale.

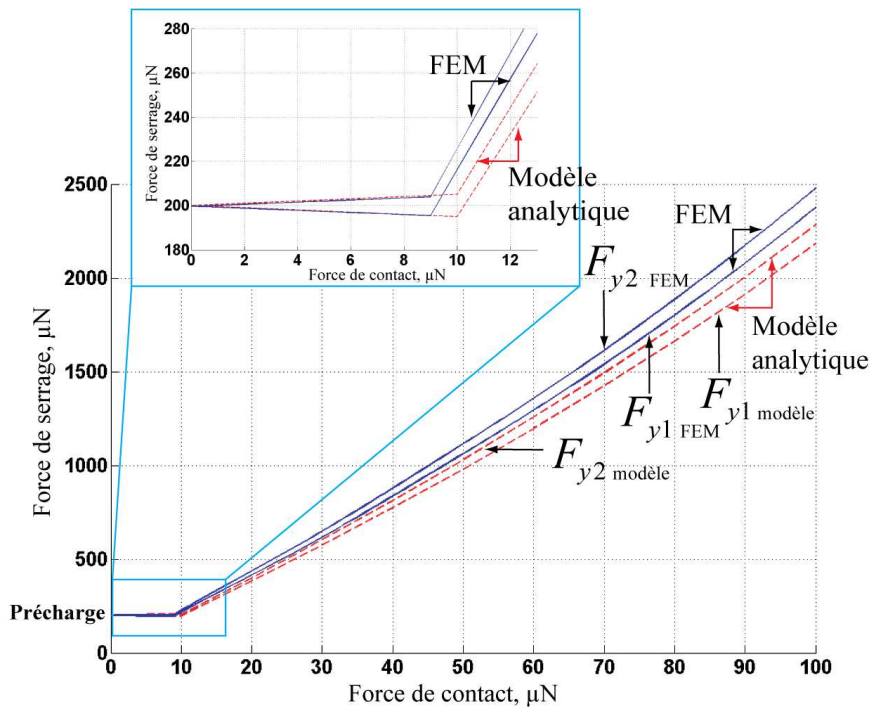


FIG. 4.14 – Comparaison de la simulation avec la méthode des éléments finis (FEM) avec le modèle analytique.

rées au modèle proposé. Le résultat est montré sur la figure FIG. 4.14.

Les mêmes paramètres sont appliqués durant la simulation : $F_{yi0} = 200 \mu\text{N}$, $c_1 = 100$

μm , $\ell = 800 \mu\text{m}$ et $e = 50 \mu\text{m}$. On observe une concordance entre le modèle analytique et le résultat de la simulation par la méthode des éléments finis. Les différentes phases de contact et un écart de $1 \mu\text{N}$ entre $F_{y\ell}$ du modèle et du résultat de la simulation sont observées. Pour une force de contact $F_y = 100 \mu\text{N}$, un écart de 9 % apparaît entre le modèle et la simulation. Un écart de 17 % en pente est observé lors de la phase de contact bord/plan. L'écart entre le modèle et la simulation par la méthode des éléments finis peut provenir des déformations locales sur les extrémités (non considérées dans le modèle analytique) lors du basculement de contact plan/plan à contact bord/plan. Le résultat obtenu constitue une première validation du modèle analytique qui sera complétée par des expériences.

4.4.2 Validation expérimentale

Le système utilisé est celui décrit auparavant (cf. FIG. 4.5). Lors de la validation, il est nécessaire de connaître la force de contact appliquée. Pour cela, un troisième capteur est utilisé. Du fait de l'encombrement, l'utilisation d'un troisième capteur FemtoTools[®] conventionnel type S270 n'est pas possible. Pour contourner ce problème, le contact est obtenu par un capteur de force piézorésistif en cours de développement au laboratoire par M. Joël Agnus, Ingénieur de Recherche (cf. FIG. 4.15). Ainsi avant de procéder à la validation, il est indispensable d'effectuer la calibration de ce capteur.

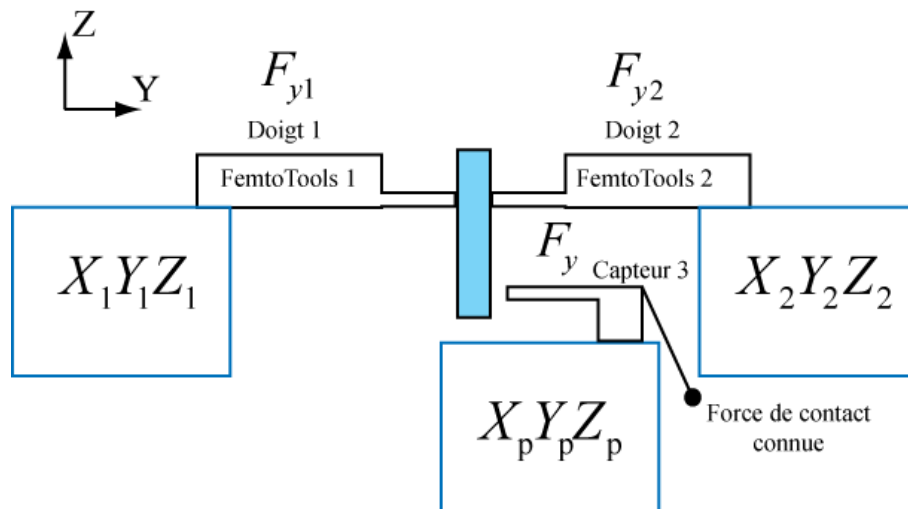


FIG. 4.15 – Installation utilisant un 3^{ème} capteur pour générer une force de contact lateral connue.

Désalignement des doigts de serrage

Comme le système robotique utilisé se base sur deux doigts indépendants, ses défauts peuvent conduire à un désalignement des doigts caractérisé par les angles α_x dans le plan Y_pZ_p et α_z dans le plan X_pY_p comme montré sur la figure FIG. 4.16. Le désalignement

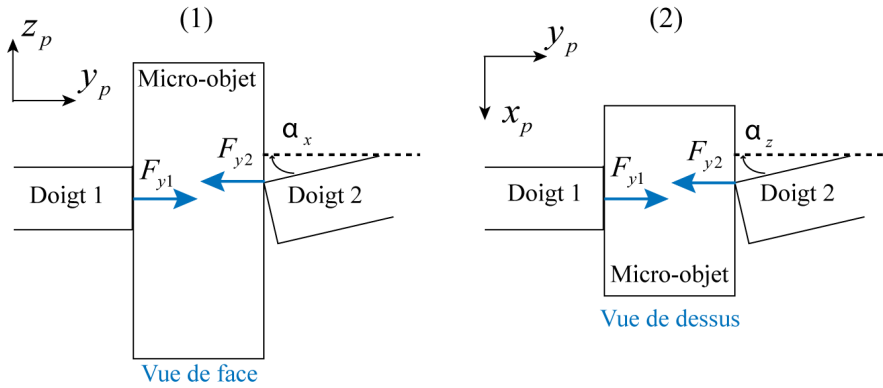


FIG. 4.16 – Désalignement des doigts dans le plan Y_pZ_p (1) et dans le plan X_pZ_p (2).

conduit à un déséquilibre de la force de serrage mesurée par chaque doigt. En effet à l'équilibre, les composantes des forces suivant l'axe Y sont égales, $F_{y1} = F_{y2}$. Si on note F_{s1} et F_{s2} les forces mesurées par les doigts, le désalignement conduit aux équations (4.12) et (4.13).

$$F_{y1} = F_{s1} \quad (4.12)$$

$$F_{s2} = F_{y2} \cos \alpha_x \cos \alpha_z \quad (4.13)$$

La différence des forces mesurées sur chaque doigt est $\Delta_F = F_{s1}(1 - \cos \alpha_x \cos \alpha_z)$. Le tableau TAB. 4.1 montre que l'écart est négligeable pour des angles α_x et α_z inférieurs à 5° .

Le désalignement des doigts doit être minimisé pour effectuer la validation du modèle.

$F_{s1} \mu\text{N}$	$\alpha_x = \alpha_z$	$\Delta_F \mu\text{N}$
1000	0,5	0,07
1000	2,5	1,90
1000	5	7,59

TAB. 4.1 – Différences entre les forces mesurées F_{s1} et F_{s2} dues au désalignement des doigts.

En effet, l'observation des phases de contact dépend fortement de la configuration initiale de la saisie. Ainsi, le désalignement engendre l'absence de phase de contact plan/plan lors de l'apparition de la force de contact latéral. Le système robotique montré sur la figure FIG. 4.17 a permis de vérifier l'effet du désalignement sur les phases de contact. Il est équipé des deux angles α et β correspondant au tangage du doigt 1 et au lacet du doigt 2. Il a été observé que la phase de contact plan/plan est absente lorsqu'il y a un désalignement des doigts. Par conséquent, une attention particulière a été apportée sur le système robotique utilisé pour la validation du modèle.

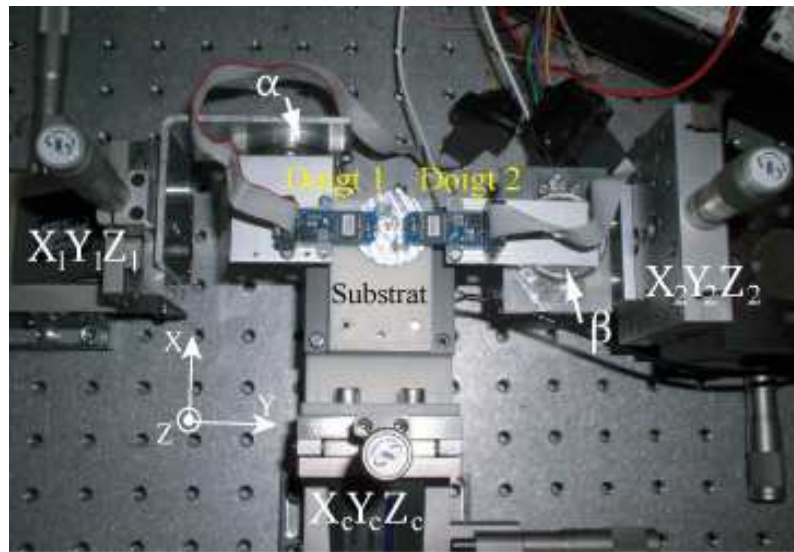


FIG. 4.17 – Système robotique pour la préhension à deux doigts de serrage avec le contrôle des angles α et β .

Calibration du capteur piézorésistif

L'objectif de la calibration est de connaître la sensibilité du capteur piézorésistif. Chaque capteur possède une sensibilité propre qui varie en fonction de l'électronique, de la qualité des soudures, de la réalisation du corps d'épreuve, etc. Le système mis en place permet de mettre face à face le capteur piézorésistif et un capteur S270 (cf. FIG. 4.18). La force de contact entre les deux capteurs est modifiée par le mouvement d'un axe de positionnement à haute résolution, qui est le NanoCube[®]. La variation des tensions de sortie de chaque capteur nous permet de déduire la sensibilité du capteur à calibrer.

Après une série de mesures, la sensibilité du capteur piézorésistif est déduite $s_p = -342$

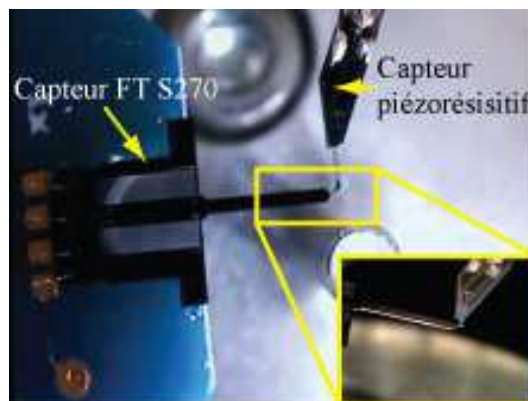


FIG. 4.18 – Installation pour la calibration du capteur piézorésistif.

$\pm 5 \mu\text{N}/\text{V}$.

Utilisation du capteur piézorésistif pour la validation du modèle

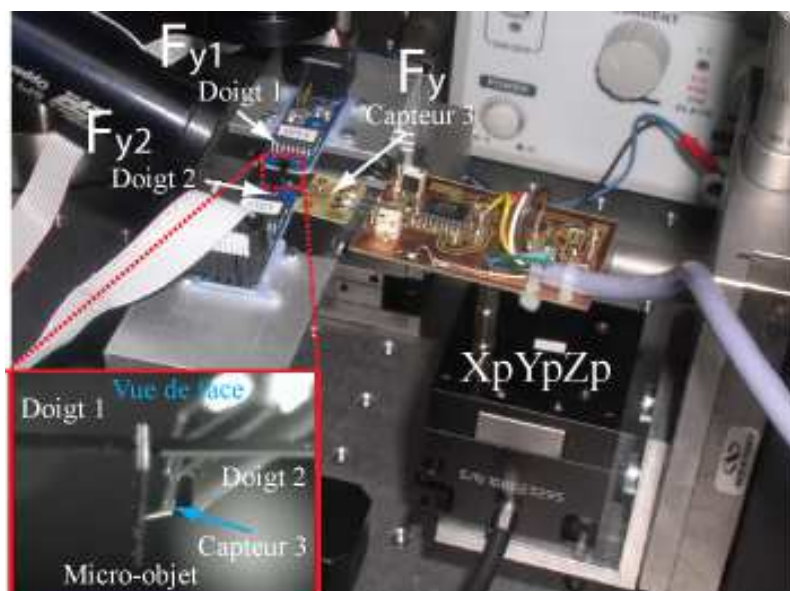


FIG. 4.19 – Utilisation du capteur piézorésistif pour la validation du modèle.

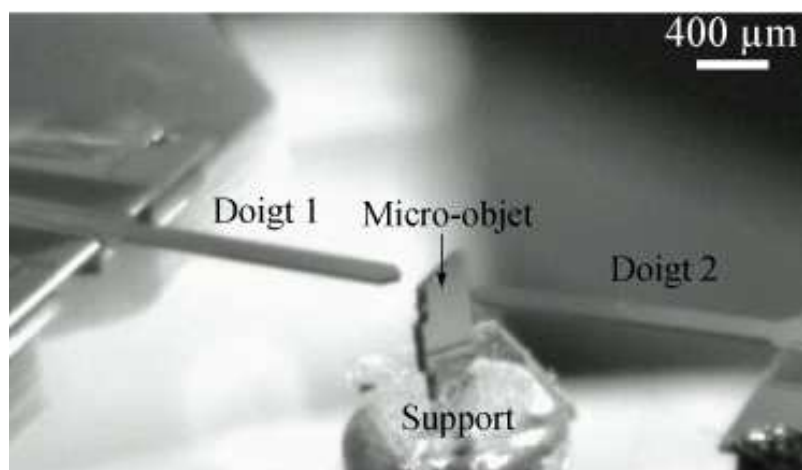


FIG. 4.20 – Support utilisé pour le positionnement du micro-objet avant la saisie.

Après la calibration, le capteur piézorésistif est monté sur un système de positionnement à grande précision pour appliquer la force de contact latéral grâce au mouvement de $X_p Y_p Z_p$. L'ensemble de l'installation est montré sur la figure FIG. 4.19. On utilise alors un autre support (*cf.* FIG. 4.20) pour positionner le micro-objet entre les deux

doigts du préhenseur. Ce dernier est muni de trous de $500 \mu\text{m}$ de diamètre pour faciliter la prise du micro-objet. Une fois le micro-objet saisi, le support est retiré et le capteur piézorésistif est positionné pour générer le contact latéral. Deux résultats sont montrés sur les figures FIG. 4.21 et FIG. 4.22.

Les mesures expérimentales correspondent avec le modèle proposé. Ainsi sur les deux

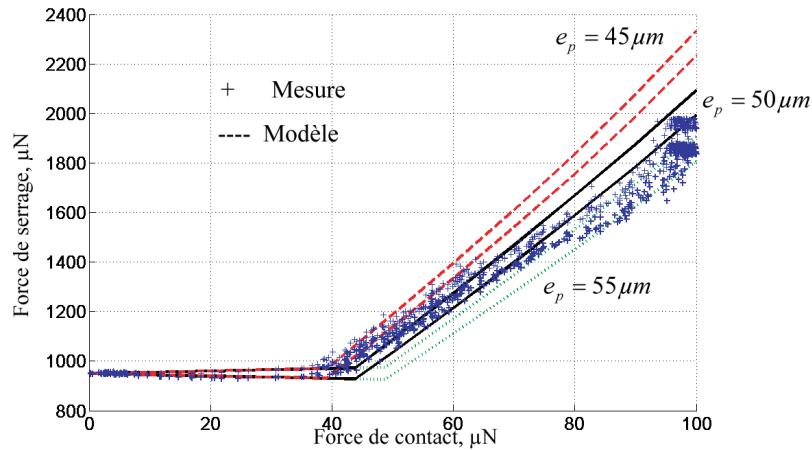


FIG. 4.21 – Résultat expérimental comparé au modèle analytique avec $F_{y10} = F_{y10} = 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \pm 5 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

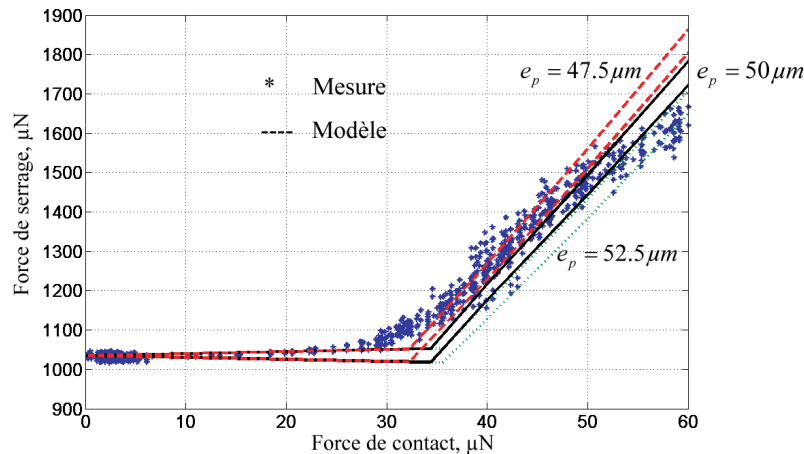


FIG. 4.22 – Résultat expérimental comparé au modèle analytique avec $F_{y10} = F_{y10} = 1035 \mu\text{N}$, $\ell = 1500 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \pm 5 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

mesures, la variation de la force de serrage montre les différentes phases de contact entre

le micro-objet et les doigts du préhenseur. Une petite différence (inférieure à $10 \mu\text{N}$ dans le cas des figures FIG. 4.21 et FIG. 4.22) existe entre la force $F_{y\ell}$ de contact limite avant basculement obtenue par le modèle et l'expérience. Elle peut s'expliquer par l'état du bord de chaque doigt qui n'est pas un angle droit parfait. Elle peut aussi provenir d'une déformation locale du bord sous l'effet de la contrainte de serrage.

Les pentes des mesures expérimentales sont estimées par une pente moyenne. La comparaison par rapport aux résultats du modèle analytique montre un écart relatif en pente de 17 % sur la figure FIG. 4.21 et 28 % sur la figure FIG. 4.22.

4.5 Influence des paramètres du modèle

Le modèle analytique permet d'étudier les effets de la variation des paramètres du modèle. L'étude de l'influence des paramètres est intéressante afin de définir la gamme de forces appliquées et de tirer les enseignements lors de la conception de préhenseurs à deux doigts de serrage. Nous allons nous intéresser aux paramètres influents du modèle qui sont :

- l'épaisseur du doigt et le décalage suivant Z ;
- la précharge ;
- la distance de contact ℓ ;
- les raideurs K_y et K_z des doigts.

4.5.1 Influence de l'épaisseur du doigt et le décalage suivant Z

Dans le modèle analytique, nous avons considéré que l'épaisseur des doigts était fixe et l'alignement entre les doigts était parfait. Si nous introduisons un décalage suivant Z entre les doigts, l'épaisseur apparente qui est la distance entre deux bords opposés change comme montrée sur la figure FIG. 4.23. Par conséquent, un décalage d_z induit une épaisseur apparente $e_p = e + d_z$ pour un contact à gauche et $e_p = e - d_z$ pour un contact à droite. La variation de l'épaisseur des doigts et du décalage en Z sont alors étudiés. Les résultats comparant le modèle et les simulations par la méthode des éléments finis sont montrés sur la figure FIG. 4.24.

On peut observer la variation de la force de contact limite en accord avec l'équation (4.1) et surtout de la pente lors de la phase de contact bord/plan. La diminution de l'épaisseur apparente conduit à une augmentation de la pente. Et à l'inverse, une augmentation de l'épaisseur apparente diminue la pente. Une validation expérimentale n'est pas effectuée du fait de la difficulté de contrôler précisément l'épaisseur apparente et l'impossibilité de changer l'épaisseur des doigts.

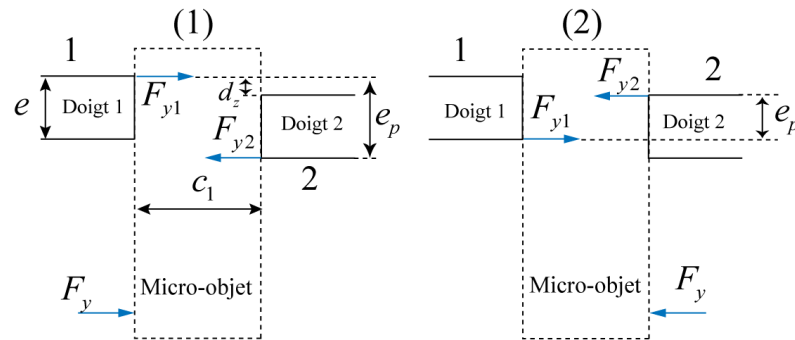


FIG. 4.23 – Décalage suivant Z entre les deux doigts entraînant la variation de l'épaisseur apparente e_p : (1) $e_p > e$, (2) $e_p < e$.

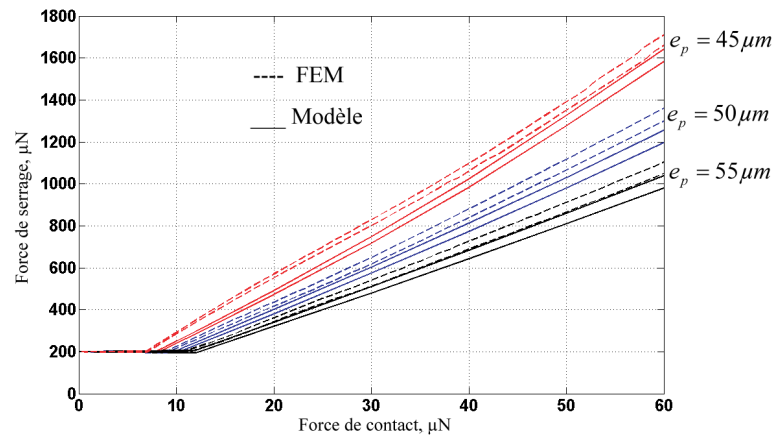


FIG. 4.24 – Effet de l'épaisseur apparente e_p sur la force de serrage.

4.5.2 Influence de la précharge

Pour effectuer la saisie, il est nécessaire d'appliquer une précharge sur le micro-objet pour le détacher d'un support. Cette force permet par la suite de maintenir le micro-objet entre les deux doigts du préhenseur. L'influence de la précharge est étudiée lors de la présence de force de contact latéral. On introduit alors différentes valeurs de précharge dans le modèle. Le résultat est montré sur la figure FIG. 4.25.

On observe une augmentation de la phase de contact plan/plan. La pente durant la phase de contact bord/plan est très peu sensible à la variation de la précharge. Ces observations ont été validées par des mesures expérimentales montrées sur la figure FIG. 4.26. On observe la variation de $F_{y\ell}$ et la faible sensibilité de la pente lors de la phase de contact bord/plan. Pour $F_y = 100 \mu\text{N}$, la force de serrage atteint $1850 \pm 75 \mu\text{N}$ pour les trois valeurs de précharge appliquées au modèle et $1800 \mu\text{N} \pm 200 \mu\text{N}$ pour les résultats expérimentaux. Concernant la force de contact limite, on obtient un écart de $2 \mu\text{N}$ pour

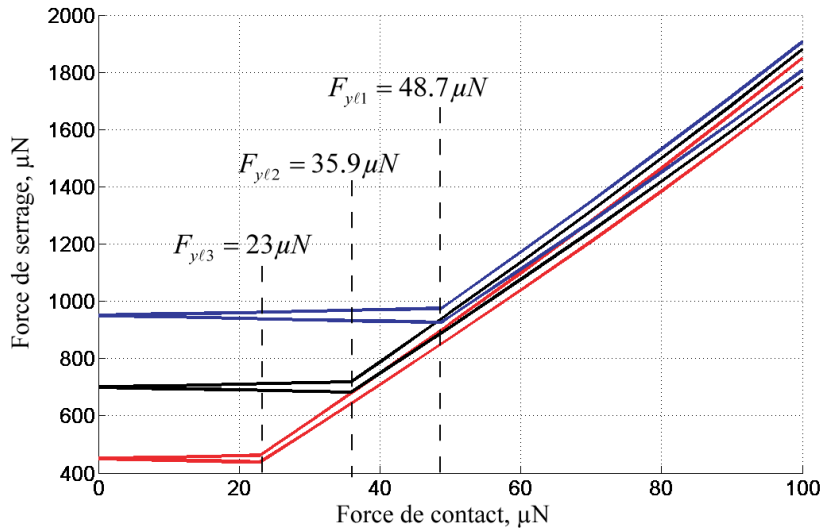


FIG. 4.25 – L'effet de la précharge sur la force de serrage pour les précharges $F_{yio} = 450, 700, 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

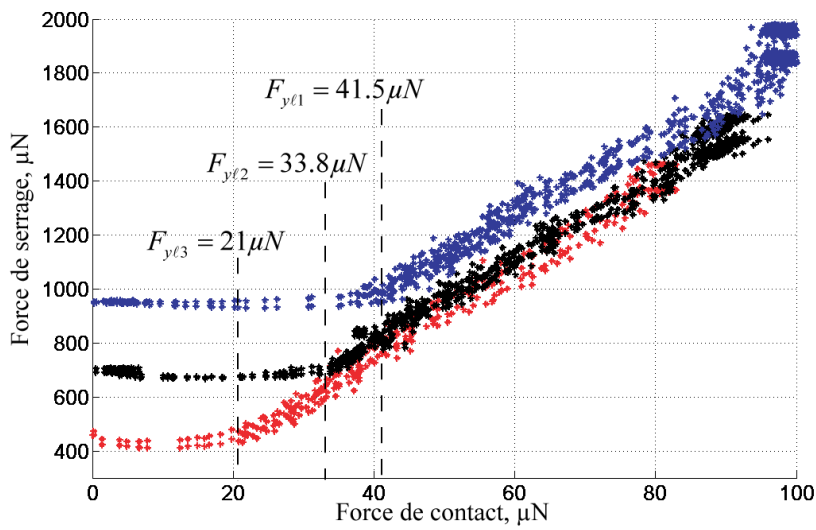


FIG. 4.26 – Résultats expérimentaux de l'effet de la précharge sur la force de serrage pour les précharges $F_{yio} = 450, 700, 950 \mu\text{N}$, $\ell = 950 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

$F_{yio} = 450 \mu\text{N}$, $2,1 \mu\text{N}$ pour $F_{yio} = 700 \mu\text{N}$ et $7,1 \mu\text{N}$ pour $F_{yio} = 950 \mu\text{N}$. Les résultats obtenus confirment la pertinence du modèle analytique proposé.

4.5.3 Influence de la distance de contact ℓ

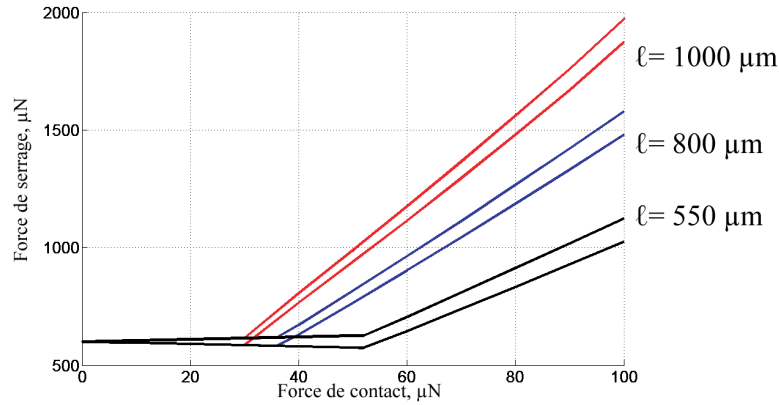


FIG. 4.27 – Influence de la distance de contact ℓ sur la force de serrage pour une précharge $F_{yi0} = 600 \mu\text{N}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

L'effet de la distance de contact est aussi étudiée car elle varie lors d'une tâche de guidage à cause des défauts du mouvement de translation, l'imperfection du bord du rail, etc. Le résultat est montré sur la figure FIG. 4.27. On observe une variation de la pente lors du contact bord/plan et de la force de contact limite en accord avec l'équation (4.1). La validation expérimentale de l'effet de ℓ a été effectuée. Le résultat est montré sur la figure FIG. 4.28.

Les mesures confirment l'effet de la distance ℓ sur la variation de la pente lors de la phase de contact bord/plan. L'effet de ℓ sur la force de contact limite est moins visible et difficile à comparer car la précharge F_{yi0} varie de 550 à 650 μN lors des mesures. On observe que l'influence de ℓ sur l'évolution de la force de serrage (force de contact limite $F_{y\ell}$ et la pente) est sensiblement identique à celle de e_p .

4.5.4 Influence de la raideur du capteur K_y et K_z

Pour la conception de préhenseurs, le choix des raideurs est important afin qu'ils puissent accomplir les tâches. La raideur est un paramètre difficile à contrôler en micro-fabrication car une tolérance de 1 μm est courante mais peut engendrer une variation importante sur la raideur. Dans un premier temps, la raideur dans la direction de saisie est étudiée. Différentes raideurs K_y sont introduites dans le modèle et le résultat est montré sur la figure FIG. 4.29.

On observe une diminution de la pente sur la phase de contact bord/plan quand la raideur suivant la direction de serrage est plus faible.

Ensuite, la raideur perpendiculaire à la direction de saisie K_z est étudiée. On introduit

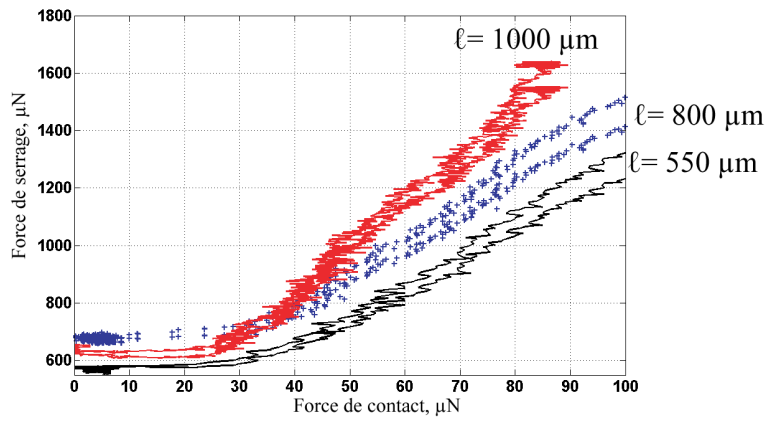


FIG. 4.28 – Résultats expérimentaux de l'effet de la distance de contact ℓ sur la force de serrage pour une précharge $F_{yi0} = 600 \pm 50 \mu\text{N}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $e_p = 50 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $E = 170 \text{ GPa}$, $L = 3000 \mu\text{m}$, $w = 300 \mu\text{m}$.

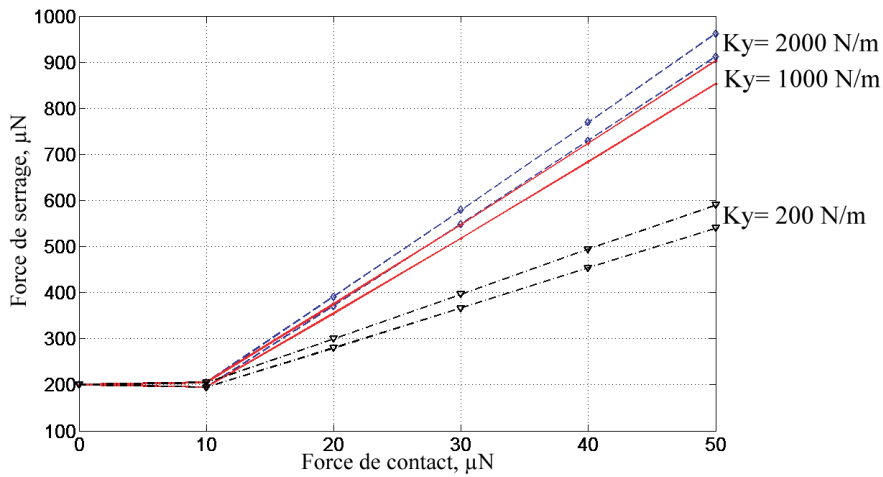


FIG. 4.29 – Effet de la variation de la raideur K_y sur la force de serrage.

différentes raideurs dans le modèle et le résultat est montré sur la figure FIG. 4.30. On observe une diminution de la pente sur la phase de contact bord/plan quand la raideur K_z est plus faible.

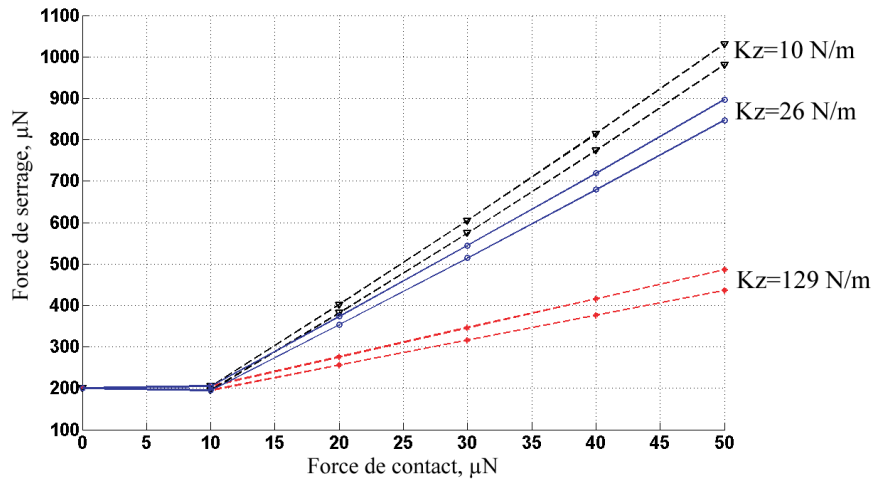


FIG. 4.30 – Effet de la variation de la raideur K_z sur l'évolution de la force de serrage.

4.6 Conséquences sur les forces appliquées en micro-assemblage et la conception d'un préhenseur

Nous allons maintenant nous intéresser aux conséquences de la variation des paramètres du modèle sur les forces appliquées en micro-assemblage et à la conception de préhenseur. Quatre points sont abordés lors de l'apparition de la force de contact latéral :

- le ratio $\frac{e}{\ell}$ sur l'évolution de la force de serrage ;
- le choix de la compliance du préhenseur ;
- le choix de la précharge ;
- le choix de l'actionnement et de la forme des doigts.

4.6.1 Ratio e/ℓ sur la force de serrage

L'un des objectifs lors du contrôle de la force de serrage est de préserver le micro-objet manipulé. L'apparition d'un contact latéral conduit à une variation de la force de serrage et à deux phases de contact. L'expression de la force de contact limite, qui sépare la phase de contact plan/plan et bord/plan, est donnée par l'équation (4.14).

$$F_{y\ell} = F_{yi0} \frac{2e}{2\ell + e} \quad (4.14)$$

Si l'on considère la variable $x = \frac{e}{\ell}$, on obtient l'équation (4.15).

$$F_{y\ell} = F_{yi0} \frac{2x}{2 + x} \quad (4.15)$$

En considérant une précharge fixée, la variation de la force de contact limite ne dépend que de e et de ℓ . En prenant en compte les épaisseurs des doigts e allant de $25 \mu\text{m}$ à 100

μm (correspondant aux préhenseurs microfabriqués) et une dimension de micro-objet de $200 \mu\text{m}$ à $2000 \mu\text{m}$, l'évolution de la force de contact limite est montrée sur la figure 4.31.

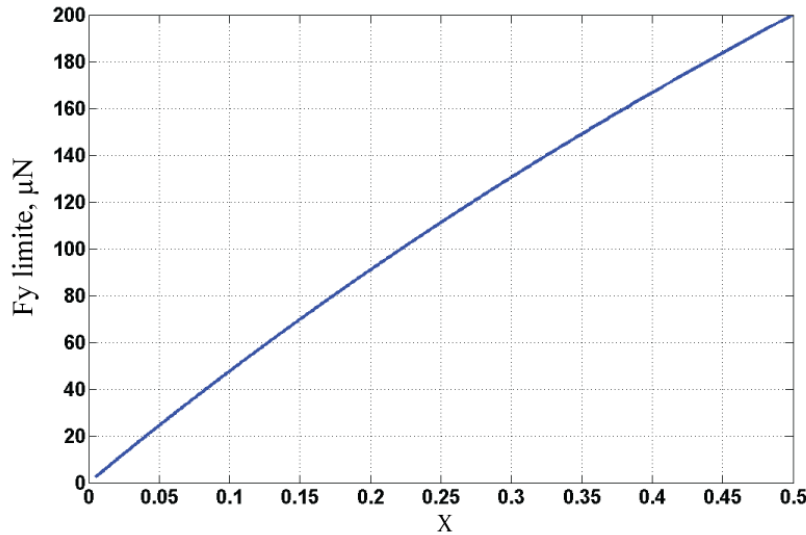


FIG. 4.31 – Evolution de la force de contact limite en fonction du ratio $\frac{e}{\ell}$ ($\frac{\min(e)}{\max(\ell)}$ à $\frac{\max(e)}{\min(\ell)}$) avec la précharge $F_{yi0} = 500 \mu\text{N}$.

Elle est sensiblement linéaire en fonction de x . Nous pouvons déduire la recommandation 1 : “Quand un micro-objet est sujet à un contact latéral, la force de serrage (F_{y1} , F_{y2}) peut être limitée en rallongeant la phase de contact plan/plan par l’augmentation du ratio $\frac{e}{\ell}$ ”. Le contact plan/plan assure une meilleure stabilité de la saisie et la force de serrage doit rester dans un ordre de grandeur assurant l’intégrité du micro-objet manipulé.

4.6.2 Choix de la compliance du préhenseur

Nous avons vu que la variation de raideur suivant l’axe Y et l’axe perpendiculaire à la force de contact latéral (Z) influence la force de serrage sur la phase 3 (cf. FIG. 4.29 et FIG. 4.30). Nous établissons la recommandation 2 : “Pour diminuer la pente de la force de serrage durant la phase de contact bord/plan (Phase 3), des doigts rigides selon l’axe perpendiculaire (Z) à la force de contact latéral et flexibles selon l’axe de saisie (Y) doivent être choisis”. La diminution de la pente conduit à une limitation de la force de serrage pour une force de contact latéral donnée. Le choix des raideurs en Z et en Y ne peut pas se faire indépendamment mais nécessite un compromis sur la structure du doigt.

Nous avons vu la relation entre le déplacement Δ_{yF} et la force de contact latéral. Les

raideurs (K_y, K_z) du préhenseur déterminent le déplacement du micro-objet en présence de contact latéral. En effet, le déplacement Δ_{yF} dépend de Δ_{y1} , Δ_{y2} et Δ_z . Dans le cas où la force de serrage maximale (F_{y1max} et F_{y2max}) est fixée pour un déplacement Δ_{yF} durant la phase 3, le modèle analytique permet de déterminer la compliance du préhenseur. Nous établissons alors la recommandation 3 : “Les caractéristiques d'un préhenseur (K_y, K_z) peuvent être déterminées pour un déplacement maximum du point de contact Δ_{yF} dans l'objectif de limiter la force de serrage”.

4.6.3 Choix de la précharge

Durant le micro-assemblage, les mouvements non-désirés des micro-objets doivent être limités. L'objectif est d'éviter de perdre le micro-objet par glissement ou éjection tout en garantissant le repère objet. La précharge agit directement sur la force de contact limite comme nous indique l'équation (4.14). Le déplacement du micro-objet peut être limité en rallongeant la phase 2 (contact plan/plan) lors de l'apparition de la force de contact latéral en augmentant la force de contact limite $F_{y\ell}$. Par ailleurs, un contact plan entre le micro-objet et les doigts du préhenseur augmente la stabilité du micro-objet en présence de perturbations suivant X et Z [RCL10]. Nous obtenons donc la recommandation 4 : “La précharge appliquée au micro-objet doit être la plus grande possible (pour un ratio $\frac{e}{\ell}$ fixé) pour rallonger la phase de contact plan/plan afin de limiter le déplacement du micro-objet en présence de contact latéral et pour augmenter la stabilité face aux perturbations”. Par contre, la précharge doit être limitée pour éviter l'indentation et la déposition qui dépendent de $\frac{Force\ appliquée}{Surface\ en\ contact}$.

4.6.4 Le choix de l'actionnement et de la forme des doigts

Durant la perturbation de la saisie par une force latérale, la force de serrage peut atteindre 3 mN pour une précharge de 200 μ N, une force de contact latéral de 100 μ N, des doigts d'épaisseur 50 μ m, des raideurs $K_y = 1000$ N/m et $K_z = 26$ N/m et une distance de contact de 1500 μ m. Pour observer la phase de contact plan/plan, il est nécessaire que les doigts soient de forme plane et qu'il n'y ait pas de désalignement (α_x et α_y) entre eux. En plus, le décalage suivant Z entre les deux doigts doit être minimisé. Ces éléments réunis nous conduisent à la recommandation 5 : “Un préhenseur à deux doigts de serrage pour le micro-assemblage doit être capable de générer une force de blocage de l'ordre de quelques mN, et être équipé de doigts à extrémités planes qui sont à la fois solidaires et microfabriqués pour minimiser les désalignements et le décalage en Z ”.

Les cinq recommandations que nous venons d'établir constituent un cadre général sur la conception d'un préhenseur et sur les forces appliquées lors du micro-assemblage. Les objectifs visés sont clairement l'application d'une force non excessive malgré la présence d'une force de contact latéral, et la stabilité de la saisie afin de ne pas perdre le micro-objet manipulé. La maîtrise de la force de serrage est très importante lorsque les micro-objets manipulés sont flexibles comme les supports optiques, pour ne pas appliquer une

force excessive.

En même temps, dans la conception actuelle, l'application de la force de serrage conduit à un contact entre le micro-objet et les doigts qui n'est pas de type plan/plan (cf. FIG. 4.32 -(1)) ce qui engendre une stabilité précaire du support optique manipulé lors du guidage. Dans l'objectif d'assurer un contact plan/plan permanent entre le micro-objet et les doigts, une modification de la zone de saisie sur les supports optiques doit être envisagée pour les prochaines fabrications. Connaissant l'angle de déformation de la partie flexible une fois la force de serrage appliquée, on intègre cet angle sur la zone de saisie pour assurer un contact plan/plan. La figure FIG. 4.32 -(2) montre une solution possible pour assurer un contact plan/plan après déformation due à la précharge.

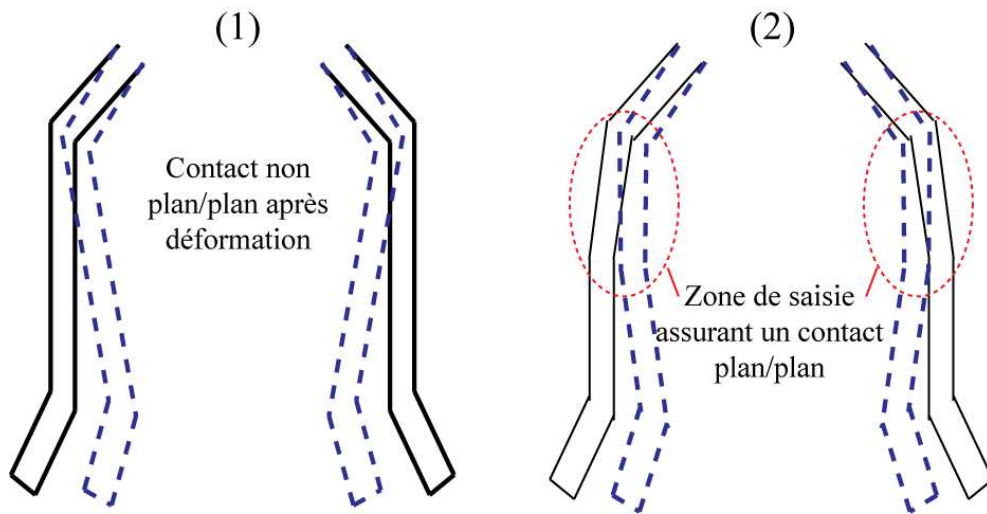


FIG. 4.32 – (1) forme actuelle de la partie flexible des supports optiques, (2) future conception assurant un contact plan/plan.

4.7 Intégration d'un modèle équivalent linéaire dans un simulateur

Pour des besoins de commande, le modèle est intégré dans un simulateur. L'utilisation de ce dernier permettra la compréhension du fonctionnement du guidage. Comme le modèle développé est non linéaire, il est approximé par un modèle linéaire sur la phase de contact bord/plan. Il prend en compte le modèle de l'évolution de la force de serrage pour des paramètres fixés. Il utilise la position du micro-objet $Y_{micro-objet}$, la position de la rainure $Y_{rainure}$ et les défauts de trajectoire Y_p . La force de contact F_y est reconstruite par une relation simplifiée ($F_y = K \cdot \delta_y$) avec le déplacement du point de contact Δ_{yF} . Ensuite, la force de serrage est obtenue en prenant en compte les deux types de contact lors de la perturbation latérale. Le fonctionnement global du simulateur est décrit sur le schéma bloc de la figure FIG. 4.33.

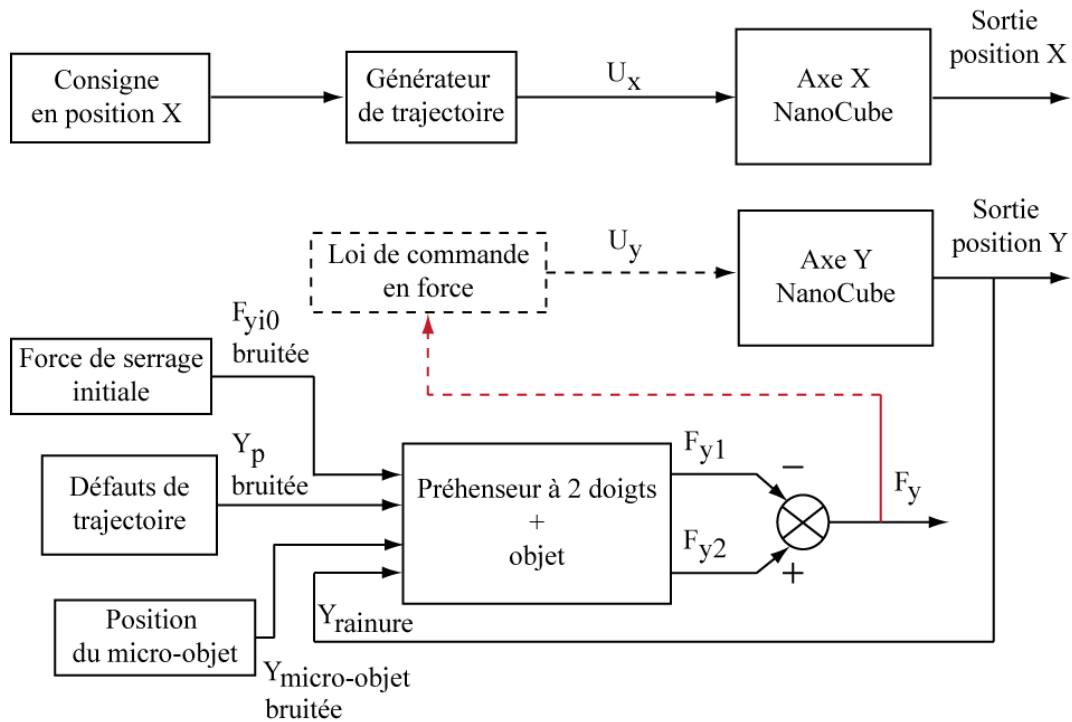


FIG. 4.33 – Principe de fonctionnement du simulateur intégrant le modèle d'évolution de la force de serrage.

Le simulateur est développé sous Matlab/Simulink[®] et le résultat est présenté sur la figure FIG. 4.34. Le modèle utilise les paramètres suivants : $F_{yi0} = 200 \mu\text{N}$, $e = 50 \mu\text{m}$, $c_1 = 100 \mu\text{m}$, $K_y = 1000 \text{ N/m}$, $K_z = 29 \text{ N/m}$ et $\ell = 950 \mu\text{m}$.

On observe que la position Y_{rail} est égale à Y_p car la correction n'est pas appliquée. A partir de $t = 0,5 \text{ s}$, le micro-objet touche le côté droit de la rainure. La force de contact apparaît et les deux phases d'évolution de la force de serrage sont observées.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude de l'intégration de mesure de force sur une station de micro-assemblage conduit au choix d'un préhenseur à deux doigts instrumentés pour effectuer le guidage automatisé et une correction sur le substrat. Ce préhenseur est capable de mesurer la force de serrage et la force de contact latéral. Une modélisation analytique du système a été proposée. Les simulations par la méthode des éléments finis (écart de 9 % à $F_y = 100 \mu\text{N}$ et écart de 17 % en pente) et les résultats expérimentaux ont permis de valider le modèle statique (écart entre les forces de contact limite $F_{y\ell}$ de $7,1 \mu\text{N}$ pour une précharge de $950 \mu\text{N}$, écart de 28 % en pente). Le modèle est générique, par conséquent, il peut être étendu à d'autres préhenseurs. La variation des paramètres du modèle (e_p , ℓ , K_y , K_z , etc.) a été étudiée conduisant à des affirmations sur la gamme

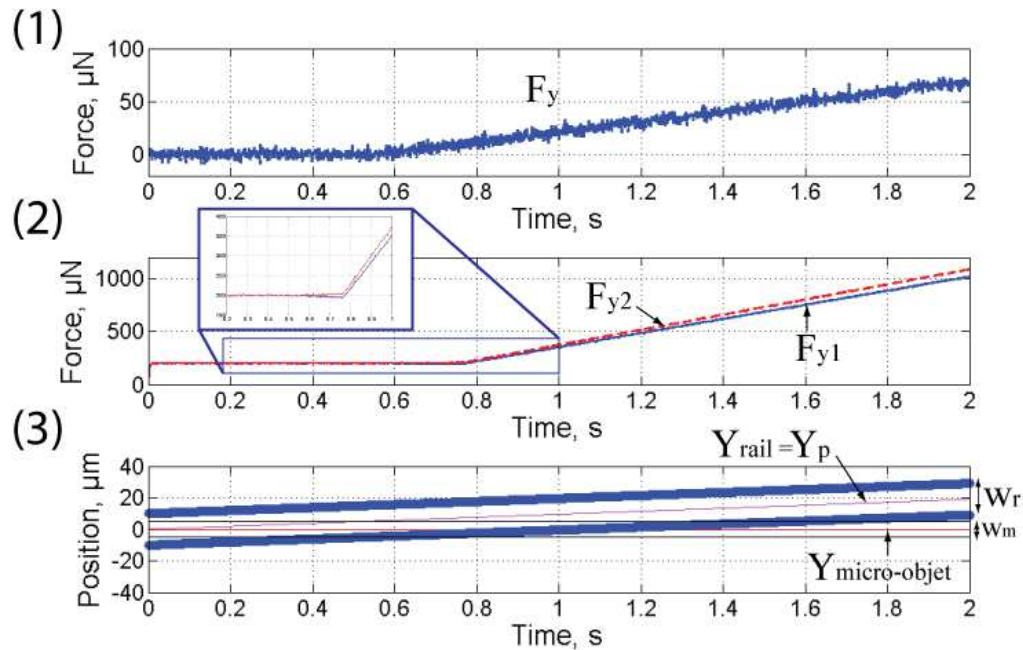


FIG. 4.34 – Résultat de l'intégration du modèle dans un simulateur avec $F_{y\ell} = 10 \mu\text{N}$: (1) estimation de la force de contact, (2) évolution de la force de serrage, (3) position du micro-objet par rapport à la rainure.

de forces appliquées en micro-assemblage pour des micro-objets à bords parallèles de volume inférieur à $0,1 \text{ mm}^3$ et sur la conception de préhenseur. Ainsi, un préhenseur à deux doigts instrumentés constitue une réponse à l'automatisation du guidage ou plus généralement à d'autres tâches nécessitant le contrôle de la force de contact latéral. Il doit disposer de doigts à extrémité plane, de deux doigts solidaires microfabriqués pour minimiser les désalignements ainsi que le décalage en Z et être équipé d'actionneurs avec une force de blocage de quelques mN. Pour assurer une pente plus faible lors de la phase de contact bord/plan, les doigts doivent être suffisamment flexibles dans l'axe de saisie et rigides dans l'axe perpendiculaire à la force de contact latéral. Le modèle équivalent linéaire a été intégré dans un simulateur afin de comprendre le fonctionnement du guidage et la mise en place d'une commande assurant le guidage automatisé qui sera traité dans le chapitre 5. L'utilisation du système robotique pour le guidage automatisé constitue la prochaine étape.

Chapitre 5

Guidage automatisé par contrôle en force

Dans ce chapitre, nous étudions le guidage automatisé par contrôle en force. Le système robotique avec un préhenseur à deux doigts de serrage est utilisé. Les conditions de stabilité de la saisie lors du guidage sont établies puis une stratégie est choisie en prenant en compte les spécificités du micromonde. Le simulateur est complété par les comportements dynamiques des axes de positionnement et des capteurs de force. La commande hybride force/position est choisie pour accomplir le guidage automatisé en prenant en compte la stratégie établie. Cette commande est intégrée dans le simulateur afin de vérifier son fonctionnement. Des résultats sont présentés avec l'utilisation d'une loi de commande en force à base de correcteur incrémental. Une validation expérimentale est enfin effectuée et la robustesse du guidage automatisé est testée.

Sommaire

5.1	Introduction	144
5.2	Contrôle en force pour la micromanipulation et le micro-assemblage	144
5.2.1	Mesure de force en mode téléopéré	145
5.2.2	Asservissement de force en mode automatisé	147
5.3	Guidage par deux doigts instrumentés (GDDI)	153
5.3.1	Stabilité de la saisie	154
5.3.2	Stratégie de guidage	156
5.3.3	Mesure de la force de contact latéral	157
5.4	Commande pour l'automatisation du guidage	158
5.4.1	Commande hybride en force/position	159
5.4.2	Schéma bloc de la commande hybride force/position pour le guidage automatisé	161
5.4.3	Mise en oeuvre de la commande dans le simulateur	164
5.4.4	Résultats du simulateur	166
5.5	Validation expérimentale	166
5.5.1	Mesure de la largeur de la rainure	168
5.5.2	Mise en oeuvre du contrôleur incrémental	169
5.5.3	Guidage avec un désalignement prédéfini	171
5.5.4	Perturbations type échelon de chaque côté du rail	171
5.6	Conclusion	174

5.1 Introduction

La micromanipulation et le micro-assemblage sont des applications de la micro-robotique. Afin de réaliser des opérations de micro-assemblage automatisé pour la fabrication des MEMS/MOEMS, il est nécessaire de connaître les forces d'interaction non seulement entre le manipulateur et son environnement, mais aussi entre l'objet manipulé et le préhenseur. L'intégrité des objets manipulés et du robot manipulateur ainsi que le succès de la manipulation ou du micro-assemblage sont les objectifs finaux.

5.2 Contrôle en force pour la micromanipulation et le micro-assemblage

La réalisation des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage par le contrôle en force a été étudiée par un certain nombre de chercheurs [XHR09, TF01, ZF98, KS09, CPK09, ZF98, LKO⁺03, YGN01, SXWL04, ZNV98, LCG⁺06]. Lors de la micromanipulation, l'information de force constitue une information locale qui permet de détecter et de caractériser les interactions.

On définit deux niveaux de l'utilisation de la force lors de la micromanipulation et du micro-assemblage :

- elle permet de prendre des décisions en mode téléopéré ;
- elle est asservie durant des tâches automatisées.

5.2.1 Mesure de force en mode téléopéré

Différentes opérations sont réalisées avec l'aide d'une mesure de force. La force constitue une information complémentaire à la vision pour la perception des interactions. Les principales opérations sont la saisie, la poussée et l'insertion.

La saisie

Les opérations de prise et de dépose sont très fréquentes durant la micromanipulation et le micro-assemblage. Les préhenseurs peuvent être équipés de capteurs de force pour ressentir les forces à l'échelle du micromonde afin de contrôler la position du micro-objet, de détecter le contact avec le micro-objet et pour appliquer l'effort nécessaire pour détacher les micro-objets d'un support adhésif sans pour autant les endommager. Dans [XCHR09], une station 3D MFM (Manipulation Force Microscope) est équipée de deux pointes d'AFM avec retour de force optique. La manipulation de nanofils de silicium (25 nm de diamètre) est réalisée par la station. Le microscope offre une vue de dessus de la scène de manipulation et permet la détection des positions des nanofils. La mesure de force sur une pointe permet de détecter les contacts et les interactions (type force de pull-off). Elle offre aussi des données intéressantes sur la compréhension de la micromécanique et des phénomènes microphysiques.

Dans [TF01], un système de manipulation appelé "ortho-tweezer" est équipé de 2 doigts perpendiculaires avec un retour de force par jauges de contraintes (Entran ESB-020-350). Les tapotements d'amplitude 0,4 mN générés par chaque doigt permettent de localiser la position des micro-objets. Les dimensions des objets manipulés sont de 200 μm x 200 μm x 50 μm . Ils sont collés sur du GelPack[®] et une force de serrage de 4 mN doit être appliquée pour détacher le micro-objet du GelPack[®] avant de le saisir. Dans ces deux cas, la mesure de force sert à aider l'opérateur lors de la saisie.

Poussée de micro-objets

Le positionnement des micro-objets sur un substrat est une opération typique de la micromanipulation. Les micro-objets étant disposés en vrac, leurs positions sont modifiées par poussée pour réaliser un motif ou pour les classer par catégories (critère de forme, dimension, etc.). La présence de la force de friction et des forces d'adhésion entre les micro-objets et le substrat conduit alors à l'utilisation de la mesure de force. Elle permet d'éviter les mouvements brusques du micro-objet et surtout sa perte. La poussée est composée de trois phases : le mouvement libre du pousseur, le contact avec une augmentation de la force jusqu'à la force de détachement et la force de poussée. Elle peut s'effectuer en mode téléopéré, cas dans lequel la force aide l'opérateur, ou en automatisé par détection d'un pic de force et/ou asservissement de la vitesse de poussée.

L'utilisation de la force pour accomplir la poussée de micro-objets est proposée dans plusieurs travaux [ZF98, KS09, CPK09].

Dans [ZF98], les dimensions des micro-objets manipulés sont de $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$. Le pousseur est une pointe d'AFM piézorésistive inclinée à 15° assurant un point de contact bien défini (cf. FIG. 5.1). Le positionnement et l'orientation des micro-objets par poussée s'effectuent avec une vitesse de $0,22\ \text{mm/s}$. Une série de mesures a permis de déterminer une moyenne de force de poussée de $2,2\ \mu\text{N}$ et de force de détachement de $5,8\ \mu\text{N}$. Le point de départ de la poussée est entré par un opérateur. La mesure de force permet de modifier la configuration de la poussée. Le positionnement des micro-objets est assuré avec une précision de $\pm 7\ \mu\text{m} / \pm 2^\circ$. L'alignement par rapport à une référence mobile ou fragile assure une incertitude inférieure à $\pm 3\ \mu\text{m} / \pm 0,1^\circ$.

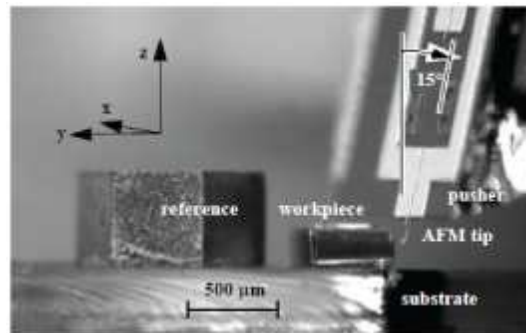


FIG. 5.1 – L'installation utilisée pour la poussée de micro-objets avec une pointe d'AFM [ZF98].

Insertion ou “Peg-in-Hole”

L'opération d'insertion est très utile pour certaines phases de micro-assemblage. Elle permet le positionnement d'un micro-objet dans un emplacement dédié. Un jeu fonctionnel est nécessaire entre le micro-objet et l'emplacement. En raison des imprécisions du système robotique et de la position du trou, il arrive que le micro-objet touche le bord de l'emplacement. Cela peut engendrer le glissement du micro-objet entre les doigts du préhenseur voire même sa perte. Il faut alors détecter ce contact et corriger la position ou compenser ces imprécisions par de la compliance. A la fin de l'opération d'insertion, il faut aussi détecter par mesure de force quand le micro-objet touche le fond de l'emplacement lorsque c'est le cas.

Dans [LKO+03], les opérations d'insertion s'effectuent par un préhenseur compliant comme montré sur la figure FIG. 5.2. Il (de dimensions globales $1200\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$) est à actionnement électrothermique qui assure une ouverture de $20\ \mu\text{m}$ pour $5\ \text{V}$ d'alimentation. Il est monté sur un système robotique possédant 6 degrés de liberté dont 3 translations et 3 rotations. Les micro-objets manipulés mesurent $300\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Les défauts de positionnement sont alors compensés par la déformation du préhenseur. Ce dernier doit assurer une force de serrage suffisante pour éviter le glissement et

la perte du micro-objet. Pour vérifier l'état de l'insertion, un capteur de force capacitif est intégré sur le préhenseur qui mesure la force dans l'axe d'insertion. La faisabilité de l'insertion a été démontrée avec l'utilisation de la mesure de force. Cela ouvre la perspective d'appliquer des algorithmes de planification des tâches pour l'automatisation de l'insertion guidée par la force.

Un système robotique permettant l'insertion de micro-objet métallique dans des trous

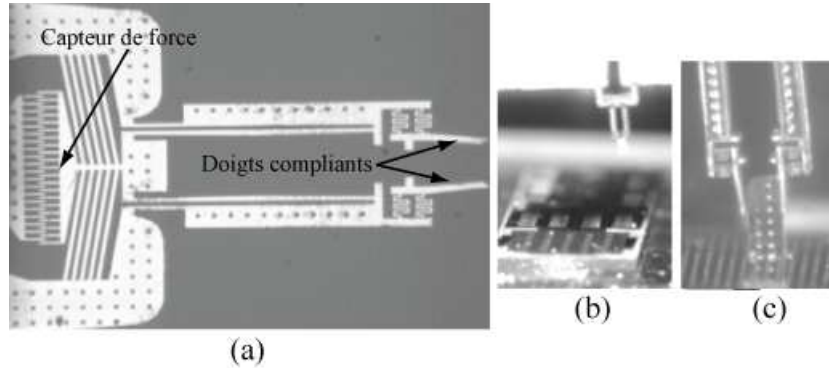


FIG. 5.2 – (a) le préhenseur compliant utilisé pour l'insertion, (b) l'objet est maintenu par le préhenseur et (c) l'opération d'insertion du micro-objet.

sur un wafer positionné verticalement est proposé dans [YGN01]. Afin d'améliorer le temps de cycle et éviter la détérioration du micro-objet, une information de force est ajoutée. Un capteur piézoélectrique (PCB 209C1) est intégré sur le micromanipulateur. La mesure de force aide l'opérateur lors de l'insertion. L'avantage de l'utilisation du capteur piézoélectrique est qu'il résiste à de fortes charges statiques.

5.2.2 Asservissement de force en mode automatisé

L'asservissement de force est utilisé durant les tâches de micromanipulation et de micro-assemblage afin de les automatiser. Le contrôle de la force permet alors de maintenir leur niveau en dessous d'une limite permettant de garantir l'intégrité des micro-objets et du manipulateur, de vérifier l'état d'avancement de la tâche et d'assurer son succès. La modélisation de la tâche conduit à l'identification des directions contraintes nécessitant l'asservissement en force. L'amplitude de la force à contrôler est choisie grâce à la connaissance de la tâche du concepteur. Beaucoup de tâches peuvent être accomplies grâce à l'asservissement de force telles que la prise, la dépose ou le lâcher, le soulèvement de microstructures et l'insertion.

Soulèvement de microstructures

Pour soulever des structures pliables à l'issue des étapes de microfabrication, il est commode d'utiliser une pointe qui entre en contact avec elles. La rigidité de cette dernière conduit à une grande force avec très peu de déformations non mesurées par un retour par vision. Pour éviter de les endommager, la force doit être contrôlée.

Des micromiroirs microfabriqués sont généralement positionnés horizontalement à la surface du substrat. Ils doivent ensuite être positionnés verticalement pour réfléchir le faisceau se propageant parallèlement au substrat. Une sonde équipée de capteur de forces permet de contrôler la force de soulèvement afin de préserver la structure microfabriquée. Dans [SXL03], le soulèvement d'un miroir microfabriqué est proposé. Une sonde équipée de capteur PVDF est utilisée pour soulever un miroir de dimensions $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$. Le capteur est monté sur la station microrobotique du Michigan State University à 3 degrés de liberté (type Signatone[®]). Ce système est utilisé pour un asservissement de la force de contact sur un miroir. La commande se base sur un contrôle de l'accélération (\ddot{y}_c). Pour le mouvement libre, le contrôle de l'accélération est régie par l'équation (5.1). La mesure de l'accélération en temps réel est difficile et une estimation à partir du modèle dynamique du système robotique est utilisée.

$$\ddot{y}_c = \ddot{y}_c^d + k_{vc}(\dot{y}_c^d - \dot{y}_c) + k_{pc}(y_c^d - y_c) \quad \text{pour } (t < t_{sw}) \quad (5.1)$$

avec k_{vc} gain dérivatif, k_{pc} gain proportionnel, y_c^d position désirée et t_{sw} temps de détection de l'impact. Une fois le contact détecté, l'asservissement de la force de contact s'effectue par un correcteur PI et un contrôle de l'accélération qui sont régis par l'équation (5.2) durant le mouvement contraint. La force de contact est asservie à quelques μN .

$$\ddot{y}_c = K\ddot{y}_c + K_d\dot{y}_c + K_f(F_c^d - F_c) + K_i \int_{sw}^t (F_c^d - F_c)dt \quad \text{pour } (t > t_{sw}) \quad (5.2)$$

avec F_c^d force désirée, F_c force mesurée, K_f et K_i sont les gains du correcteur PI; K et K_d sont des gains sur le contrôle de l'accélération.

Dans [ZNV98], l'étude de la force d'impact pour éviter d'endommager une structure pliable est proposée grâce à l'utilisation d'un retour de force combiné avec un retour en position par vision. Pour cela, un préhenseur est équipé d'un retour de force à base de mesure optique (raideur du levier $0,22 \text{ N/m}$). Un système de vision à base de microscope est utilisé pour l'asservissement visuel. Il est équipé de zoom/focus motorisés.

La loi de commande utilisée se base sur la vision et la force comme montre la figure FIG. 5.3. Le contrôleur $C(t)$ assure la commande en position par vision tant qu'une position limite n'est pas atteinte et que la force de contact est inférieure à une limite fixée (si $|F_m| < F_{th}$ et $(x_d - x_m) > \epsilon$). Ensuite, la commande bascule en contrôle en force. Le correcteur utilisé pour l'asservissement force est un correcteur proportionnel décrit par l'équation 5.3. La tension en sortie du correcteur est une commande en vitesse qui doit être intégrée pour obtenir la commande en position du système piézoélectrique. Le système de positionnement utilise un correcteur PID en interne.

$$u(k) = G_F(F_r(k) - F_m(k)) \quad (5.3)$$

avec $u(k)$ tension de sortie du correcteur, G_F gain proportionnel, $F_r(k)$ force désirée et $F_m(k)$ force mesurée.

L'utilisation de l'asservissement en force et la vision permet de réaliser une approche avec une vitesse de $80 \mu\text{m/s}$ pour une force d'impact de 9 nN . La force de contact est

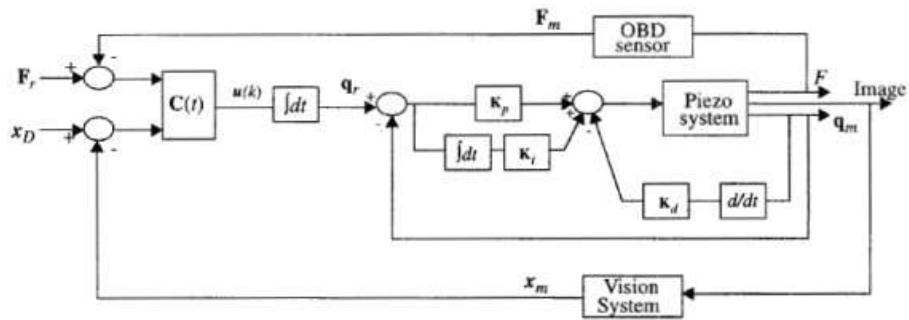


FIG. 5.3 – Schéma bloc de la commande du système de micro-assemblage dans [ZNV98].

ensuite réglée à 2 nN. Ce résultat est obtenu après plusieurs essais avec différents gains. L'asservissement de force combiné avec un contrôle en position permet donc de réduire la force d'impact et de réguler la force de contact pour préserver le miroir.

Lâcher de micro-objets

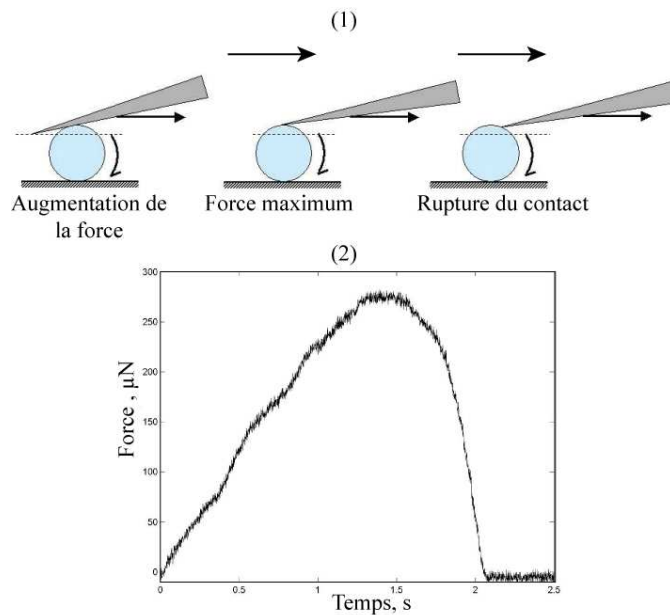


FIG. 5.4 – (1) roulement d'une bille par application d'une force verticale, (2) évolution de la force lors du roulement [GD06].

La manipulation de micro-objets de dimensions inférieures à $50 \mu\text{m}$ est confrontée aux forces d'adhésion plus particulièrement lors de la phase de lâcher. Des stratégies de lâcher ont été mises en place, soit par une conception des doigts minimisant l'adhésion [AAN⁺98, ZN00], soit par un lâcher dynamique [HRR01], soit par l'application

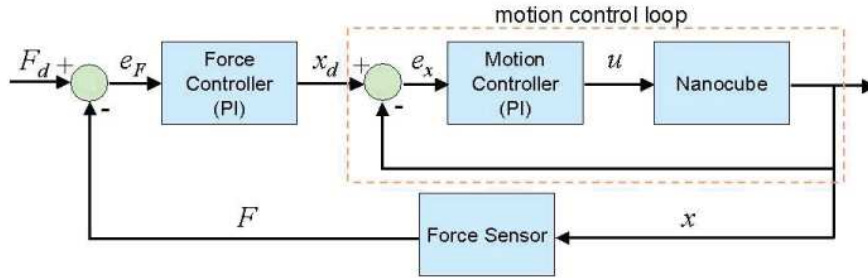


FIG. 5.5 – Contrôle en force avec une boucle interne en position [GD06].

de force de diélectrophorèse [GGH06], soit par roulement en contrôlant la force verticale [HDR06, GD06].

Le lâcher de microbilles par roulement en contrôlant la force est proposé dans [GD06]. L'objectif est de réaliser le roulement de la bille comme montré sur la figure FIG. 5.4. Les auteurs utilisent des pointes avec un retour de force par un capteur piézorésistif pour manipuler des microbilles. La force verticale appliquée peut être contrôlée par une boucle d'asservissement avec un correcteur proportionnel intégral (PI). Le système utilise une boucle interne en position qui est réglée en usine par le fournisseur. Des essais d'asservissement utilisant la commande montrée sur la figure FIG. 5.5 ont été réalisés. Ils ont conduit à la nécessité d'utiliser un système de positionnement de résolution nanométrique. Le contrôle de la force verticale permet d'assurer le roulement pour relâcher la microbille.

Prise et insertion de micro-objets

La prise et l'insertion font partie des opérations courantes en micro-assemblage et en micromanipulation. L'automatisation de ces opérations par le contrôle en force permet de garantir leurs accomplissements en appliquant précisément de manière répétée la force nécessaire pour la prise et la force indiquant la fin de l'insertion c'est-à-dire la pièce insérée touche le fond du trou par exemple.

Dans [LCG⁺06], la prise et l'insertion de micro-objets par asservissement de force sont proposées. Les micro-objets sont fabriqués en résine SU8, un polymère biocompatible pouvant être utilisé dans des applications biomédicales. Les dimensions des micro-objets sont de $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ avec des encoches de $60 \mu\text{m}$ et un trou au milieu de $100 \mu\text{m}$ de diamètre. Une pointe en tungstène s'insère alors dans le trou du milieu lors de la prise et la force de friction permet de saisir les micro-objets. Un système de manipulation équipé de retour en force est utilisé (cf. FIG. 5.6). Un capteur de force type jauge de contrainte de la série Nano17[®] de chez ATI est monté sur le système de micromanipulation (à la base de la pointe en tungstène) et donne les 6 composantes de force/couple. Le système de micromanipulation se base sur une table de positionnement à 6 degrés de liberté (NanoMax-HS 6-axis flexure stage, Melles Griot[®]) assurant une plage de déplacement de 4 mm (résolution 37,5 nm) suivant les 3 axes linéaires et

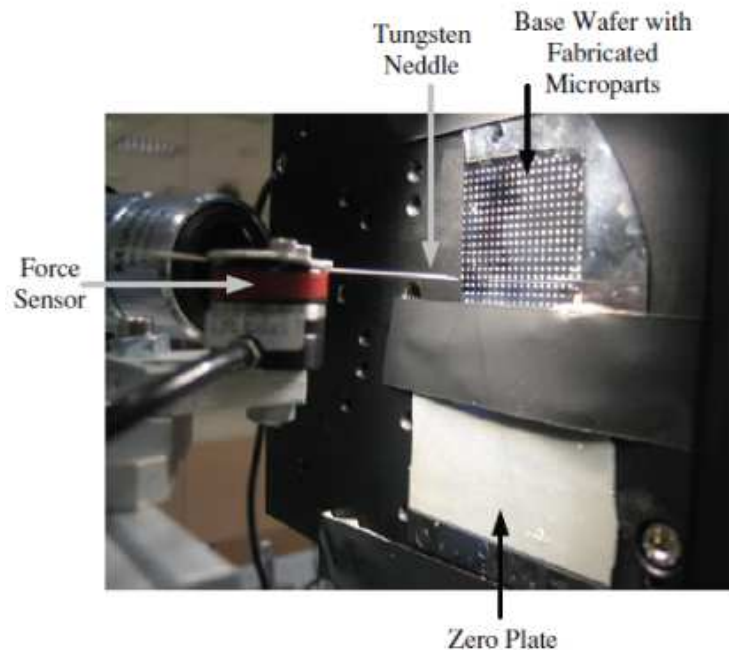


FIG. 5.6 – Système utilisé pour la prise par pointe et l’insertion de micro-objets par contrôle en force [LCG⁺06].

6° (résolution 25”) suivant les axes de rotation. L’ensemble est monté sur un système de positionnement à grande course possédant 3 degrés de liberté (M-511.DD et M-501.1 PD, Physik Instrumente[®]). Il possède une course de 50 mm et une précision de 0,2 μm suivant X et Y. Suivant Z, la course est de 12,5 mm pour une résolution de 8 nm. L’insertion s’effectue selon l’axe Y. Un axe vertical, assurant le maintien et l’alignement du wafer et du “zéro plate”, se base sur un système de positionnement type M-501.1 PD de Physik Instrumente[®].

Deux opérations sont accomplies par le système en utilisant un asservissement en force (cf. FIG. 5.7) après un alignement visuel par l’opérateur. Nous les décrivons ci-dessous.

- La prise nécessite l’application d’une force de compression de 100 mN (cf. FIG. 5.8-(a) et FIG. 5.8-(c)). Un correcteur intégral avec un coefficient $K_i = 0,05$ asservit la force par l’actionnement d’un système de transmission de force. Une consigne de 150 mN est appliquée pour casser le lien entre le micro-objet et le wafer. Un temps d’attente est fixé avant l’application d’une consigne de 0 mN pour retirer le micro-objet du wafer. L’évolution de la force asservie est montrée sur la figure FIG. 5.8-(d). La durée moyenne de l’opération est de 25 s.
- L’insertion du micro-objet sur une encoche du “zero plate” peut commencer après une phase d’alignement FIG. 5.8-(b). Une force de 400 mN enfonce le micro-objet dans l’encoche et permet de garantir son maintien grâce à la force de friction entre le micro-objet et l’encoche (cf. FIG. 5.8-(a)). L’écart entre l’encoche du “zéro plate” et la fente du micro-objet permet de vérifier la qualité de l’assemblage.

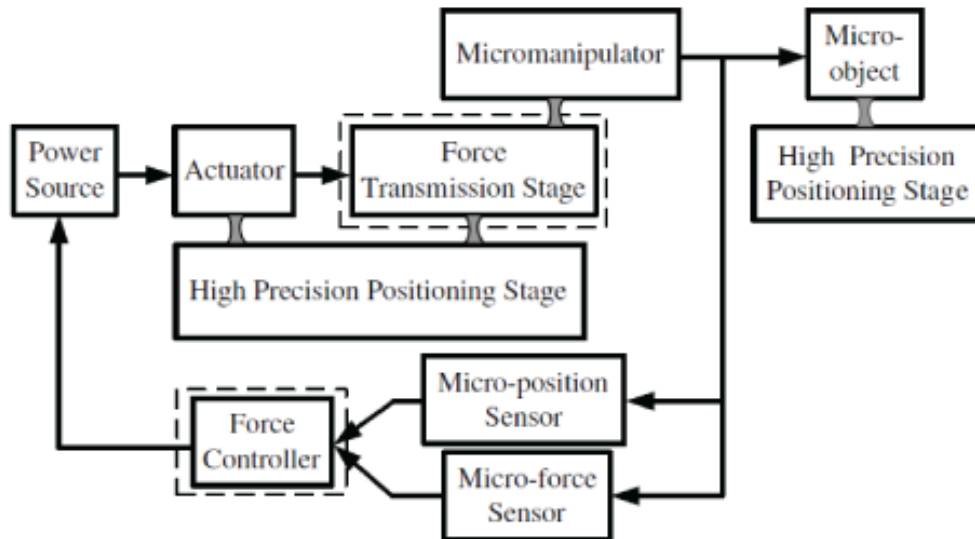


FIG. 5.7 – Schéma de principe du système robotique pour la saisie et l'insertion guidées par la force.

Ces travaux présentés dans [LCG⁺06] montrent des tâches automatisées, qui sont la prise et l'insertion, réalisées par asservissement de force. Les expériences réalisées montrent l'intérêt et l'efficacité de l'asservissement en force selon une gamme de forces de plusieurs centaines de mN.

Nous avons vu les différents travaux de micromanipulation et de micro-assemblage existants à base de retour de force. L'utilisation de l'information de force permet de réaliser des tâches comme la prise, la dépose, l'insertion, la poussée, le soulèvement d'un miroir, etc. Malgré cela, les travaux en contrôle en force (asservissement, stratégie, planification, etc.) à l'échelle micrométrique restent peu nombreux. La difficulté de mise en place du système et la fragilité des composants sont des freins à leurs utilisations. Notre étude traite donc du contrôle en force pour l'automatisation des tâches à l'échelle microscopique. Les différents travaux réalisés montrent néanmoins l'apport de l'utilisation de l'information de force sur l'accomplissement des tâches. Le contrôle de la force permet ainsi d'éviter de casser les micro-objets, d'appliquer une force suffisante pour saisir et effectuer la dépose. Les niveaux de force utilisés varient de quelques nN à quelques mN pour des micro-objets de dimensions inférieures à $0,1 \text{ mm}^3$.

Nous avons fait le choix de l'utilisation d'un préhenseur à deux doigts de serrage pour l'assemblage des supports optiques. Nous allons nous intéresser à l'utilisation du contrôle en force pour effectuer le guidage, une tâche qui n'est pas encore traitée à l'échelle micro. Le contrôle en force doit éviter une augmentation brusque de la force de serrage et rejeter les forces de perturbations pouvant conduire au glissement du micro-objet ou à sa perte. Les objectifs visés sont l'étude et la réalisation d'un guidage automatisé. L'étude se focalise sur le guidage automatisé par contrôle en force de micro-objets rigides à faces

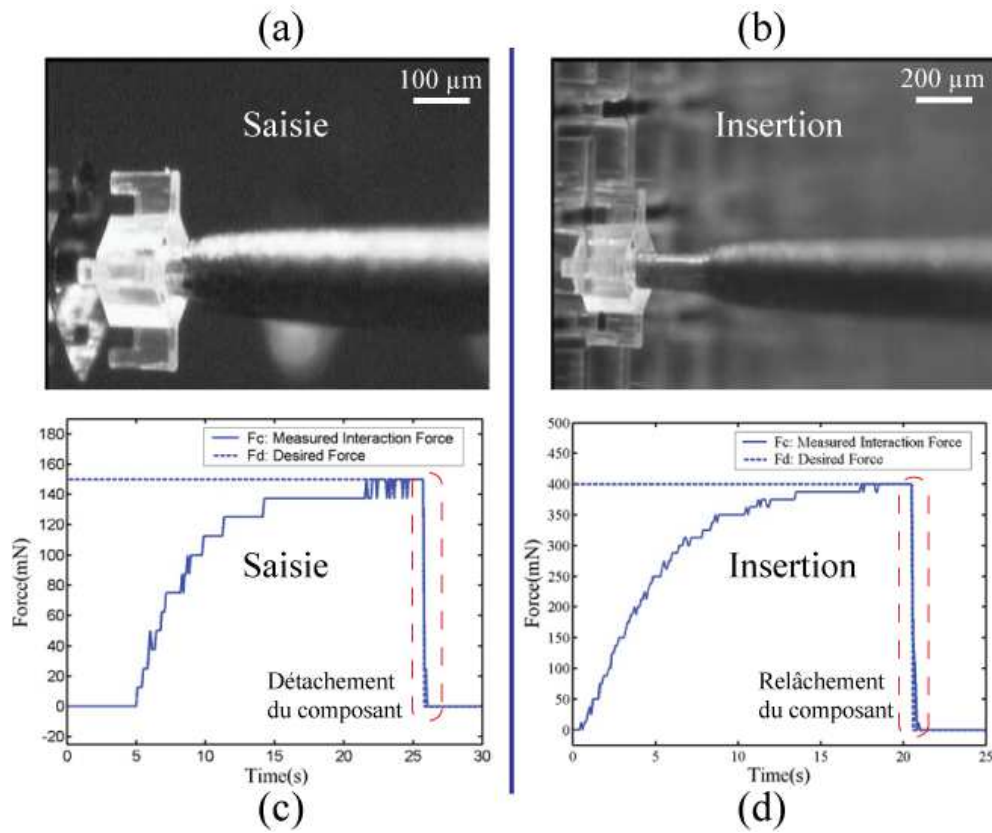


FIG. 5.8 – (a) le micro-objet se détachant du wafer, (b) l'insertion est terminée, (c) l'évolution de la force appliquée lors de la saisie et (d) l'insertion [LCG+06].

parallèles (*cf.* FIG. 5.9). Une commande hybride force/position doit être utilisée pour assurer le mouvement d'avance dans la rainure et le contrôle de la force de contact latéral. Un asservissement de force de quelques μN à quelques dizaines de μN est traité avec l'utilisation d'un correcteur en force statique et non linéaire.

La rainure est de largeur L_r et de profondeur P_r . On considère que la profondeur de la rainure est assez grande pour éviter les forces (F_z) suivant l'axe Z (*cf.* FIG. 5.9).

5.3 Guidage par deux doigts instrumentés (GDDI)

Durant le guidage, le préhenseur maintient un micro-objet et ce dernier peut entrer en contact avec la rainure. La force de serrage ne doit pas trop augmenter et les forces de perturbations doivent être rejetées ou maintenues à des valeurs acceptables. Pour accomplir la tâche de guidage, nous allons dans un premier temps nous focaliser sur la stabilité de la saisie en présence de forces de perturbation.

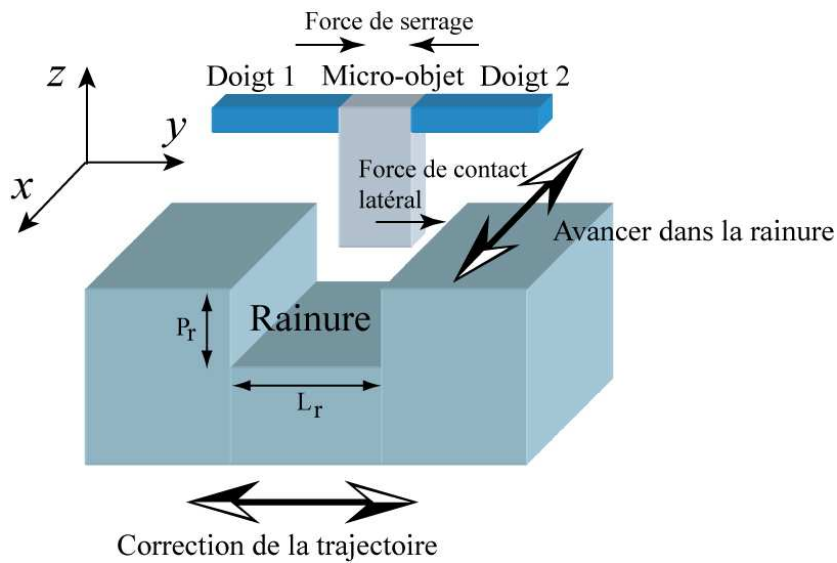


FIG. 5.9 – Guidage d'un micro-objet rigide dans une rainure.

5.3.1 Stabilité de la saisie

Prenons le cas d'un micro-objet à faces parallèles saisi par un préhenseur à deux doigts de serrage. Le contact entre les doigts et le micro-objet est de type plan/plan. Lors de l'apparition de contacts entre le micro-objet manipulé et son environnement, le micro-objet est soumis à une force de perturbation F avec ses trois composantes F_x , F_y et F_z suivant les axes X , Y , Z respectivement. Nous allons étudier séparément l'effet de chaque composante de force (cf. FIG. 5.10) sur la stabilité de la saisie. L'étude de la

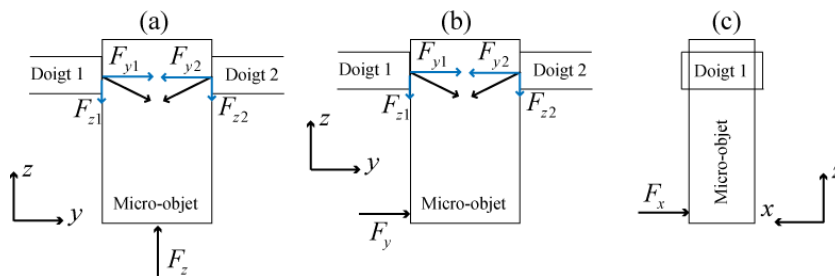


FIG. 5.10 – Perturbation de la saisie par les forces : (a) F_z , (b) F_y , et (c) F_x .

stabilité se base sur le modèle de contact de Coulomb qui constitue une approximation majorée des forces de friction. Les conditions de stabilité établies donneront des valeurs limites hautes.

- La stabilité en présence de la force F_z (cf. FIG. 5.10 -(a)) : selon Coulomb, le glissement de l'objet n'apparaît pas si les forces tangentielles exercées par les doigts sont importantes. La condition de non glissement est $2\mu F_y \geq F_z$ avec $F_{y1}=F_{y2}=F_y$.

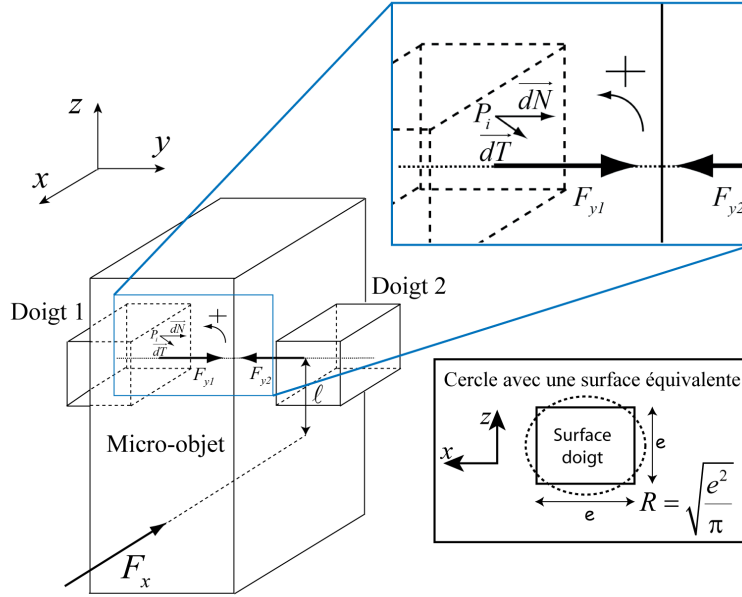


FIG. 5.11 – Détails du schéma utilisé pour le calcul de la force F_x limite avant la rotation.

- Le coefficient de friction et la précharge sont des paramètres importants sur la stabilité. Le coefficient de friction dépend de la rugosité des surfaces en contact et du type de matériau. La fragilité des doigts est également une limite à la force F_z .
- La stabilité en présence de la force F_y (cf. FIG. 5.10 -(b)) : la force F_y génère un déplacement réversible (lors de l'annulation de F_y) du micro-objet entre les deux doigts du préhenseur comme indiqué dans le chapitre 4. Malgré tout, le micro-objet est toujours maintenu jusqu'à ce qu'une force F_y maximale engendre la rupture des doigts.
 - La stabilité en présence de la force F_x (cf. FIG. 5.10 -(c)) : la force F_x induit un couple qui peut causer la rotation de l'objet. Pour éviter la rotation de l'objet, la force limite F_y peut être calculée. Dans notre cas, la surface en contact (entre l'objet et les doigts) est un carré de $50 \mu\text{m}$ de côté. On considère par approximation un cercle de rayon R de surface équivalente S , F_{yi} la précharge, P la pression uniforme induite par F_{yi} , dS une surface élémentaire, dN et dT les vecteurs de force élémentaire normale et tangentielle comme nous montre la figure FIG. 5.11. Pour une précharge F_{yi} , la pression est $P = \frac{F_{yi}}{S}$.

$$\vec{dN} = P \cdot dS \cdot \vec{n} \quad (5.4)$$

La condition de non glissement sur un point élémentaire P_i est :

$$\left\| \vec{dT} \right\| \leq \mu \cdot P \cdot dS \cdot \left\| \vec{n} \right\| \quad (5.5)$$

A partir du couple élémentaire dC de l'équation (5.6), l'intégration sur la surface de contact donne le couple pour un doigt à l'équation (5.7).

$$dC = \rho \left\| \vec{dT} \right\| \quad (5.6)$$

$$C = \frac{2}{3} F_{yi} \mu R \quad (5.7)$$

La condition de stabilité est par conséquent :

$$F_x \leq \frac{4F_{yi}\mu R}{3\ell} \quad (5.8)$$

Pour ordre de grandeur, la force limite F_x est de 22,54 μN pour une précharge $F_{y1} = F_{y1} = 1000 \mu\text{N}$, un coefficient de friction $\mu = 0,3$, une distance de contact $\ell = 500 \mu\text{m}$ et $R = 28,2 \mu\text{m}$ (équivalent à un carré de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$).

On observe la dépendance de la stabilité à la dimension de la surface en contact (R), le coefficient de friction, la précharge et la distance de contact. Cette condition de stabilité est valable tant que le contact entre les doigts et le micro-objet est de type plan/plan. Elle est établie dans le cas statique donc elle reste correcte tant que la vitesse d'exécution des mouvements n'est pas trop grande. La condition de stabilité doit être prise en compte pour établir une stratégie de guidage afin d'éviter le glissement et/ou la perte du micro-objet.

5.3.2 Stratégie de guidage

Durant la phase de guidage, un contact entre le micro-objet manipulé et la rainure peut apparaître et il est caractérisé par l'amplitude de la force et sa direction. Trois stratégies peuvent être adoptées pour continuer la tâche :

- stratégie 1 : le mouvement d'avance selon l'axe X continue tout en corrigeant la force de contact latéral ;
- stratégie 2 : le mouvement d'avance est stoppé et la trajectoire est corrigée suivant Y jusqu'à ce que le contact soit rompu ($F_y = 0$) ;
- stratégie 3 : le mouvement d'avance est stoppé et la trajectoire est corrigée suivant Y. Le mouvement d'avance peut continuer une fois la force de contact redescendue à une valeur conduisant à la stabilité de la saisie.

Dans le cas de la stratégie 1, il est quasiment impossible d'assurer le respect de la condition de l'équation (5.8) pour assurer le maintien du micro-objet (F_x limite faible). La stratégie 2 peut conduire à une série de créations et ruptures de contact si la force de pull-off est présente. En effet, la force de pull-off engendre une zone instable qui correspond à $F_y = 0 \mu\text{N}$, mais sans rupture de contact (les points A et C de la figure FIG. 5.12). La commande à consigne nulle est connue pour être instable surtout quand un terme intégral intervient dans le correcteur [KD99].

Pour respecter la condition de l'équation (5.8), il est indispensable d'arrêter le mouvement lors de la phase de correction. En effet, la force F_x doit être inférieure à la force limite avant que le mouvement d'avance ne continue. Pour ordre de grandeur, elle est

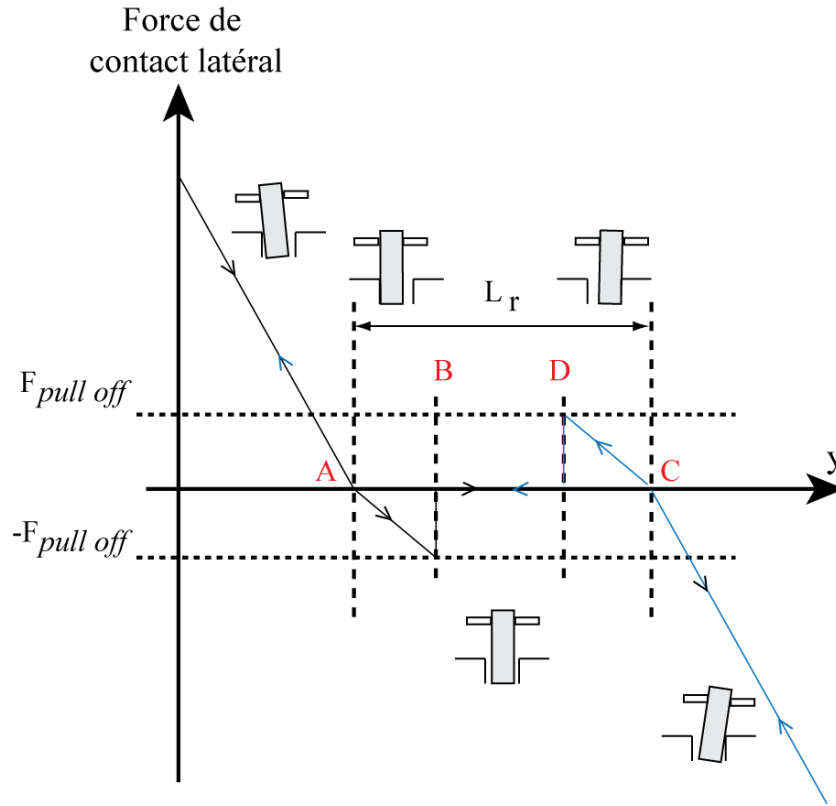


FIG. 5.12 – Apparition de la force de pull-off sur le guidage en cas de rupture de contact.

de $11,27 \mu\text{N}$ pour une précharge $F_{yi} = 500 \mu\text{N}$, $\mu = 0,3$, $\ell = 500 \mu\text{m}$, et $R = 28,2 \mu\text{m}$. Ainsi, la dernière stratégie est choisie pour accomplir le guidage automatisé. Le choix de cette stratégie entraîne la nécessité de mesurer la force de contact latéral qui doit être validée.

5.3.3 Mesure de la force de contact latéral

Pour effectuer le guidage automatisé, nous décidons de contrôler la force de contact latéral. La mesure de cette force s'effectue par la différence des forces appliquées par les deux doigts du préhenseur. Cette estimation est valide dans le cas de guidage en quasi-statique.

$$F_y = F_{y2} - F_{y1} \quad (5.9)$$

Généralement, les capteurs de force présentent un coefficient de couplage ; la mesure dépend de la force appliquée sur l'axe sensible (Y dans notre cas) mais aussi sur un axe perpendiculaire (Z dans notre cas). Les expressions des forces mesurées sont alors $F_{c1} = F_{y1} + \alpha F_{z1}$ pour le doigt 1 et $F_{c2} = F_{y2} + \alpha F_{z2}$ pour le doigt 2, avec α le coefficient de couplage. Par conséquent, l'estimation de la force de contact latéral peut dépendre du couplage (cf. équation (5.10)) avec $F_{z2} = -F_{z1} = F_z$.

$$F_y = F_{c2} - F_{c1} + 2\alpha F_z \quad (5.10)$$

Dans notre cas, le coefficient de couplage est faible ($\alpha = 0,01$ donné par FemtoTools et vérifié expérimentalement) et F_z est aussi petite devant F_{c1} et F_{c2} car elle correspond à la composante de la force de serrage suivant Z. L'estimation de la force est alors exprimée par l'équation (5.11).

$$F_y = F_{c2} - F_{c1} \quad (5.11)$$

Le même système robotique que celui utilisé pour la validation du modèle est utilisé

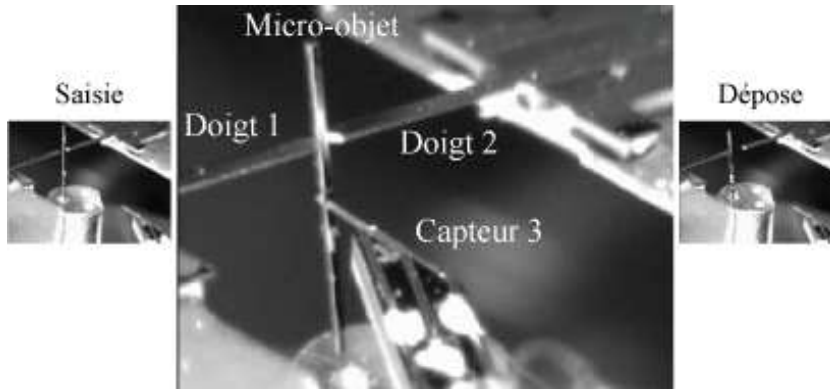


FIG. 5.13 – Système de mesure pour la validation de l'estimation de la force de contact latéral F_y .

pour valider l'estimation de la force de contact latéral. La saisie et la dépose s'effectuent grâce à un support équipé de trous de $500 \mu\text{m}$ de diamètre permettant de positionner le micro-objet (cf. FIG. 5.13). Pour ce faire, la force appliquée par le capteur 3 doit être comparée avec la force estimée à partir des informations provenant des doigts. La figure FIG. 5.14 montre le résultat en quasi-statique de la validation de l'estimation. La figure FIG. 5.15 montre le résultat lors de l'introduction d'une perturbation dynamique (actionnement de l'axe Y_p). On observe une concordance entre la force appliquée par le capteur 3 (F_y appliquée) et la force estimée en statique (F_y) donc la mesure de la force de contact latéral par les deux doigts instrumentés est validée.

5.4 Commande pour l'automatisation du guidage

La mise en œuvre de la stratégie décrite ci-dessus permet d'assurer la stabilité de la saisie et conduit à définir une loi de commande. Il est nécessaire d'assurer la mise en position de micro-objet dans la rainure tout en contrôlant la force de contact latéral. Il n'y a que la commande hybride en force/position qui peut remplir cet objectif.

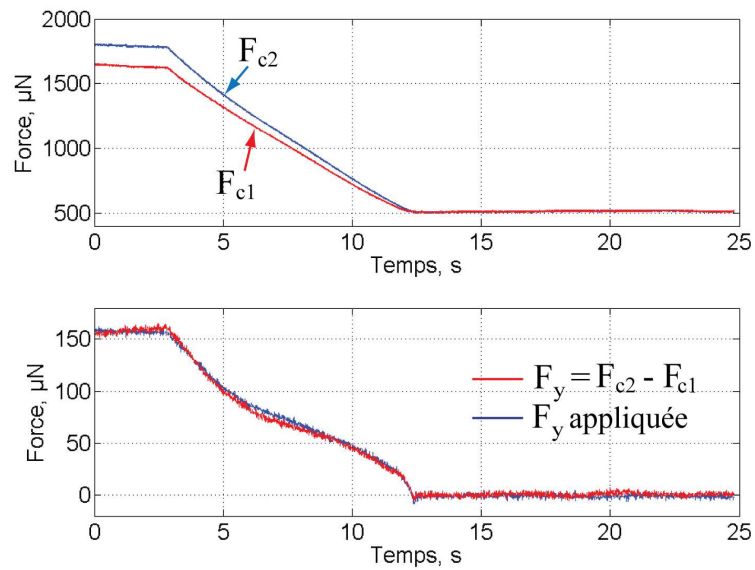


FIG. 5.14 – Validation de l'estimation de la force de contact latéral en quasi-statique.

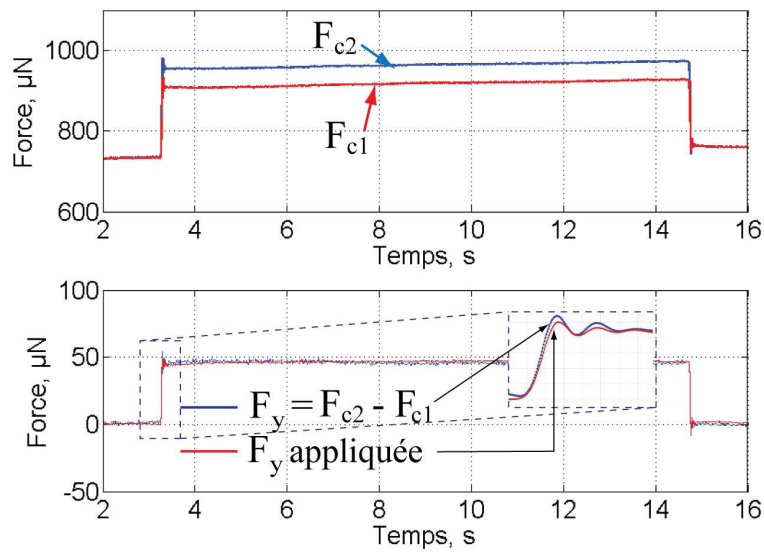


FIG. 5.15 – Validation de l'estimation de la force de contact latéral lors d'une perturbation dynamique.

5.4.1 Commande hybride en force/position

Elle a été introduite par [RC81] dans sa version initiale au début des années 80. Une amélioration a ensuite été proposée par [FM92] pour corriger les instabilités par intro-

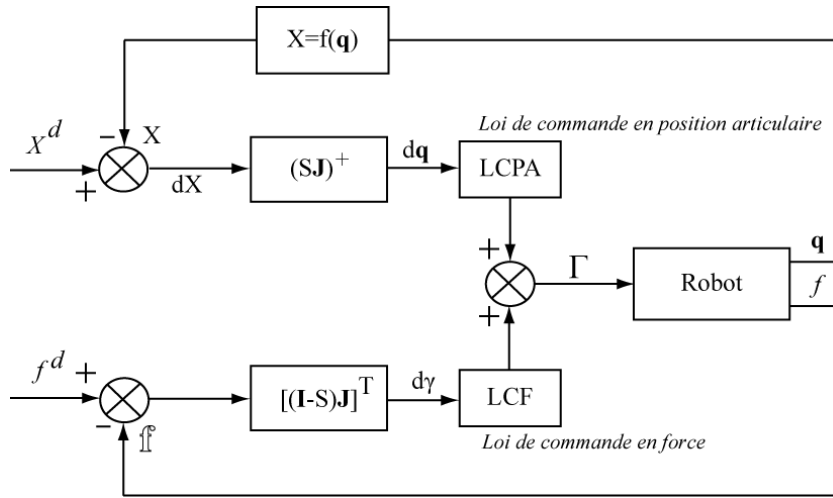


FIG. 5.16 – Schéma de commande hybride force/position d'après [FM92].

duction de la matrice pseudo-inverse $(SJ)^+$ et par formulation des axes commandés en force et des axes commandés en position. Une orthogonalité des espaces à mouvements contraints et des espaces à mouvements libres est observée comme condition de mise en place de la commande hybride force/position. Elle se traduit par la mise en place de la matrice de sélection \mathbf{S} qui définit de façon claire dans l'espace articulaire les axes du robot commandés en force ou en position. Initialement, les robots manipulateurs sont essentiellement commandés en couple articulaire Γ avec les six composantes à savoir F_x , F_y , F_z , C_x , C_y et C_z . Par conséquent, la matrice de sélection \mathbf{S} est une matrice 6×6 définissant les axes commandés en position. Chaque axe commandé en position possède un 1 sur la diagonale de la matrice \mathbf{S} . Les axes commandés en force sont définis par la matrice $\mathbf{I}-\mathbf{S}$ avec des éléments à 1 sur la diagonale. La figure FIG. 5.16 montre le schéma bloc de la commande hybride force/position proposée dans [FM92].

La force (ou couple) désirée est \mathbf{F}^d et la position désirée est \mathbf{X}^d . Les coordonnées articulaires \mathbf{q} sont transformées par le modèle géométrique direct (MGD) pour obtenir les coordonnées opérationnelles du robot. Le déplacement élémentaire est obtenu par $d\mathbf{q}=(\mathbf{S}\mathbf{J})^+ d\mathbf{X}$, avec $(\mathbf{S}\mathbf{J})^+$ la matrice pseudo-inverse. La variation du couple élémentaire est décrite par $d\gamma=[(\mathbf{I}-\mathbf{S})\mathbf{J}]^T (\mathbf{f}^d - \mathbf{f})$. La LCPA (Loi de Commande en Position Articulaires) transforme un déplacement élémentaire en variation de couple articulaire. Sur les robots manipulateurs, elle est généralement à base de correcteur PID [KD99]. La LCF (Loi de Commande en Force) peut être à base de correcteur PI avec une anticipation de la force désirée et une compensation de la gravité [KD99].

Des précautions doivent être prises sur le fonctionnement de la commande hybride force/position [KD99] :

1. en terme d'implantation, la commande hybride force/position nécessite beaucoup de calculs en ligne puisque plusieurs changements de coordonnées sont réalisés. La

- puissance des calculateurs actuels autorise cependant des fréquences d'échantillonnage de plus en plus élevées et permet d'améliorer ainsi ses performances ;
2. lorsqu'une perturbation en déplacement est appliquée en amont du capteur dans une direction commandée en effort, elle n'est pas compensée par l'asservissement en effort à moins que le robot ne soit en contact dans cette direction ;
 3. avec la commande hybride force/position, l'environnement doit être parfaitement connu pour éviter que le robot soit en espace libre dans une direction commandée en effort ou qu'il ne soit au contact dans une direction commandée en position ;
 4. la plupart des tâches exigent le passage d'un mode à un autre en cours d'exécution, ce qui théoriquement se réalise en modifiant les éléments concernés de la matrice \mathbf{S} . Ces commutations de mode peuvent aussi exiger des modifications des gains des correcteurs et sont d'autant plus difficiles à mettre en oeuvre si les lois de commande en position et en effort comportent des termes intégraux.

L'apparition des robots commandés en position a conduit à des nouvelles considérations des commandes en force explicite. Les commandes en force à base de boucle de position ont été initialement proposées dans [MB86, Sch87, VK93]. Dans le cadre du micro-assemblage, les axes de positionnement qui constituent les robots sont généralement commandés en position de part les types d'actionneurs utilisés (moteurs à courant continu, actionneurs piézoélectriques, etc.). La commande en force avec une boucle interne en position a été reprise à l'échelle micro dans [ZNV98, GD03, GD06] où clairement les axes sont commandés en position.

Pour la commande hybride force/position, la prise en compte des robots commandés en position a conduit à une extension appelée commande hybride externe. Elle se caractérise par la présence de deux boucles de commande imbriquées (*cf.* FIG. 5.17) : la boucle externe correspond à un asservissement en effort et la boucle interne à un asservissement de position. La sortie de la boucle externe est transformée en consigne de position pour la boucle interne. En robotique humanoïde, elle est proposée dans [RPD00, RPD01] pour la commande des doigts d'une main robotisée lors de la manipulation d'objets. Elle est également utilisée pour la commande du robot médical *Dermarob* permettant d'effectuer des prélèvements de peau en vue de réaliser une greffe [DDPP03].

Ces différents travaux utilisent la commande hybride force/position et montrent l'intérêt et l'efficacité de ce type de commande pour des applications robotiques.

Pour accomplir la tâche de guidage, nous proposons d'utiliser le système robotique présenté précédemment et rappelé sur la figure FIG. 5.18.

5.4.2 Schéma bloc de la commande hybride force/position pour le guidage automatisé

Pour accomplir le guidage automatisé, nous établissons la commande hybride externe (qui est une extension de la commande hybride force/position) comme nous montre le schéma bloc de la figure FIG. 5.19. La prise en compte de la stratégie de guidage se traduit

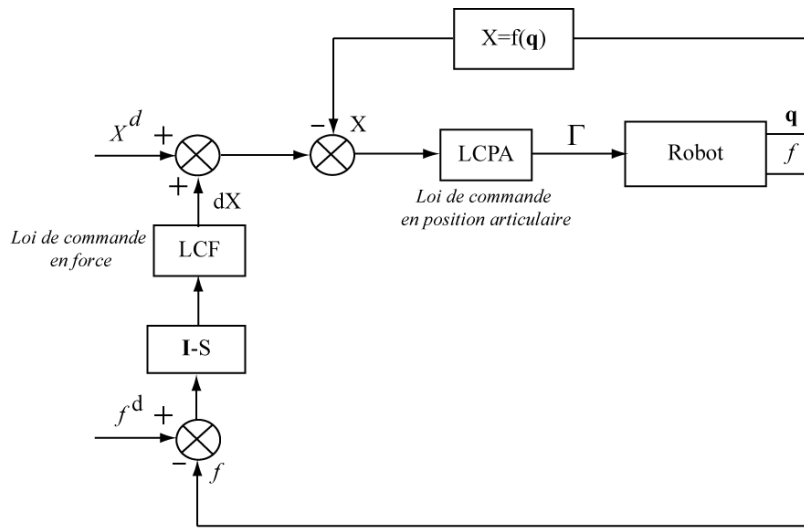


FIG. 5.17 – Schéma bloc de la commande hybride externe [RPD01].

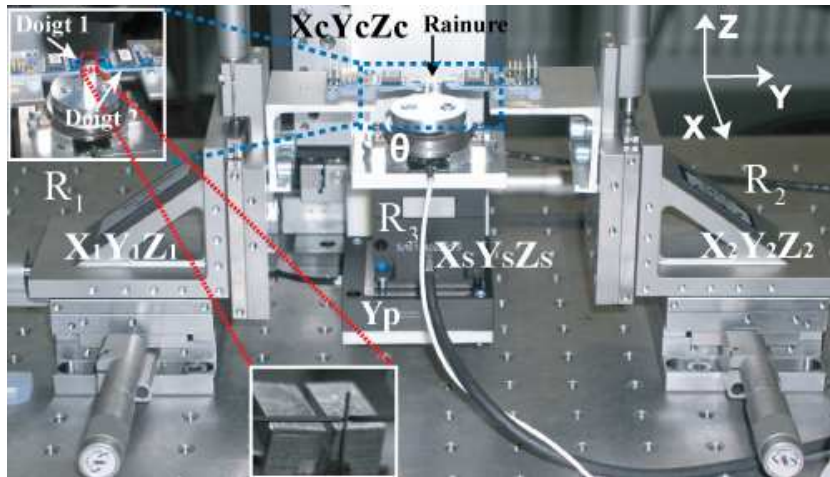


FIG. 5.18 – Système robotique utilisé pour le guidage automatisé équipé de deux doigts de serrage et ses 14 degrés de liberté dont 5 motorisés.

par l'ajout d'un bloc **E** pour "Enable Control" qui autorise le mouvement d'avance suivant l'axe X tant que la force F_{err} est inférieure à une certaine limite. Lors du mouvement d'avance, la force $F_{err} = F_y$ induit une force de friction F_x , qui doit respecter la condition de stabilité de l'équation (5.8). Les boucles internes en position sont contrôlées par la Loi de Commande en Position (LCP) et la boucle externe en force utilise une Loi de Commande en Force (LCF). Les détails du fonctionnement du bloc **E** sont donnés sur la figure FIG. 5.20. On observe les deux entrées qui sont la commande en position U_x et la force d'erreur F_{err} . La commande en position U_x est la commande de l'axe X_s qui est

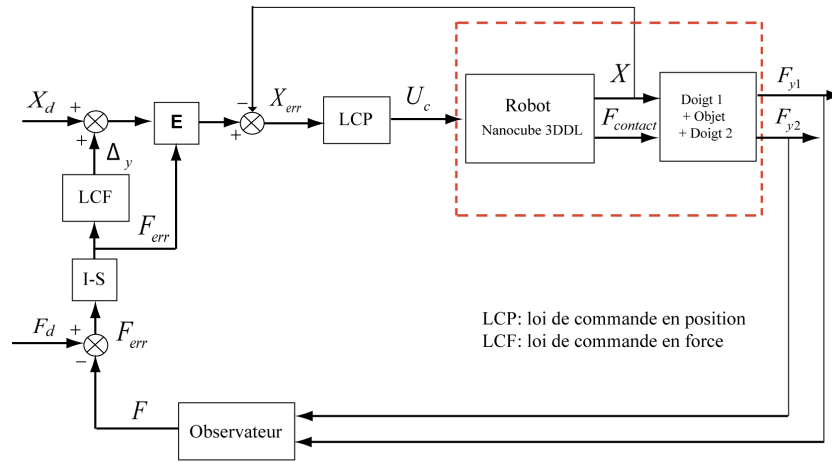


FIG. 5.19 – Schéma bloc de la commande hybride externe pour le guidage automatisé avec le bloc **E**.

un élément de la position désirée $X_d = (U_x, U_y, U_z)$. On soustrait la force limite $F_y limite$ à la valeur absolue de la force d'erreur $\|F_{err}\|$. Si cette différence est supérieure à 0 alors la sortie du *Switch 1* est égale à 1 et sinon, elle est égale à -1. La sortie du *Switch 1* est utilisée à l'entrée du *Switch 2* : "-1" conduit à l'arrêt du mouvement d'avance et "1" à la poursuite du mouvement.

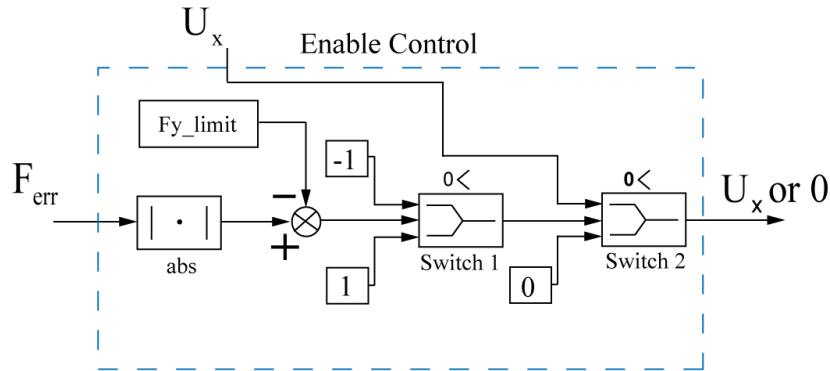


FIG. 5.20 – Détail du bloc E "enable control" avec ses deux entrées F_{err} et U_x .

On considère le système robotique qui porte le substrat et qui utilise deux tables de positionnement motorisées $(X_s Y_s Z_s + Y_p)$. La rotation θ n'est pas utilisée durant le guidage automatisé. Le système robotique possède par conséquent une configuration cartésienne avec les axes disposés en perpendiculaire dont certains sont redondants. De ce fait, les coordonnées articulaires correspondent aux coordonnées opérationnelles. Le système robotique dispose de trois axes de translation : les axes X et Z commandés en

position et l'axe Y commandé en force. La matrice de sélection utilisée est décrite par l'équation (5.12).

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

5.4.3 Mise en oeuvre de la commande dans le simulateur

Le simulateur présenté au chapitre précédent est utilisé pour comprendre le fonctionnement de la commande hybride externe. On intègre alors la partie dynamique des axes de positionnement et des capteurs de force pour rendre le simulateur plus réaliste. L'identification des axes de positionnement motorisés nous donne la dynamique du NanoCube[®] sur les deux axes X_s et Y_s (cf. équation (5.13)) et de l'axe P625.1CD Y_p (cf. équation (5.14)).

$$N_Y(s) = N_X(s) = \frac{0.005s^2 + 21.62s + 2212}{s^2 + 66.21s + 2212} \quad (5.13)$$

$$H_{P625.1CD}(s) = \frac{57.07s + 3383}{s^2 + 233.3s + 3383} \quad (5.14)$$

La dynamique des capteurs FemtoTools[®] (cf. équation (5.15)) est obtenue à partir de [Gra08] :

$$G_{270}(s) = \frac{1224.3s + 17.579e9}{s^2 + 1224.3s + 17.579e9} \quad (5.15)$$

Le résultat obtenu à partir du simulateur est présenté sur la figure FIG. 5.21. Il présente la réponse à un échelon de tension commandé sur l'axe Y_s conduisant à la variation de la force de serrage. Le contact avec la rainure apparaît et la force de contact (cf. FIG. 5.21 -(1)) est estimée par les deux forces mesurées sur les doigts ($F_{err} = F_y = F_{y2} - F_{y1}$). La position du micro-objet de largeur W_m par rapport à la rainure de largeur W_r est montrée sur la figure FIG. 5.21 -(3). Le comportement dynamique des axes intervenant lors du guidage est intégré dans le simulateur.

Mise en oeuvre d'un correcteur incrémental

La loi de commande en force (LCF) utilisée est à base de correcteur incrémental dont les détails se trouvent sur la figure FIG. 5.22. Ce correcteur est choisi pour sa simplicité et sa stabilité pour une commande en quasi-statique. Les asservissements en force sont connus comme difficiles à stabiliser avec un correcteur PID pour une commande en dynamique. Ils utilisent par conséquent des gains faibles pour assurer la stabilité [ES87, ZH97].

Le correcteur utilisé se base sur une modification de la position de la rainure ($Y_{rainure}$) à une vitesse définie par le pas du correcteur incrémental. La zone morte permet d'assurer un asservissement dans une plage définie tout en évitant les oscillations autour d'une valeur d'entrée. Elle introduit également une non-linéarité dans la commande. Ce correc-

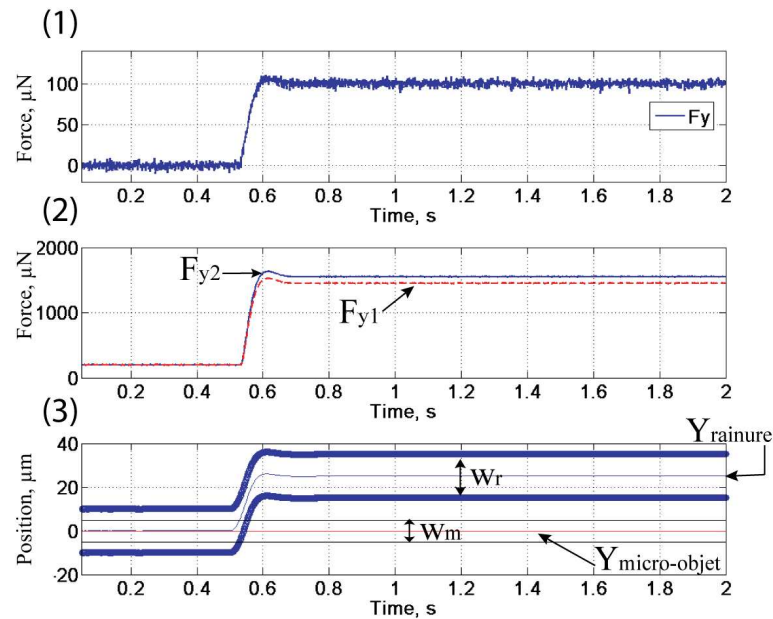


FIG. 5.21 – Dynamique du système de positionnement et des capteurs intégrés dans le simulateur : (1) estimation de la force de contact latéral ($F_y = F_{y2} - F_{y1}$), (2) force de serrage (F_{y1}, F_{y2}), (3) position du micro-objet dans la rainure Y .

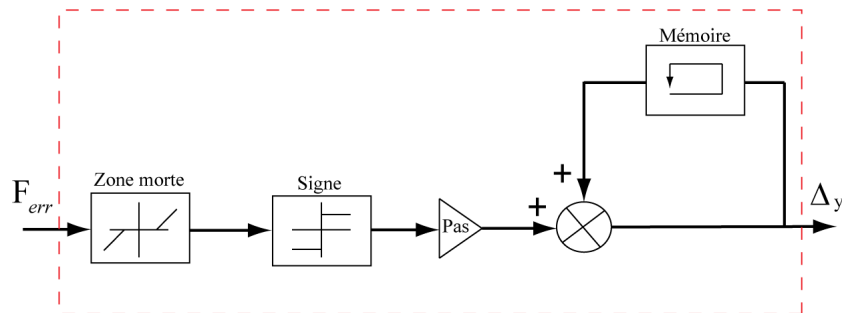


FIG. 5.22 – Loi de commande en force à base d'un correcteur incrémental.

teur introduit une vitesse de correction V_{corr} qui dépend de la fréquence d'échantillonnage F_{ech} et du pas Pas . Elle correspond à $V_{corr} = F_{ech} Pas$. Le cas idéal consisterait à l'utilisation d'une très grande fréquence d'échantillonnage F_{ech} et un pas Pas très petit. La fréquence d'échantillonnage est limitée par le système utilisé pour l'implantation de la commande. Le Pas est limité par la résolution de l'axe de correction.

Il est montré dans les travaux [AS86, KSH86] que la force et la vitesse présentent une dualité ce qui conduit à une forme de correspondance entre la force et la vitesse. Comme l'axe de correction est commandé en position, l'erreur de force, qui est une image de la

vitesse, doit être transformée en consigne de position d'où l'utilisation de la mémorisation.

5.4.4 Résultats du simulateur

Validation de la commande hybride externe

L'effet de la commande hybride externe est vérifié en utilisant le simulateur. Le résultat de la validation du correcteur incrémental est présenté sur la figure FIG.5.23. Un mouvement en X est introduit et une perturbation suivant l'axe Y est ensuite détectée par l'estimation de la force de contact F_y . La force de contact limite est fixée à $15 \mu\text{N}$ en considérant le cas le plus défavorable c'est-à-dire la force de serrage minimum $F_{yi} = 200 \mu\text{N}$, la distance de contact maximale $\ell = 500 \mu\text{m}$ et le coefficient de friction $\mu = 0,3$ conduit à $F_{x\text{limite}} = 4,5 \mu\text{N}$. Pour une force $F_y = 15 \mu\text{N}$ et un coefficient de friction $\mu = 0,3$ alors $F_x = 4,5 \mu\text{N}$. Ainsi la rotation du micro-objet manipulé est évitée et la stabilité est assurée.

Le correcteur associé au contrôle en force est initialement désactivé et le dépassement de la force de contact limite entraîne l'arrêt du mouvement d'avance grâce au bloc E. La correction s'effectue (cf. FIG. 5.23 -(5)) et la force de contact descend jusqu'à la limite fixée (cf. FIG. 5.23 -(1)) durant la stratégie de guidage. Une fois la force de contact en dessous de la valeur limite, le mouvement d'avance peut reprendre (cf. FIG. 5.23 -(4)) pour atteindre la position finale désirée.

L'efficacité et la stabilité du correcteur pour la commande en force sont vérifiées. La commande hybride externe permet de réaliser la commande en position suivant X , la commande en force suivant Y et assurer la stabilité du micro-objet. La position désirée suivant X est atteinte donc le guidage est réussi.

Suivi de rampe

Le test de suivi de rampe est effectué pour simuler un désalignement entre l'axe de guidage et la rainure. Le résultat est montré sur la figure FIG. 5.24 avec une rampe de pente $10 \mu\text{m/s}$. On observe que la rampe de perturbation Y_p est introduite et la position Y_{rail} est maintenue à une certaine distance de la position de l'objet $Y_{micro-objet}$ pour assurer une force de contact inférieure à $15 \mu\text{N}$. L'augmentation de la force de serrage par rapport à la précharge est estimée à 15% ce qui n'est pas excessif pour garantir l'intégrité des micro-objets tout en assurant la stabilité de la saisie.

5.5 Validation expérimentale

Nous investiguons le guidage automatisé en utilisant le système robotique de la figure FIG. 5.18. Le micro-objet est préalablement saisi avec une précharge définie. La loi de commande est implémentée sous Simulink/Matlab[®] couplé à une carte Dspace[®] 1103 assurant un contrôle en temps réel. Des expériences sont effectuées à partir des résultats de simulation afin de déterminer l'efficacité de la stratégie et les performances du contrôleur. Pour effectuer l'expérimentation, nous avons conçu une rainure à largeur variable.

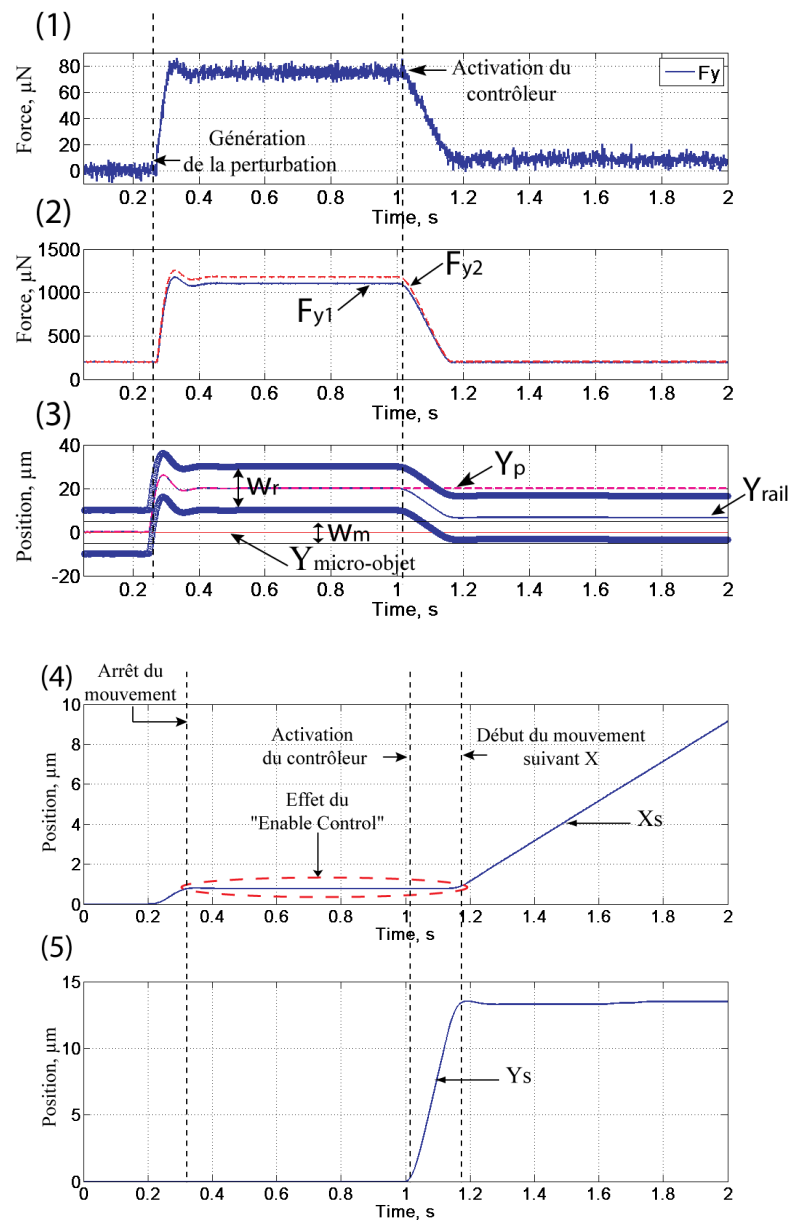


FIG. 5.23 – Validation du correcteur incrémental : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage, (3) position selon Y du micro-objet par rapport à la rainure, (4) mouvement d'avance selon l'axe X_s , (5) la correction sur l'axe Y_s .

La largeur de la rainure W_r doit d'abord être mesurée pour présenter la position du micro-objet par rapport à la rainure. Ensuite, le contrôleur incrémental est utilisé pour la boucle en force de la commande hybride externe. La mise en œuvre d'un guidage avec différentes perturbations est présentée.

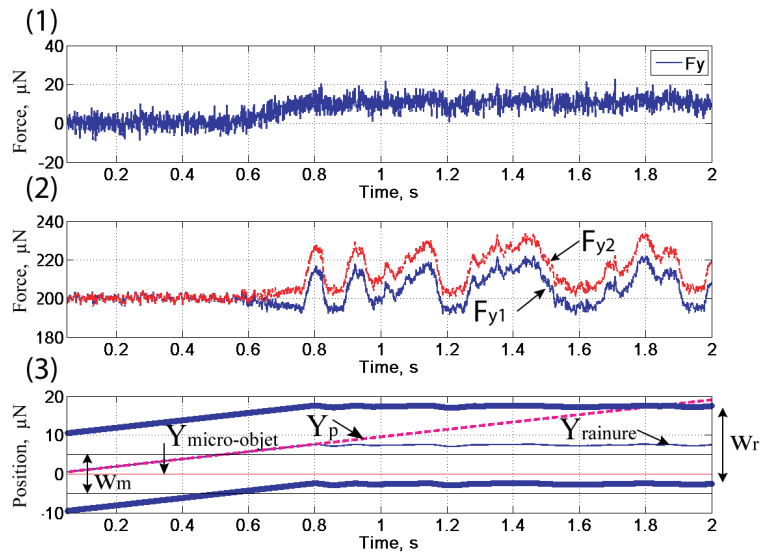


FIG. 5.24 – Suivi d’une rampe simulant le désalignement de l’axe de guidage et de la rainure : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée par une rampe, (3) position du micro-objet $Y_{micro-objet}$ par rapport à la rainure.

Note : Toutes les courbes présentées dans cette section sont obtenues durant la validation expérimentale. Elles sont issues des capteurs de force et des capteurs de position intégrés sur les systèmes de positionnement. La force de contact latéral est estimée à partir des mesures venant des deux doigts.

5.5.1 Mesure de la largeur de la rainure

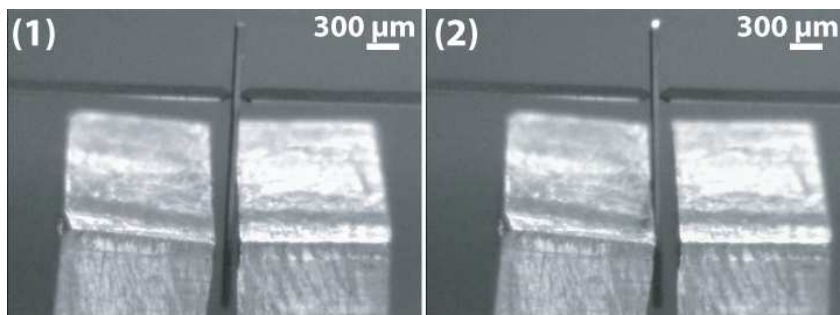


FIG. 5.25 – (1) Contact à droite et (2) contact à gauche pour mesurer la largeur de la rainure.

Nous allons mesurer la largeur de la rainure utilisée durant la validation expérimentale. Pour effectuer la mesure, un double contact est effectué afin de détecter le point de contact à gauche et à droite grâce au suivi de la force de contact (*cf.* FIG. 5.25). La distance qui sépare les deux points de contact, correspond donc à la largeur de la rainure. L'évolution de la force de contact et de la distance parcourue sont montrées sur la figure FIG. 5.26. Les contacts apparaissent sur les points A et B, la largeur du micro-objet est de $50 \pm 1 \mu\text{m}$ (tolérance de fabrication) donc la largeur de la rainure est de $139 \pm 2 \mu\text{m}$. L'incertitude de $2 \mu\text{m}$ est obtenue par l'addition de l'incertitude de la largeur du micro-objet et l'incertitude majorée de la position où apparaît le contact. La largeur de la rainure est maintenue fixe durant la suite de la validation expérimentale.

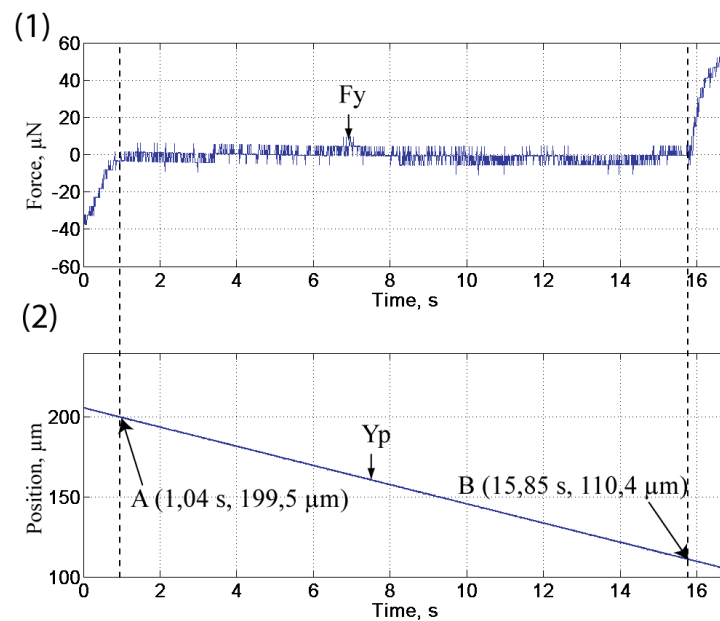


FIG. 5.26 – Résultat expérimental de la mesure de la largeur de la rainure : (1) la force de contact latéral, (2) la position suivant Y .

5.5.2 Mise en oeuvre du contrôleur incrémental

L'objectif est de mettre en oeuvre la commande hybride externe avec le correcteur incrémental pour le contrôle en force. La commande est intégrée sous Matlab/Simulink en utilisant une carte Dspace[®]. La fréquence d'échantillonnage est fixée à $F_{ech} = 100 \text{ Hz}$. Le résultat est montré sur la figure FIG. 5.27 pour un pas de correction de $0,275 \mu\text{m}$. La perturbation est introduite par l'intermédiaire de Y_p pendant que le correcteur est inactif. On observe alors l'arrêt du mouvement en X avec la vitesse de $1,9 \mu\text{m/s}$. Le bloc E fonctionne correctement avec une force limite de $15 \mu\text{N}$. Une fois le correcteur activé et la force de contact ramenée en dessous de $15 \mu\text{N}$, le mouvement suivant X continue

avec une vitesse de $0,55 \mu\text{m/s}$. Le fonctionnement du système expérimental correspond bien à ce qui a été observé avec le simulateur.

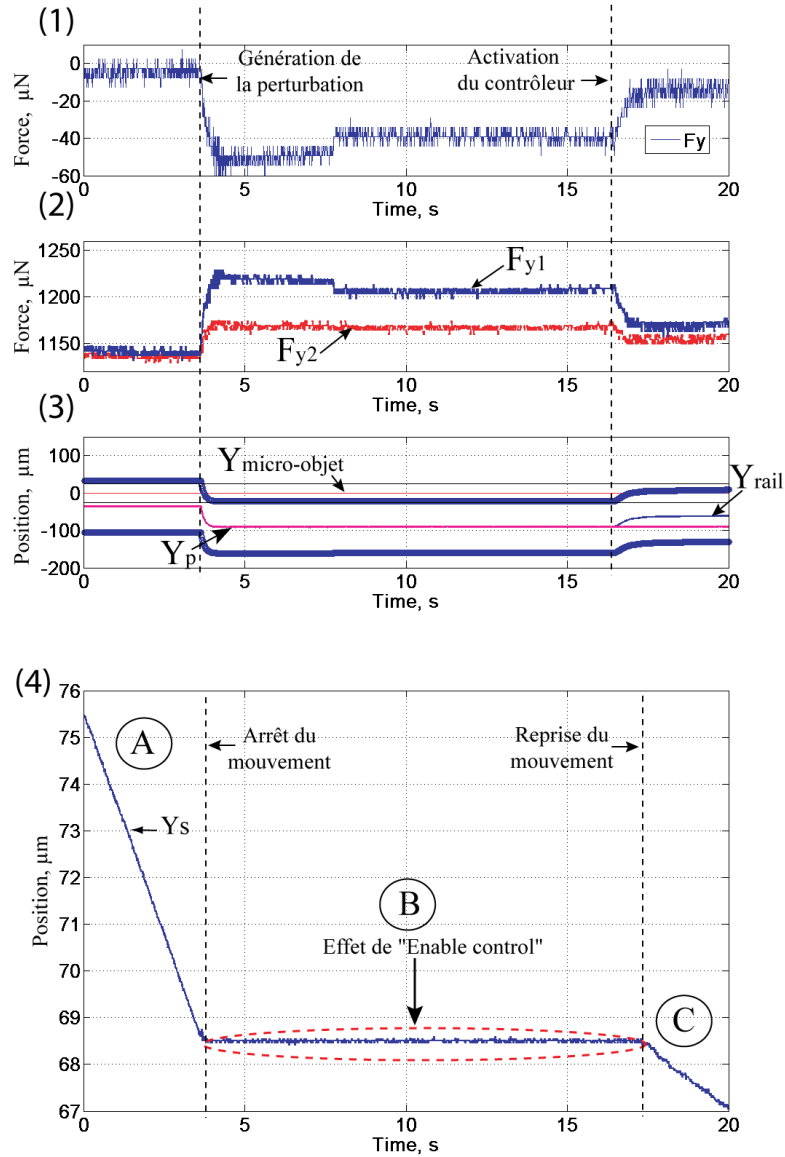


FIG. 5.27 – Résultat expérimental de la validation de la commande : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée par une rampe de $2 \mu\text{m/s}$, (3) position du micro-objet $Y_{\text{micro-objet}}$ par rapport à la rainure, (4) mouvement d'avance suivant l'axe X_s .

5.5.3 Guidage avec un désalignement prédéfini

Pour appliquer un désalignement connu entre l'axe de guidage et la rainure, une rampe est introduite par Y_p . Durant cette phase, le contrôleur est actif en permanence et peut agir directement. Les résultats sont montrés sur la figure FIG. 5.28. On observe que quand le contact apparaît, la force de serrage augmente jusqu'à ce que la force de contact limite soit atteinte. La loi de commande en force agit pour maintenir cette force en dessous de la limite fixée. Le correcteur est configuré avec une fréquence d'échantillonnage $F_{ech} = 100$ Hz et un pas $Pas = 400$ nm. La position du micro-objet est légèrement à l'extérieur de la rainure du fait de la zone morte dans le correcteur. Le contact à droite induit une force de contact latéral de $-20 \mu\text{N}$ et la stabilité est garantie car la précharge est augmentée à $950 \mu\text{N}$. On observe également que durant le guidage, la force de serrage est maintenue dans une plage convenable assurant la stabilité et préservant l'intégrité du micro-objet. L'augmentation par rapport à la précharge est de $7,9 \%$ pour un offset de $-20 \mu\text{N}$. En considérant le déplacement de perturbation et le mouvement d'avance, un angle α de désalignement estimé à $26,4^\circ$ est calculé par $\alpha = \tan^{-1}(\Delta Y_p / \Delta X_n)$. La position suivant l'axe X est atteinte sans glissement ou perte du micro-objet donc la tâche est réussie. L'angle ($\alpha = 26,4^\circ$) de désalignement appliqué est grand par rapport à une situation réelle de guidage et montre ainsi l'efficacité de la structure de commande.

5.5.4 Perturbations type échelon de chaque côté du rail

La robustesse du guidage automatisé est vérifiée par l'introduction de perturbations type échelon sur chaque côté du micro-objet. Le contrôleur est activé dès le début du guidage et des contacts brusques sont appliqués par l'actionnement de l'axe Y_p . La force limite est maintenue à $\pm 15 \mu\text{N}$ et le résultat est montré sur la figure FIG. 5.29. On observe l'apparition de la force de contact sur les deux côtés du micro-objet. La correction permet de maintenir la force en dessous de la limite fixée dans le bloc E. L'arrêt du mouvement suivant l'axe de guidage est effectué à chaque dépassement de la force de contact limite. Le temps de réjection de la perturbation est inférieur à 800 ms avec une vitesse de correction de $5 \mu\text{m/s}$ (fréquence d'échantillonnage de $F_{ech} = 100$ Hz et $Pas = 50$ nm). Ce temps de réjection peut être réduit en augmentant soit la fréquence d'échantillonnage soit le pas de correction. La position finale est atteinte sans glissement ou perte du micro-objet donc le guidage est réussi. On peut conclure que la stratégie mise en place permet d'assurer le guidage malgré des perturbations.

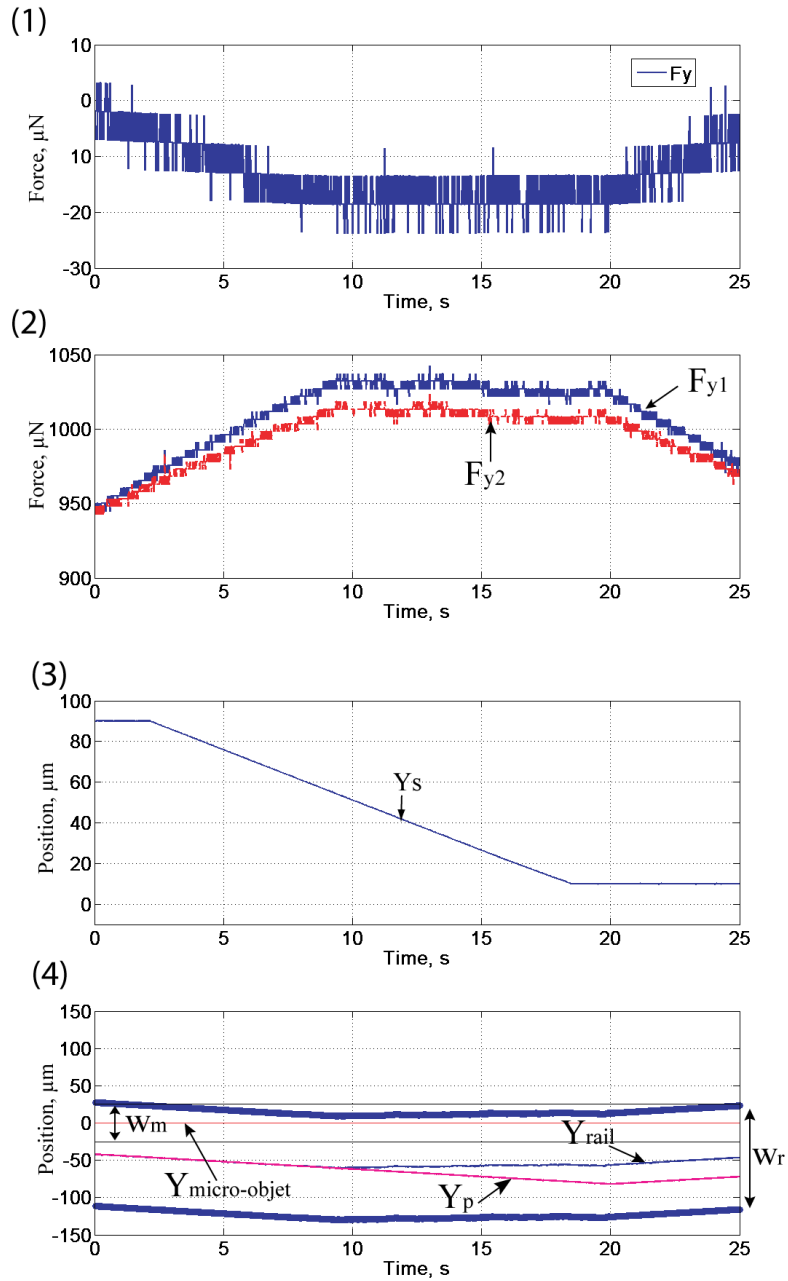


FIG. 5.28 – Résultat expérimental d'un guidage perturbé par une rampe de $2 \mu\text{m/s}$: (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée, (3) mouvement d'avance suivant l'axe X_s , (4) position du micro-objet $Y_{\text{micro-objet}}$ par rapport à la rainure.

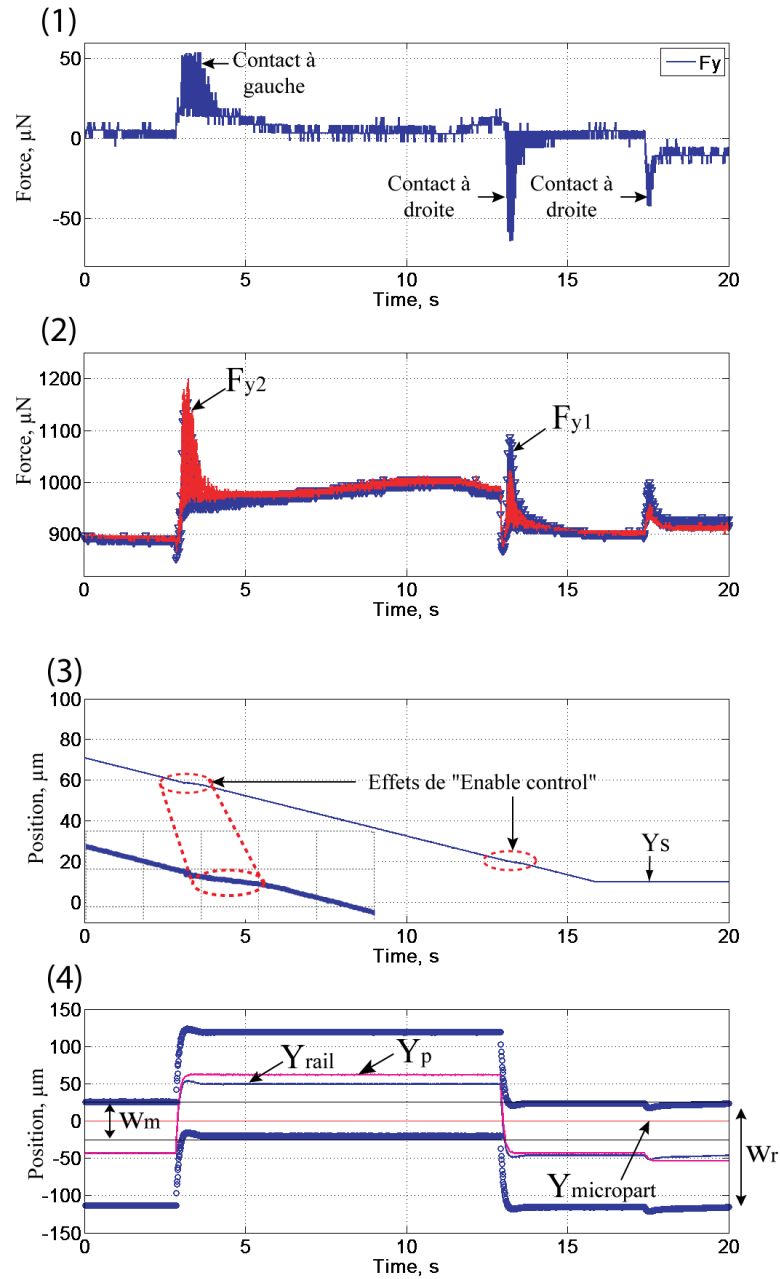


FIG. 5.29 – Résultat expérimental d'un guidage avec perturbations dynamiques : (1) force de contact latéral, (2) force de serrage perturbée, (3) mouvement d'avance suivant l'axe X_s , (4) position du micro-objet $Y_{\text{micro-objet}}$ par rapport à la rainure.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents travaux en micromanipulation et en micro-assemblage utilisant le retour de force. L'utilisation de la force peut se faire de deux façons : la mesure de force en mode téléopéré et un asservissement de force en mode automatisé. Nous avons étudié le guidage automatisé par deux doigts instrumentés. Nous avons établi une stratégie de guidage en tenant compte de la condition de stabilité en présence d'une force F_x de perturbation et de la présence de la force de pull-off. Nous avons établi que la condition de stabilité dépend de la surface de contact, de la précharge, de la distance de contact et du coefficient de friction. Pour effectuer le guidage, la mesure de la force de contact latéral, utilisée comme retour de force, a été validée en appliquant un contact à force connue grâce au capteur 3. Nous avons choisi la commande hybride externe qui est une extension de la commande hybride force/position pour accomplir le guidage automatisé. Elle se distingue par une boucle en force externe qui se superpose sur les boucles en position de tous les axes du robot. Nous avons défini un bloc "enable control" permettant de prendre en compte la stratégie de guidage préalablement établie. La commande a ensuite été mise en oeuvre dans un simulateur et les résultats de simulation ont permis de valider son efficacité. Nous l'avons également intégrée sous Matlab/Simulink[®] combiné avec une carte Dspace[®] pour contrôler le système robotique. La force de contact limite a été fixée à 15 μN et 20 μN suivant les essais. Nous avons accompli le guidage avec un désalignement connu, il a permis de contrôler l'augmentation de la force de serrage à 7,9 % et la réjection de perturbations type échelon s'effectue en moins de 800 ms. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la commande hybride externe permet d'accomplir le guidage automatisé par un préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés.

Conclusions et perspectives

Dans cette thèse, nous avons proposé la fabrication de MOEMS par le micro-assemblage robotique. Cette approche vise la réalisation de nouvelles générations de MOEMS, à base de bancs optiques qui sont à la fois hybrides, reconfigurables et tridimensionnelles (3D). Les avantages de la microfabrication et les contraintes du micro-assemblage sont pris en compte dès le début de la conception des MOEMS.

Cette nouvelle génération de MOEMS offre :

1. un système générique pouvant servir de base pour la fabrication de différentes fonctions optiques ;
2. une très bonne qualité des éléments optiques car chaque composant est réalisé sans compromis ;
3. un positionnement 3D des éléments des bancs optiques ;
4. un alignement passif des supports optiques en exploitant la qualité de la microfabrication ;
5. une reconfigurabilité et un remplacement des éléments défectueux grâce à une solidarisation réversible.

Les contributions de nos travaux

Dans le chapitre 2, nous avons proposé un concept de microbancs optiques 3D reconfigurables à faisceau se propageant dans l'espace libre et réalisé la fabrication des substrats et des supports optiques conjointement avec l'équipe MIMU du département MN2S de FEMTO-ST. Dr. Sylwester BARGIEL, chercheur temporaire (MN2S), s'est occupé de la microfabrication des substrats et j'ai effectué la fabrication des supports optiques. Les bancs optiques sont obtenus par micro-assemblage robotique des supports optiques sur les substrats. Nous avons choisi une fixation par éléments flexibles, un alignement passif et l'utilisation d'un préhenseur actif monté sur un système robotique équipé de 8 degrés de

liberté motorisés pour réaliser des bancs optiques à la fois génériques et reconfigurables. Durant cette thèse, nous avons conçu la station de micro-assemblage qui a permis d'obtenir les résultats montrés sur les figures FIG. 2.33 et FIG. 2.34. Ces derniers valident le concept proposé et montrent notre capacité à réaliser un micro-assemblage robotique 3D en mode téléopéré.

Le chapitre 3 s'est concentré sur l'étude des forces de surface à l'échelle micrométrique pour un contact plan/plan. Les études disponibles dans l'état de l'art ne couvrent pas la mesure de la force de pull-off pour ce type de contact, qui est pourtant fréquent en micro-assemblage de par la fabrication des micro-objets sur wafer en silicium. Nous avons proposé un nouveau banc de mesure robotisé capable de positionner deux surfaces planes et d'effectuer une séquence d'approche/retrait pour évaluer la force de pull-off pour un contact silicium/silicium de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. A l'aide de ce nouveau dispositif, nous avons montré que la force de pull-off peut atteindre $196 \mu\text{N}$ et qu'une variation de moins de 28% a été observée sur un même point de contact en fixant les paramètres. Ceci constitue un très bon résultat dans le cadre de la mesure des forces de surface. La variation de la précharge a montré sa faible influence sur la force de pull-off donc l'absence de plastification et d'indentation lors des mesures. L'influence de l'angle de contact θ (rotation autour de Z) a été également étudiée. Nous avons obtenu une force de pull-off nulle au-delà de $-2,45^\circ$ et $4,24^\circ$ avec un pic autour de 0° pour une valeur de précharge de $200 \pm 50 \mu\text{N}$. Une comparaison de la force de pull-off avec un modèle de la force de van der Waals a montré que cette dernière représente environ 5 % de la force de pull-off maximale obtenue. Par conséquent, les forces capillaires et les forces de contact contribuent donc majoritairement. Les forces de pull-off mesurées constituent des informations utiles à la conception d'outils pour le micro-assemblage (compromis sur la surface de contact afin de réduire le pull-off et assurer la stabilité de la saisie) et à la force de serrage minimale à appliquer pour détacher un micro-objet de son support. Le niveau de force de pull-off mesuré montre qu'il est nécessaire de contrôler les forces de serrage et d'interaction durant les tâches de micro-assemblage, en particulier le guidage durant lequel des contacts apparaissent régulièrement.

Le chapitre 4 s'est focalisé sur l'intégration des mesures de forces sur une station de micro-assemblage pour accomplir des tâches automatisées. Une station équipée de préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés avec un axe de correction sur le substrat a été conçue et réalisée. Elle assure la mesure de la force de serrage pour saisir les micro-objets et celle de la force de contact latéral F_y qui apparaît lors du guidage. La modélisation analytique du système lors d'une saisie de micro-objets rigides a été proposée pour étudier l'évolution de la force de serrage en présence de force de contact latéral. Le modèle statique a montré la présence d'une force de contact limite $F_{y\ell}$ entre un premier comportement (translation du micro-objet - contact micro-objet/préhenseur plan/plan) et un second (translation et rotation du micro-objet - contact bord/plan). Ce modèle a ensuite été validé avec des simulations par la méthode des éléments finis et des résultats expérimentaux montrant des écarts acceptables (simulation : 9 % à $F_y = 100 \mu\text{N}$ et 17% en pente, expérimentation : écart de $7,1 \mu\text{N}$ sur $F_{y\ell}$ et 28 % en pente).

L'étude de l'influence des paramètres du modèle (précharge, distance de contact, épaisseur des doigts, décalage entre les doigts et raideurs K_y et K_z) a permis d'établir cinq recommandations sur les caractéristiques d'un préhenseur et les forces appliquées durant le micro-assemblage. Pour des besoins de commande, un simulateur a été réalisé sous Matlab/Simulink[®] pour intégrer le modèle statique linéarisé.

Dans le chapitre 5, un état de l'art des travaux en micromanipulation et en micro-assemblage a été présenté suivant deux niveaux d'utilisation de l'information de force qui sont la mesure en mode téléopéré et l'asservissement en mode automatisé. Les travaux de ce mémoire se sont terminés par l'automatisation de la tâche de guidage en utilisant un système robotique équipé d'un préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés. L'étude de la stabilité face aux forces de perturbations a conduit à une force limite F_x (équation (5.8)) assurant le maintien du micro-objet entre les doigts du préhenseur. Une stratégie de guidage a été établie en prenant en compte la condition sur la force F_x et l'apparition de la force de pull-off lors du guidage. Une commande hybride externe a été choisie pour effectuer le guidage avec la prise en compte de la stratégie par le bloc "enable control". La commande a été validée dans le simulateur intégrant le comportement dynamique des axes, puis testée avec différentes perturbations en utilisant un correcteur incrémental comme Loi de Commande en Force (LCF). La validation expérimentale a été effectuée par une commande temps réel (utilisant une carte Dspace[®]) qui a montré l'efficacité de la stratégie établie et de la commande. Une augmentation acceptable de 7,9 % de la force de serrage est observée lors du suivi d'une rampe et un temps de réjection de moins de 800 ms est obtenu lors de perturbations dynamiques. Nous avons accompli un guidage automatisé avec une commande hybride externe assurant la mise en position d'un micro-objet dans la rainure et le maintien de la force de contact en dessous d'une limite garantissant la stabilité de la saisie.

Perspectives

Nous allons décrire des perspectives possibles issues des travaux de cette thèse. Nous allons les classer en deux catégories qui sont :

- la conception de MOEMS ;
- l'automatisation du micro-assemblage robotique.

La conception de MOEMS

Les microbanco développés assurent le positionnement d'éléments optiques sur un substrat. Il peut être utilisé pour réaliser un MOEMS tel qu'un microspectromètre. L'intégration d'un actionneur de type électrothermique [CHL10] ou électrostatique [NCD⁺02, LBK⁺09] sur le substrat du microbanco optique doit être étudiée. La linéarité, la course, la résolution et la surface occupée sur le substrat seront alors optimisées lors de la conception pour obtenir un microspectromètre capable de couvrir le plus large spectre et à haute résolution.

La fabrication de MOEMS sur plusieurs niveaux est également envisagée pour assurer

des fonctions plus complexes comme les microscopes miniatures (confocaux, en lumière polarisée, à contraste de phase, etc.) pour l'analyse et la caractérisation de cellules biologiques, les interféromètres pour des mesures de distance ou d'angle et les appareils OCT (*“Optical Coherence Tomography”*) pour l'imagerie de l'œil et d'autres parties du corps humain *in-vivo*. Les faisceaux se propagent alors sur plusieurs niveaux et le positionnement d'un miroir à 45° ou d'un séparateur de faisceau doit être assuré pour les guider entre les niveaux. Un travail de conception mécatronique est indispensable pour réaliser ces différentes fonctions optiques. La mise en place des différents niveaux s'effectuera par micro-assemblage robotique et la solidarisation peut être assurée par des systèmes déformables. La conception de ces MOEMS complexes nécessite un travail de formalisation des techniques utilisées qui peuvent être optimales (quelles fonctions optiques utilisées) et/ou intégrées (conception simultanée des éléments du MOEMS, de la commande des actionneurs et du système d'assemblage).

L'automatisation du micro-assemblage robotique

La compréhension du micromonde

Les études de l'influence de la surface de contact, des rugosités et des angles de contact sur la force de pull-off lors d'un contact plan/plan doivent être approfondies pour faciliter l'automatisation de la micromanipulation et du micro-assemblage. La variation des dimensions des surfaces de contact peut être obtenue par une modification de la pointe du capteur ou par un échantillon à pavés réduisant la surface de contact (S) (cf. FIG. 5.30). La variation de la rugosité peut être obtenue sur un échantillon à surface microstructurée comme dans [DBP⁺10].

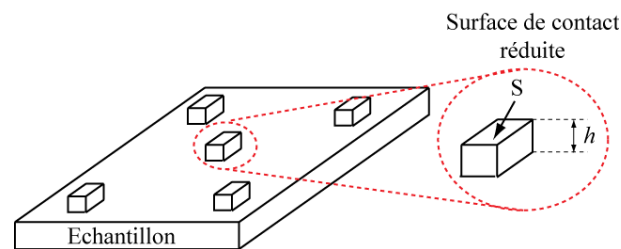


FIG. 5.30 – Surface de contact réduite par des pavés de surface S et de hauteur h .

La variation des deux angles de contact nécessite un étalonnage précis du système micro-robotique, qui est une thématique ouverte compte tenu du niveau de défauts à compenser et du manque de capteurs adéquats. Des travaux traitant de l'étalonnage de robots sont maintenant en cours au sein du département AS2M.

Le micro-assemblage de micro-objets flexibles

Nous avons accompli une première étape, qui est le guidage automatisé de micro-objets rigides dans cette thèse. L'étude du guidage et de l'insertion¹ automatisés de micro-objets flexibles constituent une problématique non résolue à l'échelle micrométrique. Une modélisation fine des déformations des parties flexibles en statique et en dynamique est nécessaire pour comprendre la tâche et mettre en place une commande dynamique et/ou une commande innovante type "*input shaping*". La modélisation dynamique de tels systèmes est très délicate car elle doit prendre en compte l'évolution des contacts, les caractéristiques de chaque élément (manipulateur, préhenseur, micro-objet manipulé, substrat, support). Une meilleure compréhension des phénomènes et la mise en place de commande dynamique et/ou innovante permettront d'augmenter la vitesse d'assemblage tout en garantissant la stabilité de la saisie.

Micro-assemblage automatisé par vision et force

Le guidage automatisé est effectué avec la commande d'un axe en position et d'un autre axe en force. Pour accomplir des tâches automatisées plus complexes, l'utilisation de plusieurs informations capteurs constitue une voie possible. Il faudrait proposer des mesures de force sur plusieurs axes et combiner les informations de force avec des informations de position, par vision par exemple.

Pour effectuer des mesures de forces sur plusieurs axes, l'étude et le développement des supports et/ou des préhenseurs instrumentés peu encombrants doivent être réalisés en définissant les gammes de mesure, la résolution, le nombre de degrés de liberté et un rapport signal sur bruit convenable pour la commande. La combinaison de l'asservissement visuel dont les résultats ont montré des capacités intéressantes [Tam09] avec du contrôle en force conduira alors à l'automatisation de tâches de micromanipulation et de micro-assemblage très variées (prise, dépose, poussée, soulèvement de structures pliables, insertion, guidage, etc.). L'asservissement visuel pouvant par exemple gérer une information globale assurant le positionnement et le retour de force donnera une information locale permettant de contrôler les interactions et garantissant la stabilité de la saisie. L'objectif final est d'augmenter la cadence d'assemblage, le taux de réussite et la qualité des assemblages quelque soit la complexité de la tâche.

Pour des tâches complexes (par exemple une insertion dans un trou incliné), une configuration cartésienne du manipulateur ne sera pas adaptée. L'introduction des rotations et des bras de levier conduira à la nécessité d'établir de manière très précise le modèle géométrique direct (MGD) et le calcul de la jacobienne J du robot. Les imprécisions sur le modèle géométrique (MG) et la jacobienne J peuvent entraîner des instabilités sur la commande hybride force/position. Des études doivent être menées pour déterminer avec une très bonne précision le modèle géométrique (MG) et la jacobienne J d'un manipulateur pour le micro-assemblage.

Il se peut que la matrice de sélection \mathbf{S} (cf. sous-section 5.4.1) évolue pendant la réalisation des tâches, ce qui entraîne une commutation du mode de fonctionnement. Ces commuta-

¹Tâche complexe avec plus d'un degré de liberté contraint

tions sont sources d'instabilité et peuvent exiger des modifications de gains de correcteurs difficiles à mettre en œuvre. La mise en place d'une structure de commande capable de gérer ces commutations et ces changements de gains nécessite des investigations afin d'accomplir des tâches complexes en mode automatisé.

Bibliographie

- [AAN⁺98] F. ARAI, D. ANDOU, Y. NONODA, T. FUKUDA, H. IWATA et K. ITOIGAWA : Integrated microendeffector for micromanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 3:17 – 23, 1998. 101, 107, 110, 149
- [ACP⁺08] K. N. ANDERSEN, K. CARLSON, D. H. PETERSEN, K. MOLHAVE, V. EICHORN, S. FATIKOW et P. BOGGILD : Electrothermal microgrippers for pick-and-place operations. *Microelectronic Engineering*, 85:1128–1130, 2008. 19, 23, 36, 69
- [ALGR10] S. ALVO, P. LAMBERT, M. GAUTHIER et S. RÉGNIER : A van der waals force-based adhesion model for micromanipulation. *Journal of Adhesion Science and Technology*, In Press, 2010. 108
- [ALO⁺96] Y. ANDO, J. LINO, K. OZAKI, Y. ISHIKAWA et T. KITAHARA : Friction and pull-off force on silicon surface modified by fib. In *IEEE MEMS, Workshop on An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems*, pages 349 – 353, 1996. 100, 107
- [AMC06] Y. H. ANIS, J. K. MILLS et W. L. CLEGHORN : Vision-based measurement of microassembly forces. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16:1639–1652, 2006. 85
- [ANC05] J. AGNUS, P. NECTOUX et N. CHAILLET : Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on mmoc microgripper. In *IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)*, 2005. 68
- [APB⁺00] V. A. AKSYUK, F. PARDO, C. A. BOLLE, S. ARNEY, C. R. GILES et D. J. BISHOP : Lucent microstarTM micromirror array technology for large optical crossconnects. In *SPIE In MOEMS and Miniaturized Systems*, 2000. 6
- [AS86] H. ASADA et J.-J. E. SLOTINE : *Robot analysis and control*. John Wiley & Sons, 1986. 165
- [ASF⁺99] F. ARAI, T. SUGIYAMA, T. FUKUDA, H. IWATA et K. ITOIGAWA : Micro tripaxial force sensor for 3d bio-micromanipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1999. viii, 87, 88

- [BAP03] M. BOUKALLEL, J. ABADIE et E. PIAT : Levitated micro-nano force sensor using diamagnetic materials. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, September 2003. [viii](#), [84](#), [85](#)
- [BB05] R. A. BOUDREAU et S. M. BOUDREAU : *Passive Micro-optical Alignment Methods*. 2005. [45](#), [60](#)
- [BCG⁺98] Y BELLOUARD, R CLAVEL, R GOTTHARDT, J E BIDAUX et T SIDLER : A new concept of monolithic shape memory alloy micro-devices used in micro-robotics. *In 6th International Conference on New Actuator*, 1998. [69](#)
- [BFG⁺08] M. M. BLIDERAN, M. FLEISCHER, F. GRAUVOGEL, K. LOFFLER, M. G. LANGER et D. P. KERN : Real-time gripping detection for a mechanically actuated microgripper. *Microelectronic Engineering*, 85:1022–1026, 2008. [69](#)
- [BGC⁺98] K. F. BOHRINGER, K. GOLDBERG, M. B. COHN, R. HOWE et A. PISANO : Parallel microassembly with electrostatic force fields. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1998. [17](#)
- [BGK06] H. J. BUTT, K. GRAF et M. KAPPL : *Physics and Chemistry of Interfaces*. Wiley, 2006. [107](#)
- [Bhu07] Bharat BHUSHAN : *Handbook of nanotechnology*. Springer, 2007. [83](#)
- [BK04] N. BHAT et W.-J. KIM : Precision force and position control of ionic polymer-metal composite. *In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, pages 421–432, 2004. [92](#)
- [BK08] J. R. BONANDER et B. I. KIM : Cantilever based optical interfacial force microscope. *Appl. Phys. Lett*, 92, 2008. [93](#)
- [BMN⁺07] F. BEYELER, S. MUNTWYLER, Z. NAGY, M. MOSER et B. J. NELSON : A multi-axis mems force-torque sensor for measuring the load on a microrobot actuated by magnetic fields. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3803–3808, 2007. [91](#)
- [BMN⁺08] F. BEYELER, S. MUNTWYLER, Z. NAGY, C. GRAETZEL, M. MOSER et B. J. NELSON : Design and calibration of a mems sensor for measuring the force and torque acting on a magnetic microrobot. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18:1–7, 2008. [91](#)
- [BMN09a] F. BEYELER, S. MUNTWYLER et B. J. NELSON : A six-axis mems force-torque sensor with micro-newton and nano-newtonmeter resolution. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18:433 – 441, 2009. [41](#), [91](#)
- [BMN09b] F. BEYELER, S. MUNTWYLER et B.J. NELSON : Design and calibration of a microfabricated 6-axis force-torque sensor for microrobotic applications. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009. [41](#), [91](#)

- [BMS05] I. B. BAHADUR, J MILLS et Yu SUN : Design of a mems-based resonant force sensor for compliant, passive microgripping. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005. 19, 20, 36
- [BNO⁺07] F. BEYELER, A. NEILD, S. OBERTI, D. J. BELL, Y. SUN, J. DUAL et B. J. NELSON : Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16:7–16, 2007. 19, 23, 36, 69, 90
- [Boh98] K. F. BOHRINGER : *The Handbook of industrial robotics*, chapitre Microassembly. Wiley & Sons, 1998. 17, 37
- [BPA03] M. BOUKALLEL, E. PIAT et J. ABADIE : Micromanipulation tasks using passive levitated force sensing manipulator. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2003. 84
- [BQG86] G. BINNING, C. F. QUATE et C. GERBER : Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56:930–933, 1986. 83
- [BRC⁺10] S. BARGIEL, K. RABENOROSOA, C. CLÉVY, C GORECKI et P LUTZ : Towards micro-assembly of hybrid moems components on a reconfigurable silicon free-space micro-optical bench. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20:1–12, April 2010. 78
- [BSB02] S. BÜTEFISCH, V. SEIDEMANN et S. BÜTTGENBACH : Novel micro-pneumatic actuator for mems. *Sensors and Actuators A*, 97-98:638–645, 2002. 19, 36
- [But08] H. J. BUTT : Capillary forces : Influence of roughness and heterogeneity. *American Chemical Society*, 24:4715–4721, 2008. 107
- [CBN⁺98] M. B. COHN, K. F. B'HRINGER, J. M. NOWOROLSK, A. SINGH, C. G. KELLER, K. Y. GOLDBERG, et R. T. HOWE : Microassembly technologies for mems. *Proceeding SPIE*, pages 2–16, 1998. 17, 37
- [CCC⁺05] Y. CHIU, C.-H. CHEN, J.-C. CHIOU, W. FANG et H.-P. D. SHIEH : Memsbased miniature optical pickup. *IEEE TRansactions on Magnetics*, 41:967–970, 2005. v, 13, 14, 15
- [CEM⁺00] M. C. CARROZZA, A. EISINBERG, A. MENCIASSI, D. CAMPOLO, S. MICERA et P. DARIO : Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevice. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10:271–276, 2000. 19, 23, 36, 69
- [CH97] M. B. COHN et R. T. HOWE : Wafer-to-wafer transfer of microstructures using breakaway tethers, 1997. 30, 36
- [Cha07] A. CHAU : *Etude théorique et expérimentale des forces dues à la condensation capillaire*. Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, 2007. 97
- [CHC⁺06] C.-H. CHIOU, Y.-Y. HUANG, M.-H. CHIANG, H.-H. LEE et G.-B. LEE : New magnetic tweezers for investigation of the mechanical properties of single dna molecules. *Nanotechnology*, 17:1217–1224, 2006. 69

- [Che09] A. CHERRY : *Etude, conception et optimisation d'une plate-forme de mesure de micro et nano force par flottaison magnétique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009. 41, 93
- [CHL10] Q. CHEN, Y. HADDAB et P. LUTZ : Microfabricated bistable module for digital microrobotics. *Journal of Micro - Nano Mechatronics*, 6:1–12, 2010. 177
- [CL05] N. CHRONIS et L. P. LEE : Electrothermally activated su-8 microgripper for single cell manipulation in solution. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14:857– 863, 2005. 69
- [Cle05] C. CLEVY : *Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2005. 69
- [CPK09] D. J. CAPPELLERI, G. PIAZZA et V. KUMAR : Two-dimensional, vision-based micronewton force sensor for microrobotics. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009. 24, 85, 144, 146
- [CRDL07] A. CHAU, S. RÉGNIER, A. DELCHAMBRE et P. LAMBERT : Influence of geometrical parameters on capillary forces. In *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 2007. 39
- [CS86] A. M. CAZABAT et M. A. COHEN STUART : Dynamics of wetting : Effects of surface roughness. *The Journal of Physical Chemistry*, 90:5845–5849, 1986. 107
- [CTTF06] H.-C. CHANG, J. M.-L. TSAI, H.-C. TSAI et W. FANG : Design, fabrication, and testing of a 3-dof harm micromanipulator on (1 1 1) silicon substrate. *Sensors and Actuators (A)*, 125:438–445, 2006. 69
- [CWW03] R. J. CHANG, H. S. WANG et Y. L. WANG : Development of mesoscopic polymer gripper system guided by precision design axioms. *Precision engineering*, 27:362–369, 2003. 19
- [CZK03] B. CHANGA, Q. ZHOU et H. N. KOIVO : Experimental study of micro-forces in a controlled environment. In *2nd VDE World Microtechnologies Congress MICRO.tec*, Munich, Germany, 2003. 107
- [Das09] A. N. DAS : *Automated 3D Microassembly With Precision Adjusted Hybrid Supervisory Controller*. Thèse de doctorat, The University of Texas at Arlington, 2009. v, vi, 16, 26, 27, 59
- [DBP⁺10] J. DEJEU, M. BECHELANY, L. PHILIPPE, P. ROUGEOT, J. MICHLER et M. GAUTHIER : Reducing the adhesion between surfaces using surface structuring with ps latex particle. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2:1630–1636, 2010. 178
- [DCM04] N. DECHEV, W.L. CLEGHORN et J.K. MILLS : Microassembly of 3-d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13:176 – 189, 2004. v, 19, 20, 36, 38, 78

- [DDPP03] E. DOMBRE, G. DUCHEMIN, P. POIGNET et F. PIERROT : Dermarob : A safe robot for reconstructive surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19:879–884, 2003. [161](#)
- [DDS03] D. DUDLEY, W. DUNCAN et J. SLAUGHTER : Emerging digital micromirror device (dmd) applications. *SPIE Proceedings*, 4985, 2003. [v](#), [9](#)
- [DKC04] N. DECHEV, J. K. MILLS et W. L. CLEGHORN : Mechanical fastener designs for use in the microassembly of 3d microstructures. *IMECE proceeding*, 2004. [v](#), [19](#), [21](#)
- [DKRL02] M. R. DESCOUR, A. H. O. KÄRKKÄINEN, J. D. ROGERS et C. LIANG : Toward the development of miniaturized imaging systems for detection of pre-cancer. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38:122–130, 2002. [vii](#), [51](#), [55](#), [59](#)
- [DLC⁺08] T. C. DUC, G. K. LAU, J. F. CREEMER, et P. M. SARRO : Electrothermal microgripper with large jaw displacement and integrated force sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17:1546–1555, 2008. [69](#)
- [DMM⁺03] R. DIANOUX, F. MARTINS, F. MARCHI, C. ALANDI, F. COMIN, et J. CHEVRIER : Detection of electrostatic forces with an atomic force microscope : Analytical and experimental dynamic force curves in the nonlinear regime. *Physical Reviews B*, 68:1–6, 2003. [84](#)
- [Dom98] E. DOMBRE : Programmation des robots. Rapport technique, LIRMM (CNRS), 1998. [25](#)
- [DRL⁺06] N. DECHEV, L. REN, W. LIU, W. L. CLEGHORN et J. K. MILLS : Development of a 6 degree of freedom robotic micromanipulator for use in 3d mems microassembly. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2006. [v](#), [15](#), [21](#)
- [DSPS08a] A. N. DAS, J. SIN, D. O. POPA et H. E. STEPHANOU : Design and manufacturing of a fourier transform microspectrometer. In *IEEE Conference on Nanotechnology NANO '08*, pages 837 – 840, 2008. [15](#), [52](#), [55](#), [59](#)
- [DSPS08b] A. N. DAS, J. SIN, D. O. POPA et H. E. STEPHANOU : On the precision alignment and hybrid assembly aspects in manufacturing of a microspectrometer. In *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2008. [53](#), [55](#)
- [DZL⁺07] A. N. DAS, P. ZHANG, W. H. LEE, H. STEPHANOU et D. POPA : μ^3 : Multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Roma, Italia, 2007. [vi](#), [19](#), [26](#), [27](#), [36](#), [38](#), [52](#), [78](#)
- [ES87] S. EPPINGER et W. SEERING : Understanding bandwidth limitations in robot force control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, 1987. [164](#)
- [EZ96] T. EASTMAN et D.M. ZHU : Adhesion forces between surface-modified afm tips and a mica surface. *Langmuir*, 12:2859–2862, 1996. [100](#), [107](#)

- [FB06] J. FANG et K. F. BOHRINGER : Parallel micro component-to-substrate assembly with controlled poses and high surface coverage. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16:721–730, 2006. 17, 37
- [FF01] S. FAHLBUSCH et S. FATIKOW : Micro force sensing in a micro robotic system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2001. viii, 87, 89
- [FKY⁺07] T. FUKUSHIMA, H. KIKUCHI, Y. YAMADA, T. KONNO, J. LIANG, K. SASAKI, K. INAMURA, T. TANAKA et M. KOYANAGI : New three-dimensional integration technology based on reconfigured wafer-on-wafer bonding technique. In *IEEE International Electron Devices Meeting*, 2007. 33, 37
- [FM92] W. D. FISHER et M. S. MUJTABA : Hybrid position force control : A correct formulation. *International Journal of Robotics Research*, 11:299–311, 1992. xi, 159, 160
- [GD03] J. J. GORMAN et N. G. DAGALAKIS : Force control of linear motor stages for microassembly. In *Proceedings of IMECE*, 2003. 161
- [GD06] J. J. GORMAN et N. G. DAGALAKIS : Probe-based micro-scale manipulation and assembly using force feedback. In *International Conference on Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, 2006. x, xi, 149, 150, 161
- [GGH06] Michael GAUTHIER, Elie GIBEAU et David HERIBAN : Submerged robotic micromanipulation and dielectrophoretic micro-object release. In *IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, 2006. 150
- [GGR05] T. GOTSZALK, P. B. GRABIEC et I. W. RANGELOW : A novel piezoresistive microprobe for atomic and lateral force microscopy. *Sensors and Actuators A*, 123-124:370–378, 2005. 87
- [GHAB08] I. GIOUROUDI, H. HOTZENDORFER, J. Kosel D. ANDRIJASEVIC et W. BRENNER : Development of a microgripping system for handling of microcomponents. *Precision Engineering*, 32:148–152, 2008. 69
- [GN04] M. A. GREMINGER et B. J. NELSON : Vision-based force measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 26:290–298, 2004. 86
- [GR09] M. GAUTHIER et S. RÉGNIER : *Robotic micro-assembly*. IEEE Press, 2009. 107
- [Gra08] C. GRAETZEL : *MEMS & High Speed Vision : Development and Application to Reverse-engineer Drosophila Flight Control*. Thèse de doctorat, ETH ZURICH, 2008. 89, 164
- [GRRC06] M. GAUTHIER, S. RÉGNIER, P. ROUGEOT et N. CHAILLET : Forces analysis for micromanipulations in dry and liquid media. *Journal of Micromechanics*, 3:389–413, 2006. 100

- [GSS⁺99] P. B. GRABIEC, R. SUNYK, F. SHI, G. POPOVIC, T. GOTSZALK, P. HUDEK, P. DUMANIA et I. W. RANGELOW : A design and fabrication of a 3d force sensitive microprobe for surface characterization. *Microelectronic Engineering*, 46:405–408, 1999. 87
- [HAPG09] D. HÉRIBAN, J. AGNUS, V. PETRINI et M. GAUTHIER : A mechanical detethering technique for silicon mems etched with a drie process. *Journal Micromechanics Microengineering*, 19, 2009. 64, 68, 69
- [HDR06] D. S. HALIYO, F. DIONNET et S. REGNIER : Controlled rolling of microobjects for autonomous manipulation. *Journal of Micromechanics*, 3:75–101, 2006. 150
- [HG08] D. HÉRIBAN et M. GAUTHIER : Robotic micro-assembly of microparts using a piezogripper. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008. vi, 23, 24, 25, 36, 68, 69
- [Hon06] Y. K. HONG : *Surface Tension Self-Assembly for Three Dimensional MOEMS*. Thèse de doctorat, Imperial College London, 2006. 17, 37
- [How01] Larry L. HOWELL : *Compliant mechanisms*. Wiley-Interscience, 2001. 122
- [HP91] M. C. HERMAN et K. D. PAPADOPOULOS : A method for modeling the interactions of parallel flat plate systems with surface features. *Journal of colloid and interface science*, 142:331 – 342, 1991. 107
- [HRR01] S. HALIYO, Y. ROLLOT et S. RÉGNIER : Dynamical experiments on releasing sticking objets manipulated by adhesion. In *Actes de SPIE International Conference on Microrobotics and Microassembly*, pages 234–242, Boston - Etats-Unis, Octobre 2001. 149
- [IMA⁺10] J. N. ISRAELACHVILI, Y. MIN, M. AKBULUT, A. ALIG, G. CARVER, W. GREENE, K. KRISTIANSEN, E. MEYER, N. PESIKA, K. ROSENBERG et H. ZENG : Recent advances in the surface forces apparatus (sfa) technique. *Reports on Progress in Physics*, 73:1–16, 2010. 93
- [IRLC09] I. A. IVAN, M. RAKOTONDRAHE, P. LUTZ et N. CHAILLET : Current integration force and displacement self-sensing method for cantilevered piezoelectric actuators. *Review of Scientific Instruments*, 80:3 pages, 2009. 91
- [Isr91] J. N. ISRAELACHVILI : *Intermolecular and surface forces*. 1991. 39
- [JH91] S. A. JOYCE et J. E. HOUSTON : A new force sensor incorporating force feedback control for interfacial force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 62:710–715, 1991. 93
- [KD99] W. KHALIL et E. DOMBRE : *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermes, 1999. 115, 156, 160
- [KDN09] B. E. KRATOCHVIL, Li. DONG et B. J. NELSON : Real-time rigid-body visual tracking in a scanning electron microscope. *The International Journal of Robotics Research*, 28:498–511, 2009. 18

- [KFT08] M. KOYANAGI, T. FUKUSHIMA et T. TANAKA : New three-dimensional integration technology using reconfigured wafers. *In International Conference Solid-State and Integrated-Circuit Technology*, 2008. vi, 33, 34, 37
- [KKHC08] J H KYUNG, B G KO, Y H HA et G J CHUNG : Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using sma wires and flexible hinges. *Sensors and Actuators A*, 141:144–150, 2008. 69
- [KKJ02] M. KOHL, B. KREVEY et E. JUST : Sma microgripper system. *Sensors and Actuators A : Physical (1)*, 97-98:646–652, 2002. 19, 69
- [KKKJ03] D.-H. KIM, B. KIM, H. KANG et B.-K. JU : Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2003. 23, 36
- [KLKS05] D. H. KIM, M. G. LEE, B. KIM et Y. SUN : A superelastic alloy microgripper with embedded electromagnetic actuators and piezoelectric force sensors : a numerical and experimental study. *Smart Materials and Structures*, 14:1265–1272, 2005. 69
- [KLZS08a] K. KIM, X. LIU, Y. ZHANG et Y. SUN : Micronewton force-controlled manipulation of biomaterials using a monolithic mems microgripper with two-axis force feedback. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2008. 91
- [KLZS08b] K. KIM, X. LIU, Y. ZHANG et Y. SUN : Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic mems microgripper with two-axis force feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18:1–8, 2008. 19, 69, 90, 91
- [KS09] S. KHAN et A. SABANOVIC : Hybrid vision/force feedback control for pushing micro-objects. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2009. 24, 144, 146
- [KSH86] H. KAZEROONI, T. SHERIDAN et P. HOUPY : Robust compliant motion for manipulators, part i : The fundamental concepts of compliant motion. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2:83–92, 1986. 165
- [LA95] S. LEE et H. ASADA : Direct adaptive control of force-guided assembly robots using tuned dither. *In Proceedings of the American Control Conference*, 1995. 46
- [Lam05] P. LAMBERT : *A Contribution to Microassembly : a Study of Capillary Forces as a gripping Principle*. Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, 2005. vi, viii, 39, 40, 97, 98
- [Lam07] P. LAMBERT : *Capillary Forces in Microassembly*. Springer, 2007. 39, 107
- [Lan08] D. LANG : *A study of Micro-gripping Technologies*. Thèse de doctorat, University of Southern Denmark, 2008. 18
- [LBK⁺09] K. LASZCZYK, S. BARGIEL, J. KREZEL, C. GORECKI et M. KUJAWINSKA : Silicon comb-drive x-y microstage with frame-in-the-frame architecture for

- moems applications. *In Smart Sensors, Actuators, and MEMS IV*, 2009. 177
- [LCG⁺06] Z. LU, P. C. Y. CHEN, A. GANAPATHY, G. ZHAO, J. NAM, G. YANG, E. BURDET, C. TEO, Q. MENG et W. LIN : A force-feedback control system for micro-assembly. *J. Micromech. Microeng.*, 16:1861–1868, 2006. xi, 36, 144, 150, 151, 152, 153
- [LCK⁺96] A P LEE, D R CIARLO, P A KRULEVITCH, S LEHEW, J TREVINO et M A NORTHRUP : A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and sma actuation. *Sensors and Actuators A*, 54:755–759, 1996. 69
- [LDS⁺99] R. LEVY, M. R. DESCOURS, R. J. SHUL, C. L. WILLISON, M. E. WARREN, T. K. KOLOLUOMA et J. T. RANTALA : A concept for zero-alignment micro optical systems. *In SPIE, Vol. 3879*, 1999. vii, 50, 51, 55
- [Lec08] D. LECKBAND : *Handbook of Molecular Force Spectroscopy*, chapitre Surface Force Apparatus Measurements of Molecular Forces in Biological Adhesion, pages 1–22. Springer US, 2008. 100
- [Lee91] L. H. LEE : *The chemistry and physics of solid adhesion, Fundamentals of Adhesion*. Plenum Press, 1991. 39
- [Lef03] Tine LEFEBVRE : *Contact modelling, parameter identification and task planning for autonomous compliant motion using elementary contacts*. Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2003. 115
- [LKO⁺03] W. H. LEE, B. H. KANG, Y. S. OH, H. STEPHANOU, A. C. SANDERSON, G. SKIDMORE et M. ELLIS : Micropeg manipulation with a compliant microgripper. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2003. 19, 23, 144, 146
- [LSLW96] L. Y. LIN, J. L. SHEN, S. S. LEE et M. C. WU : Realization of novel monolithic free-space optical disk pickup heads by surface micromachining. *Optics Letters*, 21:155–157, 1996. v, 13, 14, 46
- [LSLW97] L. Y. LIN, J. L. SHEN, S. S. LEE et M. C. WU : Surface-micromachined micro-xyz stages for free-space microoptical bench. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9:345–347, 1997. 45, 55
- [LSP05] M. LAST, V. SUBRAMANIAM et K.S.J. PISTER : Out-of-plane motion of assembled microstructures using a single-mask soi process. *In International Conference Transducers*, June 2005. v, 22, 36, 78
- [Man02] O. MANZARDO : *Micro-sized Fourier Spectrometers*. Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2002. v, 10, 50, 55
- [Mas79] M. T. MASON : *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 1979. 115
- [MB86] J. MAPLES et J. BECKER : Experiments in force control of robotic manipulators. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1986. 161

- [MB08] M. R. MOREAU et J. Le BÉCHEC : Mesure de force et de couple : Capteurs de force (partie 1) - gamac. *Techniques de l'Ingénieur*, R1820, 2008. 87
- [MBN10] S MUNTWYLER, F BEYELER et B J NELSON : Three-axis micro-force sensor with sub-micro-newton measurement uncertainty and tunable force range. *Journam of Micromechanics and Microengineering*, 20:1–8, 2010. 91
- [MBR⁺04] O. MILLET, P. BERNARDONI, S. RÉGNIER, P. BIDAUD, E. TSITSIRIS, D. COLLARD et L. BUCHAILLOT : Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism. *Sensors and Actuators A : Physical*, 114:371–378, 2004. 69
- [MGDS01] M. A. MIGNARDI, R. O. GALE, D. J. DAWSON et J. C. SMITH : *MEMS and MOEMS Technology and Applications : The digital Micromirror Device - A Micro-Optical Electromechanical Device for Display Applications*. SPIE Press, 2001. 1, 9, 15
- [MH05] Kristian MOLHAVE et Ole HANSEN : Electro-thermally actuated micro-grippers with integrated force-feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15:1265–1270, 2005. 69
- [MN88] G MEYER et NAMER : Novel approach to atomic force microscopy. *Appl. Phys. Lett*, 53:2400–2402, 1988. 83
- [MUFM04] S. MARLIERE, D. URMA, J.-L. FLORENS et F. MARCHI : Multi-sensorial interaction with a nano-scale phenomenon : the force curve. In *EuroHaptics*, Munich, Germany, June 2004. 28
- [MUM⁺05] F. MARCHI, D. URMA, S. MARLIERE, J.L. FLORENS, A. BESANCON, J. CHEVRIER et A. LUCIANI : Educational tool for nanophysics using multisensory rendering. In *WordHaptics 2005 " Entertainment and Educational Applications"*, 2005. 28
- [MWP97] M. Edward MOTAMEDI, Ming C. WU et Kristofer S.J. PISTER : Micro-opto-electro-mechanical devices and on-chip optical processing. *Optical Engineering*, 1997. 15, 45, 59
- [MZL⁺07] M. MAYYAS, P. ZHANG, W. H. LEE, P. SHIAKOLAS et D. O. POPA : Design tradeoffs for electrothermal microgrippers. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007. 69
- [NCD⁺02] W. NOELL, P.-A. CLERC, L. DELLMANN, B. GULDIMANN, H. P. HERZIG, O. MANZARDO, C. MARXER, K. WEIBLE, R. DÄNDLIKER et N. de ROOIJ : Applications of soi-based optical mems. *IEEE Journal of Slected Topics in Quantum Electronics "Optical MEMS"*, 2002. v, 11, 12, 13, 15, 55, 177
- [NS⁺02] W. NOELL, W. SUN, , N. de ROOIJ, H. P. HERZIG, O. MANZARDO et R. DÄNDLIKER : Optical mems based on silicon-on-insulator (soi) for monolithic microoptics. In *IEEE Annual Meeting Conference Proceedings LEOS*, pages 580–581, 2002. 50

- [PAC⁺05] R. PÉREZ, J. AGNUS, C. CLÉVY, A. HUBERT et N. CHAILLET : Modeling, fabrication, and validation of a high-performance 2-dof piezoactuator for micromanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pages 161–172, 2005. [19](#), [69](#)
- [PAS05] S. PAINEAU, P. ANDREUCCI et C. SCHAFFNIT : Microsystèmes : applications et mise en oeuvre. *Techniques de l'Ingénieur*, 2005. [v](#), [1](#), [7](#), [9](#)
- [PB08] S. PARK et K. F. BOHRINGER : A fully dry self-assembly process with proper in-plane orientation. In *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2008. [17](#), [37](#)
- [PKK⁺05] J. PARK, S. KIM, D.-H. KIM, B. KIM, S. J. KWON, J.-O. PARK et K.-I. LEE : Identification and control of a sensorized microgripper for micromanipulation. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 10:601–606, 2005. [69](#)
- [PLM⁺07] D.O. POPA, W. H. LEE, R. MURTHY, A. N. DAS et H. E. STEPHANOU : High yield automated mems assembly. *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2007. [18](#)
- [PMAM⁺07] J. POLESEL-MARIS, L. AESCHIMANN, A. MEISTER, R. ISCHER, E. BERNARD, T. AKIYAMA, M. GIAZZON, P. NIEDERMANN, U. STAUFER, R. PUGGIN, N. F. de ROOIJ, P. VETTIGER et H. HEINZELMANN : Piezoresistive cantilever array for life sciences applications. *Journal of Physics : Conference Series*, 61:955–959, 2007. [87](#)
- [PMD09] D. O. POPA, R. MURTHY et A. DAS : M³ - deterministic, multiscale, multirobot platform for microsystems packaging : design and quasi-static precision evaluation. *IEEE Transaction on Automation Science and Engineering (TASE)*, 6:345–361, 2009. [18](#)
- [Pop07] D. O. POPA : Automated assembly and packaging of mems. Rapport technique, ARRI Institut Texas, 2007. [vi](#), [32](#), [36](#)
- [PS04] D. O. POPA et H. E. STEPHANOU : Micro and meso scale robotic assembly. *ASME Journal of Manufacturing Processes*, 6:52 – 71, 2004. [vi](#), [17](#), [26](#), [31](#), [36](#), [38](#)
- [RAE⁺02] Y. I. RABINOVICH, J. J. ADLER, M. S. ESAYANUR, A. ATA, R. K. SINGH et B. M. MOUDGIL : Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness. *Advances in Colloid and Interface Science*, 96:213–230, 2002. [107](#)
- [RC81] M.H. RAIBERT et J. J. CRAIG : Hybrid position/force control of manipulators. *Transactions of ASME*, 102, 1981. [159](#)
- [RC08] S. RÉGNIER et N. CHAILLET : *La microrobotique - Applications à la micromanipulation*. 2008. [viii](#), [15](#), [39](#), [40](#), [41](#), [82](#), [93](#), [95](#), [96](#), [100](#)
- [RCL10] K. RABENOROSOA, C. CLÉVY et P. LUTZ : Active force control for robotic micro-assembly : Application to guiding tasks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2010. [139](#)

- [RDM⁺09] K. RABENOROSOA, A. N. DAS, R. MURTHY, C. CLÉVY, D. O. POPA et P. LUTZ : Precise motion control of a piezoelectric microgripper for microspectrometer assembly. In *ASME'09 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC'09) & Computers and Information in Engineering Conference (CIE'09)*., San Diego, United States, 2009. 53, 55
- [RF05] J. C. RIVOAL et C. FRÉTIGNY : Microscopie à force atomique (afm). In *Technique de l'ingénieur*, 2005. 83
- [Rol00] Y. ROLLOT : *Micro-manipulations par adhésion : Modélisations dynamiques et expérimentation*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2000. 39
- [RPD00] C REMOND, V PERDEREAU et M DROUIN : Design of a hybrid external structure for a multi-fingered hand. In *IFAC Symposium on Robot Control*, 2000. 161
- [RPD01] C. REMOND, V. PERDEREAU et M. DROUIN : Commande d'une main robotisée : Optimisation des forces. 2001. xi, 161, 162
- [RR02] Véronique ROCHUS et Pierre ROCHUS : Venus tout droit du pays des lilliputiens, les moems vont envahir l'espace. 2002. 13
- [RR09] M. RAKOTONDRABE et P. ROUGEOT : Presentation and improvement of an afm-based system for the measurement of adhesion forces. In *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Bangalore India, August 2009. 83
- [RRANss] M. RAKOTONDRABE, K. RABENOROSOA, J. AGNUS et N. CHAILLET : Robust feedforward-feedback control of a nonlinear and oscillating 2-dof piezo-cantilever. *Transactions on Automation Science and Engineering*, In Press. 68
- [RWMS07] L. REN, L. WANG, J. K. MILLS et D. SUN : 3-d automatic microassembly by vision-based control. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2007. 18
- [Sch87] J. De SCHUTTER : A study of active compliant motion control methods for rigid manipulators based on a generic scheme. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1987. 161
- [Scu00] M. SCUSSAT : *Assemblage bidimensionnel de composants optiques miniatures*. Thèse de doctorat, EPFL, 2000. vi, vii, 47, 48, 49, 55
- [SGW09] B. P. SOLANO, A. J. GALLANT et D. WOOD : Design and optimisation of a microgripper : Demonstration of biomedical applications using the manipulation of oocytes. In *DTIP of MEMS and MOEMS*, 2009. 69
- [SHC⁺99] A. SINGH, D.A. HORSLEY, M. B. COHN, A. P. PISANO et R. T. HOWE : Batch transfer of microstructures using flip-chip solder bonding. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8:27–33, 1999. 30, 36
- [Sit07] M. SITTI : Microscale and nanoscale robotics systems : Characteristics, state of the art, and grand challenges. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1):53–60, 2007. 28

- [SLH01] U. SRINIVASAN, D. LIEPMANN et R. T. HOWE : Microstructure to substrate self-assembly using capillary forces. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10:17–24, 2001. 17, 37
- [SM02] R. R. A. SYMS et D. F. MOORE : Optical mems for telecoms. *Materials Today*, 5:26–35, 2002. xiii, 7, 8
- [SMW03] C. SOLF, J. MOHR et U. WALLRABE : Miniaturized liga fourier transformation spectrometer. *In IEEE Sensors*, 2003. 51, 52
- [SN07] Y. SUN et B. J. NELSON : MemS capacitive force sensors for cellular and flight biomechanics. *Biomedical Materials*, 2:16–22, 2007. 91
- [SPP+03] Y. SUN, D.P. POTASEK, D. PIYABONGKARN, R. RAJAMANI et B.J. NELSON : Actively servoed multi-axis microforce sensors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 294–299, 2003. 91, 93
- [Ste98] M. B. STERN : *Micro-optics*, chapitre Binary Optics Fabrication. Taylor & Francis, 1998. 15
- [Ste00] A M STEWART : Capacitance dilatometry attachment for a surface-force apparatus. *Measurement Science and Technology*, 11:298–304, 2000. 93
- [SWG+05] L. STAUFFER, A. WURSCHE, B. GACHTER, K. SIERCKS, I. VERETTAS, S. ROSSOPOULOS et R. CLAVEL : A surface-mounted device assembly technique for small optics based on laser reflow soldering. *Optics and Lasers in Engineering*, 43:365–372, 2005. 48, 55
- [SXL03] Y. SHEN, N. XI et W. J. LI : Contact and force control in microassembly. *IEEE 5th International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP)*, pages 60–65, 2003. viii, 18, 91, 92, 148
- [SXRC05] L. SUN, H. XIE, W. RONG et L. CHEN : Task-reconfigurable system for mems assembly. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005. 18
- [SXWL04] Y. SHEN, N. XI, U. C. WEJINYA et W. LI : High sensitivity 2-d force sensor for assembly of surface mems devices. *IEEE International Conference on intelligent robots and Systems (IROS)*, 2004. 144
- [SYBW03] R. R. A. SYMS, E. M. YEATMAN, V. M. BRIGHT et G. M. WHITESIDES : Surface tension-powered self-assembly of microstructures - the state-of-the-art. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12:387–417, 2003. 17, 37
- [Sym99] R. R. A. SYMS : Surface tension powered self-assembly of 3-d micro-optomechanical structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8:448–455, 1999. 17, 37
- [SZK09] V. SARIOLA, Q. ZHOU et H. N. KOIVO : Three dimensional hybrid microassembly combining robotic microhandling and self-assembly. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009. vi, 32, 33, 37

- [SZLK08] V. SARIOLA, Q. ZHOU, R. LAAß et H. N. KOIVO : Experimental study on droplet based hybrid microhandling using high speed camera. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008. vi, 33, 37
- [Tam09] B. TAMADAZTE : *Vision 3D et Commande par asservissements visuels pour la micromanipulation et le micro-assemblage de MEMS*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009. vi, 18, 27, 28, 29, 36, 38, 76, 179
- [TDFP10] B. TAMADAZTE, S. DEMBÉLÉ et N. Le FORT-PIAT : Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing. *ASME/IEEE Transaction on Mechatronics*, pp:1–11, 2010. 68
- [TF01] J.A. THOMPSON et R. S. FEARING : Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing. *In IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2001. 20, 24, 144, 145
- [TGES04] K. TSUI, A. A. GEISBERGER, M. ELLIS et G. D. SKIDMORE : Micromachined end-effector and techniques for directed mems assembly. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14:542–549, 2004. vi, 19, 25, 26, 36
- [TJ06] D. TOLFREE et M. J. JACKSON : *Commercializing Micro-Nanotechnology Products*. CRC Press, 2006. 1, 14
- [TLS05] Y.-C. TSAI, S. H. LEI et H. SUDIN : Design and analysis of planar compliant microgripper based on kinematic approach. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15, 2005. 19, 20, 36
- [Ven06] S. VENKATRAMAN : Serial assembly of microstructures. Mémoire de D.E.A., University of California, Berkeley, 2006. 15
- [VHR02] B. E. VOLLAND, H. HEERLEIN et I. W. RANGELOW : Electrostatically driven microgripper. *Microelectronic Engineering*, 61-62:1015–1023, 2002. 69
- [VK93] R. VOLPE et P. KHOSLA : A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 38:634–1650, 1993. 161
- [VLP06] S. VENKATRAMAN, M. LAST et K. S. J. PISTER : Methods and characterization of pick and place microassembly. *In ASME International Congress*, 2006. v, 20, 22, 36
- [VMET09] R. VOICU, R. MAULLER, L. EFTIME et C. TIBEICA : Design study for an electro-thermally actuator for micromanipulation. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 12:402–409, 2009. 69
- [WFS00] M. C. WU, L. FAN et G.-D. SU : Micromechanical photonic integrated circuits. *IEICE Transactions Electronic*, E83-C:903–911, 2000. vi, 46, 55, 59
- [WGW⁺07] J. WASON, W. GRESSICK, J. T. WEN, J. GORMAN et N. DAGALAKIS : Multi-probe micro-assembly. *In IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2007. 19

- [WMS91] G. M. WHITESIDES, J. P. MATHIAS et C. T. SETO : Molecular self-assembly and nanochemistry : a chemical strategy for the synthesis of nanostructures. *Science*, 254:1312–1319, 1991. [17](#)
- [Wol05] R. F. WOLFFENBUTTEL : Mems-based optical mini- and microspectrometers for the visible and infrared spectral range. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15:145–152, 2005. [51](#), [55](#)
- [WSMK05] U. WALLRABE, C. SOLF, J. MOHR et J. G. KORVINK : Miniaturized fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator. *Sensors and Actuators A*, 123-124:459–467, 2005. [51](#), [55](#)
- [WW04] C. WENJIE et L. WEI : Design of a flexure-based gripper used in optical fiber handling. In *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, pages 83–89, 2004. [69](#)
- [WYLP95] M. C. WU, L. Y. LIN, LEE S. S. LEE et K. S. J. PISTER : Micromachined free-space integrated micro-optics. *Sensors and actuators*, 50:127–134, 1995. [45](#), [46](#), [55](#)
- [XAHR09] H. XIE, J. C. ACOSTA, D. S. HALIYO et S. RÉGNIER : Pick-and-place nanomanipulation with three-dimensional manipulation force microscopy. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1333–1338, 2009. [24](#), [144](#), [145](#)
- [XR09] H. XIE et S. RÉGNIER : Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip gripper with multi-feedback. *Journal of Microengineering and Micromechanics*, 19:1–9, 2009. [28](#), [29](#), [36](#), [38](#)
- [XRR09] H. XIE, M. RAKOTONDRABE et S. RÉGNIER : In-situ characterization of the piezoelectric scanner with optical levers. *Review of Scientific Instruments*, 80:046102–1/046102–3, 2009. [83](#)
- [YGN01] G. YANG, J. A. GAINES et B. J. NELSON : A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3d microassembly. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 133–138, 2001. [24](#), [144](#), [147](#)
- [YLG01] T. W. YEOW, K. L. E. LAW et A. GOLDENBERG : Mems optical switches. *IEEE Communications Magazine*, 39:158 – 163, 2001. [1](#), [6](#)
- [YLP08] C.-D. YEO, S.-C. LEE et A. A. POLYCARPOUB : Dynamic adhesive force measurements under vertical and horizontal motions of interacting rough surfaces. *Review of Scientific Instruments*, 79:1–8, 2008. [100](#)
- [YS05] S. YANG et M. T. A. SAIF : Micromachined force sensors for the study of cell mechanics. *Review of Scientific Instruments*, 76:1–8, 2005. [viii](#), [85](#), [86](#)
- [Zam03] F. ZAMKOTSIAN : Les composants moems pour les instruments astronomiques du futur. 4 èmes Rencontres Nationales des Mécaniciens, 2003. [13](#)

- [ZBW97] W. ZESCH, M. BRUNNER et A. WEBER : Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1997. v, 19, 23, 36
- [ZCLS10] Y. ZHANG, B. K. CHEN, X. LIU et Y. SUN : Autonomous robotic pick-and-place of microobjects. *IEEE Transactions on Robotics*, 26:200–207, 2010. 69
- [ZF98] W. ZESCH et R. S. FEARING : Alignment of microparts using force controlled pushing. *The International Society for Optical Engineering*, 1998. x, 24, 144, 146
- [ZH97] G. ZENG et A. HEMAMI : An overview of robot force control. *Robotica*, pages 473 – 482, 1997. 164
- [Zic06] M. ZICKAR : *MEMS based Optical Cross Connects for Fiber Optical Communication*. Thèse de doctorat, Institute of Microtechnology, University of Neuchatel, 2006. 13
- [ZKLS06] Q. ZHOU, P. KORHONEN, J. LAITINEN et S. SJOVALL : Automatic dextrous microhandling based on a 6-dof microgripper. *Journal of Micromechatronics*, 3:359–387, 2006. 69
- [ZN00] Y. ZHOU et B. J. NELSON : The effect of material properties and gripping force on micrograsping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000. 149
- [ZNV98] Y. ZHOU, B. J. NELSON et B. VIKRAMADITYA : Fusing force and vision feedback for micromanipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1998. x, 18, 84, 144, 148, 149, 161
- [ZST09] M. N. M. ZUBIR, B. SHIRINZADEH et Y. TIAN : A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation. *Mechanism and Machine Theory*, 44:2248–2264, 2009. 69

Résumé

La thèse propose un concept de microbancoptiques reconfigurables (MOEMS 3D hybrides) à base d'éléments microfabriqués et assemblés à l'aide d'une station robotique : ces nouveaux bancs optiques combinent les avantages du micro-assemblage robotique et des techniques de microfabrication sur silicium. Le positionnement fin des supports optiques sur un substrat s'effectue par une tâche de guidage. La réalisation d'une telle tâche à l'échelle micrométrique est une contribution majeure de la thèse. Elle a nécessité plusieurs avancées. L'absence de modèles fiables et de mesures disponibles pour des contacts plan/plan, un type de contact très fréquent en micro-assemblage, nous a conduit au développement d'un banc de mesure robotisé pour évaluer la force de pull-off. Ensuite, un système robotique équipé de préhenseur à deux doigts de serrage instrumentés a été mis en œuvre pour mesurer simultanément la force de serrage et la force de contact latéral qui agit sur le micro-objet manipulé durant le guidage. Un modèle de l'évolution de la force de serrage lors de l'apparition de la force de contact latéral est présenté et confronté à une modélisation par éléments finis ainsi qu'à des résultats expérimentaux. Enfin, une stratégie de guidage est établie en prenant en compte la stabilité de la saisie et les spécificités du micromonde. Une commande hybride force/position est choisie pour automatiser le guidage par deux doigts instrumentés (GDDI). Elle a été mise en œuvre avec succès sur un système robotique.

Mots-clés : MOEMS hybrides, microbanc optique, micro-assemblage, force de pull-off, préhenseur à deux doigts instrumentés, guidage par contrôle en force, commande hybride force/position.

Abstract

The thesis proposes a concept of reconfigurable free space micro-optical bench (3D hybrid MOEMS) based on micro-assembly of microparts (holders and substrate) using a robotic station : these new optical benches combine the advantages of microrobotic assembly and silicon microfabrication. The fine positioning of holder on a substrate is performed by a constrained motion named guiding task. Achieving this task at the microscale is a major contribution. It required several steps. First, the lack of reliable models and available measures of pull-off force for planar contact which is a very common type of contact in micro-assembly, lead us to develop a robotic test bench to evaluate the pull-off force. Next, a two-sensing-finger micro-gripper has been used to simultaneously measure the gripping force and the lateral contact force acting on the grasped micropart during the guiding task. A model of the gripping force evolution according to the lateral contact force is presented and validated with a finite element modeling and experimental results. Finally, a guiding strategy is established by taking into account the stability of the grasped micropart and the specificities of the microworld. A hybrid force/position control is chosen to achieve automated guiding task. It has been performed successfully on a microrobotic system.

Keywords : hybride MOEMS, micro-optical bench, micro-assembly, pull-off force, two-sensing-finger microgripper, guiding task by force control, hybride force/position control.