



Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage

Cédric Clévy

► To cite this version:

Cédric Clévy. Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2005. Français. NNT : . tel-00134271

HAL Id: tel-00134271

<https://theses.hal.science/tel-00134271>

Submitted on 1 Mar 2007

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 : 2005

N° d'ordre : 1117

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)

**Contribution à la micromanipulation robotisée :
un système de changement d'outils automatique
pour le micro-assemblage**

par

Cédric Clévy

Soutenue le 12 décembre 2005 devant la commission d'examen :

Rapporteurs :	Marc ARSICAULT	Maître de Conférences HDR., Université de Poitiers
	Tanneguy REDARCE	Professeur, INSA Lyon
Examineurs :	Jacques GANGLOFF	Professeur, ENSPS
	Christian LEXCELLENT	Professeur, ENSMM
Directeurs de thèse :	Nicolas CHAILLET	Professeur, Université de Franche-Comté
	Arnaud HUBERT	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté

Sommaire

Table des figures	7
Liste des tableaux	13
Remerciements	15
Introduction	17
1 Problématiques de la micromanipulation et du micro-assemblage	21
1.1 Introduction	21
1.2 Particularités du micro-assemblage	24
1.2.1 Problèmes d'adhésion	25
1.2.2 Contraintes liées à la dextérité	27
1.2.3 Contraintes liées à l'environnement	30
1.2.4 Le concept de micro-usine	30
1.3 Etat de l'art des différentes stations de micromanipulation et de micro-assemblage	31
1.3.1 Méthodes de micromanipulation et de micro-assemblage	31
1.3.2 Les différentes fonctions de préhension	32
1.3.3 Les micromanipulateurs	37
1.3.4 Les capteurs	42
1.3.5 Autres systèmes péri-micro-robotiques	43
1.3.6 Exemples choisis de systèmes de micromanipulation	44
1.3.7 Conclusion	49
1.4 Besoins et enjeux de la micromanipulation et du micro-assemblage robotisés . .	50
1.4.1 Manipulation de composants en petites séries	51
1.4.2 Manipulation de composants en moyennes séries	51
1.4.3 Bilan des besoins : vers compacité, automatisation et flexibilité	51
2 Développement de stations de micromanipulation	53
2.1 Introduction	53
2.2 Historique des réalisations du laboratoire	54
2.2.1 Première génération de stations de micromanipulation	54
2.2.2 Réalisation d'une micropince	55
2.3 Critères pour la réalisation de stations de micromanipulation	57

2.3.1	Le projet européen ROBOSEM	58
2.3.2	Définition des objectifs	59
2.4	Dernière génération de stations de micromanipulation	60
2.4.1	Réalisation d'une station de micromanipulation de structure modulaire .	60
2.4.2	Réalisation d'une station de micromanipulation compatible MEB . . .	61
2.4.3	La modularité : le cœur du problème	62
2.5	Réflexions sur la flexibilité	63
2.5.1	Système multi robots	63
2.5.2	Système avec changement de pinces	66
2.5.3	Système avec changement d'outils	68
2.5.4	Conclusions : choix d'un système	69
2.6	Conclusion	71
3	Choix d'un principe pour système de changement d'outils	73
3.1	Introduction	73
3.2	Contraintes de conception pour la réalisation d'un système de changement d'outils	74
3.2.1	Influence des outils utilisés	75
3.2.2	Contraintes de conception liées à l'actionneur	77
3.2.3	Intégration dans la station de micromanipulation	80
3.2.4	Transmission des efforts	80
3.2.5	Compatibilité MEB	82
3.2.6	Bilan des contraintes de conception	82
3.3	Choix d'un système de solidarisation	83
3.3.1	Système fondé sur les déformations mécaniques	83
3.3.2	Solutions électromagnétiques (aimants, bobines)	88
3.3.3	Solutions fondées sur les forces électrostatiques	91
3.3.4	Solutions fondées sur l'utilisation de polymères ou de colles reposition- nables	94
3.3.5	Solutions fondées sur les forces de Van der Waals	95
3.4	Conclusion	97
4	Conception, modélisation et commande d'un système de changement d'outils à colle thermique	99
4.1	Introduction	99
4.2	Principe de fonctionnement	100
4.3	Mise en œuvre du système de changement d'outils	102
4.4	Modélisation analytique des phénomènes thermiques	103
4.4.1	Mise en équation et hypothèses	103
4.4.2	Réduction du problème	105
4.4.3	Résolution analytique du modèle unidirectionnel en régime stationnaire	107
4.5	Modélisation numérique des phénomènes thermiques : méthode des différences finies	109
4.6	Identification des paramètres des différents modèles	113
4.6.1	Identification fondée sur le modèle analytique en régime stationnaire . .	113

4.6.2	Identification fondée sur le modèle numérique (ARX)	116
4.6.3	Conclusion	120
4.7	Validation expérimentale des modèles	120
4.7.1	Fonctionnement sous environnement atmosphérique	121
4.7.2	Fonctionnement sous environnement à vide	128
4.8	Commande et caractérisation du système de changement d'outils à colle thermique	130
4.8.1	Intégration du système de changement d'outils dans la station de micro-manipulation	131
4.8.2	Utilisation du système de changement d'outils	133
4.8.3	Tenue mécanique des joints de colle	134
4.8.4	Répétabilité de positionnement	135
4.8.5	Compatibilité MEB et essais	138
4.9	Conclusion	143
5	Application des travaux à la micromanipulation et au micro-assemblage : améliorations et perspectives	145
5.1	Introduction	145
5.2	Exemples d'opérations de micromanipulation	146
5.2.1	Manipulation d'un grain d'olivine	148
5.2.2	Assemblage d'un roulement	149
5.2.3	Manipulation d'éprouvettes de traction miniatures	151
5.2.4	Conclusion	151
5.3	Conception et réalisation du support compliant	152
5.3.1	Structure du support compliant	153
5.3.2	Position d'équilibre du plan de travail	153
5.3.3	Phase de conception : maximisation de la sensibilité du support compliant	154
5.3.4	Exemple d'utilisation du support compliant	155
5.4	Perspectives d'utilisation du support compliant comme capteur d'effort	158
5.4.1	Utilisation de structures parallèles de type plate-forme de Stewart comme capteur d'effort	159
5.4.2	Instrumentation du support compliant	161
5.4.3	Analyse du capteur réalisé	164
5.5	Conclusion	169
	Conclusion	171
	Annexes	175
	A Etude d'une poutre en flexion	175
	B Caractérisation de la force de serrage de la micropince MMOC	179

C	Modélisation numérique des phénomènes thermiques par éléments finis	181
C.1	Introduction	181
C.2	Modélisation numérique des phénomènes thermiques	182
C.3	Résultats	183
C.4	Influence du rayonnement	183
D	Identification paramétrique à partir du modèle analytique en régime stationnaire	185
E	Identification des paramètres : méthode ARX par discrétisation temporelle	189
F	Caractéristiques du capteur de position SFH 900	193
F.1	Données du capteur SFH 900	193
F.2	Montage électronique	193
G	Index des vidéos disponibles sur le Cédérom	195
	Références Bibliographiques	197

Table des figures

1.1	Exemple de MEMS optique	22
1.2	Exemples de micro-systèmes assemblés	23
1.3	Exemples d'objets manipulés et précision de dépose	24
1.4	Illustrations des phénomènes d'adhésion	26
1.5	Exemples de systèmes de vision pour micromanipulation	28
1.6	Exemple de réalisation d'une micro-usine selon Tanaka et al.	30
1.7	Assemblage parallèle réalisé avec plusieurs manipulateurs	31
1.8	Assemblage en parallèle d'engrenages	32
1.9	Moyens techniques à mettre en œuvre pour assembler des micro-composants	33
1.10	Combinaison de deux fonctions de préhension	34
1.11	Utilisation de deux pointes pour la manipulation de micro-objets	35
1.12	Prise et dépose d'un micro-objet par orientation de l'outil	36
1.13	Fonctions de préhensions utilisées selon les dimensions de l'objet manipulé	37
1.14	Manipulation d'objets de 50 μm de dimensions à l'aide de deux robots mobiles autonomes	39
1.15	Station de micromanipulation selon Weck et al.	40
1.16	Station de micromanipulation selon Popa et al.	40
1.17	Station de micromanipulation réalisée par assemblage de modules selon Gautier et al.	41
1.18	Station de micromanipulation selon Breguet et al.	42
1.19	Station de micromanipulation selon Yang et al.	45
1.20	Station de micromanipulation selon Tanikawa et al.	45
1.21	Station de micromanipulation selon Thompson et al.	46
1.22	Station de micromanipulation selon Dechev et al.	47
1.23	Station de micromanipulation selon Zhou et al.	48
1.24	Station de micromanipulation selon Sun et al.	48
1.25	Station de micromanipulation selon Koyano et al.	49
1.26	Répartition des stations de micromanipulation selon leur mode de fonctionnement	50
2.1	Première génération de station de micromanipulation développée au LAB.	54
2.2	Actionneur piézoélectrique pour micropince MMOC développé au LAB	55
2.3	Schéma de principe d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique de la micropince MMOC	56

2.4	Micropince MMOC composée d'un actionneur piézoélectrique et d'une paire d'outils.	57
2.5	Structure d'une station de micromanipulation composée de trois axes linéaires, d'une micropince MMOC et d'un plan de travail.	61
2.6	Structure de la seconde station de micromanipulation composée du robot MM3A, d'une micropince MMOC et d'un plan de travail.	62
2.7	Montage photographique illustrant le concept de système d'assemblage composé de robots d'architectures identiques	64
2.8	Système d'assemblage composé de deux robots de structures et de technologies différentes	64
2.9	Deux types de tourelles revolver	67
2.10	Schéma illustrant le concept de changement de micropinces appliqué à une de nos stations de micromanipulation	68
2.11	Système de changement d'organes terminaux selon Weck et al.	69
2.12	Schéma illustrant le concept de changement d'outils appliqué à une de nos stations de micromanipulation	70
3.1	Schéma illustrant le concept de système de changement d'outils appliqué à une de nos stations de micromanipulation	74
3.2	Forme générale d'une paire d'outils.	75
3.3	Différentes formes possibles de l'extrémité des outils	76
3.4	Exemple d'outils en silicium.	76
3.5	Modélisation d'un doigt de l'actionneur de la micropince MMOC	77
3.6	Schéma de l'actionneur seul subissant une force F_Z et schéma d'un outil fixé à l'actionneur subissant une force F_m	78
3.7	Montage utilisé pour déterminer la force à appliquer pour atteindre la rupture d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique	79
3.8	Système de fixation d'un outil à l'actionneur grâce à l'action d'une force	81
3.9	Système de micro-connecteur mécanique selon Skidmore et al.	84
3.10	Bobine réalisée par assemblage de spires selon Dechev et al.	84
3.11	Système de connecteur mécanique selon Tsui et al.	85
3.12	Eléments d'un système de serrage par micro-étau selon Skidmore et al.	85
3.13	Eléments utilisés pour réaliser un système de changement d'outils	86
3.14	Pièces permettant la réalisation d'une connexion mécanique par déformation de deux poutres.	87
3.15	Interactions entre deux dipôles magnétiques	88
3.16	Système de changement d'outils utilisant des aimants	89
3.17	Courbe de Paschen	91
3.18	Utilisation des forces électrostatiques pour réaliser un système de changement d'outils.	92
3.19	Schéma d'un condensateur plan et détermination de la force d'attraction des deux électrodes.	92
3.20	Robot réalisé par Daltorio et al. possédant quatre roues, chacune équipée de quatre morceaux d'adhésif	95

3.21	Exemple de courbe de force entre une pointe d'AFM et un substrat en polystyrène	96
3.22	Mécanisme d'adhésion du Gecko et réalisations synthétiques	97
4.1	Etat de la colle thermique utilisée pendant un cycle de chauffage-refroidissement.	100
4.2	Schéma de l'ensemble actionneur-résistances-outils-magasin-colle	101
4.3	Schémas de l'ensemble actionneur-résistances-outils-magasin	102
4.4	Caractéristiques d'une poutre	103
4.5	Schéma du système réel actionneur-outil-magasin-résistances	106
4.6	Schéma simplifié du système actionneur-outil-résistance.	106
4.7	Schéma simplifié du système outil-résistance.	107
4.8	Schéma du modèle unidirectionnel correspondant au système outil-résistance .	107
4.9	Schéma éclaté du système modélisé et hypothèses posées.	108
4.10	Variation du coefficient de conduction $\lambda(x)$ le long du système résistance-outil.	110
4.11	Mesures de températures effectuées en régime stationnaire sur le système résistance-outil, pour trois densités de chaleur	114
4.12	Tracé de cinq courbes de températures (T_r et T_o) issues du modèle unidirectionnel	115
4.13	Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-outil pour trois densités de source de chaleur.	116
4.14	Influence de l'actionneur et du magasin sur la température en régime stationnaire	121
4.15	Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-actionneur-outil	122
4.16	Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-actionneur-outil-magasin	123
4.17	Influence du produit $\rho_o \cdot C_o$ sur le régime transitoire de l'évolution de la température	124
4.18	Comparaison du modèle aux mesures du système résistance-actionneur-outil-magasin en régime transitoire	125
4.19	Différences de températures mesurées entre les points A et B	126
4.20	Exemple de cycle de températures au contact actionneur-outil calculé à partir du modèle numérique	127
4.21	Mesures de températures de l'outil disposé dans un MEB	129
4.22	Différences de températures entre les points A et B dans le vide	130
4.23	Mise en place du magasin d'outils dans la station de micromanipulation	131
4.24	Schéma de câblage de la station de micromanipulation	132
4.25	Etapes successives pour réaliser un changement d'outils	132
4.26	Essais de pelage d'un film de colle.	134
4.27	Trois types de contacts actionneur-outils	134
4.28	Détermination des forces limites de micromanipulation.	135
4.29	Schéma du système expérimental utilisé pour les mesures de répétabilité de changement d'outils	136
4.30	Dispersions de remise en position lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe X	136
4.31	Dispersions de remise en position lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe Y	138

4.32	Dispersions de remise en position lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe Z	139
4.33	Etude des températures de liquéfaction et de solidification de la colle dans un environnement à vide	140
4.34	Influence du dégazage de la colle dans le vide	141
4.35	Etapes du cycle de changement d'outils dans un MEB	142
4.36	Etapes successives permettant de régler la position relative de deux outils	142
5.1	Exemples d'opérations de micromanipulation et de micro-assemblage	147
5.2	Système utilisé pour effectuer des opérations de micromanipulation dans le cadre du projet ROBOSEM	148
5.3	Bactéries en présence d'un grain de roche (olivine)	149
5.4	Assemblage d'un roulement à billes dans un MEB	150
5.5	Essais mécaniques de nano-indentation et de nano-rayures	151
5.6	Billes de 50 μm de diamètre disposées autour d'une paire d'outils en nickel . .	152
5.7	Photographie du support compliant	153
5.8	Support compliant au repos en vue latérale.	154
5.9	Influence des paramètres a et P sur la sensibilité du support compliant.	156
5.10	Influence des paramètres a et P sur la sensibilité	156
5.11	Séquence de micro-assemblage d'un micro-mécanisme	157
5.12	Capteur d'effort fabriqué par technologies silicium	158
5.13	Exemples de structures parallèles de la famille des plate-formes de Stewart. . .	159
5.14	Détails des systèmes à ressorts équipant le support compliant	161
5.15	Photographie du support compliant instrumenté	162
5.16	Caractéristiques du capteur SFH 900	163
5.17	Mouvement du plan de travail lorsque celui-ci subit une force verticale appliquée en son centre.	163
5.18	Comparaison modèle-mesures lorsque le plan de travail subit un déplacement vertical.	164
5.19	Schéma du support compliant et notations.	165
5.20	Exemples de structures envisageables de support compliant possédant six systèmes ressorts-capteurs	170
5.21	Ajout d'éléments de positionnement à l'interface outil-actionneur	173
5.22	Système de connecteur électrique pour changement d'outils	173
A.1	Modèle de poutre encastrée-libre subissant une force de flexion selon l'axe Z. .	175
A.2	Répartition de contraintes à l'extrémité d'une poutre subissant une force de flexion selon Z.	176
B.1	Forces en jeu lors du maintien d'un objet entre les doigts de la micropince. . . .	179
C.1	Système résistance-outil utilisé pour effectuer des simulations sous FEMLAB. .	182
C.2	Système élément chauffant-résistance-outil utilisé pour effectuer des simulations sous FEMLAB.	183

C.3	Comparaison des mesures et des résultats issus du modèle développé sous FEM-LAB	184
C.4	Etude de l'influence du rayonnement par éléments finis (FEMLAB) sur la température des points A et B en régime stationnaire pour le système résistance-outil.	184
D.1	Mesures de températures effectuées en régime stationnaire sur les systèmes résistance-outil	186
F.1	Caractéristiques dimensionnelles et brochage du capteur SFH 900.	194
F.2	Montage électronique permettant de traiter la tension délivrée par le capteur SFH 900.	194

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques de la micropince MMOC à quatre DDL	56
2.2	Caractéristiques des axes linéaires constituant la station de micromanipulation modulaire.	61
2.3	Caractéristiques du robot MM3A à trois DDL.	62
2.4	Critères de comparaison des différentes solutions techniques pour réaliser une station de micro-assemblage flexible travaillant de manière automatique dans des espaces confinés.	70
3.1	Paramètres d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique.	78
3.2	Paramètres permettant la déflexion d'une poutre piézoélectrique.	87
3.3	Valeurs numériques de la force d'attraction des deux électrodes pour une permittivité du diélectrique $\varepsilon_r = 5$	93
4.1	Tableau des notations utilisées.	104
4.2	Valeurs numériques mesurées des coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil pour trois systèmes	122

Remerciements

Avant toute chose, la thèse représentant l'aboutissement de mes études, je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux à mes parents ainsi que mon frère pour les sacrifices consentis et leur soutien constant tout au long de ces années. Je tiens d'ailleurs à leur dédier ces travaux.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au Laboratoire d'Automatique de Besançon au sein du groupe "microrobotique, micromécatronique". Je tiens donc à remercier tout particulièrement notre directeur, Monsieur Alain Bourjault, professeur à l'ENSMM, de m'avoir offert d'excellentes conditions pour effectuer ces travaux de recherche.

J'adresse toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse, Messieurs Nicolas Chaillet, professeur à l'université de Franche-Comté et Arnaud Hubert, Maître de Conférences à l'université de Franche-Comté pour leur encadrement remarquable. Leur compétence, leur disponibilité, leur confiance et les échanges nourris que nous avons eus tout au long de ces années m'ont beaucoup appris.

J'exprime tout ma gratitude à Messieurs Tanneguy Redarce, Professeur à l'INSA Lyon et Marc Arsicault, Maître de Conférences HDR, à l'université de Poitiers pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ces travaux et pour les discussions enrichissantes que nous avons eues.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Monsieur Christian LExcellent, professeur à l'ENSMM, d'avoir présidé ma soutenance de thèse ainsi que Jacques Glangloff, professeur à l'ENSPS, d'avoir accepté de juger ces travaux.

Je ne saurais oublier de remercier Emmanuel Foltête pour son aide précieuse ainsi que Bernard Lang pour son expérience déterminante. Merci également à Joël Agnus, Michaël Gauthier, Ricardo Perez, Yuji Urhushima pour leur contribution ainsi qu'aux collaborateurs et amis qui m'ont permis d'effectuer de nombreux essais, en particulier Stephan Fahlbusch, Jörg Zenke, Johann Michler, Mickael Hiltl, Jean-Marc Breguet et Sébastien Mazerolle.

Je ne terminerai pas ces remerciements sans avoir une pensée sympathique pour tous les enseignants, les collègues, les amis, les proches ainsi que ma copine pour leur soutien, leurs encouragements, leur aide ainsi que pour l'excellente ambiance de travail pendant ces trois années.

Introduction

Depuis une dizaine d'années, les thématiques de recherches liées à la micromanipulation et au micro-assemblage ne cessent de se développer [Bru00]. Elles s'appliquent à des objets ou composants microscopiques, c'est-à-dire de dimensions généralement comprises entre 1 μm et 1 mm. Elles correspondent notamment à des besoins liés à l'assemblage de micro-engrenages, de sources laser, de composants optiques sur des substrats silicium (lentilles, fibres), de capsules endoscopiques ainsi que la manipulation de cellules biologiques et de poudres cosmétiques. Sur un plan général, les domaines applicatifs sont donc divers et concernent la micro-mécanique, l'optique, les micro-systèmes, la micro-électronique mais également la médecine, la biologie et la pharmacie.

La manipulation d'objets et l'assemblage de composants constituent des problématiques scientifiques très différentes selon que l'on considère des objets microscopiques ou des objets de dimensions millimétriques ou centimétriques [Men04][Bou02]. Tout d'abord, les phénomènes d'adhésion des objets microscopiques dus aux forces surfaciques (capillarité, électrostatiques, Van der Waals) deviennent prépondérants devant les effets de la gravité [Fea95]. Ces forces agissent au contact d'un objet avec un autre (effecteur, plan de travail, autre objet) mais également à distance, rendant les opérations de prise et de dépose particulièrement délicates. Pour améliorer la faisabilité de ces opérations, de nombreuses équipes de recherche s'attachent à modéliser, voire à contrôler ces forces [Rou05][Lam05]. Ceci est une étape nécessaire dans un but d'automatisation de tâches de micromanipulation. Les solutions consistent soit à réduire les effets néfastes des forces d'adhésion ou alors, à l'inverse, de les utiliser à bon escient. Pour cette raison, des effecteurs particuliers (de type micro-levier par exemple), des systèmes permettant la manipulation d'objets sans qu'il y ait contact mécanique avec le préhenseur ainsi que de nombreuses techniques adaptées à la micromanipulation sont développées.

Notons également que les objets microscopiques sont généralement fragiles (faibles dimensions, matériaux particuliers), de ce fait, les efforts exercés, pendant leur manipulation, doivent être adaptés et contrôlés.

De plus, en micromanipulation, la visualisation de la scène nécessite d'utiliser un système de vision dont la résolution doit être compatible avec les dimensions des objets considérés. Dans ce but, des microscopes optiques, voire même des microscopes électroniques à balayage sont utilisés. Certaines applications localisées dans des espaces confinés nécessitent des systèmes de visualisation de dimensions compatibles avec l'environnement (fibroscopes, micro-caméras).

Les opérations de micromanipulation ainsi que l'assemblage de micro-composants peuvent être effectués de manière manuelle ou robotisée. Pour les grandes séries de pièces, les opérations sont plutôt effectuées de manière parallèle [Boh98] alors pour les petites séries, elles sont plutôt réalisées les unes à la suite des autres (procédé sériel). Dans ce dernier cas, un robot micromanipulateur (ou micro-robot) est utilisé. Il génère des mouvements entre un micro-préhenseur et l'objet à manipuler. Les résolutions nécessaires sont souvent comprises entre quelques dizaines de nanomètres et quelques micromètres. Ainsi, les technologies utilisées sont particulières à la micro-robotique, où, les matériaux actifs, notamment piézoélectriques, prédominent pour la réalisation de leurs actionneurs. Par rapport à l'échelle macroscopique, les structures des micromanipulateurs doivent également être très compactes, de manière à garantir une meilleure rigidité et une meilleure précision.

Les systèmes robotisés utilisés à des fins de micromanipulation et de micro-assemblage peuvent fonctionner de manière téléopérée ou totalement automatique. De même, ils peuvent être particulièrement flexibles ou complètement dédiés, comme c'est le cas dans l'industrie micro-électronique. Un système flexible permet de réaliser des séquences d'opérations différentes sans avoir à changer sa structure. L'automatisation d'opérations est, quant à elle, particulièrement utile pour réaliser des séquences d'opérations identiques, avec une qualité constante. Toutefois, les phénomènes d'adhésion rendent ces opérations particulièrement compliquées et nécessitent d'utiliser de nombreux capteurs. Ceux-ci doivent traiter des informations visuelles ou d'effort d'interaction dans plusieurs directions de l'espace. Ces deux points sont particulièrement délicats lorsqu'il s'agit d'objets microscopiques où le bruit des mesures et les perturbations sont souvent de l'ordre de grandeur de la mesure elle-même.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent le développement de moyens robotisés utiles à la micromanipulation et au micro-assemblage. Le but est de contribuer à la réalisation d'un système flexible capable de manipuler et d'assembler automatiquement des micro-composants notamment dans la perspective de réalisation d'une micro-usine. Le premier chapitre s'attache aux enjeux de la micromanipulation et du micro-assemblage effectués à l'aide de systèmes robotisés. Dans ce but, un état de l'art est présenté et commenté. Il concerne principalement les systèmes de micro-positionnement, les fonctions de préhension et les capteurs extéroceptifs.

Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des précédentes réalisations du laboratoire concernant la micro-robotique. Celles-ci sont, ainsi, succinctement présentées dans le deuxième chapitre et conduisent au développement de deux stations de micromanipulation. Effectuer des opérations de micro-assemblage nécessite l'utilisation séquentielle d'outils différents et dédiés à chaque opération à effectuer. Afin d'améliorer la flexibilité de ces stations de micromanipulation et après comparaison de plusieurs solutions, la proposition, que nous formulons dans notre travail de recherche, est l'étude et le développement d'un système permettant de changer les organes terminaux d'un microprehenseur à doigts de serrage (c'est-à-dire les extrémités, rapportées sur le préhenseur, qui sont en contact avec les objets à manipuler).

Ce système de changement d'outils consiste à fixer temporairement les organes terminaux d'une micropince à l'extrémité de l'actionneur de celle-ci ou dans un magasin d'outils. Plu-

sieurs types d'organes terminaux sont disponibles dans le magasin et peuvent donc être utilisés séquentiellement. Les stations de micromanipulation équipées de ce système de changement d'organes terminaux permettent alors de manipuler des micro-objets de géométries, matériaux, dimensions et propriétés mécaniques très divers. Le troisième chapitre présente ainsi différentes solutions techniques adaptées à la réalisation d'un tel système de fixation temporaire. Parmi ces solutions, celle que nous avons retenue est fondée sur l'utilisation d'une colle thermique. A l'instar d'une cire, celle-ci peut être liquéfiée par simple chauffage et solidifiée par refroidissement de manière cyclique.

Le quatrième chapitre présente la modélisation des phénomènes thermiques se produisant dans les organes terminaux lors d'un changement. Cette modélisation conduit, entre autres, au dimensionnement de la commande de ce système pour un fonctionnement en mode automatique. Pour conclure ce chapitre, différentes expérimentations sont présentées, permettant de valider les modèles obtenus et de caractériser le système de changement d'organes terminaux.

Plus généralement, pour étudier le fonctionnement des stations de micromanipulation équipées du système de changement d'organes terminaux, différentes opérations de micromanipulation et de micro-assemblage ont été réalisées. Elles sont présentées dans le cinquième chapitre. Enfin, pour améliorer ces systèmes de manipulation, le plan de travail (surface où sont déposés les objets à manipuler) est monté sur une structure compliant. Cette structure est également présentée et différentes possibilités de l'utiliser pour la mesure d'effort sont explorées.

Chapitre 1

Problématiques de la micromanipulation et du micro-assemblage

Ce chapitre présente tout d'abord les besoins d'effectuer des opérations de micro-manipulation ou de micro-assemblage et leurs spécificités. Différentes équipes de recherche ont développé des systèmes robotisés proposant des solutions intéressantes comme alternatives aux moyens plus répandus de type manuel ou utilisant des machines dédiées. Les systèmes présentés fonctionnent majoritairement en mode téléopéré et assez peu en mode automatique. Ils sont habituellement réalisés par assemblage d'éléments permettant le positionnement, la préhension, la visualisation ou la mesure. L'état de l'art de ces systèmes est présenté et met en avant les enjeux que représente la réalisation d'un système permettant la micromanipulation et le micro-assemblage de manière flexible et automatique dans des espaces confinés.

1.1 Introduction

Depuis plusieurs années les problématiques scientifiques liées à la micro-robotique et plus particulièrement au micro-assemblage n'ont cessé de se développer. En effet, le désir de réaliser des systèmes de plus en plus compacts et "intelligents" accompagne les progrès effectués dans le domaine des MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) ou plus généralement des composants et produits de très petites dimensions constitués par assemblage de micro-objets.

Les MEMS sont des systèmes qui intègrent des composants réalisant des fonctions différentes (principalement mécaniques, électroniques, thermiques, électrotechniques ou optiques).

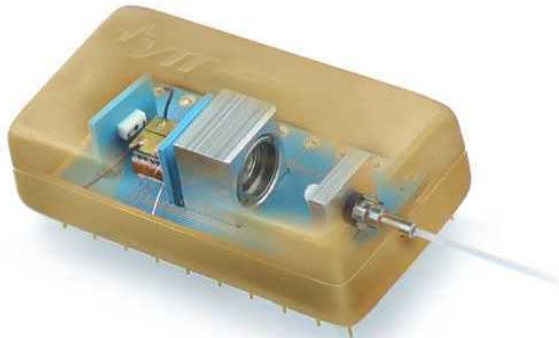


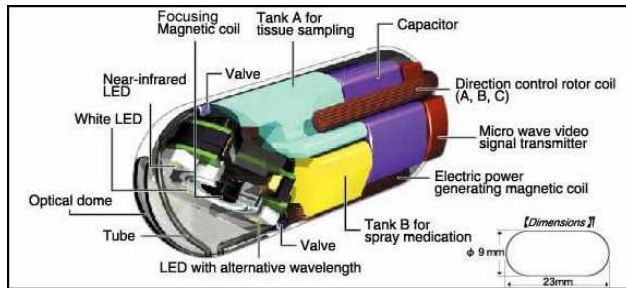
FIG. 1.1 – Exemple de MEMS optique : développement d'un module laser à longueur d'onde variable (Université de Oulu, Finlande) [Inf].

Ils sont usuellement réalisés par des technologies de micro-fabrication en salle blanche. Celles-ci permettent de fabriquer en lots, et avec précision, des systèmes complexes. Par exemple, les accéléromètres miniatures ou les têtes d'impression sont actuellement réalisés grâce à cette technique.

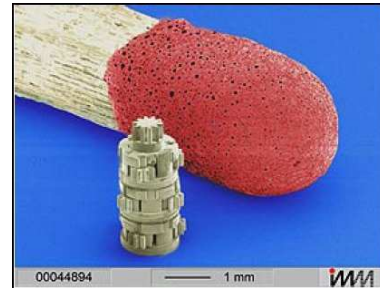
Depuis quelques années, les procédés de micro-fabrication sont de plus en plus élaborés. Cependant, ces moyens de fabrication rencontrent des limitations principalement dues aux matériaux utilisés. En effet, leur diversité est limitée et les procédés les mettant en œuvre sont parfois incompatibles entre eux. Par exemple, les technologies et matériaux permettant de réaliser des MEMS sont souvent incompatibles avec ceux des filières usuelles de l'électronique (CMOS). Ainsi, le micro-assemblage permet d'assembler des pièces de natures différentes et dont les moyens de fabrication sont incompatibles entre eux. Cela permet de réaliser des MEMS de plus en plus complexes et intégrant de plus en plus de fonctionnalités. La FIG. 1.1 présente un exemple d'un MEMS résultant de l'assemblage de différents composants.

Plus généralement, des phases de micro-assemblage permettent de réaliser des composants constitués de pièces de natures différentes fabriquées séparément. Il peut s'agir de micro-mécanismes (micro-pompes, micro-relais, commutateurs optiques, systèmes de dosage), de capteurs (pression, température, composition chimique ou d'effort), de systèmes optiques (sources laser, connecteurs optiques, micro-miroirs) ou de systèmes pour la médecine (systèmes endoscopiques, outils chirurgicaux, systèmes d'analyses). La FIG. 1.2 présente quelques exemples de réalisations.

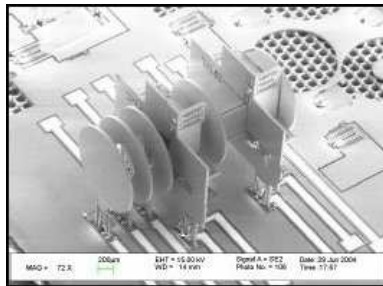
Qu'il s'agisse de MEMS ou de composants assemblés, la diversité des systèmes dont la réalisation nécessite des phases de micro-assemblage est très importante. De plus, la micro-robotique et le micro-assemblage ont connu des développements rapides ces dernières années. Dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire, nous avons émis certaines hypothèses et considéré certaines restrictions.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 1.2 – Exemples de micro-systèmes assemblés : (a) capsule endoscopique miniature NO-RIKA de 9 mm de diamètre [NOR] ; (b) système d'engrenage composé de trains épicycloïdaux miniatures (Institut für Mikrotechnik Mainz [IMM]) ; (c) spectromètre de masse miniature de dimensions $2 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ (Zyvex [Ude05]) ; (d) nanomoteur[®] (Klocke Nanotechnik [Nan]).

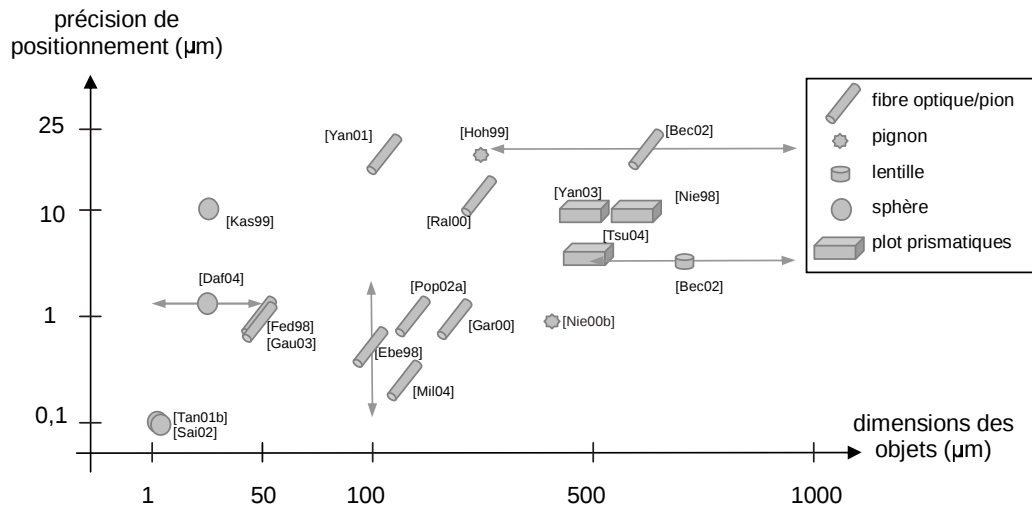


FIG. 1.3 – Exemples d’objets manipulés et précision de dépose (nécessaire ou effectuée réellement). Les dimensions correspondent au diamètre pour les fibres optiques, pour les autres, il s’agit de la plus grande dimension de l’objet.

Tout d’abord, nous allons considérer que les phases d’assemblage de systèmes dont les pièces ont des dimensions de plus de 1 mm ou dont la précision de positionnement¹ est supérieure à 25 μm requièrent l’utilisation de robots précis mais conventionnels, cela ne concerne donc pas le micro-assemblage.

De même, nous considérerons que les opérations portant sur des objets de dimensions inférieures au micromètre concernent le domaine de la nanomanipulation. Elles requièrent des moyens spécifiques tels que des STM (microscope à effet tunnel) ou AFM (microscope à force atomique) et ne seront pas traités dans ce mémoire.

Ainsi, nous considérons que le micro-assemblage est une séquence d’opérations élémentaires (micromanipulation, fixation, gravure,...) effectuées sur des objets dont les dimensions sont comprises entre 1 μm et 1 mm. La majorité des études récentes sur le sujet utilisent des hypothèses similaires [Yan03] [Bru00] [Pop02b] [Pei01].

Enfin, dans ce mémoire, nous considérerons principalement les opérations de micromanipulation, les autres opérations (solidarisation, contrôle, gravure par exemple) n’étant pas approfondies.

1.2 Particularités du micro-assemblage

Assembler des micro-objets est complexe et nécessite l’utilisation de technologies adaptées. Tout d’abord, il est nécessaire d’utiliser un système permettant de générer des mouvements re-

1. Par "précision de positionnement", nous entendons la distance séparant un point d’un objet déposé et la cible que ce point aurait dû atteindre.

latifs entre un effecteur (qui pourra être un préhenseur ou un outil) et un objet, pour permettre sa manipulation. Les résolutions de ce système, que nous appellerons manipulateur, sont en regard avec les dimensions des objets manipulés. La précision de positionnement est souvent fondamentale, par exemple, fixer une lentille à l'extrémité d'une fibre optique de 200 μm de diamètre avec une erreur de positionnement de 1 μm ou d'orientation de 0,4 μrad engendre une perte de 50 % de l'intensité lumineuse [Gar00]. Ainsi, la FIG. 1.3 fait état d'exemples de précisions de manipulations en fonction des caractéristiques des composants manipulés (formes, dimensions). Il est également nécessaire d'utiliser un système permettant de visualiser la scène avec une résolution suffisante, ou des capteurs permettant de mesurer les efforts en jeu. De même, les outils utilisés pour manipuler ces micro-objets doivent être adaptés à leurs particularités (taille, fragilité, forme) [Tic04]. L'environnement de travail (propreté, encombrement) joue également un grand rôle [Zho04].

1.2.1 Problèmes d'adhésion

La micromanipulation couvre un large spectre de dimensions puisqu'elle s'adresse à des objets dont les dimensions varient de 1 μm à 1 mm. La manipulation des objets les plus gros de ce spectre, c'est-à-dire dont les dimensions sont globalement supérieures à environ 100 μm , peut généralement être effectuée de manière automatique² sans utiliser de commande référencée capteur. Par exemple, une pince peut saisir un objet dont la position est connue puis le déplacer. Lorsque la pince s'ouvre, l'objet est libéré à l'endroit désiré. Lorsqu'il s'agit de manipuler des objets de dimensions globalement inférieures à environ 100 μm , les effets de forces d'adhésion surfaciques deviennent prépondérants réduisant rapidement le caractère déterministe des opérations de micromanipulation [Fea95].

Les phénomènes d'adhésion interviennent à distance ou au contact de deux surfaces et sont de trois natures :

- des charges s'accumulent sur la surface des objets, outils ou substrats et engendrent des forces électrostatiques ;
- la présence de liquide, due à l'humidité ambiante par exemple, au contact de deux micro-objets engendre des forces de capillarité ;
- les molécules de deux objets proches interagissent et engendrent les forces de Van der Waals.

L'ensemble de ces forces d'adhésion ont des effets prépondérants en micromanipulation puisqu'elles peuvent agir quand deux micro-objets sont en contact mais également à distance [Bru00]. De nombreuses équipes de recherche se sont attachées à développer des modèles [Fea95] [Ara95] qui ont été enrichis depuis afin de prévoir et quantifier l'influence de ces divers efforts [Miy00b] [Zho00] [Lam03] [Sav04]. Ceux-ci perturbent les contacts entre un objet et son préhenseur, entre un objet et le substrat (site de prise ou de dépose) ou entre deux objets. Ainsi, la prise d'un objet peut être rendue difficile, l'objet pouvant être repoussé par un préhenseur avant même que celui-ci n'ait réussi à le saisir. De même prendre un seul objet choisi parmi un

2. Le mode automatique caractérise une séquence programmée réalisée automatiquement par une cellule de manipulation à l'instar des systèmes robotisés macroscopiques.

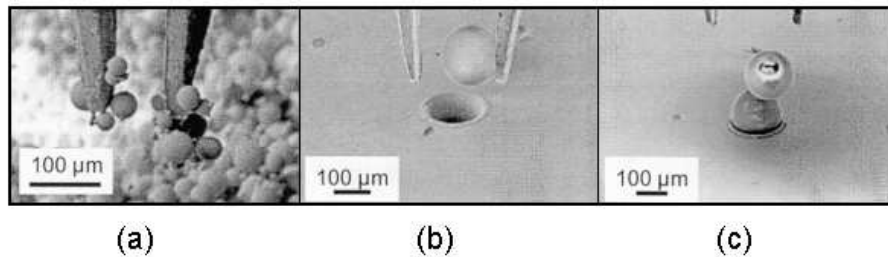


FIG. 1.4 – Illustrations des phénomènes d’adhésion : (a) difficultés de prendre un micro-objet parmi un ensemble (b) adhésion du micro-objet au préhenseur lors d’une phase de dépose (c) adhésion de deux micro-objets entre eux.

ensemble, peut être rendu difficile (FIG. 1.4 (a)). La dépose de micro-objets est l’opération rendue la plus délicate par les effets d’adhésion (FIG. 1.4 (b) et (c)), l’objet adhérant généralement à son préhenseur.

Pour réaliser des opérations de micromanipulation avec succès, de nombreuses solutions existent. Il est notamment possible de réduire les effets d’adhésion en prenant certaines précautions. Seules les principales solutions détaillées dans la littérature seront présentées ici. Tout d’abord, le milieu joue un rôle prépondérant [Gau05], une opération de micromanipulation pouvant avoir lieu dans l’air, dans un liquide ou dans le vide [Sai02] [Miy00b]. Dans l’air, une atmosphère sèche diminue considérablement les forces de capillarité [Zho04]. Les forces électrostatiques, quant à elles, peuvent être réduites en utilisant des matériaux conducteurs reliés à la masse (pour les effecteurs et le substrat). La surface de contact entre un objet et le préhenseur ou le substrat joue également un rôle important : plus elle est faible, plus les forces d’adhésion diminuent [Ara98][Koy96]. De même, la rugosité des effecteurs et du substrat doit être convenablement choisie, une rugosité trop importante engendre des phénomènes de micro-tribo-indentation alors qu’une rugosité trop faible favorise les effets d’adhésion [Wec04].

L’ensemble de ces précautions ne suffit pas toujours à garantir le bon déroulement d’une opération de micromanipulation. Les formes du préhenseur ont une influence directe de même que ses trajectoires pendant les phases de dépose. Leur étude, ainsi que la bonne connaissance des forces d’adhésion en jeu, permet d’accroître les chances de succès des phases de dépose [Sav04]. Parfois, il est nécessaire d’utiliser des techniques complémentaires. Nous pouvons par exemple citer la dépose d’objets par accélération de l’effecteur [Lam03] et l’utilisation de phénomènes tels que la diélectrophorèse [Ros05] ou la pression tribologique (“squeeze effect”) [Wat04].

Les travaux de certaines équipes scientifiques montrent qu’il est possible de réaliser des opérations de micromanipulation en utilisant les effets d’adhésion à bon escient en utilisant des outils particuliers ou des techniques adaptées permettant de contrôler la surface de contact entre objet et outils [Lam05] [Dri05a]. Il est aussi possible d’utiliser les effets de capillarité en essayant de maîtriser la quantité de liquide à la surface de l’objet [Lam03]. Certains ont étudié

des solutions fondées sur la maîtrise de la température de l'effecteur. Dans [Liu04], on utilise une goutte d'eau à l'interface objet-préhenseur que l'on gèle ou liquéfie pour prendre ou déposer l'objet. Un principe relativement similaire est présenté dans [Ara97] où, cette fois ci, le préhenseur est chauffé pour faire disparaître l'humidité au contact préhenseur-objet et ainsi libérer l'objet.

Finalement, les principales solutions permettant la réalisation d'opérations de micromanipulation sont les suivantes :

- utiliser des techniques de manipulation sans contact avec l'objet, par utilisation de champs magnétiques ou électrostatiques, d'ultra-sons, de pression lumineuse ("laser trapping") ou de diélectrophorèse négative [Lam04][Her05] ;
- réduire les effets d'adhésion [Ara95] [Fea95] ;
- utiliser ces effets d'adhésion à bon escient [Lam05] ;
- effectuer une dépose dynamique de l'objet par accélération de l'effecteur [Wec03].

Malgré tout, la communauté scientifique s'accorde encore aujourd'hui à dire que la maîtrise de la position de dépose de micro-objets est particulièrement difficile et représente un obstacle conséquent à l'automatisation de tâches de micro-assemblage.

1.2.2 Contraintes liées à la dextérité

Des évolutions récentes permettent de fabriquer des objets de plus en plus petits et complexes. Leur assemblage devient donc de plus en plus délicat. Pour manipuler des micro-objets, il est nécessaire d'utiliser des outils que l'on appelle aussi effecteurs. Ceux-ci peuvent être utilisés lors d'opérations manuelles ou montés à l'extrémité d'un manipulateur. Les performances des manipulateurs de précision ne sont plus suffisantes sauf à des coûts importants (systèmes dédiés) [Fis98], expliquant en partie pourquoi, aujourd'hui, la majorité des opérations de micro-assemblage sont réalisées manuellement. Mais, cela engendre de nombreux problèmes :

- les opérateurs doivent être doués d'une dextérité importante, ce qui peut conduire à des coûts de main d'œuvre importants [Cho03] ;
- la sensibilité humaine fait que les efforts appliqués sur les micro-objets pendant leur manipulation sont souvent bien trop importants, de nombreux objets ou systèmes sont régulièrement cassés [Yam01] ;
- le micro-assemblage manuel engendre une fatigue prématurée des opérateurs, diminuant leur constance et leur efficacité.

Pour pallier ces problèmes, de nouvelles technologies sont mises au point régulièrement dans le but de développer des systèmes robotisés. Ceux-ci permettent d'apporter une assistance à l'opérateur (système téléopéré) ou peuvent fonctionner de manière automatique selon les applications. Ils peuvent être composés de manipulateurs (effecteur fixé à un robot), de moyens de visualisation adaptés aux opérations à effectuer (dimensions des objets, résolution) et de capteurs permettant de mesurer les efforts en jeu.

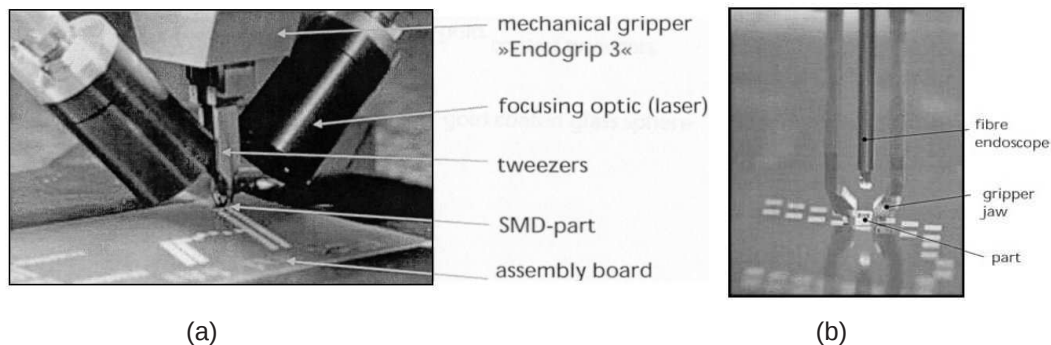


FIG. 1.5 – Exemples de systèmes de vision pour micromanipulation : (a) manipulateur équipé d'une micropince et de deux caméras ; (b) micropince équipée d'un endoscope de 0,8 mm de diamètre placé entre ses deux doigts [Wec03].

Manipulateurs

Nous avons vu que le micro-assemblage concerne des objets dont les dimensions sont comprises entre $1\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$. Un espace de travail de l'ordre de quelques centimètres cube est généralement suffisant [Sun05]. De plus, la précision nécessaire à la manipulation de micro-objets est souvent comprise entre $100\ \text{nm}$ et $25\ \mu\text{m}$ [Bru00] [Yan03] (voir FIG. 1.3). Ces caractéristiques sont liées aux applications étudiées et aux systèmes à assembler. Pour manipuler des micro-objets, il est donc nécessaire d'utiliser des effecteurs adaptés aux particularités de ceux-ci ainsi qu'un manipulateur dont les courses sont de l'ordre de quelques centimètres et dont les résolutions sont de l'ordre de la centaine de nanomètres. Ces résolutions sont, en général, incompatibles avec les technologies utilisées en robotique conventionnelle et nécessitent d'autres technologies, par exemple celles utilisant des structures compliantes (absence de jeu) ou des matériaux actifs pour les motoriser.

Visualisation de la scène

La manipulation de micro-objets nécessite d'observer la scène par l'intermédiaire d'un système de vision. Généralement, une vue large de la scène, permettant de contrôler les trajectoires et collisions des robots, ainsi qu'une vue précise centrée sur l'objet à manipuler sont utilisées. Pour visualiser des mouvements en trois dimensions, il est nécessaire d'utiliser au moins deux systèmes de visualisation (caméra, microscope par exemple) concentrés sur la zone d'intérêt. De plus, la visualisation d'objets dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre, notamment à des fins de traitement d'images, nécessite l'utilisation d'un système de vision dont la résolution est meilleure que $100\ \text{nm}$.

La résolution des caméras ou des microscopes optiques n'est pas suffisante et reste généralement limitée à la manipulation d'objets de dimensions caractéristiques de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$. Cette limite physique est liée à la longueur d'onde moyenne du spectre visible [Dio05]. Les objectifs utilisés sont généralement encombrants et offrent une profondeur de champ très faible (voir FIG. 1.5 (a)). L'utilisation d'endoscopes est intéressante du point de vue de l'encombre-

ment (FIG. 1.5 (b)) mais reste limitée en terme de résolution puisque la visualisation d'objets de dimensions inférieures à 500 μm demeure en général très difficile. Ces solutions permettent l'utilisation de flux vidéos utiles pour effectuer, par exemple, du traitement d'images, notamment pour envisager une commande référencée vision.

Pour manipuler des objets de dimensions inférieures à 10 μm , il est nécessaire d'utiliser des systèmes de visualisation apportant une meilleure résolution, c'est pourquoi, l'utilisation de Microscopes Electroniques à Balayage (MEB) est répandue. Un MEB est constitué d'une chambre à vide dans laquelle sont disposés les échantillons à visualiser. Un faisceau d'électrons scanne ces échantillons émettant des électrons secondaires. Ceux-ci sont ensuite recueillis par un collecteur permettant d'obtenir une image des échantillons. Cette technologie combine une résolution pouvant atteindre quelques nanomètres et une profondeur de champ importante pouvant être de l'ordre des dimensions de la chambre. Cependant, son utilisation impose des contraintes importantes quant au rafraîchissement des images, à l'encombrement, à la profondeur de champ qui rend l'appréciation des distances selon son axe difficile, ainsi qu'à la compatibilité MEB des matériels disposés dans la chambre. Un matériel est dit "compatible MEB" lorsque celui-ci permet au MEB de fonctionner normalement sans détérioration. Cela impose généralement trois contraintes :

- le dégazage : les matériels placés dans la chambre du MEB doivent dégazer le moins possible pour permettre d'atteindre d'une part la pression de mise en route du champ d'électrons, typiquement $1,5 \times 10^{-5}$ mbars, et, d'autre part, la meilleure visualisation possible (la qualité des images s'améliore lorsque la pression de la chambre diminue) ;
- les matériaux utilisés : l'image est obtenue par le balayage de la zone à visualiser par un champ d'électrons. Les matériels placés dans la chambre du MEB ne doivent donc pas engendrer de déviation de ce faisceau d'électrons, sans quoi l'image serait déformée. Les matériaux et principes utilisés influent directement sur les images réalisées. L'utilisation de matériaux conducteurs permet l'évacuation des électrons procurant des images de bonne qualité. L'utilisation d'éléments magnétiques (par exemple) engendre une déviation des électrons causant une distorsion des images ;
- les phénomènes physiques modifiés : de nombreuses constantes physiques dépendent de la pression. Ainsi, un système dont le fonctionnement a été étudié dans l'air peut voir son comportement fortement modifié lorsqu'il est placé dans la chambre d'un MEB.

Mesure d'efforts

La mesure des efforts en jeu lors des phases de micromanipulation permet généralement d'en améliorer les chances de réussite. En effet, la maîtrise des efforts de contact permet, d'une part, de préserver les micro-objets, généralement très fragiles et, d'autre part, de diminuer les phénomènes d'adhésion notamment lors des phases de dépose.

La réalisation de capteurs d'effort représente une réelle difficulté technologique. En effet, la plage des efforts à mesurer est généralement comprise entre 0 et 100 mN (variable selon les applications) [Fat00] [Car00] et la résolution nécessaire est de l'ordre de la centaine de micro-Newton pour l'assemblage [Sun05][Fat00][Yam03]. Cette résolution peut atteindre quelques



FIG. 1.6 – Exemple de réalisation d'une micro-usine [Tan01a].

dizaines de nano-Newtons lorsqu'il s'agit de mesurer les forces d'adhésions [Zho98] [Tan01b]. Le bruit généré par les capteurs est souvent important, celui-ci pouvant être de l'ordre des mesures à effectuer. De plus, l'encombrement de la zone de travail nécessite que les capteurs soient compacts. L'ensemble de ces contraintes rend la réalisation et l'exploitation de capteurs d'effort pour la micromanipulation particulièrement délicate.

1.2.3 Contraintes liées à l'environnement

Les opérations de micromanipulation peuvent être effectuées dans des milieux de natures différentes. Par exemple, les objets biologiques doivent être placés dans des milieux liquides. Dans ce cas, une partie du manipulateur est également placée dans ce milieu. Les objets artificiels, quant à eux, sont principalement manipulés dans l'air ou dans un milieu à environnement contrôlé [Zho04]. Pour réduire les effets des forces d'adhésion, il peut toutefois être intéressant d'effectuer des opérations de manipulation d'objets artificiels directement en milieu humide [Gau05]. De plus, nous venons de voir qu'il est parfois nécessaire d'utiliser un MEB. Dans ce cas, les opérations de micromanipulation sont directement effectuées dans la chambre du MEB donc dans le vide. Généralement, l'ensemble du manipulateur est inséré dans ce milieu.

Ainsi, les opérations de micromanipulation peuvent être effectuées en milieu liquide, dans l'air ou dans le vide. De plus, les espaces utilisables sont parfois confinés, notamment lorsqu'il est nécessaire d'effectuer des opérations de micromanipulation dans un MEB. Les différents manipulateurs, moyens de vision ou de mesure doivent donc prendre en compte ces particularités.

1.2.4 Le concept de micro-usine

Quelques équipes de recherches se penchent, depuis quelques années, sur le concept de micro-usine [Bre01]. Il s'agit de réaliser un système de production permettant de réaliser des

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLAGE

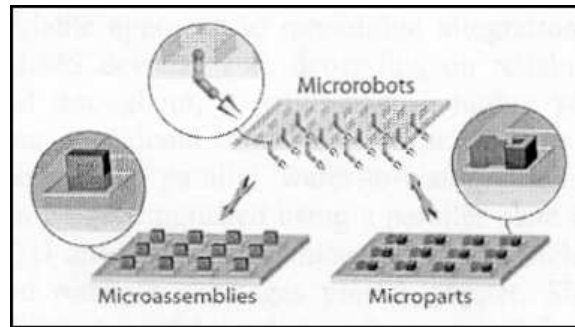


FIG. 1.7 – Assemblage parallèle réalisé avec plusieurs manipulateurs ou plusieurs effecteurs identiques effectuant simultanément la même séquence d'opérations [Pop02b].

micro-composants dans un espace restreint (souvent la taille d'une valise est prise pour exemple, voir FIG. 1.6) de manière à être transportable et à réduire les coûts de fabrication des micro-produits. Une micro-usine est flexible et facilement reconfigurable, permettant de changer de gamme de fabrication rapidement [Hat97] [Rak04]. Elle comporte différents modules compacts, fonctionnant ensemble et dédiés à la fabrication, l'assemblage, le test, la gravure, le transport, la mesure ou l'alimentation de composants [Gau04] [Fur99]. Compte tenu de ces aspects, les contraintes de réalisation d'une micro-usine concernent la modularité, les standards de communication ainsi que l'encombrement, puisque les dimensions des modules sont de l'ordre du décimètre cube. Ainsi, les travaux de recherche qui vont dans ce sens, notamment ceux concernant le développement de stations de micro-assemblage, doivent intégrer, autant que possible, ces contraintes.

1.3 Etat de l'art des différentes stations de micromanipulation et de micro-assemblage

1.3.1 Méthodes de micromanipulation et de micro-assemblage

Selon la nature des objets, différentes méthodes de micromanipulation et de micro-assemblage existent. Nous recensons les techniques sans contact (voir section 1.2.1) et les techniques où un contact entre préhenseur et objet est nécessaire (utilisation de pinces, pointes ou préhenseurs à dépression par exemple). Dans ce mémoire, nous nous intéresserons préférentiellement aux techniques de manipulation avec contact.

La taille des séries de pièces à assembler influence également les méthodes de micromanipulation. En micro-assemblage, nous considérerons que les petites séries concernent environ 10

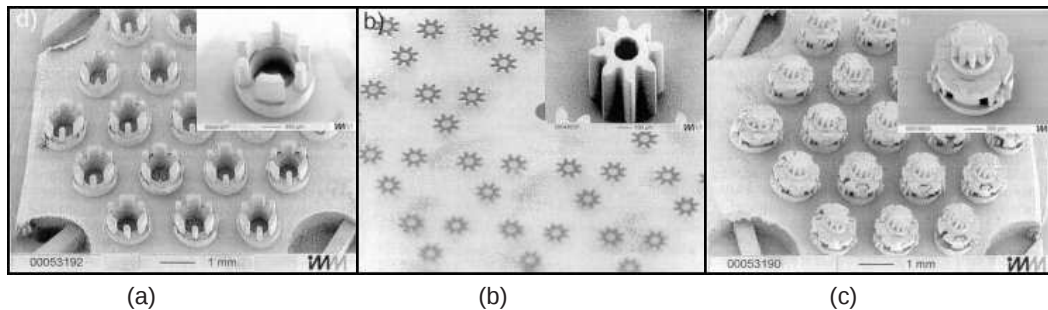


FIG. 1.8 – Assemblage en parallèle d’engrenages de diamètre extérieur de 1,9 mm [Ehr01] : (a) un ensemble de bases d’engrenages est fixé sur un plan de travail ; (b) un ensemble de pignons est pré-positionné et fixé dans de la cire puis assemblé sur l’ensemble des bases ; (c) après plusieurs opérations, un ensemble d’engrenages identiques est assemblé.

produits, les moyennes séries environ 100 et les grandes séries 1000 ou plus [Cho03] [Boh98]. Les grandes séries nécessitent l’utilisation de techniques de fabrication par lots :

- micro-fabrication par empilement de couches de matériaux différents et de couches sacrificielles. Par exemple, nous pouvons citer des travaux consistant à réaliser des structures 2D possédant des liens souples qui se déplient pour donner une structure 3D [Hui00] ;
- auto-assemblage, par exemple à partir des techniques d’agitation de fluide, vibrations, champs électrostatiques ou diélectrophorèse [Whi02][Coh98] ;
- assemblage parallèle multiple utilisant un principe permettant de maintenir puis de manipuler simultanément de nombreuses pièces identiques en utilisant, par exemple, plusieurs préhenseurs identiques travaillant en parallèle (FIG. 1.7) ou par technique de solidarisation par cire (FIG. 1.8).

Les petites et moyennes séries sont réalisées par utilisation de stations de micromanipulation. Celles-ci peuvent être utilisées en mode manuel, téléopéré ou automatique selon les applications. Les stations de manipulation sont généralement composées d’effecteurs fixés sur des robots, et de capteurs (optique ou d’effort). Finalement, des systèmes péri-micro-robotiques peuvent être utilisés permettant d’ajouter de la flexibilité ou des fonctionnalités comme l’alimentation et le transfert d’éléments. Le schéma FIG. 1.9 illustre les moyens robotisés nécessaires à l’assemblage de micro-composants.

1.3.2 Les différentes fonctions de préhension

L’état de l’art montre que pour manipuler des micro-objets, de nombreux principes de préhension sont utilisés [Tic04] [Men04]. Les plus répandus sont fondés sur l’utilisation de micropinces, de pointes, de préhenseurs à dépression ou des phénomènes d’adhésion. Ces fonctions de préhension peuvent être passives, actives (un ou plusieurs degrés de liberté), équipées de capteurs, ou faire état d’une compliance.

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLAGE

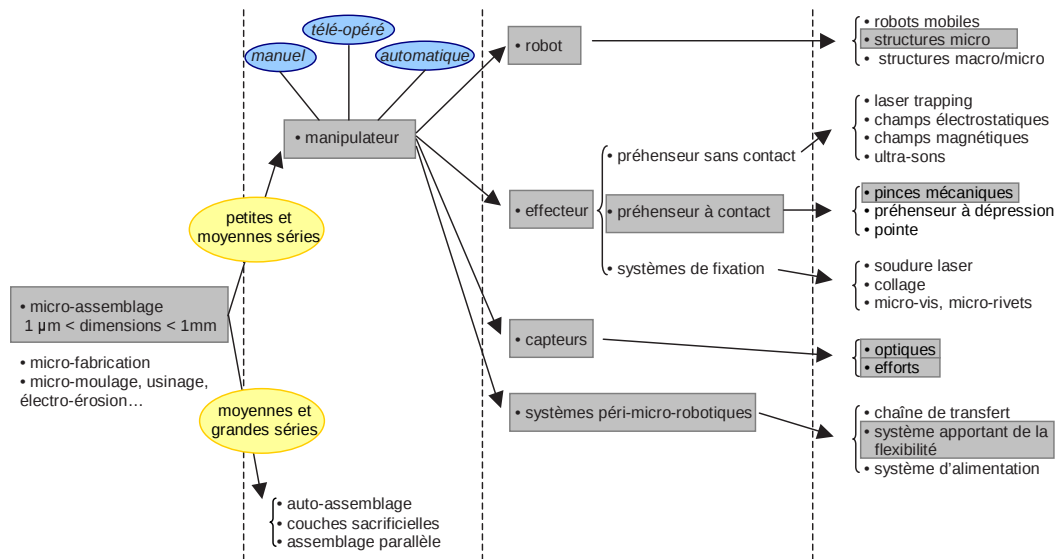


FIG. 1.9 – Moyens techniques à mettre en œuvre pour assembler des micro-composants. Les mots clés encadrés représentent les solutions techniques que nous avons développée dans le cadre de nos travaux.

Les préhenseurs de type micropinçe

Les micropinçes sont les organes de préhension les plus répandus, de nombreuses réalisations sont apparues [Agn05]. Lorsqu'il n'y a pas de problème d'adhésion, leur utilisation permet de maîtriser la position de l'objet une fois déposé. Selon les applications, leur conception est de nature plus ou moins complexe.

La majorité des micropinçes utilisées est composée de deux doigts de serrage parallèle. Quelques micropinçes sont passives, leur principe de fonctionnement est fondé sur la déformation mécanique de poutres (les doigts de la pince) [Dec04a]. Leur forme et leur dimensionnement dépendent des caractéristiques de l'objet à manipuler, ainsi, ce type de pince est généralement dédié et spécifique à une catégorie d'objets. De plus, pour déposer l'objet, une force de retrait doit être exercée, l'objet doit donc préalablement avoir été fixé à un support.

La majorité des micropinçes sont actives et différents moyens d'actionnement sont utilisés. Les plus courants sont la piézoélectricité, les alliages à mémoire de forme, les déformations thermiques, l'électrostatique ou la pression d'un fluide [Agn03a].

Les micropinçes utilisant la pression d'un fluide sont, en général, bistables. De plus, leur emploi peut s'avérer problématique compte tenu de la fragilité des micro-composants à manipuler [Daf04]. Elles sont donc principalement limitées à la manipulation d'objets non-fragiles classiquement de dimensions supérieures à 500 µm.

Les alliages à mémoire de forme, quant à eux, offrent des débattements importants mais sont fortement influencés par l'environnement (surtout sa température) [Bel99]. De plus, leur temps

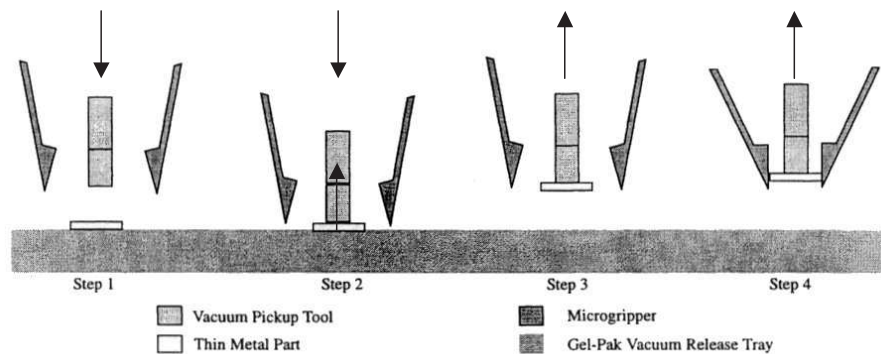


FIG. 1.10 – Combinaison de deux fonctions de préhension [Yan01]. étapes 1, 2 et 3 : un préhenseur à dépression permet de saisir et déplacer un micro-objet. étapes 4 : une micropince bloque l'objet permettant le retrait du préhenseur à dépression, ensuite, la micropince effectue l'opération de dépose de l'objet.

de réponse est important et ils possèdent une hystérésis importante. C'est probablement pour ces raisons que leur utilisation à des fins d'actionnement de micropinces décroît depuis quelques années.

L'utilisation d'éléments piézoélectriques offre une résolution importante et un temps de réponse faible. Cependant, leur faible déformation nécessite généralement de les empiler ou de les inclure dans une structure mécanique amplificatrice permettant d'obtenir des courses suffisantes [Agn05]. Leur utilisation comme moyen d'actionnement pour des micropinces est, à l'heure actuelle, largement répandue.

Pour finir, quelques réalisations sont fondées sur l'utilisation de principes électrostatiques (peignes inter-digités par exemple). Les déplacements générés sont faibles, de l'ordre de la dizaine de micromètres et peuvent difficilement être amplifiés par une structure mécanique. Leur utilisation est donc plutôt limitée à la manipulation d'objets de dimensions de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$.

Depuis quelques années des micropinces à plusieurs degrés de libertés sont réalisées [Kor05] [Agn03a]. De même, des principes utilisant deux pointes perpendiculaires actionnables séparément ont été développés [Shi00] [Dri05a] [Wat04]. Cet apport de dextérité au niveau de la fonction de préhension permet de remplacer des systèmes habituellement utilisés pour positionner finement le plan de travail (surface où sont déposés les objets à manipuler). Ainsi, le plan de travail peut être fixe et donc toujours dans le plan focal d'une caméra qui serait elle aussi fixe.

Les préhenseurs à dépression

Zesch et al. ont établi que les préhenseurs à dépression sont utilisables pour manipuler des micro-objets dont les dimensions sont supérieures à $100\ \mu\text{m}$ [Zes97]. Utilisant une seringue, ils ont constaté que ce principe était valide pour la manipulation de composants de géométries aléatoires (morceaux de diamants très petits). Ils ont également constaté la nécessité d'utiliser des techniques ou outils annexes pour palier les phénomènes d'adhésion supplémentaires

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLA

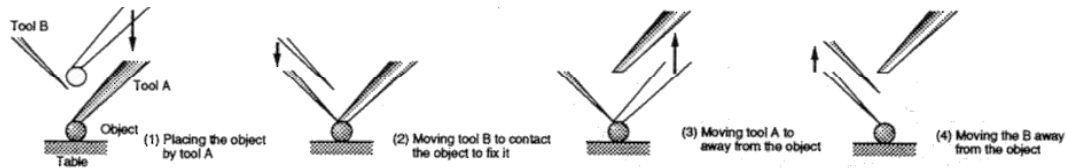


FIG. 1.11 – Utilisation de deux pointes pour la manipulation de micro-objets [Koy96]. Une pointe (tool A) est utilisée pour saisir l'objet et le transporter tandis que la pointe B plus fine permet de maintenir l'objet pendant le retrait de la pointe A, ses faibles dimensions lui permettent alors de déposer l'objet.

engendrés par le principe de succion. Il est ainsi possible d'utiliser une pointe fine ou une micropince pour maintenir le composant permettant le retrait du préhenseur à vide (FIG. 1.10).

Ce type de préhenseur est généralement peu encombrant et bon marché notamment lorsqu'il s'agit de seringues. Il permet également de manipuler une grande variété de composants de géométries, dimensions et matériaux très différents. Pour ces raisons, plusieurs équipes de recherches l'utilisent [Sun05][Zho04] [Bru00].

Les préhenseurs de type pointe

L'état de l'art montre que l'utilisation de micropinces et de préhenseurs à vide est répandue mais limitée à la manipulation d'objets de dimensions généralement supérieures à une centaine de microns. Cette constatation s'explique principalement par les phénomènes d'adhésion déjà mentionnés, dont les effets deviennent dominants à cette échelle même dans des conditions favorables (hygrométrie, rugosité, matériaux,...). Pour manipuler de tels objets, plusieurs équipes développent des principes de manipulation utilisant ces phénomènes d'adhésion (cf. section 1.2.1).

La solution la plus répandue pour la manipulation d'objets de dimensions typiquement inférieures à $100\ \mu\text{m}$ consiste à utiliser une pointe, voir un levier d'AFM (Microscope à Force Atomique) [Taf05]. Pour effectuer la prise d'un objet déposé sur un substrat, la surface de contact entre la pointe et l'objet doit être suffisante pour garantir que les forces d'adhésion au contact outil-objet soient supérieures à celles du contact objet-substrat. Une fois l'objet saisi par la pointe, il est possible de le déplacer jusqu'au site de dépose. Pour déposer l'objet, à l'inverse de l'opération de prise, il est nécessaire que les forces d'adhésion entre l'objet et le substrat soient supérieures à celles entre l'objet et l'outil. Ces deux conditions conduisent à la manipulation d'un micro-objet à l'aide d'une pointe mais semblent contradictoires.

Récemment, il a été démontré que pour un objet et une pointe de géométries connues, il existe une limite de poids supérieure qui permet la prise d'un objet, et une limite inférieure permettant sa dépose [Lam05]. Ainsi, il est possible de réaliser une pointe qui permettra à la fois la prise et la dépose d'un objet. Cependant, de nombreuses équipes de recherche éprouvent des difficultés lors de l'opération de dépose. Différentes techniques ont donc été mises au point

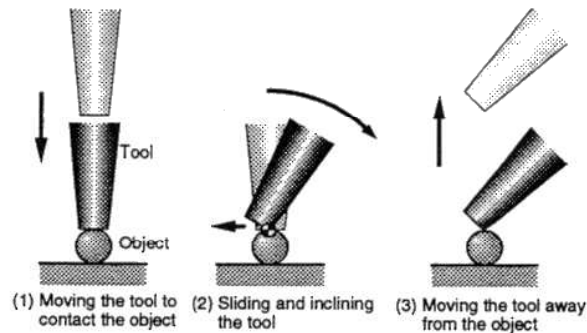


FIG. 1.12 – Prise et dépose d'un micro-objet par orientation de l'outil [Koy96] [Kas99]. Cette orientation (phase 2) permet de contrôler la surface de contact entre objet et outil et donc les forces d'adhésion. Une surface de contact importante permet de saisir et transporter l'objet (phase 1) tandis qu'une surface de contact faible permet de déposer l'objet (phase 3).

permettant d'améliorer l'efficacité de l'opération de dépose, les techniques suivantes ont été effectuées en mode automatique :

- utilisation de deux outils de différentes dimensions, une permettant la prise de l'objet, l'autre étant utilisée pour la phase de dépose (FIG. 1.11) ;
- utilisation d'une technique de dépose de l'objet par orientation de l'outil permettant de modifier la surface de contact entre l'objet et l'outil (FIG. 1.12) ;
- réalisation d'un dégagement de la pointe selon une trajectoire perpendiculaire à la normale du contact objet-outil [Sai99].

Les préhenseurs dédiés à des applications particulières

Certaines applications, de par leurs spécificités, permettent ou nécessitent l'utilisation de préhenseurs particuliers. Par exemple, la manipulation d'objets transparents peut être effectuée par laser trapping. Cette méthode est principalement utilisée pour des objets biologiques mais est applicable à des objets artificiels. De même, l'analyse de cristaux de protéines par rayon X nécessite leur manipulation. Leurs caractéristiques particulières (transparence, formes aléatoires, dimensions pouvant aller jusqu'à quelques microns) ont conduit au développement de préhenseurs spécifiques comme un lasso miniature en nylon ou une micro-pelle [Geo04] [Oha04]. Ces applications particulières restent marginales mais correspondent à un besoin d'automatisation bien réel et montrent que la diversité des outils nécessaires et dédiés en micromanipulation est une réalité.

Conclusion

Pour manipuler des objets de dimensions comprises entre $1\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$, plusieurs fonctions de préhensions peuvent être utilisées. La FIG. 1.13 fait le bilan de celles utilisées dans la littérature. Cette figure montre qu'il existe une zone de transition autour de $100\ \mu\text{m}$ et qu'il

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLA

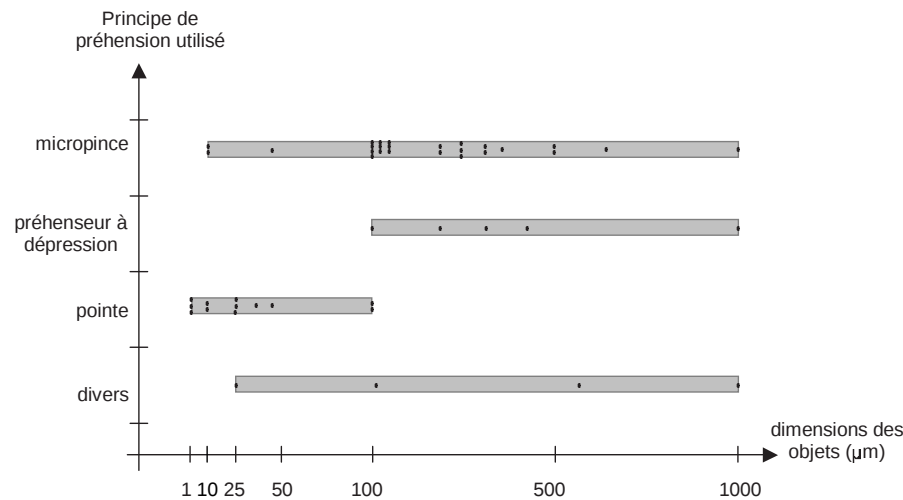


FIG. 1.13 – Fonctions de préhensions utilisées selon les dimensions de l'objet manipulé. Chaque point représente un système qui a été effectivement utilisé pour réaliser des opérations de manipulations. De cette manière, les systèmes présentés dans certains articles mais n'ayant pas été utilisés ne sont pas représentés sur cette figure.

n'existe pas de micro-préhenseur universel. Les micropinces sont rarement utilisées pour manipuler des objets de dimensions inférieures à la centaine de microns mais semblent être la plus universelle des fonctions de préhensions utilisées. Des études montrent que l'intensité des forces d'adhésion dépend de la surface et des caractéristiques des contacts objet-outils, l'utilisation d'organes terminaux (extrémité de la pince, pouvant être rapportée) adaptés devant permettre à une micropince de garantir la dépose d'un objet de dimensions allant jusqu'au micromètre [Zho04][Fat04] [Daf04]. Par ailleurs, malgré la diversité des méthodes développées permettant de déposer un objet lorsqu'il est manipulé par une pointe, de nombreuses équipes semblent, à l'heure actuelle, avoir encore de nombreux problèmes d'adhésions.

1.3.3 Les micromanipulateurs

Nous considérerons que les micromanipulateurs sont les systèmes qui permettent de générer des mouvements relatifs entre un effecteur et le plan de travail où sont déposés les objets à manipuler. De nombreuses stations de micromanipulations ont été réalisées utilisant des manipulateurs de structures et technologies variées. Un des premiers manipulateurs réalisés a été celui de Hatamura et Morishita en 1990 [Hat90] [Mor93]. Celui-ci a été conçu selon les critères suivants :

- résolution de positionnement permettant la manipulation d'objets pouvant mesurer jusqu'à 1 μm ;
- courses de quelques dizaines de millimètres afin de réaliser des opérations de prise/dépose ;
- compacité permettant au système d'être utilisé dans un MEB, adapté à la visualisation d'opérations de manipulations d'objets de 1 μm .

Ces chercheurs ont alors mis au point un système à trois Degrés De Libertés (DDL) linéaires (de type XYZ). Chaque axe est réalisé par une structure déformable actionnée par un matériau piézoélectrique et fonctionne selon un mode grossier ou un mode fin. Le mode grossier, de type inch-worm permet un déplacement rapide mais de faible précision tandis que le mode fin permet des déplacements d'amplitude de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$ avec une répétabilité de $0.01\ \mu\text{m}$. Ce système permet le déplacement du plan de travail. Une pointe, utilisée comme outil, reste quant à elle, fixe dans le référentiel du MEB. Cette station de manipulation a permis de déplacer des objets de $1\ \mu\text{m}$.

Peu de temps après, selon les mêmes critères, une équipe japonaise a également réalisé une station de micromanipulation [Sat93]. Celle-ci possède une architecture plus complexe puisque l'outil (une pointe ou un préhenseur à dépression) est monté sur un manipulateur à deux axes rotatifs et le plan de travail est équipé de cinq DDL (trois translations pour deux rotations). L'utilisation de moteurs à courant continu et à ultra-sons permet également un fonctionnement de type grossier-fin. La station de manipulation ainsi réalisée a permis d'assembler une turbine composée de trois pièces dont le diamètre final mesure $500\ \mu\text{m}$.

A partir de l'année 1995, de nombreuses équipes de recherche se sont attachées à la réalisation de stations de micromanipulation. D'un point de vue général, les travaux ont conduit au développement d'un manipulateur permettant de générer un mouvement relatif entre un outil et le plan de travail sur lequel est situé l'objet à manipuler. La majorité des réalisations effectuées sont de structure sérielle ou distribuée et peuvent être classées selon les trois grandes catégories suivantes :

- les systèmes fondés sur l'utilisation d'un effecteur monté sur un "macro"-manipulateur. Ses dimensions sont généralement importantes (de l'ordre de 50 centimètres au cube à plusieurs mètres cubes) et permettent des résolutions qui sont en général de l'ordre de la dizaine de micromètres. Le plan de travail est quant à lui monté sur un manipulateur permettant des mouvements fins (courses faibles, résolutions importantes) ;
- les systèmes, généralement compacts, fondés sur des technologies permettant de combiner mouvements grossiers et fins (matériaux piézoélectriques, ultra-sons, principe électromagnétique) ;
- les robots mobiles.

Utilisation de robots mobiles

L'utilisation de robots mobiles pour réaliser des opérations d'assemblage est une solution particulièrement flexible. Il est possible d'utiliser de nombreux robots compacts et autonomes, chacun étant dédié à la réalisation d'une opération (manipulation, visualisation, contrôle, fixation, transport...). En fonction des opérations à effectuer sur un produit, il est possible de ne faire intervenir que les robots possédant les outils nécessaires aux interventions requises. Les premiers robots mobiles pour le micro-assemblage sont apparus vers 1995. Ils peuvent fonctionner dans différents environnements (air, vide) et leur flexibilité a été établie [Fat00] [Sch01]. De même, leur intérêt pour la réalisation d'opérations de micro-assemblage ou pour la réalisation d'une micro-usine est d'actualité [Fat04] [Dri05b]. Leur domaine atteignable peut

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLA

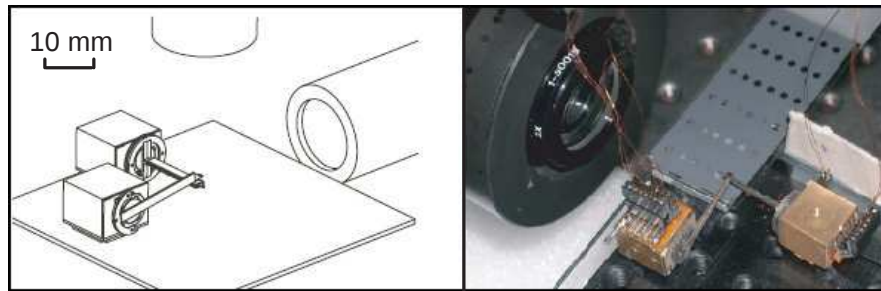


FIG. 1.14 – Manipulation d'objets de $50\ \mu\text{m}$ de dimensions à l'aide de deux robots mobiles autonomes, actionnés par matériaux piézoélectriques [Dri05a]. Ils sont de petites dimensions ($15 \times 10 \times 10\ \text{mm}^3$) et peuvent communiquer.

être important, celui-ci pouvant être de plusieurs mètres carrés avec une précision de positionnement inférieure au micromètre. La FIG. 1.14 illustre une réalisation récente. Les limitations rencontrées aujourd'hui par l'utilisation de robots mobiles à des fins de micro-assemblage concernent principalement leur autonomie énergétique.

Utilisation d'un "macro"-manipulateur

L'utilisation d'un manipulateur de dimensions importantes a conduit à de nombreuses réalisations. L'utilisation de robots dont les caractéristiques et modèles sont parfaitement connus représente un attrait certain. Ainsi, des équipes de recherches ont utilisé des manipulateurs SCARA [Hoh99] [Zuh96]. Ce type de solution technique est source de nombreux problèmes en micromanipulation. Les technologies utilisées ainsi que les vitesses et inerties des parties mobiles engendrent des problèmes de vibrations difficilement compatibles avec la réalisation d'opérations de micromanipulation. Des systèmes d'amortissement doivent alors être réalisés [Rei97].

Pour pallier ces difficultés, il est possible de réaliser des manipulateurs mieux adaptés aux besoins en micromanipulation. Cela conduit à la réalisation de structures plus rigides, dont le porte-à-faux est diminué (FIG. 1.15). La répétabilité des axes linéaires est, pour cette réalisation, de $1\ \mu\text{m}$.

Pour atteindre des précisions de positionnement relatif d'un outil par rapport à un objet de l'ordre du dixième ou du centième de micromètre, il est possible de monter le plan de travail sur une structure dont le principe d'actionnement permet des courses faibles (environ $10\ \mu\text{m}$) et des résolutions importantes (matériaux piézoélectriques par exemple). La FIG. 1.16 est un exemple de réalisation. Ce type de structure permet des déplacements rapides tout en garantissant une précision de positionnement compatible avec la réalisation d'opérations de micromanipulation. Cependant, les inconvénients liés à ce type de structure sont les suivants :

- porte-à-faux important, source d'imprécisions de positionnement pouvant atteindre plusieurs dizaines de microns ;

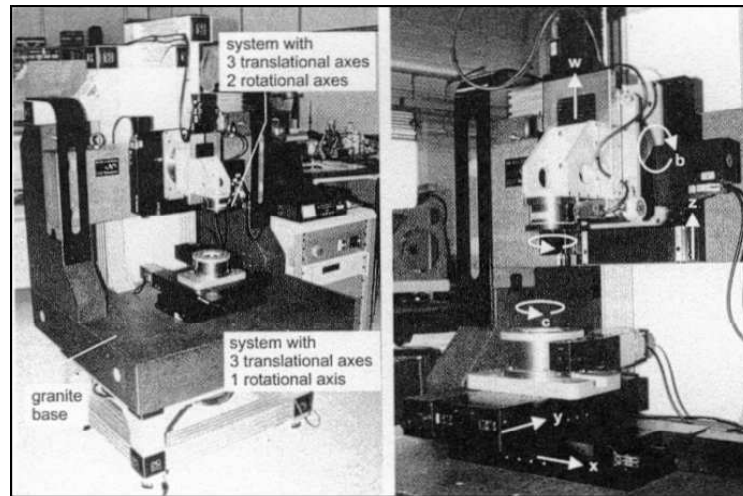


FIG. 1.15 – Station de manipulation dotée de 7 axes (3 pour le plan de travail, 4 pour l’outil). Un portique rigide est monté sur un marbre [Wec04].

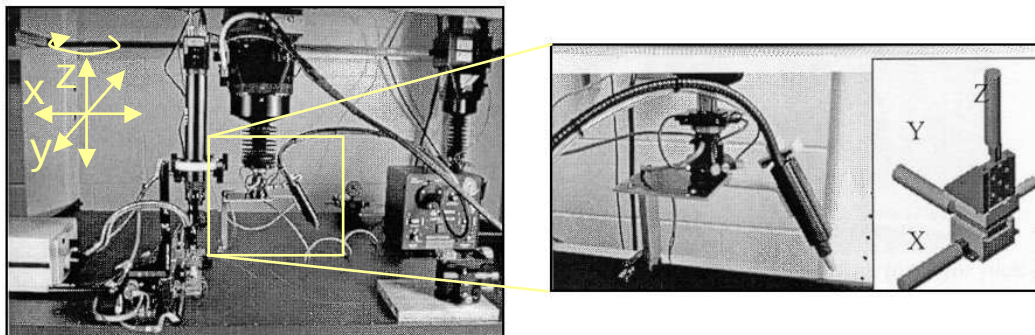


FIG. 1.16 – Station de manipulation dotée de 8 axes [Pop02a]. Les 4 axes permettant les mouvements de l’effecteur sont de type grossier, tandis que ceux du plan de travail sont fins.

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLAGE

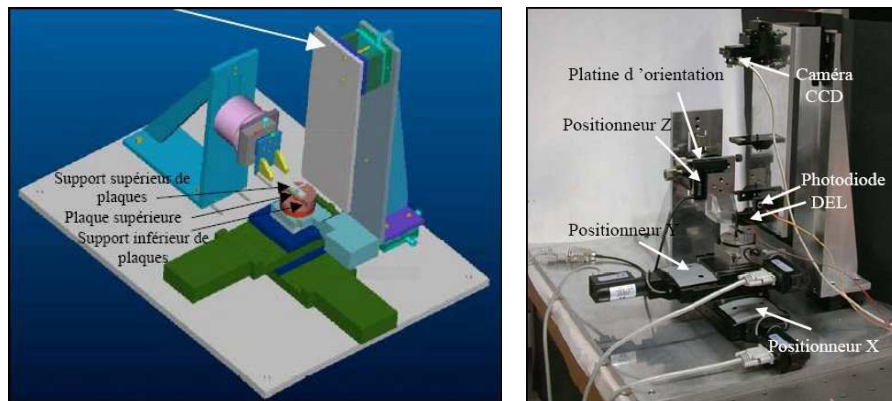


FIG. 1.17 – Station de micromanipulation réalisée par assemblage de 4 modules (3 modules de translation et un de rotation autour de Z)[Gau03].

- amortissement trop faible ;
- dilatations thermiques ayant des effets dommageables sur la précision de positionnement ;
- encombrements importants limitant l'accès aux objets à manipuler qui sont souvent placés sous un microscope ou une caméra équipée d'un objectif encombrant ;
- combinaison de plusieurs types de moyens d'actionnement.

Utilisation d'un micromanipulateur

Compte tenu des inconvénients des manipulateurs de type "macro", de nombreuses équipes ont choisi de développer des manipulateurs compacts dont les moyens d'actionnement sont dédiés (courses et précisions de positionnement) à la réalisation d'opérations de micromanipulation. Les systèmes généralement développés sont des structures série résultant d'un assemblage de modules élémentaires, chaque module réalisant un mouvement particulier. Certains modules sont commercialisés, ils sont généralement actionnés par moteur à courant continu ou par moteur pas à pas, leur résolution ne dépassant pas le dixième de micromètre. La FIG. 1.17 donne un exemple de ce type de réalisation.

La commercialisation d'axes dont les courses peuvent atteindre quelques dizaines de millimètres et garantissant une précision de positionnement inférieure à la dizaine de micromètre est récente [Kle]. L'offre reste faible, aussi, de nombreuses équipes de recherche ont développé et développent des micromanipulateurs. La FIG. 1.18 illustre ce type de réalisation.

Bilan

La majorité des stations de micromanipulation est composée d'un ou deux manipulateurs de structure à trois translations (XYZ), ou à trois translations et une rotation (plan de travail autour de Z). Exceptées les applications nécessitant le collage d'une lentille à l'extrémité d'une fibre

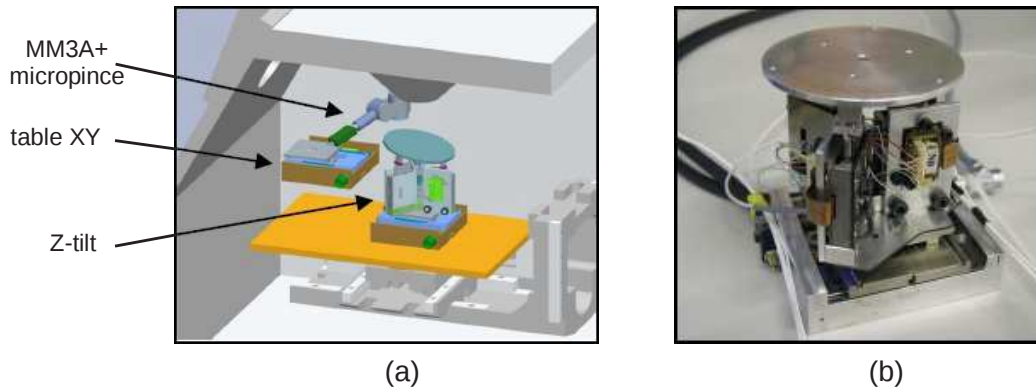


FIG. 1.18 – (a) Station de micromanipulation composée d'un plan de travail à 5 DDL "Z-tilt", et d'un manipulateur à 3 DDL "MM3A" (deux rotations, une translation) équipé d'une micropince [Maz04] ; (b) détails du "Z-tilt" permettant deux translations planes et dont le plan de travail est de type plate forme parallèle à 3 DDL.

optique où 5 DDL peuvent s'avérer nécessaires, peu de micro-systèmes à assembler justifient aujourd'hui l'utilisation de plus de 4 DDL.

1.3.4 Les capteurs

La section 1.2 a permis de décrire la nécessité d'utiliser des capteurs en micro-assemblage que ce soit en mode téléopéré mais plus encore s'il s'agit de réaliser des opérations en mode automatique. Dans ce but, tant la mesure des efforts que le positionnement d'un objet ou d'un outil dans l'espace pendant les phases de micromanipulation, sont fondamentaux.

Les capteurs d'effort

La mesure d'efforts en micro-assemblage correspond à deux besoins :

- conserver l'intégrité des différents éléments en jeu (objets manipulés, préhenseurs) et la précision des manipulateurs ;
- caractériser les forces d'adhésion.

Les forces d'adhésion sont de l'ordre de la dizaine de nano-Newtons tandis que les efforts exercés pendant les phases de micromanipulation sont de l'ordre de la dizaine de milli-Newtons. Cette double nécessité conduit donc à l'utilisation de deux gammes de capteurs.

Tout d'abord, les efforts en jeu lors des phases de micromanipulation sont généralement mesurés à l'aide de jauges de déformations fixées sur une structure déformable. Les diverses réalisations conduisent à des résolutions allant de $10 \mu\text{N}$ à $400 \mu\text{N}$ pour des plages variant de 10 mN à 350 mN [Kas99][Fat00] [Kim03][Mit93]. Quelques principes divers ont été étudiés : par exemple, une étude a porté sur la réalisation d'un capteur capacitif, mais, celui-ci n'a pu être exploité que pour la détection en tout ou rien [Yam03]. Par ailleurs, deux équipes se sont

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLAGE

intéressées à la réalisation d'un capteur utilisant un polymère piézoélectrique (PVDF), mais celui-ci s'avère encombrant (dimensions de l'ordre de quelques centimètres) et difficilement utilisable en régime statique pour des raisons de fuite de charges [Fun02] [She04].

En ce qui concerne la mesure des forces d'adhésion, le principe de mesure le plus répandu est fondé sur la déformation d'une poutre dont la raideur est connue. Cependant, la déformation est ici mesurée à l'aide d'un capteur optique. Ce principe apporte la résolution désirée et est répandu notamment pour les AFM [Zho98] [Wec03].

Les capteurs permettant de mesurer les efforts en jeu lors des phases de micromanipulation sont très peu répandus puisque jusqu'à présent moins d'une dizaine d'équipes ont réussi à développer un tel système. Ce constat montre bien toute la difficulté et tout l'enjeu que représente un moyen de mesure d'efforts compact, utilisable à des fins de micromanipulation.

Les capteurs optique

L'utilisation de systèmes de vision est indispensable à la réalisation d'opérations de micromanipulation. Cependant, compte tenu des résolutions nécessaires, ceux-ci représentent des contraintes importantes principalement d'encombrement et de profondeur de champ. Environ la moitié des systèmes de vision utilisés dans ce contexte ne disposent que d'une vue. Celle-ci peut être dispensée par un microscope ou un MEB et offre généralement une vue de dessus (axe perpendiculaire au plan de travail). Cette vue offre des informations très utiles dans le plan mais permet difficilement d'établir avec précision l'altitude relative des différents éléments (objet, plan de travail, effecteur). Les dispositifs de vision peuvent être fixes par rapport au plan de travail, par rapport au préhenseur ou mobiles par rapport à ces deux éléments.

L'autre moitié des systèmes est équipé d'au moins deux vues. Généralement, une vue de dessus et une vue latérale. Ces deux vues permettent de visualiser les détails de l'opération de micromanipulation dans l'espace. Parfois, une troisième vue, plus générale, s'avère utile pour éviter des collisions lors de mouvements larges du manipulateur.

Aussi, compte tenu du faible nombre de capteurs d'efforts présentés dans des dispositifs de micromanipulation, l'automatisation de tâches d'assemblages passe plutôt par l'utilisation d'informations visuelles généralement traitées, d'où l'importance de leur qualité. Certaines applications, compte tenu de leurs particularités, peuvent être effectuées de manière automatique en utilisant une seule vue [Daf04] [Fed98] [Zho98]. Nous pouvons par exemple citer les opérations de manipulation de billes sur un plan. Cependant, la majorité des opérations en mode automatique est effectuée à l'aide de dispositifs offrant deux [Kor05] [Kra04] [Kas99] voire trois vues [Sun05] [Tho01].

1.3.5 Autres systèmes péri-micro-robotiques

Pour réaliser des séquences d'assemblage, des systèmes péri-micro-robotiques sont utiles notamment pour des problématiques liées à une micro-usine. Ceux-ci sont ajoutés aux systèmes présentés jusqu'à présent (composés de manipulateurs, de fonctions de préhensions et de cap-

teurs divers). Les différents systèmes utilisés en micro-assemblage peuvent être classés de la sorte :

- systèmes d’alimentation ou de convoyage de composants ;
- systèmes de changement d’effecteurs apportant flexibilité au système d’assemblage ;
- systèmes permettant de contrôler la qualité des opérations effectuées.

Les systèmes permettant de transporter des composants, des sous-assemblages ou des assemblages peuvent être des systèmes autonomes de type robot mobile [Fat00] ou palette [Fur99] ou utiliser la propagation d’ondes à la manière des bols vibrants.

La réalisation de systèmes permettant le changement d’effecteurs est un enjeu important dans un souci de production et de flexibilité. Ce problème a été identifié dès la réalisation des premiers prototypes de stations de micromanipulation [Hat90] [Miy97] [Men97]. Ce type de système a pour but d’optimiser le nombre d’outils utilisables par chaque manipulateur. Compte tenu des difficultés de réalisation d’axes de micro-positionnement, le gain est triple puisqu’il conduit également à économiser de la place et à diminuer le nombre de systèmes à commander.

Les premiers systèmes de changement d’outils présentés en micro-assemblage sont plutôt de conception issue du monde de la ”macro”-fabrication avec notamment des tourelles revolver mais peu ont réellement vu le jour (voir section 2.5.2) [Ebe98]. Ce n’est que récemment que des systèmes ont véritablement été réalisés [Daf04]. Très peu de systèmes fonctionnent aujourd’hui de manière automatique.

1.3.6 Exemples choisis de systèmes de micromanipulation

Les éléments présentés jusqu’ici (manipulateurs, fonctions de préhensions, capteurs, systèmes péri-micro-robotiques) peuvent être intégrés pour réaliser une station de micromanipulation. Compte tenu des évolutions importantes et récentes de la micro-robotique, nous pouvons nous intéresser à quelques stations de micromanipulations prises parmi les plus abouties. Les exemples que nous allons citer ont été utilisés en mode téléopéré ou automatique.

La première réalisation concerne une station de manipulation conçue pour saisir des pions prismatiques ($500 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3$) placés dans un magasin et les insérer dans des orifices réalisés dans un wafer. Celui-ci est placé perpendiculairement au magasin (FIG. 1.19). Plusieurs effecteurs sont disponibles, une micropince compliant, un préhenseur à dépression et une micropince piézoélectrique. L’espace atteignable est de $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Un microscope et deux caméras latérales sont utilisés pour visualiser la scène.

La FIG. 1.20 présente une application originale fondée sur l’utilisation de deux baguettes manipulées telles qu’elles sont utilisées par les asiatiques pour manger. Chaque effecteur est fixé sur une structure parallèle de type plate-forme de Stewart offrant de bonnes caractéristiques de rigidité et une dextérité importante mais, un espace de travail restreint.

La FIG. 1.21 représente un autre type de structure originale permettant la manipulation de micro-objets. Il s’agit d’utiliser deux effecteurs actionnés indépendamment et orientés perpendiculairement entre eux. Plusieurs équipes se sont intéressées à ce type de structure offrant des

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLA

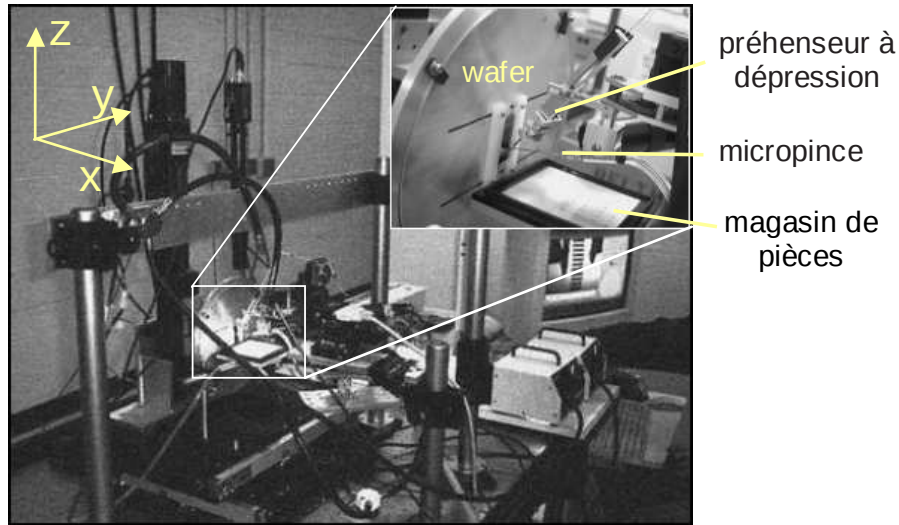


FIG. 1.19 – Station de manipulation à 8 DDL [Yan03] [Yan01]. Un préhenseur à dépression est monté sur un manipulateur 4 DDL à déplacements grossiers (3 translations et rotation autour de Y). Le plan de travail est monté sur un manipulateur à 4 DDL à déplacements fins (3 translations et rotation autour de X).

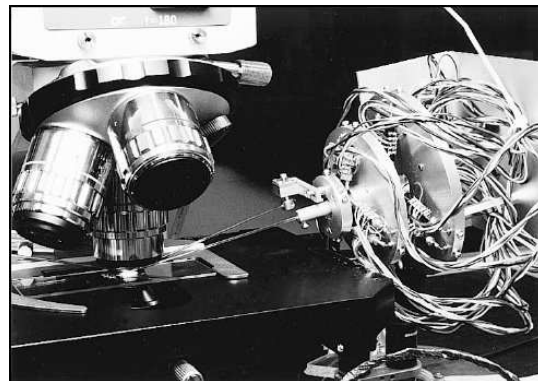
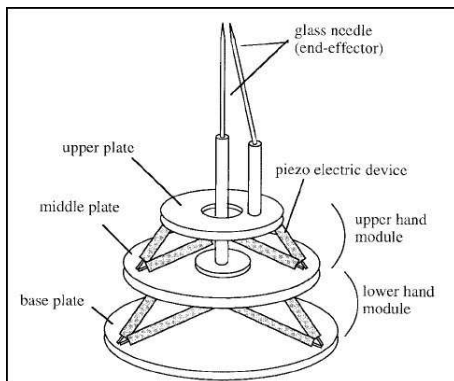


FIG. 1.20 – Manipulateur constitué de deux pointes, chacune étant montée sur une structure parallèle à 6 DDL de type plate-forme de Stewart [Tan01b][Oha04].

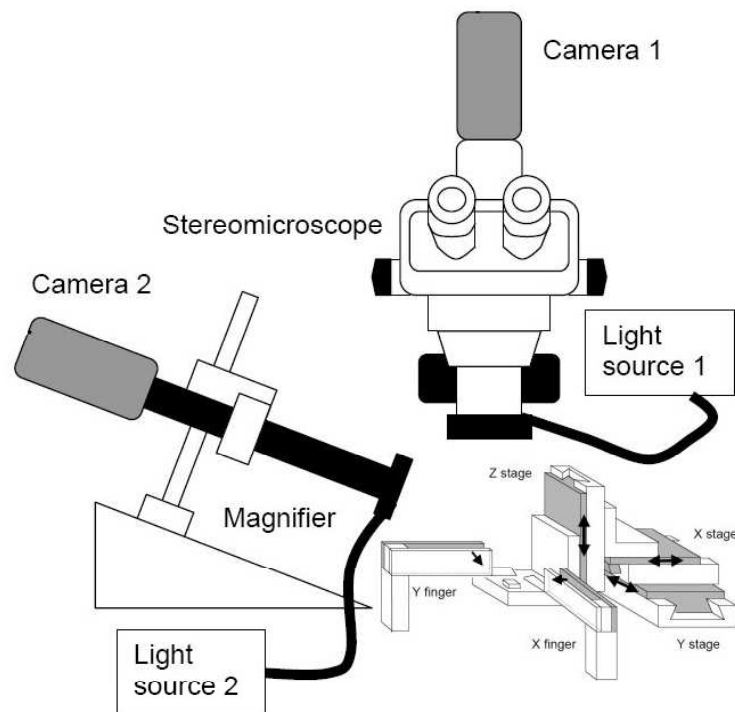


FIG. 1.21 – Manipulateur composé de deux outils pointus placés à 90° [Tho01]. Chaque outil possède un DDL en translation selon son axe principal et une compliance dans le plan. L'ensemble est monté sur un manipulateur à 3 translations. Des capteurs de force sont placés sur les outils.

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLAGE

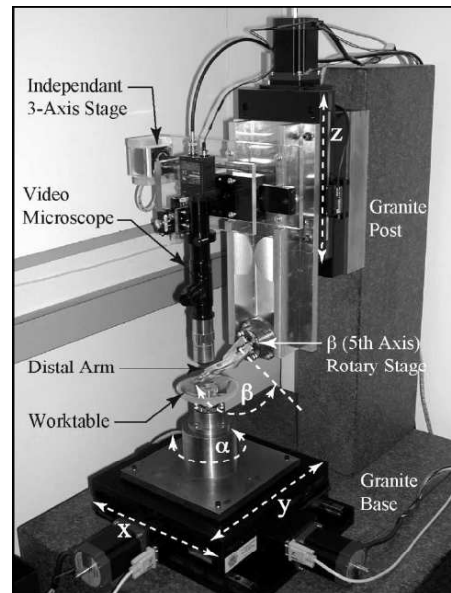


FIG. 1.22 – Manipulateur à 5 DDL monté sur un microscope [Dec03b] [Dec04b]. Le plan de travail possède 3 DDL ($XY\alpha$) tandis qu'une micropince est montée sur un manipulateur à 2 DDL ($Z\beta$).

possibilités d'orientations d'objets que d'autres types de préhenseurs, comme les micropinces par exemple, ne possèdent pas.

Une réalisation plus conventionnelle et de structure particulièrement répandue est présentée FIG. 1.22. L'espace de travail est d'environ $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$. Seul un microscope est utilisé, celui-ci est monté sur le bras manipulateur et un système permet de régler son focus et sa position de manière à visualiser la zone d'intérêt.

La FIG. 1.23 présente la structure d'une station de micro-assemblage complète. En effet, tout d'abord, les structures des manipulateurs sont modulaires, résultant de l'assemblage d'éléments, chacun réalisant un mouvement. De plus, de nombreux types d'effecteurs sont utilisés, deux micropinces "conventionnelles", un dispenseur de colle, une lampe permettant la réticulation de cette colle, un préhenseur à dépression et une micropince doté de 6 DDL [Kor05]. Cet ensemble de possibilités permet la réalisation de séquences d'assemblages complexes.

Dans le même esprit, la flexibilité et la modularité de la station de micromanipulation présentée FIG. 1.24 ont été éprouvées. En effet, cette station a permis de réaliser de manière automatique l'assemblage des composants suivants :

- capteur de pression de dimensions extérieures de 2,4 mm, nécessitant des phases de collage ;
- fibres optiques dans des vés ;

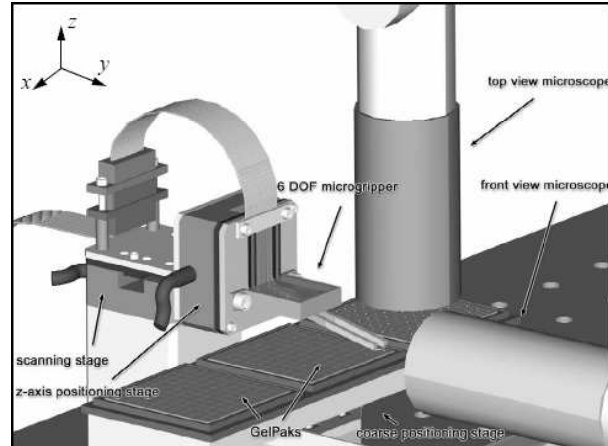


FIG. 1.23 – Station de manipulation composée d'un plan de travail mobile de type XY à actionnement grossier-fin et pince montée sur un manipulateur à 3 DDL linéaires [Zho04] [Zho99] [Zho98]. Un microscope donne une vue par dessus la scène tandis que deux caméras donnent une vue latérale.

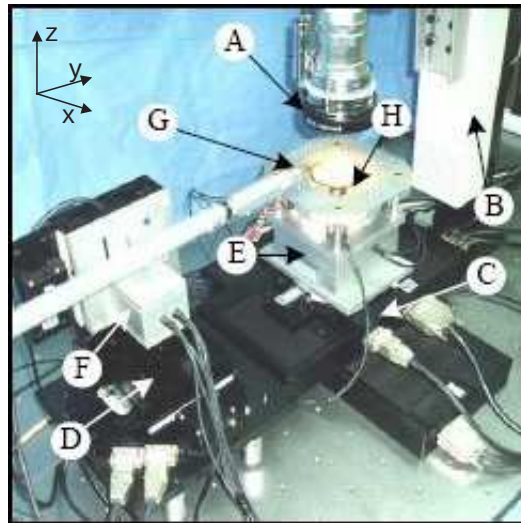


FIG. 1.24 – Station de manipulation composée d'un microscope optique (A) équipé d'un autofocus (B) [Sun05]. Une micropince (G) est montée sur un manipulateur XY grossier (D) et XY fin (F). Le plan de travail (H) est monté sur un manipulateur XYrotZ grossier (C) et une structure parallèle ZrotXrotY (E).

1.3. ETAT DE L'ART DES DIFFÉRENTES STATIONS DE MICROMANIPULATION ET DE MICRO-ASSEMBLA

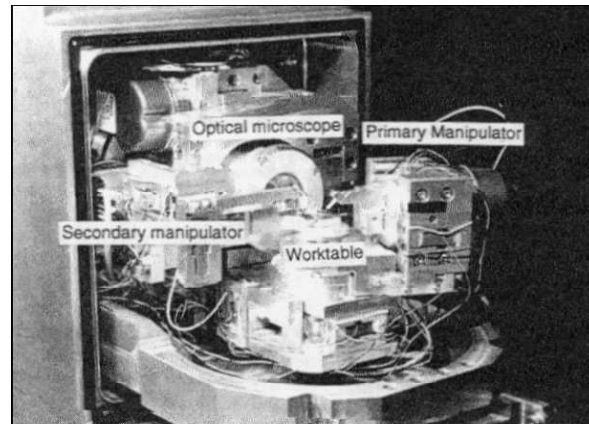


FIG. 1.25 – Station de micromanipulation composée d'un plan de travail monté sur un système à 3 translations de type grossier-fin et de deux pointes chacune montée sur un manipulateur à 5 DDL ($XYZrotXrotY$). Un MEB stéréoscopique et un microscope optique disposé latéralement permettent une vision tridimensionnelle de la zone d'intérêt. Cette station a été développée par Koyano [Koy96] puis reprise par Miyazaki [Miy97] [Miy00b] [Miy00a] et Saito [Sai99] [Sai02].

- engrenage composé de planétaires qui doivent être orientés précisément pour être assemblés.

Pour finir, la FIG. 1.25 représente une station de micromanipulation totalisant 13 DDL et qui s'intègre dans un MEB. Un microscope optique est également inséré dans la chambre du MEB afin de disposer d'une vision latérale. Cette réalisation illustre la difficulté que représente l'utilisation d'un MEB, notamment en terme d'encombrement.

1.3.7 Conclusion

Jusqu'à présent, la majorité des travaux effectués par les équipes de recherche proposent des solutions de manipulation dont les caractéristiques sont liées à l'application étudiée. Peu d'équipes se sont penchées sur la réalisation d'organes terminaux multiples [Nie98] ou génériques pouvant être utilisés pour de nombreuses applications. Les systèmes réalisés montrent qu'une station de micromanipulation doit répondre à des problématiques de précision, d'encombrement, de visualisation et de mesure d'efforts. L'utilisation de manipulateurs dotés de nombreux DDL permet une dextérité importante mais engendre par la même des problèmes d'encombrement et de précision néfastes en micro-assemblage. A l'heure actuelle, la majorité des stations de micromanipulation fonctionnent en mode téléopéré, mais, depuis quelques années, l'intérêt pour l'automatisation grandit (FIG. 1.26). Cette évolution permet d'apporter des solutions aux besoins d'assembler des séries de micro-composants avec une qualité constante [Fis98].

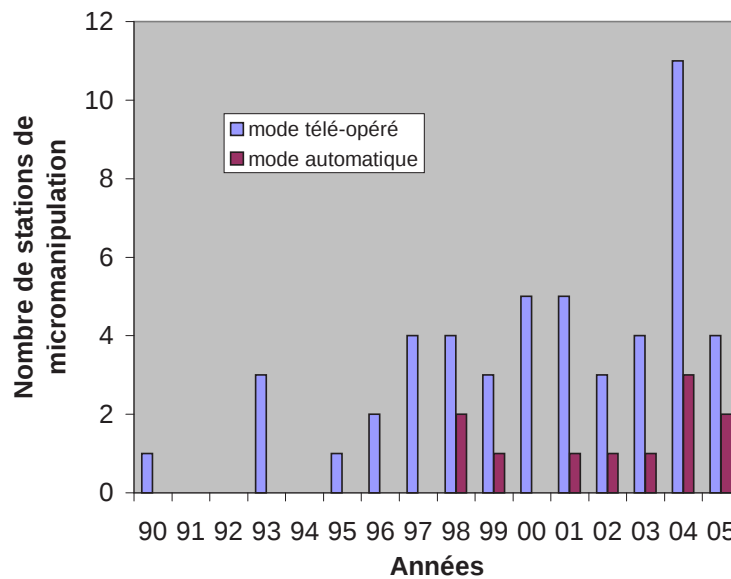


FIG. 1.26 – Répartition des stations de micromanipulation selon leur mode de fonctionnement. Pour qu’une station de micromanipulation soit classée en mode automatique, elle doit avoir été utilisée pour réaliser des cycles de prise-transport-dépose d’objets dont toutes les dimensions sont comprises entre $1\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$.

1.4 Besoins et enjeux de la micromanipulation et du micro-assemblage robotisés

Le besoin de réaliser des opérations de micromanipulation touche de nombreux domaines, lesquels sont très variés. Nous pouvons par exemple citer la pharmacie, les micro-systèmes (MEMS³ et MOEMS⁴), la micro-mécanique, la biologie, l’optique. Les caractéristiques de taille, de géométrie et de consistance des objets manipulés, leur milieu d’insertion, le type d’opérations de manipulation à effectuer sur ces objets, l’encombrement disponible sont autant de paramètres qui influencent fortement la conception d’un système de micromanipulation. Par ailleurs, l’assemblage des micro-composants en petites ou moyennes séries est très coûteux, celui-ci pouvant représenter jusqu’à 80% du prix du produit final [Cho99b].

A l’heure actuelle, les besoins en micromanipulation et en micro-assemblage sont encore atomisés. Ils peuvent toutefois être classés en deux catégories : les besoins de manipulation ou d’assemblage de petites séries de micro-composants correspondent surtout à une logique de flexibilité et de reconfigurabilité tandis que ceux relatifs aux moyennes séries s’orientent plutôt vers la productivité, la fiabilité et un peu vers la flexibilité.

3. Micro-Electro-Mechanical-Systems.

4. Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems.

1.4.1 Manipulation de composants en petites séries

Les applications concernant la manipulation de micro-composants par petites séries sont variables. Elles peuvent s'appliquer à une seule gamme d'objets, c'est-à-dire des objets dont les propriétés géométriques et dimensionnelles sont proches, ou à une grande variété d'entre eux.

Manipuler un seul type de micro-objets nécessite d'utiliser des outils dédiés aux particularités des tâches à effectuer ainsi qu'à celles des objets. En revanche, la manipulation d'une grande diversité de composants nécessite de disposer de nombreux outils échangeables facilement ou d'outils génériques. La génération de mouvements relatifs entre outils et objets peut, quant à elle, être effectuée avec un manipulateur dédié s'il est disponible sur le marché. En effet, la conception et la réalisation d'un robot dédié demande un investissement temporel et financier souvent conséquent. Si un tel manipulateur n'est pas disponible, il est alors intéressant d'utiliser des axes élémentaires motorisés générant des mouvements de translation ou de rotation, axes qui, une fois assemblés, engendrent une structure plus complexe répondant aux besoins des diverses applications. Cette solution offre une grande diversité de choix et une flexibilité importante.

1.4.2 Manipulation de composants en moyennes séries

Les opérations de micromanipulation ou de micro-assemblage de composants en moyenne série nécessitent de réaliser successivement des opérations élémentaires de micromanipulation à l'aide d'outils dédiés. Elles sont actuellement principalement réalisées manuellement ou à l'aide de machines dédiées.

Ces machines sont particulièrement rapides et fiables mais souvent volumineuses et coûteuses.

Ces inconvénients sont principalement dus au manque de technologies adaptées aux besoins des industriels (rapidité, fiabilité, durabilité) et prenant en compte les spécificités dues aux faibles dimensions des pièces (visualisation, précisions de positionnement et mesure de grandeurs).

Ces machines occasionnent des coûts de fabrication importants en terme d'investissement, de fonctionnement, de maintenance, d'utilisation ou de main d'œuvre.

L'état de l'art effectué ici a mis en évidence les progrès encourageants effectués récemment concernant le développement de stations de micromanipulation ou de micro-assemblage fonctionnant en mode automatique. Nous avons également pu constater que des équipes de recherche portent un intérêt particulier à la flexibilité et la modularité. Ces travaux peuvent constituer les bases d'une alternative avec l'assemblage manuel et celui utilisant des machines dédiées.

1.4.3 Bilan des besoins : vers compacité, automatisation et flexibilité

La micromanipulation et le micro-assemblage sont en pleine expansion. L'analyse des différents besoins ainsi que des moyens mis en œuvre par les différentes équipes de recherches mettent en évidence l'intérêt de réaliser une station de micromanipulation compacte, flexible et

capable de fonctionner en mode automatique.

La compacité est nécessaire pour des raisons de précisions indispensables en micromanipulation, d'encombrement et d'économies. En effet, d'une part, un système compact génère moins de vibrations, possède une structure plus rigide et consomme moins d'énergie qu'un système de dimensions importantes. D'autre part, l'utilisation de moyens optiques puissants réduit particulièrement l'espace disponible autour de la zone de travail.

Une station de micromanipulation flexible et modulaire permet de réaliser successivement des opérations élémentaires de micromanipulation de natures différentes. Pouvoir utiliser successivement des outils différents représente par exemple un grand intérêt. De même, pouvoir modifier rapidement et simplement la structure d'une station de micromanipulation est nécessaire. L'intérêt économique de la flexibilité a été mis en avant [Cho03].

Pour finir, de nombreuses stations de micromanipulation fonctionnent aujourd'hui en mode téléopéré. Ce principe apporte une aide précieuse aux opérateurs. L'automatisation de ces systèmes a pour but de permettre la réalisation de composants en séries moyennes tout en garantissant une qualité constante.

Chapitre 2

Développement de stations de micromanipulation

Compte tenu de l'étude bibliographique, des différents travaux déjà réalisés au laboratoire ainsi que des projets en cours, deux stations de micromanipulation ont été développées et sont présentées dans ce chapitre. Elles sont composées d'axes de micro-positionnement, d'une micropince et d'un système de vision. La micropince est constituée d'une paire d'outils (pièces en contact avec l'objet à manipuler) fixée à l'extrémité d'un actionneur. Pour améliorer la flexibilité des stations de micromanipulation, différentes solutions sont envisagées et comparées. Au final, le développement d'un système permettant le changement des outils de la micropince est envisagé. Ainsi, différentes paires d'outils peuvent être utilisées successivement, chacune d'entre elles étant dédiée à la manipulation d'une catégorie de micro-objets. La réalisation d'une séquence d'opérations de micromanipulation élémentaires constitue alors un cycle de micro-assemblage.

2.1 Introduction

La micro-robotique est apparue au LAB il y a une dizaine d'années. Pour explorer ce champ scientifique naissant, lié en termes applicatifs à la diminution de la taille de nombreux produits et à l'apparition de micro-produits, il a fallu commencer à développer des moyens d'actionnement adaptés à la micromanipulation, c'est-à-dire sans jeu et avec des résolutions micrométriques ou inférieures. L'exploitation de matériaux actifs (piézos, AMF, magnétiques...) a pris de l'ampleur à travers différents travaux (thèses de Hellal Benzaoui en 1998 [Ben98], de Yassine Haddab [Had00] ou de Joël Abadie en 2000 [Aba00]).

Ces connaissances de base ont alors pu être utilisées pour développer des sous-systèmes élémentaires permettant la réalisation de mouvements ou de fonctions de préhension. Ces com-

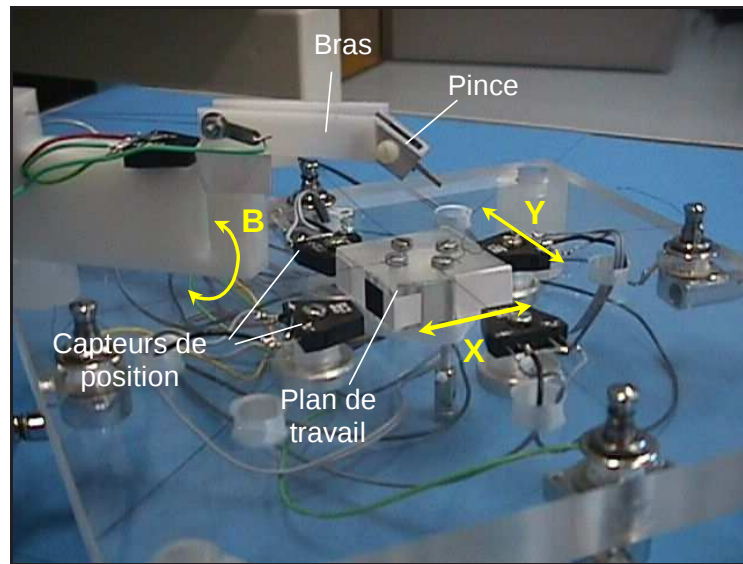


FIG. 2.1 – Première génération de station de micromanipulation développée au LAB.

posants élémentaires peuvent être combinés pour réaliser des systèmes plus complets, de type station de micromanipulation [Had00].

Au cours du temps, la diversité et la complexité des systèmes développés ont augmenté pour aboutir au développement de composants plus complets ou plus performants (thèse de Joël Agnus : développement d'une micropince quatre DDL (Degrés De Liberté) [Agn03a]).

Aujourd'hui, plusieurs composants élémentaires et quelques systèmes complets existent au LAB. Dans la continuité de ces réalisations, deux stations de micromanipulation ont été réalisées dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire. Ainsi, la structure de ces stations ainsi que les composants utilisés seront présentés.

Par ailleurs, les besoins ont également évolué en direction de la flexibilité et de l'automatisation. Cela nécessite le développement de fonctions supplémentaires. C'est pourquoi nous discuterons puis déciderons des objectifs à suivre prioritairement (section 2.3).

2.2 Historique des réalisations du laboratoire

2.2.1 Première génération de stations de micromanipulation

Durant sa thèse, Yassine Haddab a développé la première station de micromanipulation du laboratoire. Cette station était composée d'une table de travail, d'une micropince elle-même montée sur une tête inclinable (FIG. 2.1). La table de travail possède deux DDL XY actionnés par des fils AMF. La micropince permet des prises et lâchers de pièces à partir de deux poutres de matériau piézoélectrique. La tête inclinable, elle aussi actionnée par un fil AMF, possède un

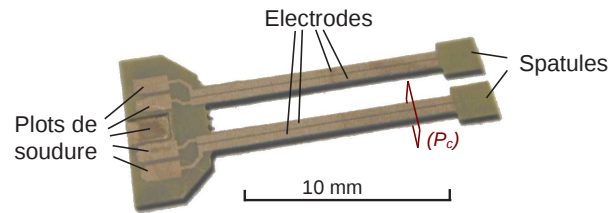


FIG. 2.2 – Actionneur composé de deux plaques de céramique piézoélectrique collées. Cet actionneur est utilisé pour réaliser une micropince. (P_c) représente le plan de la section d'un doigt de cet actionneur (voir FIG. 2.3).

DDL de rotation autour de l'axe X. L'ensemble des DDL fonctionne en boucle fermée avec une résolution micrométrique.

Pour ce faire, Yassine Haddab a intégré les connaissances développées jusqu'alors sur les AMF et a principalement travaillé sur la structure, la fabrication et la commande des matériaux piézoélectriques.

Cette thèse a permis de développer et d'intégrer de nombreuses connaissances pour aboutir à la réalisation d'une station de micromanipulation. Les premières opérations de micromanipulation (prise, transport, dépose) étaient alors possibles au LAB.

De nombreux problèmes restaient cependant à résoudre. Tout d'abord, l'espace atteignable était relativement faible ($2 \times 2 \times 1,5 \text{ mm}^3$) et devait être augmenté. Ensuite, la fabrication de la pince posait des problèmes, il était notamment difficile de garantir l'alignement des deux doigts. Ainsi, il a été nécessaire de développer des composants plus spécifiques pour aboutir à un système de micromanipulation plus performant et plus fiable. Pour ces raisons, l'étude d'un actionneur piézoélectrique "monolithique" a alors été entreprise.

2.2.2 Réalisation d'une micropince

Joël Agnus a consacré sa thèse à l'étude d'un actionneur piézoélectrique particulièrement adapté à la micromanipulation [Agn03a]. Celui-ci est constitué de deux plaques de céramique piézoélectrique (PZT) collées. Des électrodes sont déposées sur chaque face permettant l'alimentation du matériau. L'ensemble est ensuite découpé réalisant la structure finale de l'actionneur (FIG. 2.2). Cet actionneur est doté de quatre DDL (deux par doigt) permettant des mouvements conventionnels d'ouverture et de fermeture ainsi que des mouvements plus particuliers (hors plan). La FIG. 2.3 expose le principe de fonctionnement de cet actionneur pour obtenir les quatre DDL.

Des outils ont également été réalisés. Par outils nous entendons les éléments directement en contact avec l'objet à manipuler. Dans la suite de ce mémoire, les outils considérés sont des outils en nickel réalisés par procédé LIGA UV qui se montent par paires à l'extrémité de l'actionneur. Leur fonction concerne uniquement la manipulation des objets. L'ensemble ainsi réalisé consti-

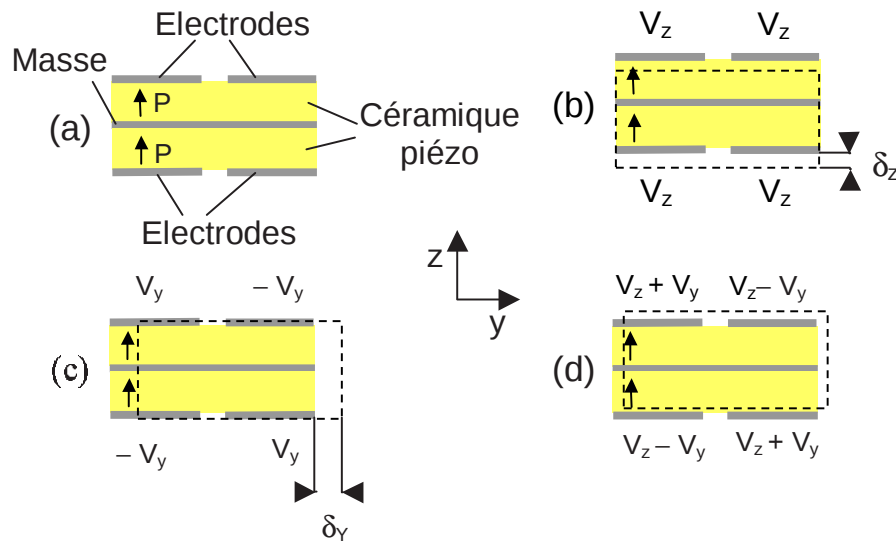


FIG. 2.3 – Schéma de principe d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique représenté en coupe selon le plan P_c (voir FIG. 2.2) : (a) P indique le sens de la polarisation ; (b) V_Z engendre un déplacement selon l'axe Z d'amplitude δ_Z ; (c) V_Y et $-V_Y$ engendrent un déplacement selon l'axe Y d'amplitude δ_Y ; (d) les combinaisons $V_Z + V_Y$ et $V_Z - V_Y$ engendrent des mouvements couplés selon Y et Z .

tue une micropince (FIG. 2.4). Les principales performances de la micropince sont indiquées dans le TAB. 2.1. Objets issus de l'horlogerie mis à part, nous ne disposons pas, à ce moment, d'objets microscopiques à manipuler avec ce préhenseur. Les outils ont donc été conçus à partir de critères géométriques "génériques" (pièces de nature cubique, sphérique, cylindrique,...). Une commande en charge a également été développée permettant la réduction de l'hystérésis propre aux matériaux piézoélectriques.

	Y	Z
Course par doigt	+/- 80 μm	+/- 200 μm
Force de blocage ¹	55 mN	10 mN
Première fréquence de résonance	1000 Hz	400 Hz

TAB. 2.1 – Caractéristiques de la micropince MMOC à quatre DDL. Les courses sont données pour une tension d'alimentation de +/- 100 V.

Cette thèse a permis de réaliser une micropince performante et particulièrement adaptée à la micromanipulation. Les quatre DDL de l'actionneur lui confèrent une certaine originalité et une grande souplesse d'utilisation. La pince est un élément modulaire car elle peut être montée

1. La force de blocage correspond à la force à appliquer à l'extrémité de l'actionneur pour ramener celui-ci dans sa position initiale lorsqu'il est alimenté.

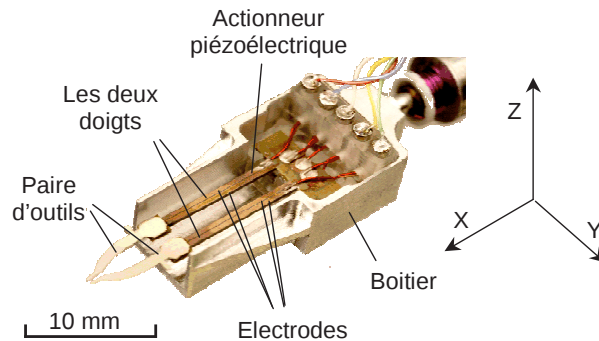


FIG. 2.4 – Micropince composée d'un actionneur piézoélectrique et d'une paire d'outils.

à l'extrémité de nombreux types de robots moyennant la réalisation d'une interface mécanique permettant leur fixation.

De nombreux problèmes restent cependant à résoudre. Par exemple, la réalisation d'une station de micromanipulation complète passe par l'intégration de la micropince dans une cellule robotisée. Dans ce mémoire, cette micropince sera appelée MMOC (Micro-prehensile Micro-robot On Chip).

2.3 Critères pour la réalisation de stations de micromanipulation

Le chapitre 1 nous a permis de présenter tout l'intérêt de développer une station de micro-assemblage capable d'effectuer des opérations sur des objets microscopiques de manière flexible et automatisée dans des espaces confinés. Or, à cet instant, au LAB, nous disposons d'une micropince et de systèmes permettant de générer des mouvements de faible amplitude. Cependant, de nombreuses fonctionnalités restent à intégrer. En effet, par exemple, la micropince doit être montée sur un système générant des mouvements larges (de l'ordre de quelques dizaines de millimètres) capables d'une précision de positionnement meilleure qu' $1\ \mu\text{m}$ afin de réaliser une station de micromanipulation. Des contraintes d'encombrement, de visualisation et d'interfaçage opérateur sont également à prévoir.

Afin de contribuer à la réalisation de cette station de micro-assemblage, nous allons d'abord nous pencher sur les apports et les contraintes du projet européen ROBOSEM, que nous avons intégré au début de nos travaux de recherche. Nous ferons ensuite le point sur les objectifs à suivre. Un ordre de priorité sera également déterminé afin de résoudre les problèmes de manière séquentielle.

2.3.1 Le projet européen ROBOSEM

Objectifs

Le projet européen ROBOSEM² "Development of a Smart Nanorobot for Sensor-based Handling in a Scanning Electron Microscope" regroupe seize partenaires et s'intéresse au développement de robots de structures modulaires effectuant des opérations de manipulation avec une précision sub-micronique dans un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Il a débuté en avril 2002 et s'est achevé en juin 2005.

Plusieurs champs d'applications sont directement visés par ce projet : le micro-assemblage, la caractérisation de matériaux à l'échelle nanométrique, et la manipulation cellulaire.

Problématiques scientifiques

Compte tenu de ce qui a déjà été développé dans la communauté scientifique, l'avancée principale proposée par le projet ROBOSEM concerne la combinaison de robots de structures modulaires et de l'utilisation d'un MEB.

Le succès d'une tâche de micromanipulation réside en partie dans le système de vision. Le MEB est donc particulièrement intéressant pour la micro-robotique puisqu'il permet une amplification importante bien adaptée à la micromanipulation. La profondeur de champ est importante et l'environnement de travail est particulièrement propre. Cependant, utiliser un MEB engendre trois contraintes importantes :

- la chambre d'un MEB étant de petite taille (30x30x30 cm³ environ), la première contrainte concerne l'encombrement des manipulateurs ;
- pour fonctionner, le vide doit être fait dans la chambre du MEB. Toutes les technologies développées doivent intégrer cette spécificité. Il faut donc éviter d'avoir recours à des matériaux (mousses, colles à séchage lent) ou des géométries (cavités) engendrant un dégazage lors de la mise sous vide ;
- selon leur conductivité, les objets visualisés accumulent plus ou moins de charges (électrons émis par le canon) engendrant une brillance accrue des zones chargées. Il faut donc utiliser des matériaux permettant l'évacuation des charges, ou les recouvrir préalablement d'un film en matériau conducteur par des techniques de pulvérisation. Les pièces insérées dans la chambre du MEB doivent ensuite être reliées à la masse.

Les robots développés doivent avoir une structure modulaire afin de faciliter leur changement de configuration en fonction de la tâche à effectuer. En fonction des champs d'applications envisagés, trois démonstrateurs sont à développer :

- manipulation d'objets micrométriques et micro-assemblage ;
- caractérisation mécanique à l'échelle microscopique (nano-tribologie, nano-rayures, nano-indentation) ;

2. projet du 5^{ème} PCRD, <http://www.robossem.org>

2.3. CRITÈRES POUR LA RÉALISATION DE STATIONS DE MICROMANIPULATION 59

- manipulation d’objets biologiques pour des applications liées à la médecine et à la pharmacie.

Le projet ROBOSEM doit donc engendrer des avancées importantes concernant le développement de robots de précision sub-micronique (mobiles ou non), de préhenseurs, de micro-capteurs d’effort adaptés et de systèmes de vision. L’ensemble de ces systèmes doit être compatible avec le fonctionnement d’un MEB et la taille de sa chambre.

Implication du LAB

L’implication du LAB dans ce projet concerne principalement le développement d’une micropince, d’outils adaptés aux objets à manipuler, d’un système permettant le changement des outils de la micropince, et de la commande bas niveau (utilisation d’informations issues par exemple d’un capteur d’effort).

La micropince MMOC présentée section 2.2.2 a été intégrée au projet. Elle peut être montée sur les différents robots qui ont été développés par nos partenaires apportant ainsi la modularité souhaitée dans ce projet.

Finalement, les objets à manipuler ont des dimensions, des formes et des propriétés mécaniques bien différentes. Cette diversité impose l’utilisation de plusieurs types d’outils. Or, compte tenu des contraintes d’encombrement, il n’est pas possible d’utiliser plusieurs robots dans la chambre d’un MEB. Il est toujours possible d’ouvrir la chambre du MEB, remplacer une pince manuellement, refermer la porte du MEB et refaire le vide pour disposer d’un autre préhenseur. Ces étapes sont longues, ces systèmes manquent donc de flexibilité. Aussi, nous avons développé et intégré un nouveau système de changement d’outils, présenté ultérieurement dans ce mémoire, afin d’apporter de la flexibilité aux robots développés tout en respectant les contraintes d’encombrement et d’environnement imposées par l’utilisation d’un MEB.

2.3.2 Définition des objectifs

Comme nous l’avons vu précédemment, de nombreux travaux restent à effectuer pour aboutir à la réalisation d’une station de micromanipulation. Partant des acquis du LAB et de l’analyse des besoins effectuée lors du premier chapitre, nous allons prendre en compte les orientations du projet ROBOSEM ainsi que celles du laboratoire pour mettre en avant des problématiques scientifiques à résoudre prioritairement.

Tout d’abord, il paraît indispensable de se pencher sur le problème de la génération de mouvements relatifs entre un effecteur et l’objet à manipuler, le but étant de permettre à l’effecteur de réaliser la tâche pour laquelle il a été conçu. Dans notre cas, compte tenu de ses performances, l’effecteur est la micropince développée au LAB (MMOC). L’état de l’art nous a permis de constater que de nombreux systèmes de micro-positionnement avaient été développés. Certains d’entre eux sont déjà commercialisés, présentant d’ailleurs des caractéristiques intéressantes (résolution, facilité d’emploi, modularité,...). Compte tenu de cette offre, il nous est apparu, dans un premier temps, plus intéressant d’en acheter un plutôt que de développer notre propre

système.

Une fois la micropince montée sur un bras robotisé, nous disposerons d'une station de micromanipulation. Comme nous l'avons montrée l'analyse effectuée à la fin du premier chapitre, nous ne désirons pas nous arrêter là. En effet, nous souhaitons que cette station de micromanipulation serve de base et qu'ensuite des fonctionnalités lui soient ajoutées. Celles-ci doivent apporter de la flexibilité et faciliter la réalisation d'opérations d'assemblage en mode automatique.

Ainsi, les objectifs que nous avons à réaliser dans le cadre de ce projet concernent le développement d'une station de micromanipulation compacte et flexible utilisant la micropince MMOC et un système permettant le changement des outils de cette dernière. Une commande intégrant toutes ces fonctionnalités doit également être développée.

2.4 Dernière génération de stations de micromanipulation

L'analyse conduite dans le chapitre 1 a permis de déterminer que deux types de robots étaient à envisager. Tout d'abord, nous avons vu que certains besoins sont plutôt tournés vers l'utilisation d'un robot modulaire pouvant être configuré en fonction des opérations de micromanipulation à effectuer. Nous avons également vu que d'autres besoins sont plutôt tournés vers la productivité et donc l'utilisation de robots dédiés. A partir de cette analyse, nous avons fait l'acquisition de deux robots micromanipulateurs conduisant au développement de deux stations de micromanipulation avec des spécificités différentes.

2.4.1 Réalisation d'une station de micromanipulation de structure modulaire

Il est possible de réaliser une station de micromanipulation de structure modulaire à partir d'axes robotisés permettant la génération de mouvements élémentaires linéaires ou rotatifs. Ces axes peuvent être achetés à l'unité. Leur assemblage permet à chacun de construire la structure robotisée de son choix. L'utilisation de ce type d'axes permet de pouvoir modifier cette structure à tout moment et en quelques instants. Dans notre cas, des axes de micro-positionnement linéaires ont été achetés à la société Physik Instrumente. Ils sont actionnés par moteur à courant continu, et sont équipés de capteurs de position de type codeur incrémental permettant une commande en boucle fermée. Une liaison par carte ou câble RS-232 permet de les piloter par ordinateur. Les principales caractéristiques des axes utilisés sont résumées dans le TAB. 2.2.

Pour réaliser une station de micromanipulation, nous n'avons utilisé que des axes linéaires. Trois axes ont ainsi été assemblés selon une structure série X-Y-Z. La micropince a ensuite été montée sur l'axe Z. Le système résultant (FIG. 2.5) permet ainsi d'effectuer des opérations de prise, transport et dépose dans un espace de travail de $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$.

Le problème majeur de ce robot est sa non compatibilité avec l'environnement d'un MEB. Nous utilisons donc cette station de manipulation pour réaliser des opérations de micromanipu-

	Axes linéaires PI
Course	25 mm
Répétabilité unidirectionnelle	0,1 μm
Jeu	2 μm
Vitesse	2,5 mm/s
Encombrement	70x62x20 mm ³

TAB. 2.2 – Caractéristiques des axes linéaires constituant la station de micromanipulation modulaire.

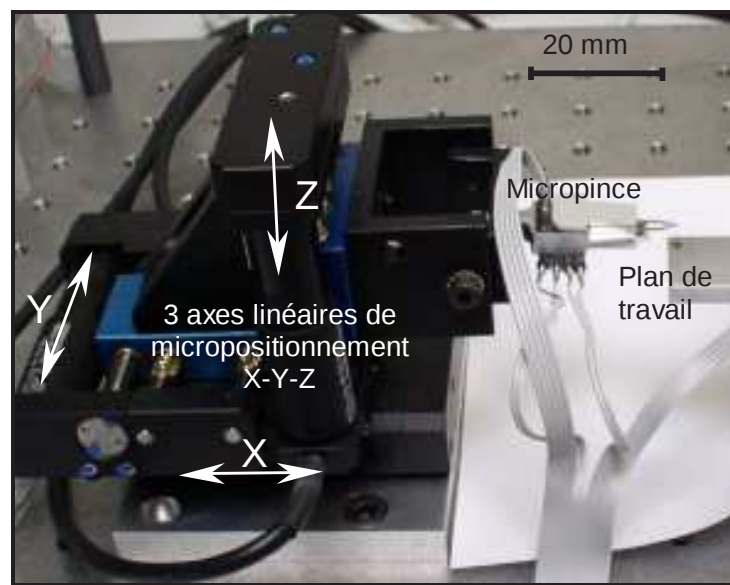


FIG. 2.5 – Structure d'une station de micromanipulation composée de trois axes linéaires, d'une micropince MMOC et d'un plan de travail.

lation ou micro-assemblage uniquement dans l'air ou en milieu liquide (dans ce cas, seuls les objets et l'extrémité des outils sont plongés dans le milieu liquide).

2.4.2 Réalisation d'une station de micromanipulation compatible MEB

En lien avec les particularités du projet ROBOSEM (encombrement, compatibilité MEB), nous avons également fait l'acquisition d'un robot à trois axes intégrés. Il s'agit du MM3A développé et vendu par la société Kleindiek Nanotechnik. Le moyen d'actionnement de ces axes repose principalement sur l'utilisation de l'effet stick and slip piézoélectrique [Ber03] [Bre98]. Ce robot est composé de deux rotations et d'une translation (structure A-B-Z selon la FIG. 2.6). Les performances de ce robot sont détaillées dans le TAB. 2.3.

Une pince peut facilement être montée à l'extrémité de l'axe Z, permettant la réalisation d'un second type de station de micromanipulation (FIG. 2.6). Le MM3A n'est malheureuse-

	MM3A
Courses : axes (A,B,Z)	(180 ° ,180 ° ,12 mm)
Résolution	1 nm
Encombrement	60x25x20 mm ³

TAB. 2.3 – Caractéristiques du robot MM3A à trois DDL.

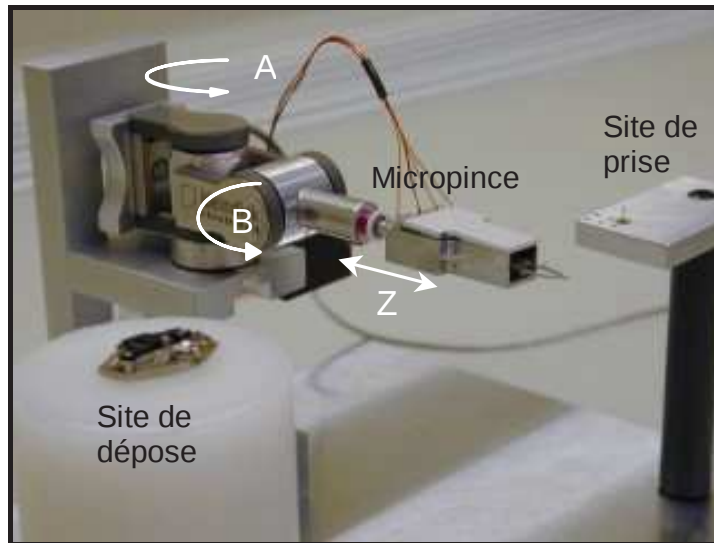


FIG. 2.6 – Structure de la seconde station de micromanipulation composée du robot MM3A, d'une micropince MMOC et d'un plan de travail.

ment pas équipé de capteurs de position, il n'est donc possible de commander des déplacements qu'en boucle ouverte. Sa structure n'est pas modifiable, aussi la station de manipulation est peu modulaire. En revanche, la compatibilité MEB, le faible encombrement et les courses importantes confèrent au MM3A un intérêt important.

L'utilisation de l'effet stick and slip pour générer des mouvements est également utile. En effet, lorsque la pince est en contact avec une partie fixe (support de travail par exemple) et que l'on commande un mouvement supplémentaire, le moteur "patine", ceci n'engendrant qu'une faible déformation de l'actionneur. Cela permet d'effectuer des opérations de manipulation sécurisées, sans risque de casser l'actionneur de la micropince MMOC pourtant très fragile.

2.4.3 La modularité : le cœur du problème

Chacune de ces stations de manipulation a ses caractéristiques propres. Nous choisissons celle que nous voulons utiliser en fonction du type de micromanipulation à effectuer. Jusqu'à

présent, ces deux stations ont suffi à réaliser de nombreux essais.

Ces deux stations de micromanipulation constituent la base de ce qui sera plus tard, nous l'espérons, un véritable système d'assemblage qui pourra, par exemple, intégrer une micro-usine. Nous souhaitons donc leur ajouter des fonctionnalités pour les rendre plus flexibles et pour qu'elles puissent réaliser des opérations de micromanipulation de manière automatique. Nous veillerons à ce que les fonctionnalités ajoutées conservent un esprit de modularité et qu'elles soient, si possible, utilisables avec d'autres stations de micromanipulation que celles que nous utilisons aujourd'hui.

2.5 Réflexions sur la flexibilité

Comme nous l'avons constaté (voir chapitre 1), l'automatisation et la flexibilité nécessaires à tout système de micro-assemblage sont deux problématiques prioritaires. Celles-ci sont scientifiquement complexes, c'est pourquoi de nombreuses équipes se concentrent principalement sur une seule de ces thématiques.

La plupart des équipes de recherche sont bien conscientes que la flexibilité sera un jour nécessaire en micro-robotique, cependant elles considèrent que l'étude de l'automatisation est prioritaire. Probablement pour cette raison, les solutions techniques apportant de la flexibilité aux micro-robots reposent davantage sur des concepts issus de la miniaturisation de solutions utilisées en robotique macroscopique que sur des solutions réellement adaptées à la micro-robotique. Malheureusement, à l'heure actuelle, peu de résultats probants ont été mis à jour sur ce point.

De notre côté, nous souhaitons d'abord réaliser une station d'assemblage flexible, c'est-à-dire nécessitant l'utilisation successive de paires d'outils différentes. Les stations de micromanipulation développées doivent donc évoluer pour permettre une succession d'opérations élémentaires de micro-assemblage. Naturellement, l'homme ne doit pas intervenir pour modifier une partie de la structure de la cellule d'assemblage pendant le processus (changement de pince manuel, par exemple). Notre station de micro-assemblage doit également pouvoir s'adapter à un changement de production, c'est-à-dire quand on passe de l'assemblage d'un composant à l'assemblage d'un autre système ayant des propriétés différentes (taille, nombre de pièces, géométrie des pièces,...). Pour faire évoluer nos stations de micromanipulation vers une station de micro-assemblage trois solutions sont envisageables. Celles-ci sont détaillées ci-dessous.

2.5.1 Système multi robots

Structures envisageables

Pour réaliser l'assemblage d'un micro-mécanisme, il est possible d'utiliser plusieurs micro-manipulateurs. Chacun serait dédié à une opération du processus d'assemblage. Comme pour l'assemblage de mécanismes de taille mésoscopique, plusieurs stratégies sont envisageables.

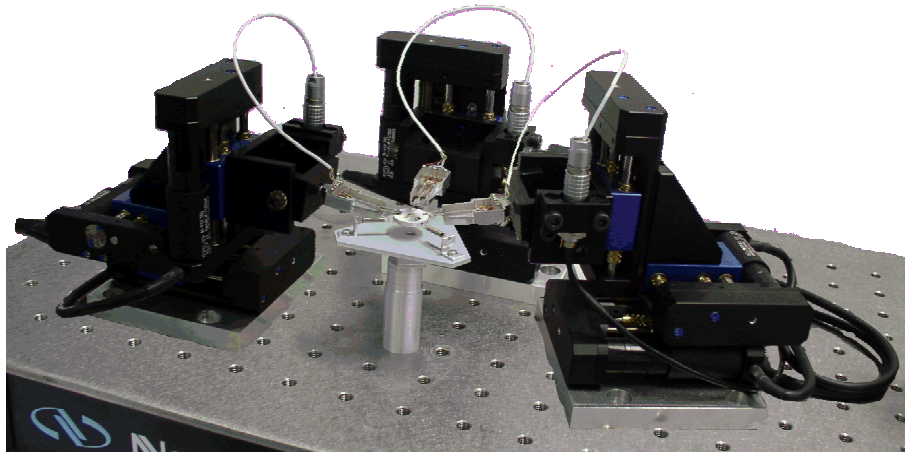


FIG. 2.7 – Montage photographique illustrant le concept de système d'assemblage composé de trois robots d'architectures identiques et d'un plan de travail compliant. Chaque robot est dédié à une tâche de micromanipulation.

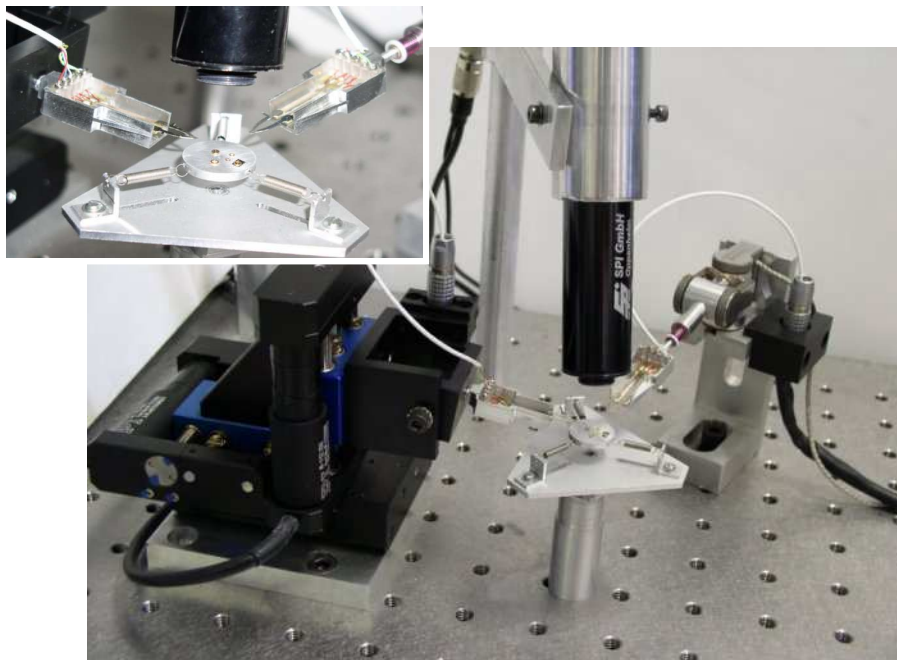


FIG. 2.8 – Système d'assemblage composé de deux robots de structure et de technologies différentes, d'un plan de travail souple et d'une caméra.

Tout d'abord, il est possible d'avoir recours à une structure composée d'un plan de travail autour duquel seraient disposées plusieurs stations de micromanipulation. Il est également possible d'utiliser plusieurs plans de travail avec des stations de manipulations dédiées à des opérations élémentaires d'assemblage ou au transfert de composants partiellement ou totalement assemblés d'un poste au suivant. Les FIG. 2.7 et 2.8 illustrent ces concepts. A chaque fois, plusieurs stations de manipulation sont disposées autour d'un plan de travail.

Avantages et inconvénients de ces structures

La FIG. 2.7 met en évidence l'utilisation de stations de micromanipulation de structures modulaires identiques ou fondées sur les mêmes technologies. Celles-ci résultent de l'assemblage de modules élémentaires dédiés à la génération d'un mouvement de translation ou de rotation. De cette manière, il est possible de réaliser une structure complexe et répondant aux besoins de l'utilisateur tout en utilisant une seule technologie rendant la commande de la station de manipulation plus simple. De même l'aspect modulaire permet à la fois de modifier la structure d'un robot si nécessaire, de pouvoir le réutiliser dans d'autres cellules d'assemblage et de choisir le nombre et le type de DDL adaptés à l'opération que doit effectuer chaque station de manipulation.

La FIG. 2.8 illustre, quant à elle, l'utilisation simultanée de plusieurs technologies avec la possibilité d'utiliser des robots dédiés ou non. L'inconvénient majeur de cette solution réside dans la diversité des technologies utilisées ; il est alors plus complexe de les commander. Cette solution permet toutefois d'optimiser la productivité de la cellule d'assemblage en mariant les robots dédiés à chaque tâche de micromanipulation.

Conclusions

Utiliser plusieurs stations de micromanipulation, chacune étant dédiée à la réalisation d'une tâche d'assemblage, permet d'optimiser un processus d'assemblage. Le recours à un seul type de technologie permet une simplicité de commande de la cellule. L'utilisation de modules élémentaires limite la productivité mais elle est plus simple à mettre en œuvre et les robots sont modifiables ou réutilisables si l'on veut changer de production. L'utilisation de robots dédiés permet d'augmenter la productivité de l'ensemble de la cellule d'assemblage mais engendre une complexité de commande et un coût importants.

D'un point de vue général, l'utilisation de plusieurs stations de micromanipulation est très coûteuse et très complexe. En effet, sans compter les capteurs nécessaires (effort, vision,...), il faut piloter plusieurs axes et le préhenseur de chaque station. Cette solution est donc envisageable pour des applications industrielles nécessitant un outil de production performant et productif.

A l'heure actuelle, aucune station n'est suffisamment aboutie pour être intégrée dans une telle cellule d'assemblage. En effet, les plus abouties fonctionnent en mode téléopéré ou en mode automatique sur des opérations très basiques (chapitre 1).

De nombreux travaux doivent encore être faits pour intégrer des informations fiables d'efforts ou des informations issues de la vision dans le fonctionnement de la cellule. Aussi, nous préférons d'abord développer une station de micromanipulation flexible capable d'effectuer des opérations d'assemblage de manière automatisée dans un espace confiné. Ensuite, il sera alors utile de se pencher plus précisément sur la conception de cellules de micro-assemblage plus complètes nécessitant plusieurs robots.

2.5.2 Système avec changement de pinces

La réalisation de deux stations de micromanipulation (section 2.4) nous permet aujourd'hui d'effectuer de nombreuses opérations de manipulations de micro-objets très divers. Pour ce faire, nous avons fabriqué plusieurs micropinces, chacune d'entre elles étant dotée d'une paire d'outils dédiée à la manipulation d'une famille d'objets ayant des caractéristiques dimensionnelles ou géométriques voisines. Chaque micropince peut être fixée à un robot à l'aide d'un système de fixation simple. Il est donc facile et rapide de changer manuellement la pince en fonction des caractéristiques des objets à manipuler.

Un système permettant le changement des micropinces de manière automatique permettrait de pouvoir réaliser des séquences d'opérations élémentaires tout en utilisant, à chaque fois, des outils adaptés aux particularités de chaque opération. Un système permettrait alors de sélectionner la pince adaptée à l'opération à effectuer pour la présenter devant le plan de travail afin de l'utiliser.

Grâce à cette solution, le robot qui est en général la partie la plus coûteuse de la station est conservé. Cela représente donc un avantage d'un point de vue économique et quant à l'encombrement. Un tel système permettrait également d'utiliser une micropince sur différents types de robots moyennant l'adaptation de l'interface mécanique entre robot et pince avec un esprit de modularité. D'un point de vue technique, de nombreuses solutions peuvent être envisagées. Nous allons donc détailler certaines de ces solutions afin de les comparer.

Tourelles revolver

Historiquement, les premiers systèmes permettant le changement des préhenseurs d'une station de micromanipulation relevaient de la miniaturisation de solutions initialement développées pour des systèmes macroscopiques. Nous pouvons par exemple citer les tourelles revolver dont deux structures sont présentées FIG. 2.9. Ce système permet de fixer plusieurs éléments fonctionnels sur une tourelle rotative. Ces éléments peuvent être des pinces (dans notre cas), d'autres types de préhenseurs ou tout autre système (collage, soudure, gravure, contrôle). La rotation de la tourelle est indexée ce qui permet de présenter la pince adaptée à l'opération d'assemblage à effectuer devant le plan de travail.

Cette solution est simple à mettre en œuvre et permet de disposer de plusieurs préhenseurs, elle est donc assez bien adaptée à l'assemblage. Toutefois, le nombre de pinces utilisables est

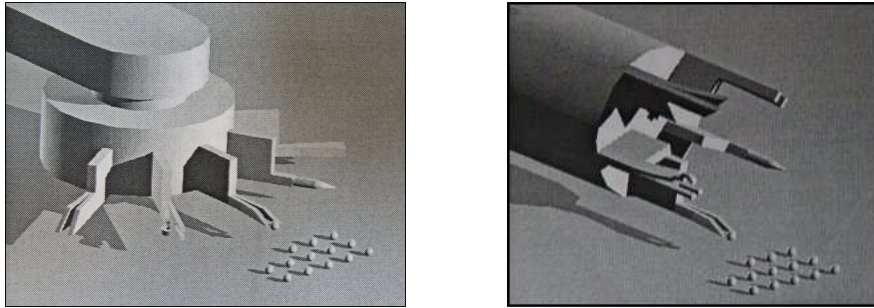


FIG. 2.9 – Deux types de tourelles revolver [Win04]. Plusieurs pinces (ou autres types de préhenseurs) sont montées sur un axe rotatif permettant d'utiliser la pince adaptée à l'opération à effectuer.

réduit ce qui peut s'avérer limitatif. Dans ce cas, il est possible d'utiliser une tourelle possédant un nombre de postes important moyennant un encombrement supplémentaire. Des problèmes de collision peuvent avoir lieu entre des objets posés sur la plan de travail et les pinces autres que celle qui est en cours d'utilisation. Pour finir, compte tenu des dimensions de la micropince développée au LAB, l'utilisation d'une tourelle engendrerait des mouvements et un encombrement difficilement compatibles avec le souhait de station de petites dimensions.

Système de changement de pince avec magasin

Une autre solution couramment répandue en assemblage macroscopique consiste à disposer d'un système de changement de pince. Comme précédemment, chaque pince est dédiée à une opération de la gamme d'assemblage. Une seule pince est fixée à l'extrémité du robot tandis que les autres sont stockées dans un magasin. Le schéma de la FIG. 2.10 illustre cette solution. Un système de changement de pince permet alors de fixer l'une d'elles à l'extrémité du robot ou dans le magasin. La FIG. 2.11 représente une exemple de ce concept, le système de fixation des pinces est ici mécanique.

Techniquement, de nombreuses solutions de fixation peuvent être envisagées. Compte tenu de la taille des pinces, il faut envisager une solution de fixation miniature. Dans le cadre du micro-assemblage, il faut concevoir un système qui permette de placer l'extrémité des outils de la micropince avec une répétabilité de l'ordre du micromètre (cf. FIG. 1.3). D'ailleurs, si des solutions de changement de pince ont été exposées dans l'état de l'art, aucun résultat d'étude de répétabilité n'a, à notre connaissance, été donné.

Les principes communément employés en robotique conventionnelle sont relativement limités lorsqu'il s'agit de les miniaturiser. De même, les principes utilisés en micro-robotique (généralement avantageés par la réduction d'échelle) ne sont pas efficaces lorsqu'il s'agit de pièces de quelques dizaines de millimètres. Un système de changement de micropince pourrait difficilement garantir une répétabilité de positionnement inférieure à quelques microns. Une ca-

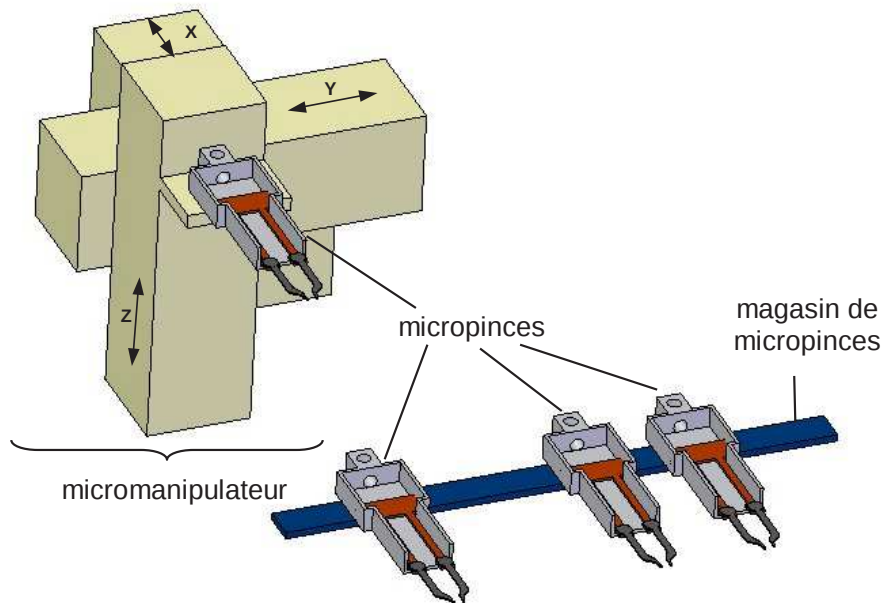


FIG. 2.10 – Schéma illustrant le concept de changement de micropinces appliqué à une de nos stations de micromanipulation. Une micropince est fixée au manipulateur, les autres sont fixées dans un magasin de micropinces.

libération serait donc nécessaire à chaque changement de micropince, ce qui peut s'avérer très limitant en mode automatique.

Un système de changement de pince doit également intégrer des connecteurs pour alimenter l'actionneur de la pince ou divers capteurs qui seraient montés sur cette pince. Cet aspect confère une complexité supplémentaire au changement de pince.

Pour finir, les robots utilisés en micro-robotique ont des courses qui dépassent rarement 30 mm. L'espace atteignable est donc couramment de l'ordre de quelques centimètres cubes. De plus, l'encombrement de la micropince MMOC développée au LAB est de l'ordre de deux centimètres cubes (section 2.2.2). L'utilisation d'un système permettant le changement des micropinces diminuerait donc considérablement l'espace de travail utilisable à des fins de micromanipulation. Une solution de changement de pince est donc séduisante mais pas optimale.

2.5.3 Système avec changement d'outils

La dernière solution envisagée pour apporter de la flexibilité à la station de manipulation consiste à réaliser un système de changement d'outils. Ici, un seul robot et un seul actionneur de micropince sont nécessaires par station de micromanipulation. Seule la partie terminale de la micropince, c'est-à-dire les outils, est changée. Le schéma de la FIG. 2.12 illustre cette solution qui nécessite le développement d'un système permettant de fixer une paire d'outils tantôt à

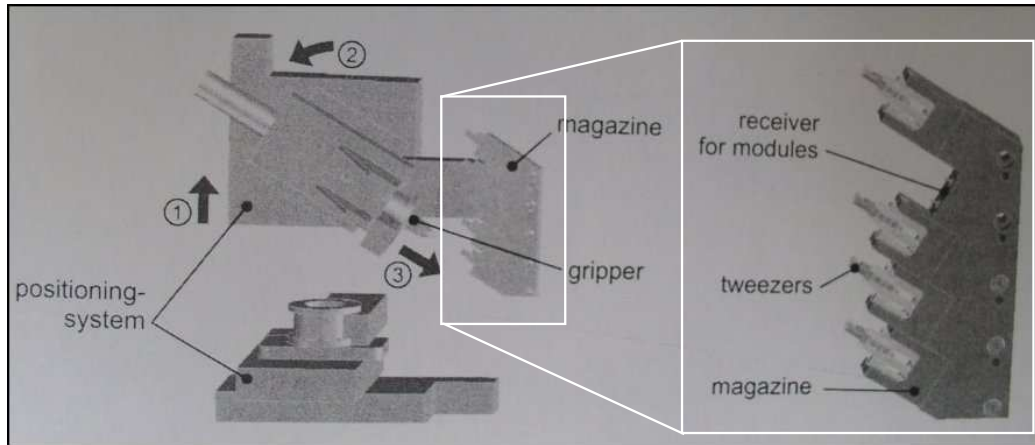


FIG. 2.11 – Système de changement d’organes terminaux développé par Weck et al. [Wec03]. Les organes terminaux à utiliser sont fixés à l’extrémité du robot, les autres sont fixées dans un magasin.

l’extrémité de l’actionneur tantôt dans un magasin d’outils.

En ce qui concerne la réalisation d’un tel système, d’un point de vue technique, l’utilisation de clips mécaniques est envisageable. De plus, en micro-robotique, certains principes physiques sont avantagés par la réduction d’échelle, les rendant plus attractifs. Ainsi, des principes de solidarisation spécifiques à la micro-robotique sont envisageables comme l’utilisation de l’effet magnétique, de l’effet électrostatique ou des forces de Van der Waals.

Le volume occupé par une paire d’outils est de $10 \times 10 \times 0,2 \text{ mm}^3$, ainsi, un panel important d’outils peut être mis à disposition. Cela garantit systématiquement l’utilisation d’une paire d’outils adaptée à chaque opération d’assemblage. L’encombrement de la station de manipulation équipée d’un système de changement d’outils serait alors amélioré.

A priori, un système de changement d’outils n’a pas besoin de connecteurs puisque les outils sont actuellement passifs. Cependant, un système de connectique peut s’avérer complémentaire et fort utile notamment pour relier un outil à un potentiel électrique souhaité (utilisation des forces électrostatiques, diélectrophorèse,...) ou un capteur qui serait fixé sur cet outil. L’aspect financier est également intéressant puisque toutes les parties les plus onéreuses (robot et actionneur) sont unitaires.

2.5.4 Conclusions : choix d’un système

La réflexion que nous avons menée dans le but de réaliser un système flexible, permettant la réalisation de séquences de micromanipulation, nous a aussi permis de comparer trois grandes solutions (voir TAB. comparatif 2.4).

Tout d’abord, il est possible d’assembler un micro-composant de manière flexible en utilisant plusieurs robots (dédiés ou modulaires) autour d’un ou plusieurs plan(s) de travail. Cette

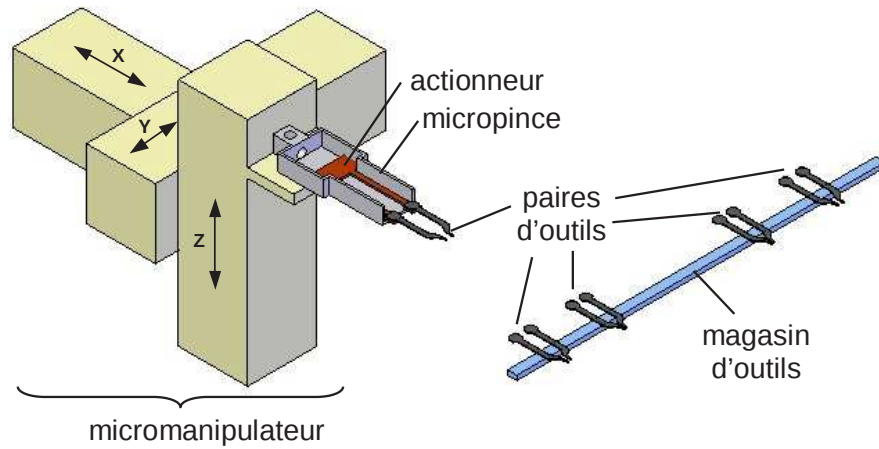


FIG. 2.12 – Schéma illustrant le concept de changement d'outils appliqué à une de nos stations de micromanipulation. Une paire d'outils est fixée à l'actionneur de la micropince, les autres sont fixées dans un magasin d'outils.

Système	multi-robots	changement de pince	changement d'outils
Flexibilité	-	+	+++
Encombrement	-	+	+++
Automatisation	+	-	+++
Précision	+++	-	+
Coût	-	+	+++
Connectique	-	+	+++
Modularité	+	+++	+++
Productivité	+++	+	-

TAB. 2.4 – Critères de comparaison des différentes solutions techniques pour réaliser une station de micro-assemblage flexible travaillant de manière automatique dans des espaces confinés.

solution est intéressante mais sera envisagée lorsque nous disposerons de stations de manipulations suffisamment abouties. Pour le moment, nous allons donc privilégier le développement d'une seule station de micromanipulation et tenter de lui apporter de la flexibilité.

Un système de changement de pince permet de résoudre ce problème. Cependant, cette solution paraît limitée en termes d'encombrement, de flexibilité et d'automatisation notamment pour les applications dans la chambre d'un MEB.

Nous avons donc envisagé le développement d'un système de changement d'outils qui résoudrait l'ensemble des problèmes évoqués jusqu'à présent. De plus, certaines applications, pour des problèmes de stérilité, peuvent nécessiter l'emploi d'outils jetables, solution envisageable uniquement si l'on dispose d'un système de changement d'outils. Cependant, une solution technique efficace doit être mise en œuvre pour permettre de solidariser momentanément une paire d'outils à l'actionneur de la micropince. Cet aspect sera discuté dans le chapitre suivant.

2.6 Conclusion

Actuellement, la majorité des équipes de recherche manipulent des objets génériques tels que des billes. De nombreux travaux ont été menés pour développer des systèmes permettant des déplacements ou des opérations de préhension et de nombreux travaux sont en cours afin d'automatiser ces stations de micromanipulation.

Pour ces raisons, nous avons réalisé deux stations de micromanipulation en utilisant les travaux antérieurs effectués au laboratoire (réalisation d'une micropince MMOC) ainsi que des robots micromanipulateurs commercialisés. Cette stratégie a permis de développer rapidement un système modulable et de nous focaliser tout de suite sur les problématiques propres au micro-assemblage.

Par la suite, une réflexion a permis de comparer différentes solutions permettant d'aboutir à la réalisation d'une cellule de micro-assemblage à partir d'une station de micromanipulation. Ainsi, il nous paraît préférable de nous pencher, en premier lieu, sur des problématiques de flexibilité avant d'aborder l'automatisation de la cellule. Nous avons donc comparé diverses possibilités permettant de rendre nos stations de micromanipulation plus flexibles. La solution qui nous a semblé la plus prometteuse consiste à développer un système de changement d'outils automatique.

Chapitre 3

Choix d'un principe pour système de changement d'outils

Un système de changement d'outils consiste à fixer temporairement et de manière automatique une paire d'outils à l'actionneur de la micropince (pour permettre des opérations de micromanipulation) ou à un magasin d'outils (pour permettre leur changement). Différentes solutions de fixation temporaire adaptées à la micro-robotique sont étudiées et comparées dans ce chapitre. Le choix d'utiliser une colle thermique est finalement retenu. L'utilisation d'éléments pouvant générer un échauffement permet de définir l'état de la colle (liquide ou solide) et donc la nature des liaisons mécaniques entre outils, actionneur et magasin.

3.1 Introduction

Les robots utilisés pour assembler des mécanismes macroscopiques sont rarement équipés d'un système permettant de changer automatiquement leur effecteur. Les robots sont majoritairement dédiés, certains possédant des poignets multi-outils. Nous trouvons, au mieux, des systèmes de changement manuel d'effecteur mais, en général, ce type de changement est fait de manière occasionnelle.

Si les systèmes de changement d'outils automatiques sont peu répandus dans le milieu de l'assemblage, ils le sont beaucoup plus dans le domaine de la fabrication et du contrôle. La majorité des systèmes de changement d'outils utilisés dans ces milieux sont fondés sur un principe de fixation temporaire mécanique.

En micro-robotique, la problématique est différente. Tout d'abord, l'encombrement est souvent fortement contraint notamment lorsqu'il s'agit d'effectuer des opérations de micromanipulation dans des espaces restreints tels que la chambre d'un Microscope Electronique à Balayage

(MEB)¹. Pour réaliser un micro-assemblage, la précision de positionnement des pièces couramment admise est inférieure au micromètre. Pour finir, les efforts à transmettre sont souvent très faibles, ils sont rarement supérieurs au dixième de Newton. Pour ces raisons et comme il en a été discuté au chapitre 2, un système de changement d'outils peut être particulièrement utile en micro-robotique. Dans ce chapitre, nous allons, dans un premier temps, nous intéresser aux critères à prendre en compte pour la réalisation d'un système de changement d'outils adapté à la station de micromanipulation développée au LAB. Nous étudierons ensuite diverses solutions techniques de fixation des outils adaptées à la micro-robotique. La comparaison de ces solutions nous permettra finalement de choisir celle qui nous semble la plus prometteuse.

3.2 Contraintes de conception pour la réalisation d'un système de changement d'outils

D'une manière générale, un système de changement d'outils permet l'utilisation séquentielle et automatique de plusieurs outils par un robot pour réaliser une séquence de tâches élémentaires (d'assemblage ou de fabrication par exemple) sur un produit. D'un point de vue technique, un système de changement d'outils permet de fixer momentanément des outils soit au robot soit dans un magasin. L'outil fixé au robot est utilisé pour réaliser une tâche, ou un ensemble de tâches, pour lequel il a été conçu. Les autres outils sont disposés dans le magasin. Ceux-ci peuvent ainsi être utilisés à tour de rôle jusqu'à ce que le robot ait exécuté la totalité de la séquence sur le produit.

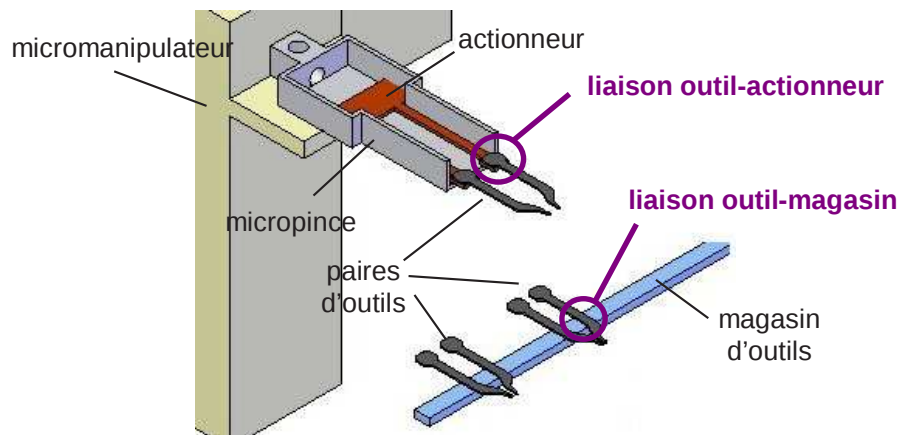


FIG. 3.1 – Schéma illustrant le concept de système de changement d'outils appliqué à une de nos stations de micromanipulation. Celui-ci consiste à réaliser une liaison encastrement démontable au niveau des contacts outils-actionneur et outils-magasin.

Dans notre cas, nous disposons de micro-robots sur lesquels nous avons fixé une pince elle-même dotée d'une paire d'outils (voir FIG. 2.4, 2.5 et 2.6 du Chapitre 2). Le système de chan-

1. Ce qui est l'une de nos applications.

3.2. CONTRAINTES DE CONCEPTION POUR LA RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OU

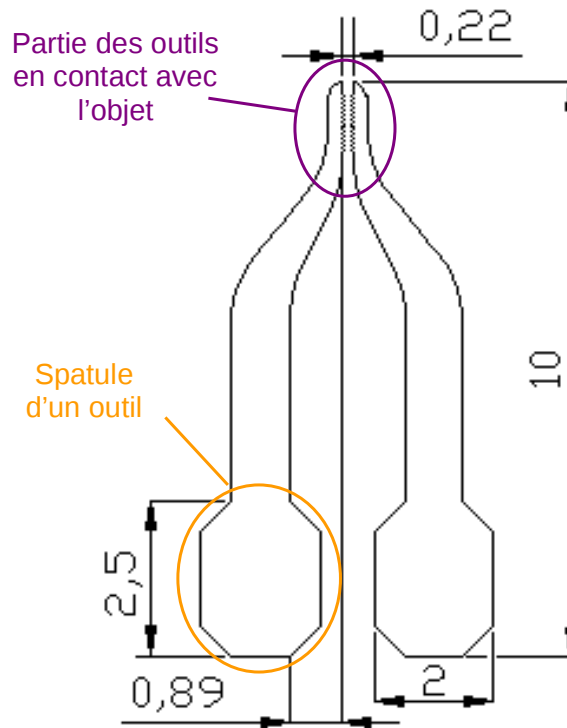


FIG. 3.2 – Forme générale d'une paire d'outils.

gement d'outils que nous souhaitons réaliser consiste à modifier la partie terminale de la pince, c'est-à-dire la paire d'outils en nickel (FIG. 3.1). Ainsi, nous avons deux outils à changer simultanément. Le micromanipulateur, qu'il s'agisse d'une structure réalisée à partir d'axes de micro-positionnement (axes PI par exemple), du robot MM3A ou de tout autre type de structure, ainsi que l'actionneur de la pince sont conservés. Les tâches élémentaires à réaliser sont uniquement des opérations de micromanipulation.

3.2.1 Influence des outils utilisés

Compte tenu du contexte indiqué précédemment, les outils que nous utilisons sont réalisés par paire. La FIG. 3.2 permet d'avoir un aperçu général de la forme des outils. L'épaisseur de ces outils est de $180\text{ }\mu\text{m}$. Chaque outil est constitué d'une partie en contact avec l'objet, d'une spatule (partie qui sera en contact avec l'actionneur) et d'un corps (structure liant les deux parties précédemment citées). La spatule et le corps sont identiques pour l'ensemble des outils. En revanche, la zone de contact avec l'objet diffère. Une vingtaine de types d'outils différents a été réalisée. La FIG. 3.3 montre quelques exemples de formes d'outils disponibles. Cette gamme d'outils permet de manipuler des pièces dont les dimensions sont comprises entre 50 et $500\text{ }\mu\text{m}$ et de géométries variées. Les outils n°1 et n°4 permettent, par exemple, de manipuler des objets cylindriques ou sphériques, les outils n°2 et n°3 sont davantage adaptés à des objets

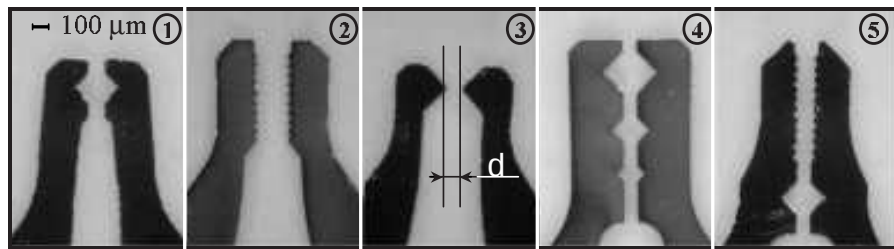


FIG. 3.3 – Différentes formes possibles de l'extrémité des outils (partie en contact avec l'objet). d est l'écartement initial entre les deux outils. L'échelle est identique sur l'ensemble de ces photographies.

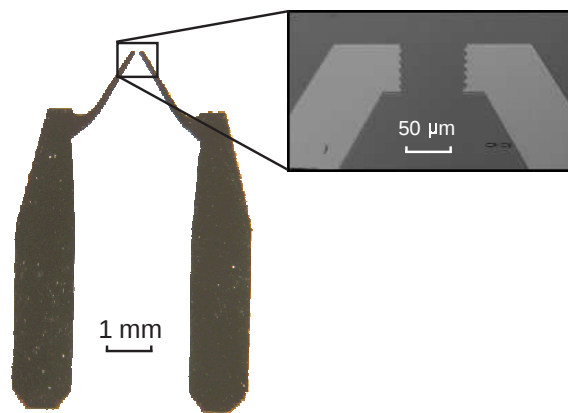


FIG. 3.4 – Exemple d'outils en silicium.

prismatiques. Les outils n°5 permettent de combiner la manipulation d'objets prismatiques, cylindriques et sphériques. La manipulation d'objets de géométrie différente de celles énoncées précédemment peut être effectuée en utilisant des outils existants ou en réalisant d'autres outils possédant des formes adaptées aux particularités de ces objets.

La forme et la taille des objets sont les paramètres qui influent le plus sur le choix d'une paire d'outils. Cependant, le matériau des objets à manipuler et les problèmes d'adhésions (cf. section 1.2.1) jouent également un rôle. En effet, la diminution de la surface de contact (outils n°3 de la FIG. 3.3 par exemple) ou l'augmentation de la rugosité au contact outil-objet (outils n°2 par exemple) réduisent les effets d'adhésion (cf. section 1.2.1). Pour finir, l'environnement de travail influence aussi ce choix.

Pour réaliser un système de changement d'outils, il sera nécessaire d'ajouter des éléments adéquats à l'interface actionneur-outil. Ces éléments permettront de fixer les outils à l'actionneur ou au magasin et seront préférentiellement montés sur l'actionneur plutôt que sur les outils. En effet, il est préférable de modifier les deux spatules de l'actionneur (parties de l'actionneur en contact avec les outils) que l'ensemble des outils à utiliser. De plus, certaines applications

3.2. CONTRAINTES DE CONCEPTION POUR LA RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS

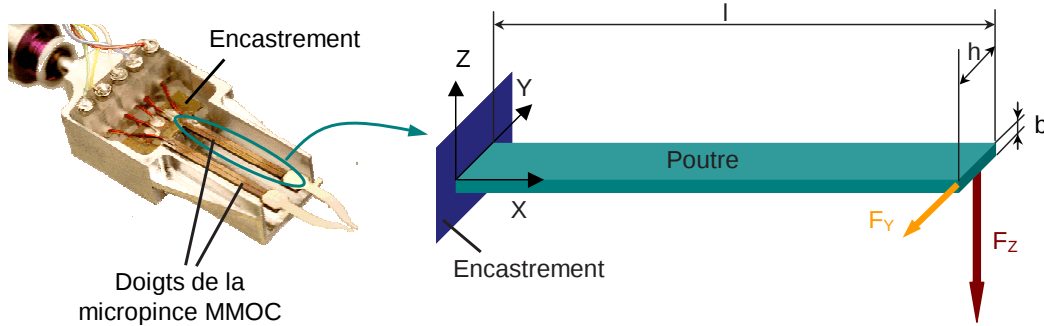


FIG. 3.5 – Modélisation d'un doigt de l'actionneur de la micropinse MMOC par une poutre encastrée-libre subissant une force de flexion selon l'axe Y ou Z.

telles que la manipulation d'objets biologiques, peuvent nécessiter l'emploi d'outils biocompatibles jetables. Dans ce cas, il s'agit de prendre une paire d'outils dans un magasin, de l'utiliser puis de la jeter. L'outil devient alors un consommable. Il paraît donc particulièrement important qu'aucun élément du système de changement d'outils ne soit ajouté à ceux-ci pour des raisons de simplicité et de coût.

Notons que des outils en silicium ont été réalisés très récemment au laboratoire afin de faciliter la manipulation d'objets plus petits que ceux manipulables par les outils en nickel (FIG. 3.4). Ces outils n'ont pas été utilisés dans le cadre des travaux présentés ici.

3.2.2 Contraintes de conception liées à l'actionneur

D'une manière générale, la conception d'un système de changement d'outils doit prendre en compte la fragilité des différents éléments (actionneur, outils, objets). Dans le cas présent, l'actionneur de la micropinse MMOC est une céramique piézoélectrique (de référence PIC 151 chez Physik Instrumente), il s'avère donc très fragile. Pour déterminer les limites d'utilisation du système de changement d'outils, nous allons quantifier les forces limites que l'actionneur peut subir. Pour cela, nous allons modéliser un doigt de l'actionneur par une poutre, encastrée à une extrémité, libre à l'autre. Celle-ci subit une force à son extrémité libre selon l'axe Y ou Z (FIG. 3.5). Les hypothèses que nous effectuerons ici sont celles des petites déformations, de l'homogénéité et de l'isotropie du matériau. En utilisant les relations de la résistance des matériaux, il est alors possible de déterminer la force de flexion admissible par la poutre en fonction de sa contrainte admissible et de ses caractéristiques géométriques (l'annexe A détaille les calculs correspondants) :

$$F_{Ymax} = \frac{h^2 \cdot b \cdot \sigma_{max}}{6 \cdot l} \quad \text{et} \quad F_{Zmax} = \frac{b^2 \cdot h \cdot \sigma_{max}}{6 \cdot l} \quad (3.1)$$

Les paramètres utilisés pour effectuer l'application numérique sont donnés dans le TAB. 3.1. Ainsi, les forces admissibles en bout de spatule de l'actionneur sont :

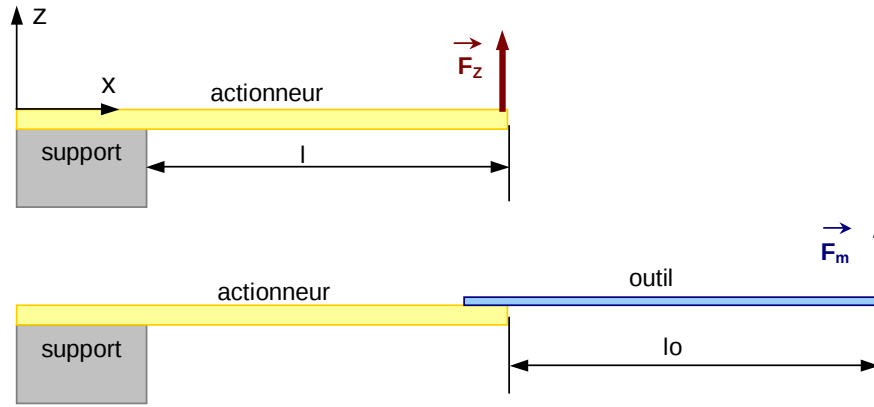


FIG. 3.6 – Schéma de l'actionneur seul subissant une force F_z et schéma d'un outil fixé à l'actionneur subissant une force F_m .

$$\begin{cases} F_y = 444 \text{ mN} \\ F_z = 177 \text{ mN} \end{cases} \quad (3.2)$$

Une force F_z appliquée à l'extrémité de l'actionneur revient à une force F_m appliquée à l'extrémité de l'ensemble actionneur-outil (FIG. 3.6) telle que :

$$F_m = \frac{l}{l + lo} \cdot F_z \quad (3.3)$$

Ce principe peut être appliqué de la même manière selon l'axe Y. Ainsi, les composantes en Y et Z de la force applicable à l'extrémité d'un outil sont :

$$\begin{cases} F_{mY} = 266 \text{ mN} \\ F_{mZ} = 106 \text{ mN} \end{cases} \quad (3.4)$$

Grandeur	symbole	valeur
contrainte à la rupture	σ_{max}	100 Mpa
longueur de l'actionneur	l	15 mm
largeur	h	1 mm
épaisseur	b	400 μm
longueur d'un outil	lo	10 mm

TAB. 3.1 – Paramètres d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique.

Afin de vérifier la pertinence des résultats de cette modélisation, des essais destructifs ont été réalisés. Ces essais consistent en l'utilisation d'un actionneur subissant une force de flexion.

3.2. CONTRAINTES DE CONCEPTION POUR LA RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OU

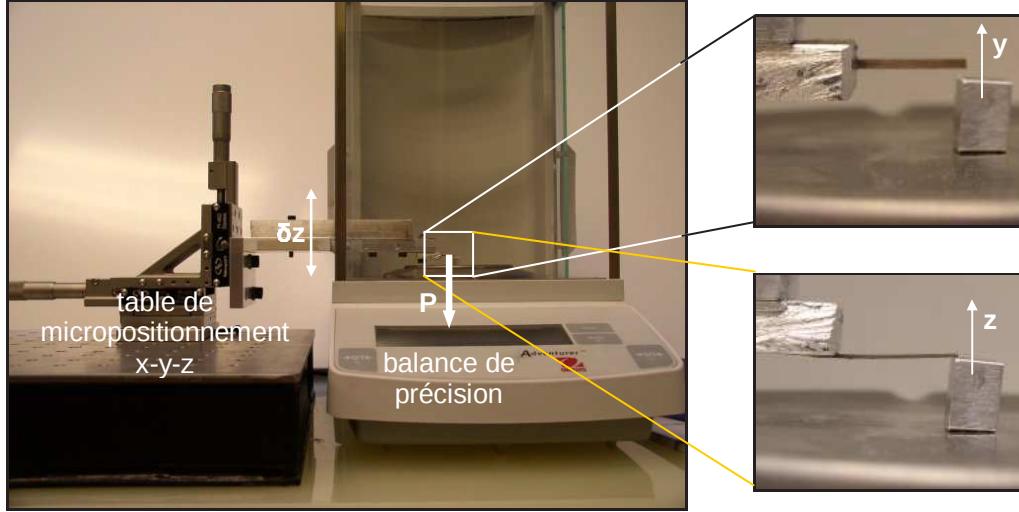


FIG. 3.7 – Montage utilisé pour déterminer la force à appliquer pour atteindre la rupture d'un doigt de l'actionneur piézoélectrique. La vue de gauche montre l'ensemble du montage. A droite, deux vues rapprochées de la poutre, en haut pour une force appliquée latéralement (F_Y), en bas la déformation de la poutre subissant une force de 200 mN (F_Z).

Celle-ci est appliquée de manière progressive jusqu'à ce que la rupture de l'actionneur soit atteinte. La FIG. 3.7 montre le dispositif expérimental utilisé pour effectuer ces essais. Un actionneur est fixé à l'extrémité d'une table de micro-positionnement. Celle-ci permet d'engendrer un déplacement selon l'axe de la gravité. L'actionneur est également en contact, à une extrémité, avec une balance de précision permettant de mesurer la force de flexion de la poutre. Trois essais ont pu être faits pour chacun des deux axes (Y et Z) permettant d'établir que les forces qui doivent être appliquées à l'extrémité de l'actionneur pour obtenir sa rupture sont :

$$\begin{cases} F_{Y_{mesure}} = 353 \text{ mN} \\ F_{Z_{mesure}} = 184 \text{ mN} \end{cases} \quad (3.5)$$

Les résultats théoriques sont assez bien corrélés avec ceux obtenus expérimentalement (4% pour F_Y et 25% pour F_Z). La différence entre les valeurs expérimentales et théoriques peut être expliquée par les moyens utilisés pour fabriquer les actionneurs :

- la première phase de réalisation des actionneurs est manuelle. Elle consiste à coller deux plaques de céramique à l'aide d'une colle conductrice très visqueuse. Ainsi, l'épaisseur de l'actionneur peut varier. Pour une force appliquée selon Y, les résultats expérimentaux et théoriques correspondent si une variation de l'épaisseur de 20 % est appliquée au modèle. Une variation de 3,5 % est nécessaire pour une force appliquée selon Z.
- La dernière phase de réalisation de l'actionneur consiste à réaliser sa forme finale par usinage ultra-sons. Pour une force appliquée selon Y, les résultats expérimentaux et théoriques correspondent si une variation de la largeur de 11 % est appliquée au modèle. Une variation de 1,7 % est nécessaire pour une force appliquée selon Z.

Compte tenu de ces éléments, très difficiles à maîtriser durant la phase de réalisation, nous considérerons que la corrélation entre résultats expérimentaux et théoriques valide les hypothèses effectuées lors de la modélisation.

3.2.3 Intégration dans la station de micromanipulation

Le système de changement d'outils à développer doit s'intégrer facilement aux stations de micromanipulation déjà réalisées sans que cela n'occasionne de modification majeure de leur structure. Le système de changement d'outils doit également être suffisamment simple d'utilisation.

L'intérêt majeur d'un tel système réside dans sa capacité à pouvoir effectuer plusieurs cycles en mode automatique. Pour ce faire, dans un souci de développement, d'automatisation et de compatibilité avec la commande d'autres systèmes utilisés dans les diverses stations de micromanipulation, l'utilisation d'un PC pour la commande du système de changement d'outils est une solution intéressante.

De même, la répétabilité de positionnement des outils doit être compatible avec les dimensions des objets manipulés. Dans le cas présent, celle-ci doit être de l'ordre du micromètre.

Les objets à manipuler sont de natures diverses, les technologies utilisées pour réaliser le système de changement d'outils doivent donc être compatibles avec ces spécificités. Par exemple, l'emploi d'éléments produisant des champs magnétiques compliquerait la manipulation d'objets métalliques.

Pour finir, la réalisation du système de changement d'outils peut nécessiter l'emploi de connexions électriques (pistes ou câbles d'alimentation). Si tel est le cas, celles-ci ne doivent pas engendrer de dysfonctionnement électrique de l'actionneur ni de contrainte mécanique qui s'opposerait aux mouvements de celui-ci.

3.2.4 Transmission des efforts

La micropince se trouve en configuration de micromanipulation lorsqu'une paire d'outils est fixée uniquement à l'actionneur. Pendant cette phase, des objets sont saisis entre les deux outils. Une force de serrage est alors exercée par ceux-ci sur l'objet afin de le maintenir et donc de permettre sa manipulation. Ces efforts sont engendrés par la déformation de l'actionneur et transmis par la liaison entre actionneur et outils. La réalisation du système de changement d'outils doit donc permettre la solidarisation momentanée des outils à l'actionneur tout en garantissant la transmission des efforts indiqués ci-dessus pendant les phases de micromanipulation.

L'actionneur a été dimensionné pour permettre le maintien statique d'une pièce de 1 g (pour un coefficient de frottement de 0,1) pour une tension d'alimentation de 100 V (voir annexe B). En cas d'accélération de 10g, une pièce de 0,1g peut être maintenue par la micropince [Agn03a]. Ainsi, la liaison entre actionneur et outils doit permettre la transmission d'une force de 55 mN

3.2. CONTRAINTES DE CONCEPTION POUR LA RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OU

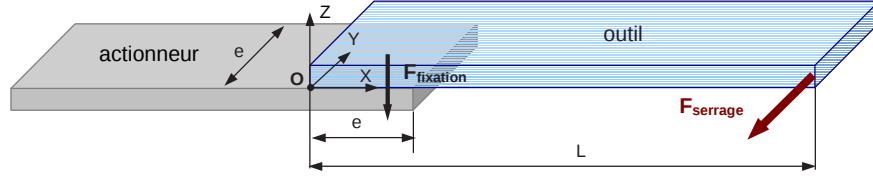


FIG. 3.8 – Système de fixation d'un outil à l'actionneur grâce à l'action de force $F_{fixation}$. Cet outil engendre par ailleurs une force de manipulation $F_{serrage}$.

selon l'axe Y (direction permettant le serrage d'un objet entre les doigts de la pince) et d'une force de 10 mN selon l'axe Z (direction permettant l'insertion d'un objet se trouvant entre les doigts de la pince).

Prenons un exemple générique consistant à supposer que le contact entre outils et actionneur est de nature plane et qu'un système engendre une force $F_{fixation}$ permettant la fixation des outils sur l'actionneur par phénomène de friction (voir FIG. 3.8). Par ailleurs, lors d'une opération de micromanipulation, un objet est saisi entre les deux outils, engendrant une force à l'extrémité de l'outil selon Y ($F_{serrage}$). La force de serrage engendre un couple au niveau du contact outil-actionneur tel que $C = F_{serrage} \cdot (L - \frac{e}{2})$. Pour maintenir la fixation en place, ce couple doit être compensé par un couple C_f exercé par la force $F_{fixation}$. Si f est le coefficient de frottement entre les matériaux des deux surfaces alors C_f s'écrit :

$$C_f = \int d \cdot f \cdot dF \quad (3.6)$$

où $dF = P \cdot dS$ résulte de la pression P exercée sur la surface dS et d est la distance entre le point d'application de dF et un point de la surface de contact. En considérant P comme uniforme, nous obtenons :

$$C_f = f \cdot P \iint_S d \cdot dS = f \cdot P \iint_S \sqrt{x^2 + y^2} \cdot dx dy \quad (3.7)$$

Le cas le plus favorable est défini lorsque le couple C_f est maximal, c'est-à-dire dans le cas présent, calculé au point O (x et y varient alors de 0 à e). L'expression de la force que le système de serrage doit exercer sur l'outil pour le maintenir fixé à l'actionneur, malgré la force de manipulation est :

$$F_{fixation} = \frac{e^2 \cdot F_{serrage} \cdot (L - \frac{e}{2})}{f \cdot \int_0^e \int_0^e \sqrt{x^2 + y^2} \cdot dx dy} \quad (3.8)$$

Dans le cas présent, la surface de contact outil-actionneur est plane et mesure $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Pour un coefficient de frottement entre les deux surfaces en contact de 0,2, le système de fixation doit finalement engendrer une force ($F_{fixation}$) de l'ordre de 2 N pour maintenir l'outil fixé à l'actionneur pour une force de manipulation de 55 mN.

3.2.5 Compatibilité MEB

Compte tenu de l'encombrement particulièrement restreint, de l'utilité grandissante d'effectuer des opérations de micromanipulation dans la chambre à vide d'un MEB et de l'implication dans le projet ROBOSEM (section 2.3.1), la compatibilité MEB du système de changement d'outils présente beaucoup d'intérêt (voir section 1.2.2). Rappelons que cela impose l'utilisation de matériaux qui dégagent faiblement et qui sont de bons conducteurs électriques. À l'inverse, certains éléments, notamment magnétiques, pouvant perturber la trajectoire des électrons, sont à éviter. Pour finir, la pression dans la chambre d'un MEB est faible (de l'ordre de 10^{-5} mbars), ce qui peut avoir de l'influence sur certains phénomènes physiques et donc aussi sur le bon fonctionnement d'un système de changement d'outils.

3.2.6 Bilan des contraintes de conception

Pour réaliser un système de changement d'outils, de nombreuses contraintes de conception sont à prendre en compte (formes, dimensions, tenue mécanique, matériaux). L'environnement d'utilisation (air ou vide) de ce système engendre également des contraintes. Ces dernières permettent d'établir la liste, non exhaustive, des critères à prendre en compte pour la réalisation d'un système de changement d'outils, notamment pour réaliser un système adapté à la micropince :

- permettre la fixation momentanée d'outils soit à l'extrémité de l'actionneur de la micropince soit dans un magasin d'outils ;
- garantir la transmission des efforts de manipulation ;
- être placé au niveau des spatules de l'actionneur et des outils (voir FIG. 2.2 et FIG. 3.2) ;
- être automatisable ;
- permettre une précision de positionnement des outils de l'ordre d'un micromètre ;
- être compatible avec une utilisation dans un MEB ;
- avoir un encombrement de l'ordre de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$, compatible avec les dimensions de la micropince ;
- pouvoir permettre la rupture de la liaison outil-actionneur plutôt que la rupture de l'actionneur ;
- être compatible avec la nature des objets à manipuler (il ne doit pas engendrer de magnétisation ou des déplacements d'objets à distance par exemple) ;
- nécessiter le moins d'éléments possibles sur les outils même si la géométrie de ceux-ci peut être modifiée ;
- s'intégrer à la structure des stations de micromanipulation dans lesquelles il sera implanté sans avoir à engendrer de modification de ces structures ;
- être simple d'utilisation ;
- disposer d'un système d'alimentation le moins contraignant possible.

3.3 Choix d'un système de solidarisation

Le nombre de solutions techniques permettant la réalisation d'un système de solidarisation momentanée des outils, tantôt à l'actionneur de la micropince, tantôt à un magasin, est, a priori, important. Cependant, il existe peu de moyens de fabrication réellement adaptés aux dimensions millimétriques des différents éléments et aux précisions nécessaires. En effet, la précision des moyens de fabrication macroscopiques (usinage, électro-érosion, laser par exemple) est rarement inférieure à la dizaine de microns. De plus, les technologies de micro-fabrication en salle blanche permettent la réalisation de pièces d'épaisseur millimétrique, mais avec des contraintes importantes telles que la durée de fabrication. Ainsi, malgré la richesse des moyens de fabrication utilisables, cette double limitation est problématique.

A partir de ces limitations technologiques, nous allons étudier différentes solutions techniques permettant la réalisation d'un système de changement d'outils. Notons que de nombreuses solutions ont été envisagées mais seules les plus pertinentes sont présentées dans ce document. En outre, compte tenu de la richesse des technologies utilisables ainsi que de leurs évolutions rapides, les solutions présentées ne constituent pas, bien sûr, une liste exhaustive.

Le premier type de solutions consiste à réaliser des systèmes permettant la connexion mécanique de deux pièces. Nous étudierons ensuite l'intérêt de solutions avantageées par la réduction d'échelle. Ainsi, nous nous pencherons sur l'utilisation de l'effet électromagnétique, des forces électrostatiques ou encore des forces de Van der Waals. Nous nous intéresserons enfin à l'utilisation de polymères et de colles repositionnables.

3.3.1 Système fondé sur les déformations mécaniques

Comme nous l'avons déjà vu au début de ce chapitre, de nombreux systèmes de changement d'outils "macroscopiques" permettent la fixation momentanée d'outils selon un principe mécanique. Or, la fabrication de pièces de dimensions de l'ordre du millimètre cube est encore possible avec des moyens de fabrication macroscopique. Il paraît donc naturel, dans un premier temps, de se pencher sur la réalisation d'une interface mécanique pour fixer momentanément les outils de la micropince. Notons que ce type de solution technique est tout à fait compatible avec l'environnement de la chambre d'un MEB.

L'état de l'art a mis en évidence plusieurs systèmes permettant la connexion mécanique de deux pièces, pièces de tailles compatibles avec l'encombrement défini par les besoins d'un système de changement d'outils. Les FIG. 3.9, 3.10 et 3.11 font état de systèmes mécaniques permettant la connexion de deux pièces. Leur principe est fondé sur la déformation de deux poutres. Ces mécanismes ont pour but de connecter plusieurs constituants élémentaires pour réaliser un système plus complexe. Leur principe de fonctionnement n'est donc pas réversible, en revanche, un système fondé sur la déformation de poutres permet la connexion électrique (FIG. 3.11). Le mécanisme de la FIG. 3.12 est, quant à lui, facilement réversible puisqu'il sert de micro-étau. Cependant, aucune étude de répétabilité de positionnement n'a été effectuée.

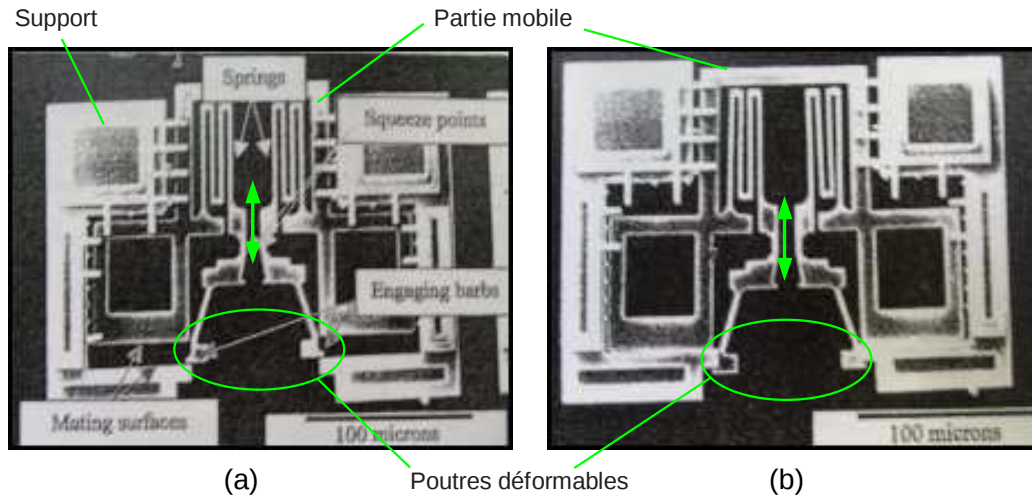


FIG. 3.9 – Système de micro-connecteur mécanique permettant de fixer définitivement deux pièces [Ski00]: (a) le connecteur est en position libre ; (b) le connecteur est fixé. La flèche indique la direction des mouvements de la partie mobile de ce connecteur.

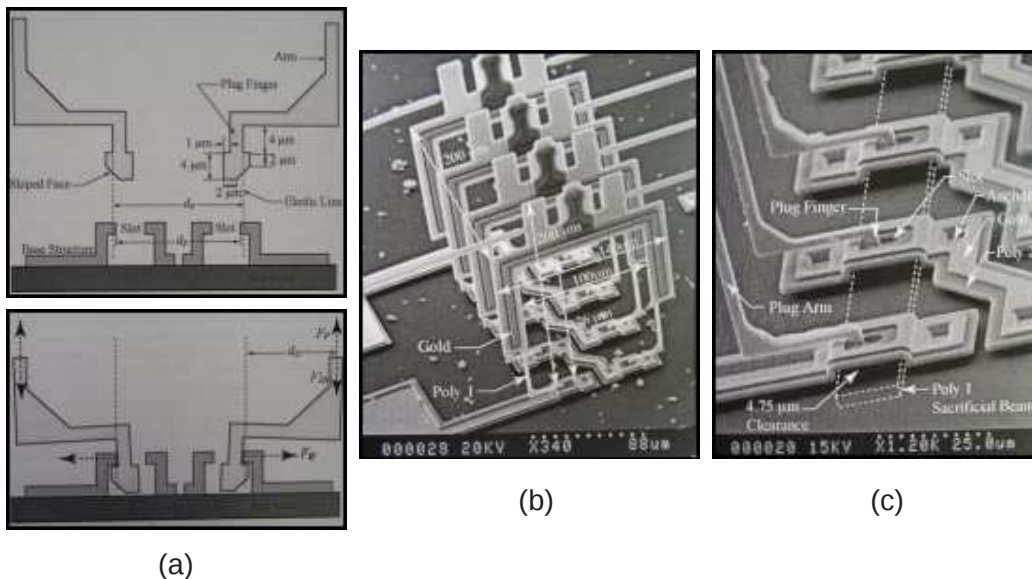


FIG. 3.10 – Bobine réalisée par assemblage de spires [Dec03a]. Le système de connexion est mécanique : (a) principe de fonctionnement ; (b) image MEB de la bobine ($200 \times 200 \times 140 \mu m^3$) ; (c) zoom sur un contact.

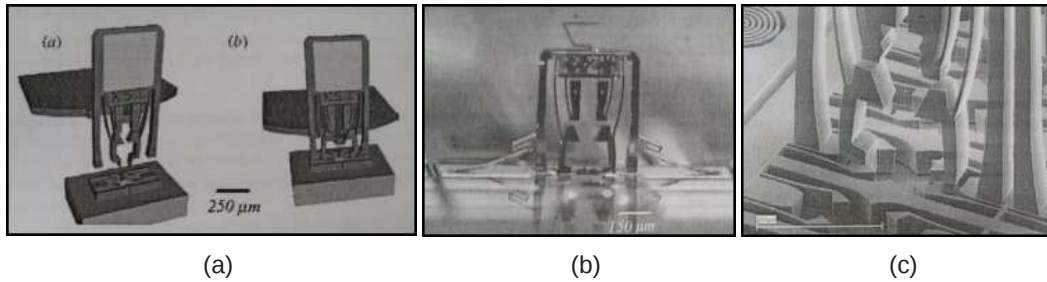


FIG. 3.11 – Système de connecteur mécanique [Tsu04] : (a) schéma du principe de fonctionnement ; (b) système réalisé possédant un système de connexion électrique ; (c) zoom sur la zone déformable du connecteur.

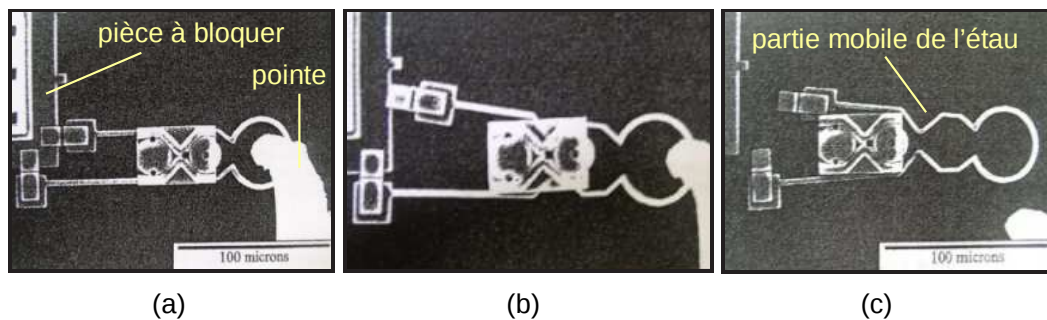


FIG. 3.12 – Éléments d'un système de serrage par micro-étau [Ski00]. La partie mobile permet de bloquer une pièce contre un support ou un autre micro-étau. Une pointe permet de translater manuellement la partie mobile de l'étau : (a) la pièce est maintenue par l'étau ; (b) la partie mobile de l'étau est déplacée vers la droite par l'intermédiaire d'une pointe ; (c) la pièce n'est plus maintenue par l'étau. Les phases a-b-c peuvent être inversées pour obtenir un serrage de la pièce.

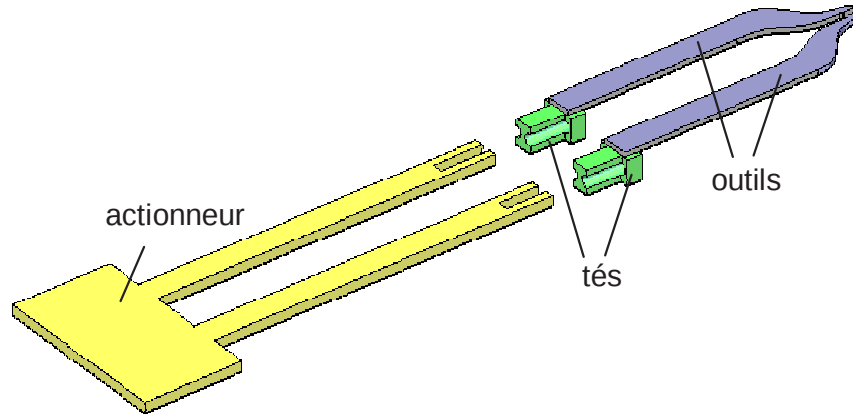


FIG. 3.13 – *Eléments utilisés pour réaliser un système de changement d'outils. Un té doit être fixé sur la spatule de chaque outil et l'extrémité de l'actionneur a été modifiée. Ces éléments permettent la solidarisation momentanée des outils sur l'actionneur.*

Aucun des systèmes présentés ne permet une solidarisation réversible de deux pièces de manière automatique. Toutefois, ils démontrent le potentiel des solutions mécaniques (compacité, forces de blocage) pour la réalisation de systèmes de changement d'outils. Dans l'optique d'un système de changement d'outils automatique, ces solutions doivent inclure un actionneur permettant de générer la déformation des poutres.

Compte tenu de ces réalisations, nous avons préalablement étudié une solution consistant à développer un système permettant de fixer momentanément deux pièces (un outil sur un actionneur dans notre cas) [Clé02]. Ce système consiste à modifier les spatules de l'actionneur (parties en contact avec les outils) et d'ajouter un élément (nommé "té") à chaque outil (FIG. 3.13). Fondé sur ce principe, deux solutions ont été envisagées.

Tout d'abord, étant donnée la structure de l'actionneur modifié, il a été envisagé d'utiliser l'effet piézoélectrique pour commander la flexion des petites poutres situées à son extrémité et ainsi permettre la fixation du "té" à l'extrémité de l'actionneur. Leur dimensionnement a été effectué selon l'encombrement disponible correspondant aux 2 mm de l'extrémité de l'actionneur. Une poutre de dimensions $L \times w \times t$, alimentée par une tension U , se déforme de δ selon la relation suivante [Smi89] :

$$\delta = \frac{3 \cdot E_3 \cdot d_{31} \cdot L^2}{2 \cdot w} \quad \text{avec :} \quad E_3 = \frac{U}{t} \quad (3.9)$$

Le TAB. 3.2 donne les valeurs numériques des différents coefficients qui interviennent dans cette relation et permet de déterminer que la flèche d'une telle poutre est de $1,05 \mu\text{m}$. Le fonctionnement de ce système nécessite alors la fabrication des éléments le constituant avec une précision bien meilleure que cette valeur. Compte tenu des moyens de fabrication disponibles,

<i>Symbole</i>	<i>grandeur</i>	<i>valeur</i>
U	tension d'alimentation	100V
t	épaisseur d'une poutre	400 μm
d_{31}	constante de charge	210 x 10 ⁻¹² m/V
L	longueur d'une poutre	2 mm
w	largeur d'une poutre	300 μm

TAB. 3.2 – Paramètres permettant la déflexion d'une poutre piézoélectrique.

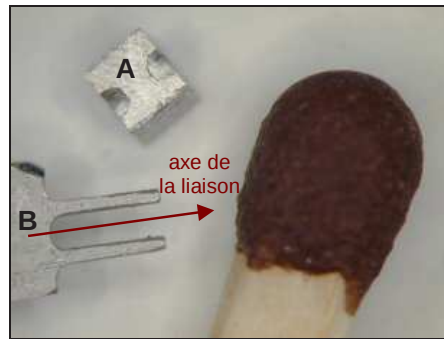


FIG. 3.14 – Pièces permettant la réalisation d'une connexion mécanique par déformation de deux poutres.

cette solution paraît difficile à mettre en œuvre.

Il a alors été envisagé d'utiliser uniquement les déformations mécaniques des poutres pour fixer les outils à l'actionneur. Dans notre cas, les poutres sont en céramique piézoélectrique, donc très fragile. Aussi, il a été décidé de réaliser une pièce rapportée, constituée d'un matériau ductile (en l'occurrence de l'aluminium) qui serait fixée à la spatule de l'actionneur et fonctionnant selon un principe de déformation mécanique de poutres. Les éléments de ce système sont présentés sur la FIG. 3.14. Une pièce identique à la pièce B doit être fixée à chaque spatule de l'actionneur tandis qu'un exemplaire de la pièce A doit être fixé à la spatule de chaque outil. Les deux pièces peuvent être connectées par un mouvement relatif axial engendrant la déformation des deux poutres. Des essais ont permis d'établir que la répétabilité de ce système est de +/- 5 μm selon chaque axe du trièdre. Chaque changement d'outils engendre une usure des poutres, dégradant les performances du système à l'issue d'une cinquantaine de changements. De plus, une erreur de positionnement relative des deux pièces du connecteur engendre des efforts (dans l'axe de la liaison) suffisamment importants pour conduire à la rupture de l'actionneur. Cette solution a représenté un premier pas intéressant, mais compte tenu de ses limitations, elle ne nous est pas apparue comme l'une des plus opportunes.

3.3.2 Solutions électromagnétiques (aimants, bobines)

Les effets d'une réduction d'échelle sur les lois de l'électromagnétisme

Les lois de la physique montrent que la réduction d'échelle est souvent favorable, parfois sans influence et rarement défavorable au magnétisme. Cugat et al. s'intéressent à cette réduction d'échelle et donnent de nombreux éléments de comparaison [Cug02b].

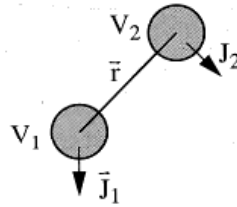


FIG. 3.15 – Interactions entre deux dipôles magnétiques [Cug02b].

Prenons comme exemple une interaction de deux aimants tel que représenté sur la FIG. 3.15. L'énergie magnétique E_{mag} de l'aimant n°2 résultant de l'interaction de l'aimant n°1 et l'aimant n°2 s'écrit :

$$E_{mag} = - \int \mu_0 \cdot \vec{M}_2 \cdot \vec{H}_1 dV = - \vec{J}_2 \cdot \vec{v} \cdot \vec{H}_1 \quad (3.10)$$

avec $\vec{J}_2$ et $\vec{M}_2$ respectivement l'aimantation et la magnétisation de l'aimant n°2, $\vec{H}_1$ le champ magnétique créé par l'aimant n°1 à la position de l'aimant n°2 et V_2 , le volume de l'aimant n°2.

La force $\vec{F}_{12}$ exercée par l'aimant n°1 sur l'aimant n°2 résulte de la variation de cette énergie par rapport à la position de l'aimant n°2, soit :

$$\vec{F}_{12} = \frac{\partial E_{mag}}{\partial \vec{r}} = \vec{\text{grad}}(E_{mag}) \quad (3.11)$$

Une réduction homothétique du dipôle (volume des aimants et distance les séparant) d'un facteur 1000 engendre donc une diminution de la force magnétique d'un facteur 100. Ainsi, une réduction par 10 de toutes les dimensions engendre une augmentation de la force massique d'un facteur 10 également. L'utilisation d'aimants permanents est donc particulièrement intéressante pour réaliser un système de solidarisation de petites dimensions.

Si l'on s'intéresse à la réduction de taille d'une bobine, nous pouvons constater que l'intensité du champ engendré diminue proportionnellement à la réduction d'échelle [Cug02b]. Cependant, comme pour un aimant, le gradient du champ augmente. Ces deux effets combinés font que la force massique est inchangée dans le cas d'une interaction bobine-aimant et diminuée

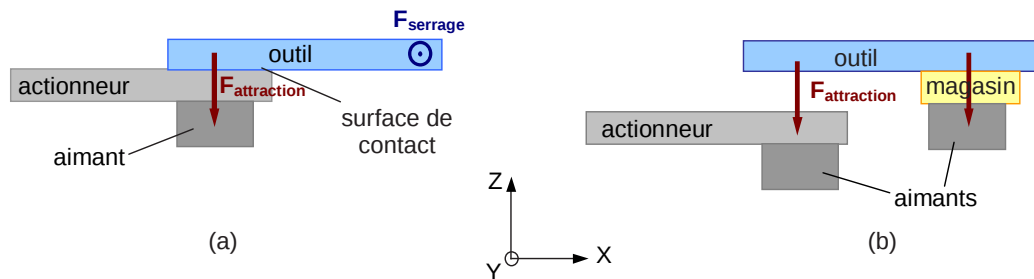


FIG. 3.16 – Système de changement d'outils utilisant des aimants : fixation des outils à l'actionneur en vue latérale : (a) phase de manipulation, les outils sont fixés à l'actionneur et subissent un effort dû au serrage de l'objet ; (b) phase de changement d'outils, l'actionneur n'est plus en contact avec les outils fixés dans le magasin.

pour une interaction bobine-bobine. Une réduction de taille semble donc, de premier abord, peu favorable à l'utilisation de bobines.

Cependant, les densités de courants applicables aux bobinages sont principalement limitées par les problèmes thermiques. Or, une réduction d'échelle engendre une augmentation du rapport surface/volume, la convection est donc facilitée en petites dimensions. De même, lorsque les pièces sont plus petites, les distances à parcourir pour atteindre les surfaces d'évacuation de la chaleur sont plus petites, la conduction est donc également facilitée. Les problèmes thermiques sont donc réduits lorsque l'on diminue la taille d'un système électromagnétique, il est alors possible d'augmenter les densités de courant. Pour des systèmes de taille conventionnelle, la limite se situe autour de 5 A/mm^2 alors qu'en micro-technologie, il est possible d'atteindre des densités de courant de plusieurs milliers d'ampères par millimètre carré. L'utilisation de bobines de petite taille est donc également favorisée par la réduction d'échelle.

Application au système de changement d'outils

Détaillons quelques solutions permettant d'intégrer des aimants ou des bobines de petites dimensions permettant la réalisation d'un système de changement d'outils.

Comme précédemment mentionné, les aimants sont les éléments les plus favorisés par la réduction d'échelle. Des développements récents ont conduit à la réalisation d'aimants de taille bien inférieure au millimètre cube [Cug02b]. Il est donc possible de placer un (ou plusieurs) aimant(s) sur la spatule de l'actionneur ou sur chaque outil. Considérons le système de fixation adapté à la micropince et défini par la structure présentée FIG. 3.16. Un aimant fixé à l'actionneur (respectivement au magasin) permet de fixer temporairement un outil sur cet actionneur (respectivement au magasin).

Nous avons vu que dans cette configuration la force de fixation doit être de l'ordre de 2 N pour garantir la fixation de l'outil à l'actionneur pendant les phases de micromanipulation (cf. section 3.2.4). Cette force est non compatible avec celle admissible par l'actionneur, qui est de

177 mN selon Z (cf section 3.2.2). En effet, lorsqu'une paire d'outils est fixée au magasin et que l'on désire fixer ces outils à l'actionneur, ce dernier, en phase d'approche, subit la force d'attraction selon Z due aux aimants, engendrant sa rupture (FIG. 3.16 (b)). Ce problème apparaît de manière similaire pour les phases de dépose des outils dans le magasin. Afin de pallier ce problème, il est possible de disposer plusieurs aimants positionnés de manière à créer un couple résistant à celui engendré par les forces de manipulation. Il est également possible de réaliser un autre type de surface de contact mais cela nécessiterait certainement la modification des outils.

Depuis quelques années, de nombreux travaux de recherche ont conduit à la réalisation de bobines très petites à partir de procédés de micro-fabrication en salle blanche. Des bobines planes pourraient par exemple être réalisées sur les spatules de l'actionneur. Une fois les outils en contact, l'alimentation des bobines permettrait la fixation des outils sur l'actionneur ou sur le magasin. Cette solution nécessite que les bobines soient alimentées longuement engendrant des problèmes d'échauffement. Cependant, pouvoir couper l'alimentation des bobines présente un grand intérêt pendant les phases d'approche puisqu'aucun effort à distance n'est alors généré.

Une solution fondée à partir des deux idées développées précédemment permettrait de bénéficier des avantages des aimants (efforts importants, absence d'échauffement) avec ceux des bobines (génération momentanée d'efforts en fonction de l'alimentation des bobines). Une bobine pourrait être alimentée de manière à générer un champ compensant celui d'un aimant pendant une phase d'approche. Un positionnement relatif précis entre les outils et le magasin ainsi qu'entre les outils et l'actionneur serait donc possible. Ensuite, la coupure de l'alimentation de la bobine permettrait alors de fixer deux pièces ensemble. Cette solution nécessite une alimentation seulement pendant les phases de changement ce qui la rend particulièrement intéressante. Cependant, les problèmes évoqués précédemment, notamment concernant la forme des surfaces de contact sont encore à résoudre.

Conclusion

Utiliser un principe électromagnétique pour réaliser un système de changement d'outils semble prometteur compte tenu des effets favorables de la réduction d'échelle ainsi que des évolutions technologiques récentes. Cependant, l'utilisation de principes électromagnétiques peut être néfaste à la réalisation de tâches de manipulations. En effet, un système de changement d'outils utilisant un tel principe ne doit pas engendrer de déplacements, la magnétisation, ou un échauffement trop important des objets à manipuler à distance, surtout dans le cas où les outils sont en nickel. Ces problèmes se trouveraient amplifiés dans le vide (MEB) engendrant en outre des déformations des images si le système de changement d'outils n'est pas convenablement blindé. Pour finir, la fabrication d'éléments électromagnétiques par des procédés salle-blanche pose des problèmes de compatibilité de matériaux même si de nombreux efforts sont faits pour les résoudre. L'analyse rapide que nous venons de mener indique que les solutions envisagées nécessitent très certainement une modification partielle des différents éléments (outils et actionneur). Le bilan effectué précédemment (section 3.2.6) a mis en évidence que cette solution pouvait être envisagée mais n'était pas souhaitable.

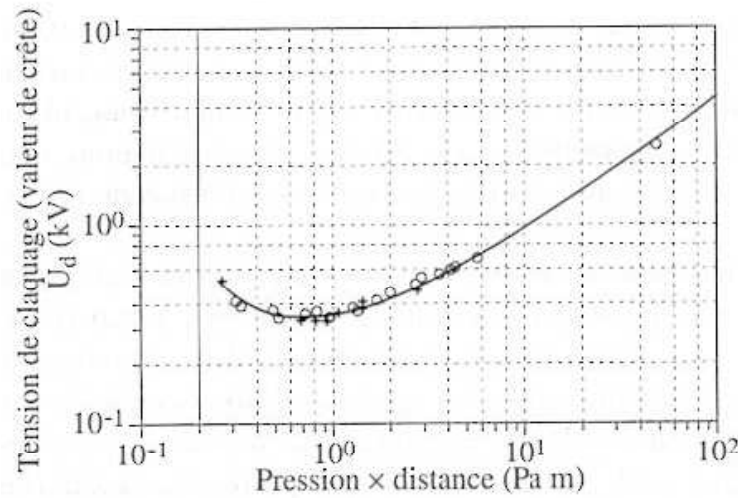


FIG. 3.17 – Courbe de Paschen : Evolution de la tension de claquage d'un condensateur en fonction de la distance entre ses deux électrodes [Cug02b].

3.3.3 Solutions fondées sur les forces électrostatiques

Les effets d'une réduction d'échelle sur les lois de l'électrostatique

La réduction d'échelle est favorable à la réalisation d'un système de changement d'outils fondé sur les forces électrostatiques. D'abord, ces dernières diminuent proportionnellement moins vite que les forces de gravité pour une réduction d'échelle donnée car ce sont des forces surfaciques. Ensuite, la courbe de Paschen (FIG. 3.17), indique que la tension de claquage augmente lorsqu'on diminue l'entrefer entre les électrodes pour un entrefer inférieur à 3 μm à pression atmosphérique. Pour finir, les procédés de micro-fabrication permettent de réaliser des empilements de couches conductrices et isolantes. Ils sont donc particulièrement adaptés à la réalisation de ce genre de systèmes.

Application au système de changement d'outils

La FIG. 3.18 indique une configuration possible d'un système permettant la fixation d'outils tantôt à l'actionneur (tension U_2), tantôt au magasin (tension U_1). Ici, la nature du contact outil-actionneur et outil-magasin est plane. La FIG. 3.19 représente un contact composé de deux électrodes et de surface S . Une différence de potentiel U entre ces deux électrodes engendre une force d'attraction F . L'énergie stockée dans le condensateur est définie par l'expression :

$$E_{elec} = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (3.12)$$

C est la capacité du condensateur, qui s'écrit dans le cas d'un condensateur plan :

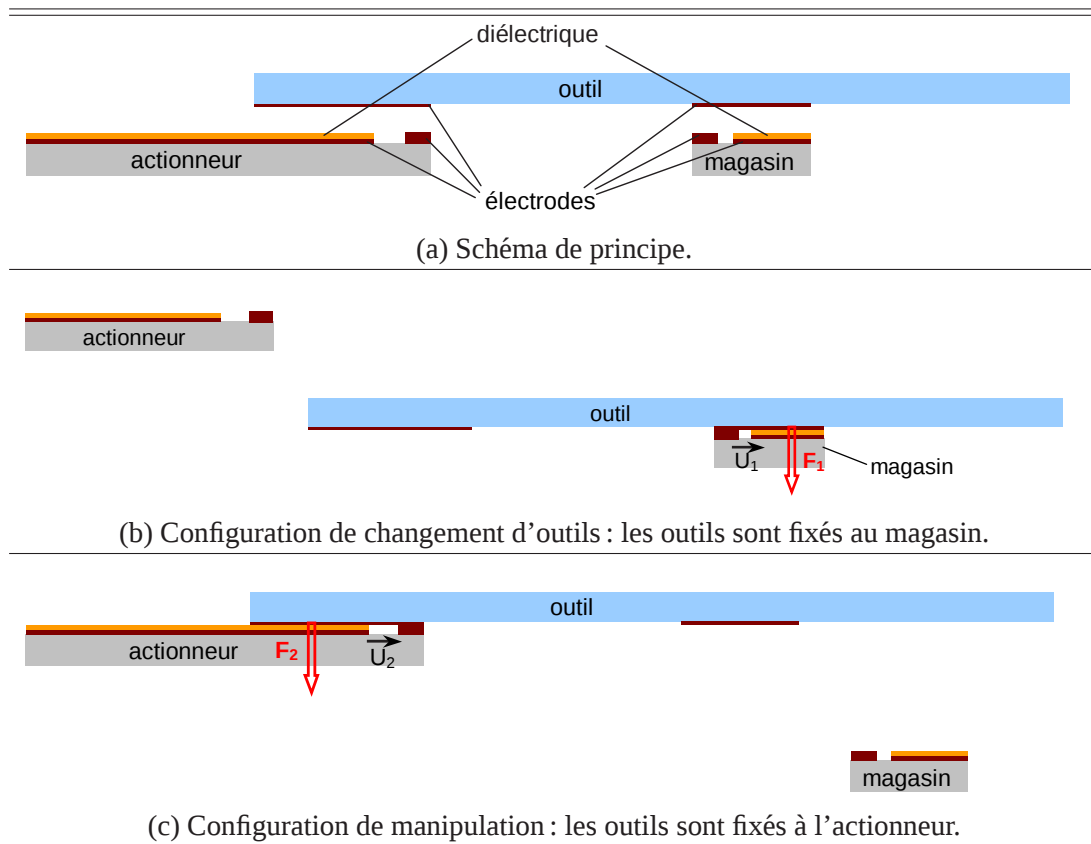


FIG. 3.18 – Utilisation des forces électrostatiques pour réaliser un système de changement d'outils.

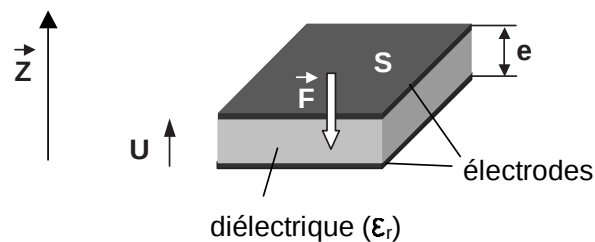


FIG. 3.19 – Schéma d'un condensateur plan et détermination de la force d'attraction des deux électrodes.

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \cdot \frac{S}{e} \quad (3.13)$$

où ε_r est la permittivité du diélectrique, ($\varepsilon_r = 1$ pour l'air), ε_o est la permittivité du vide ($\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ s}^4 \text{ A}^2 / \text{m}^3 \text{ kg}$) et e l'épaisseur du diélectrique. Comme l'énergie électrique emmagasinée dans le condensateur peut être convertie en énergie mécanique, on peut déduire l'amplitude de la force d'attraction F en fonction de caractéristiques du condensateur et de sa tension d'alimentation par la différentiation de l'énergie :

$$F = \frac{\partial W}{\partial e} = \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot U^2 \cdot S}{2 \cdot e^2} \quad (3.14)$$

Le TAB. 3.3 permet de comparer quelques valeurs numériques de cette force, calculées en fonction des paramètres de tension U et d'épaisseur du diélectrique e . Dans la section 3.3.2, nous avons déterminé la force que le système de serrage doit nécessairement exercer selon la normale au plan de contact outil-actionneur pour que les outils restent fixés à l'actionneur pendant une phase de manipulation. Cette force doit être de l'ordre de 2 N (cf. section 3.2.4), ce qui correspond ici à une tension d'alimentation de 150 V pour un entrefer de 1 μm . Il s'agit là de valeurs limites, sachant qu'un entrefer de cette épaisseur nécessite une propreté absolue, la moindre poussière qui viendrait se placer entre les deux électrodes engendrerait certainement un claquage du diélectrique. L'utilisation d'un tel principe pour réaliser un système de changement d'outils semble donc passer par une solution plus complexe, nécessitant par exemple la modification du contact (actuellement plan) entre outil et actionneur.

$F \text{ (mN)}$		épaisseur $e \text{ (}\mu\text{m)}$		
		1	5	10
tension	100	885	35	8,8
U(V)	150	1990	79	20

TAB. 3.3 – Valeurs numériques de la force d'attraction des deux électrodes pour une permittivité du diélectrique $\varepsilon_r = 5$.

Conclusion

La réalisation d'un système de changement d'outils fondé sur un principe électrostatique semble intéressante notamment pour des raisons de simplicité de réalisation d'électrodes. Il est également très simple de déterminer la force de serrage nécessaire en fonction de la tension d'alimentation. En revanche, l'utilisation de ce type de solution requiert probablement la modification de la forme des spatules des outils notamment dans leur épaisseur. Pour finir, le fonctionnement d'un tel système serait probablement perturbé et perturbant dans un MEB.

3.3.4 Solutions fondées sur l'utilisation de polymères ou de colles repositionnables

L'utilisation de colles est particulièrement intéressante pour la réalisation d'un système de changement d'outils. Faciles d'utilisation, elles possèdent en général de très bonnes caractéristiques au cisaillement. Ce type de solution semble plus adapté au maintien des outils sur l'actionneur pendant les phases de micromanipulation que les solutions développées précédemment. De plus, elles possèdent des caractéristiques faibles au pelage (force exercée selon Z dans notre cas). Cette propriété, généralement néfaste, est particulièrement intéressante dans notre cas puisqu'elle peut être utilisée pour décoller les outils.

Un des grands avantages des colles est leur capacité à s'adapter à tous types de contacts. Selon les colles, le principe d'adhérence est engendré par un phénomène ou une combinaison de plusieurs phénomènes parmi les suivants :

- liaisons chimiques (deux atomes voisins partagent des électrons) ;
- liaisons ioniques (un atome donne un électron à un autre atome) ;
- liaisons de Van der Waals (attraction entre dipôles induits) ;
- affinité moléculaire ;
- liaison mécanique (la colle remplit des interstices microscopiques).

Par ailleurs, chaque colle est un polymère particulier (molécule de forme allongée) ce qui lui confère une excellente cohésion. L'ensemble de ces propriétés permet ainsi la solidarisation de deux surfaces.

Le terme *repositionnable* caractérise les colles qui permettent une fixation non définitive. En effet, pour réaliser un système de changement d'outils, la fixation des outils doit être temporaire et réversible. Cela peut être réalisé en plaçant un film de colle aux interfaces outils-actionneur et outils-magasin. Parmi les colles repositionnables, nous pouvons par exemple citer le scotch® (double face), les post-it® que nous employons quotidiennement, mais aussi le gel-pack® (souvent utilisé pour maintenir des échantillons de petites dimensions dans leur boîte), le PDMS (PolyDiMethylSiloxane), ou encore les colles thermiques. Cette liste représente les principaux matériaux utilisables mais n'est pas exhaustive.

Les scotch, post-it et gel-pack fonctionnent selon le même principe et sont tous disponibles sous forme de films de différentes épaisseurs. Le PDMS, quant à lui, est initialement disponible sous forme liquide. Une fois appliqué, il doit réticuler pour engendrer alors un élément adhérent (sous forme de film ou autre).

Après avoir mis en œuvre certaines de ces solutions, nous avons pu constater deux aspects négatifs. Tout d'abord, l'intensité des efforts de maintien des deux surfaces entre elles n'est pas répétable et varie dans des proportions de plusieurs centaines de pourcents. Nous avons également remarqué que ces surfaces fixent très bien toutes les impuretés en suspension dans l'air dégradant rapidement les propriétés de maintien du film de colle. Ces remarques sont confirmées par les travaux de Daltorio et al. [Dal05] qui ont développé le robot présenté FIG.

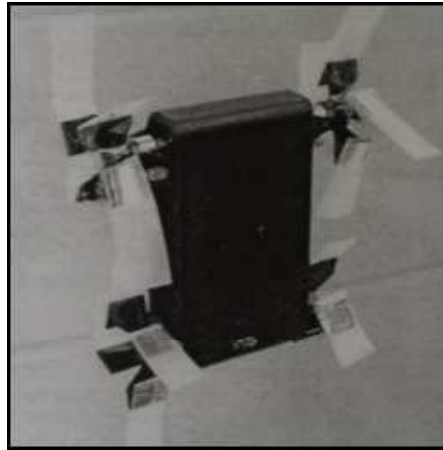


FIG. 3.20 – Robot possédant quatre roues, chacune équipée de quatre morceaux d'adhésif [Dal05]. Ce robot peut se déplacer sur des parois verticales.

3.20. Ces solutions nous sont donc apparues intéressantes mais manquent cruellement de fiabilité, même si l'utilisation d'un environnement contrôlé est envisageable.

La colle thermique, quant à elle, possède des propriétés particulières. En effet, elle est solide à température ambiante et devient liquide lorsqu'on la chauffe suffisamment. Un simple changement d'état est ainsi possible par modification de la température. La fluidité de cette colle, en phase liquide, lui permet d'épouser précisément le relief de la surface sur laquelle elle est déposée. Plus tard, lors de la solidification de cette colle, elle épousera ce relief, restant fixée à celui-ci.

Ce principe peut être utilisé pour fixer deux surfaces planes ensemble permettant de réaliser un système de changement d'outils. Cette solution permet une bonne transmission des efforts lors des phases de manipulation puisque les liaisons outils-actionneur sont rigides. Cette solution est simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de modification de la forme des outils. En effet, la fixation des outils à l'actionneur est possible par collage des spatules des outils sur les spatules de l'actionneur telles qu'elles sont. Pour finir, la liquéfaction de la colle (engendrée par chauffage) n'intervient qu'aux moments des changements d'outils. Cette solution est prometteuse mais présente toutefois des inconvénients. Tout d'abord, chauffer les outils peut s'avérer néfaste pour les objets à manipuler d'autant plus si les outils sont de bons conducteurs thermiques. Ensuite, la compatibilité MEB de cette solution est loin d'être acquise pour des raisons thermiques (les coefficients intervenant dans les phénomènes thermiques dans le vide et dans l'air sont très différents) et pour des raisons de dégazage et de pollution par la colle.

3.3.5 Solutions fondées sur les forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals résultent de l'interaction entre des dipôles électriques induits au niveau moléculaire. Elles augmentent quand la distance entre deux surfaces diminue. Il est a

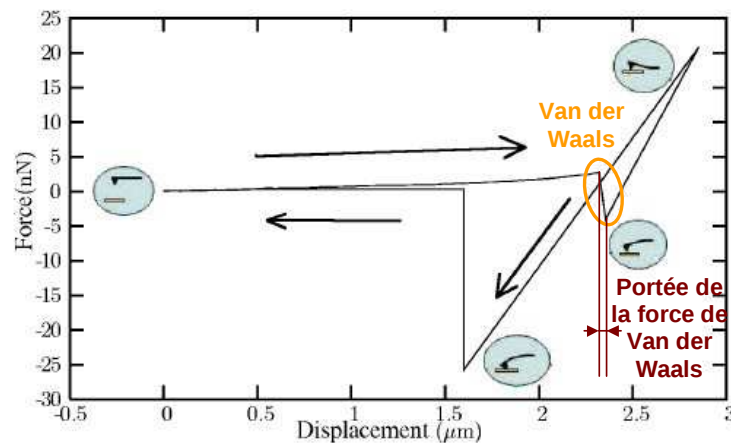


FIG. 3.21 – Exemple de courbe de force entre une pointe d'AFM et un substrat en polystyrène [Rou05].

priori envisageable de réaliser un système de changement d'outils à partir d'un tel principe. La réalisation de deux surfaces planes en regard et polies très finement pourrait être effectuée, mais, la portée des forces de Van der Waals étant de l'ordre de la centaine de nanomètres (FIG. 3.21), cette solution semble donc techniquement difficile à réaliser. Pour résoudre ce problème, il peut être intéressant de s'intéresser à la réalisation d'un système qui consiste à épouser au mieux une surface donnée. Ce principe est celui qui permet au lézard nommé Gecko-Tokay (*Gekko gekko*) de se déplacer avec une aisance remarquable sur des parois verticales, des plafonds ou des surfaces de natures très diverses. Plusieurs équipes de recherches se sont penchées sur les raisons expliquant ces phénomènes.

L'analyse visuelle a permis de déterminer qu'une patte de Gecko est composée de stries elles-mêmes dotées de poils longs à l'extrémité desquels sont fixées de très nombreuses spatules (FIG. 3.22 (a)) [Sit03]. La taille de ces spatules est très petite (100 à 200 nm de diamètre) ce qui leur permet de s'approcher très près de la surface sur laquelle le Gecko marche. Cette distance influe directement sur l'intensité des forces de Van der Waals [Aut02]. De plus, ces spatules sont fixées sur une structure souple (les poils) qui leur permet d'épouser au mieux le relief de la surface en regard. Les forces de Van der Waals sont maximales lorsque chaque spatule est parallèle à la surface en regard, et diminuent fortement lorsque l'angle entre ces deux surfaces augmente. Le lézard utilise ce principe pour décrocher les spatules de la surface d'accroche.

Des mesures ont été effectuées permettant de déterminer qu'une spatule permet de soulever 100 nN. Comme chaque patte du Gecko est équipée de milliards de spatules, celui-ci peut donc soulever 40 kg soit environ 400 fois son propre poids [Aut00].

Ces mesures mettent en évidence tout l'intérêt que peut représenter la réalisation de structures synthétiques bio-mimétiques. Plusieurs équipes de recherche se sont penchées sur ce problème difficile notamment en termes de dimensions et de matériaux [Sit02]. La FIG. 3.22

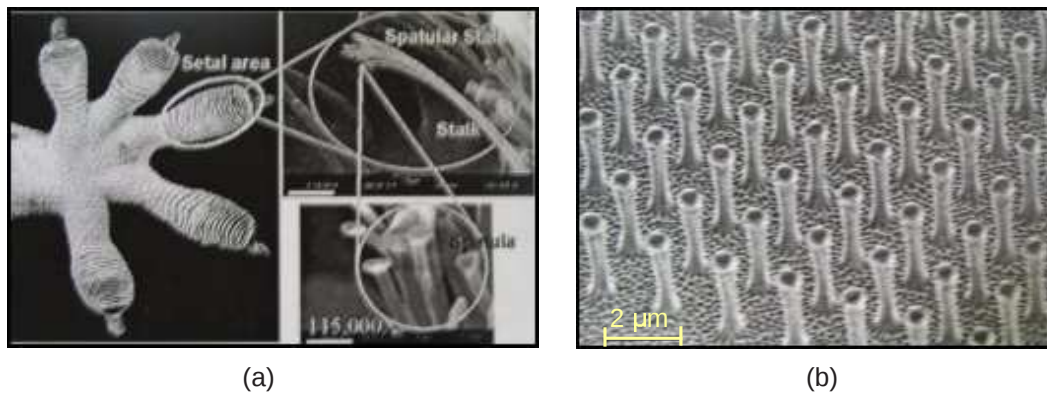


FIG. 3.22 – Mécanisme d'adhésion du Gecko : (a) patte d'un Gecko composée de poils possédant des spatules (diamètre de 100 à 200 nm) à leur extrémité [Sit03] ; (b) réalisation de poils (avec spatules) synthétiques [Gei03].

(b) présente une réalisation de poils équipés de spatules en polyimide [Gei03]. Un poil permet de soulever 70 nN, 1 cm² de poil supporte 3 N. Ainsi, un homme équipé de palmes munies de ces poils pourrait marcher aux murs. Malheureusement, ces structures ne fonctionnent que pendant quelques cycles de collage-décollement en raison de leur fragilité, de l'adhésion des poils entre eux et de l'accumulation d'impuretés. Le Gecko dispose d'un système encore inconnu actuellement donc non reproductible artificiellement lui permettant l'auto-nettoyage des petits poils équipés de spatules. Toutefois, ces structures montrent que ce principe de fixation est envisageable pour un système de changement d'outils pour lequel de nombreux paramètres de conception sont libres (matériaux, formes des surfaces par exemple), ce qui pourrait palier les difficultés citées précédemment.

3.4 Conclusion

Après avoir analysé les critères nécessaires à la réalisation d'un système de changement d'outils adapté à la micropince, nous avons pu comparer plusieurs solutions techniques permettant la réalisation de ce système. Celles-ci sont très variées et peuvent permettre la réalisation d'un système de changement d'outils adapté à la station de micromanipulation développée au LAB. Cette diversité se retrouve dans les moyens de fabrication utilisables qui vont des moyens conventionnels à des moyens particulièrement dédiés à la micro-fabrication. Nous avons pu envisager des solutions fondées sur des principes mécaniques, électromagnétiques, électrostatiques, l'utilisation de colles ou de forces de Van der Waals. D'autres solutions techniques, ou des combinaisons des solutions présentées, sont certainement possibles.

L'analyse effectuée a mis en avant des solutions intéressantes en vue de la réalisation d'un système de changement d'outils. Naturellement, ces solutions ne sont pas équivalentes en termes de complexité de mise en œuvre et de chances d'aboutir à la réalisation d'un système final effi-

cace et répondant au maximum de critères énoncés au début de ce chapitre.

La solution technique fondée sur l'utilisation d'une colle thermique est celle que nous avons décidé de retenir. Elle nous semble originale et suffisamment simple à mettre en œuvre. Elle est également susceptible de mieux répondre aux critères les plus importants et son utilisation pour d'autres systèmes micro-robotiques comme la micro-usine nous semble possible. En effet, une micro-usine se veut modulaire résultant de l'assemblage temporaire de différents éléments (voir section 1.2.4). Nous allons donc nous intéresser à la réalisation puis à la caractérisation d'un système de changement d'outils fondé sur l'utilisation d'une colle thermique.

Chapitre 4

Conception, modélisation et commande d'un système de changement d'outils à colle thermique

Ce chapitre présente les étapes de conception du système de changement d'outils automatique fondé sur l'utilisation d'une colle thermique. Dans ce but, la modélisation des phénomènes thermiques se produisant dans l'outil est présentée. Un modèle analytique du régime stationnaire, un modèle numérique du régime transitoire et une méthode permettant l'identification des différents paramètres en jeu sont proposés. Une fois le système de changement d'outils réalisé, son fonctionnement en mode automatique sera décrit. Celui-ci est commandé par une loi établie à l'aide des différents modèles. La caractérisation de ce système conclut le chapitre.

4.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis d'étudier plusieurs solutions techniques de réalisation d'un système de changement d'outils pour micropince. Nous avons finalement retenu un système fondé sur l'utilisation d'une colle thermique. Aussi, dans ce chapitre, nous étudierons comment mettre en œuvre ce système.

Pendant certaines phases d'un cycle de changement d'outils, chaque outil se trouve fixé simultanément à l'actionneur et au magasin. Or, pour effectuer, par exemple, une prise d'outils, il est nécessaire de rompre la fixation outil-magasin par liquéfaction de la colle au niveau de ce contact. Ce processus engendre l'échauffement de l'outil par phénomène de conduction thermique. En dépit de cet échauffement, la fixation outil-actionneur doit, quant à elle, rester rigide. Lors des phases de dépose des outils dans le magasin, le processus inverse se produit.

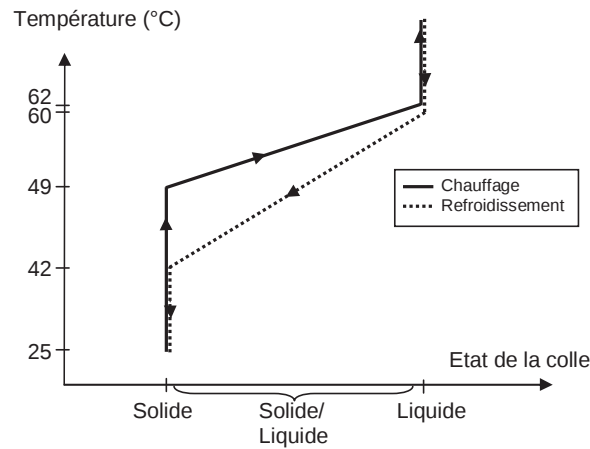


FIG. 4.1 – *Etat de la colle thermique utilisée pendant un cycle de chauffage-refroidissement.*

Lors de ces phases de changement d'outils, les phénomènes thermiques se produisent principalement dans l'outil et influent directement sur la réussite d'un changement d'outils et aussi sur la répétabilité de positionnement de ceux-ci. Nous avons donc décidé d'étudier précisément les phénomènes thermiques afin de minimiser la température des contacts où nous souhaitons conserver une liaison rigide tout en garantissant la rupture des autres liaisons. Aussi, ce chapitre sera consacré, en grande partie, à la modélisation et la commande qui permettront de faire fonctionner le système de changement d'outils de manière optimale.

Une telle étude peut être menée grâce à un logiciel d'éléments finis mais cela nécessite la connaissance des coefficients de conduction et de convection des différents éléments du système. Or, comme ce dernier est composé d'outils en nickel électro-déposé, d'une céramique PZT bicouche et de résistances électriques CMS (Composants Montés en Surface), les différents coefficients nécessaires sont inconnus et devront être déterminés. Nous présenterons donc successivement les hypothèses effectuées et les équations nécessaires à la résolution de ce problème. Nous nous intéresserons à la modélisation analytique du régime stationnaire qui sera utile pour déterminer, par identification, les coefficients thermiques des différents éléments du système de changement d'outils. Nous développerons ensuite un modèle numérique qui nous permettra d'étudier le régime transitoire pour aboutir à la loi de commande du système de changement automatique d'outils. Pour finir, nous caractériserons la tenue mécanique du joint de colle au contact outil-actionneur, la répétabilité de positionnement des outils ainsi que la compatibilité MEB de ce système.

4.2 Principe de fonctionnement

Les colles thermiques supportent de nombreux cycles de chauffage-refroidissement (ou liquéfaction-solidification) sans perdre leurs caractéristiques [Cog02]. Celle qui a été utilisée pour réaliser notre système de changement d'outils a pour nom commercial Crystallbond 555

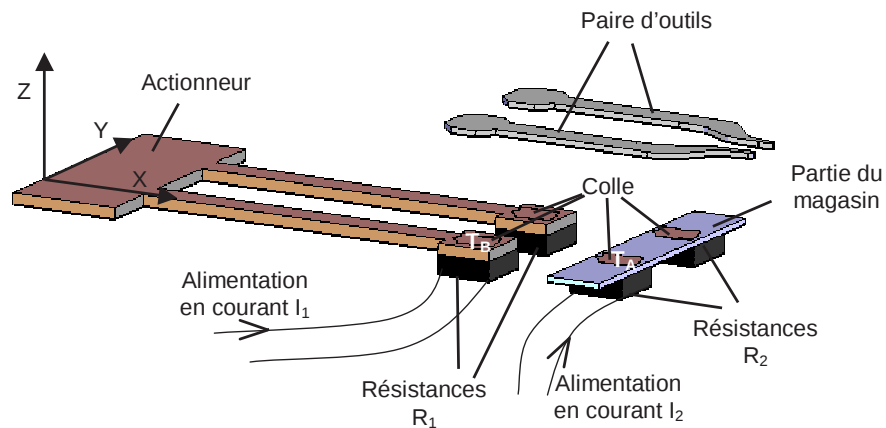


FIG. 4.2 – Schéma de l'ensemble actionneur-résistances-outils-magasin-colle. La colle est placée aux contacts outils-actionneur et outils-magasin.

HMP¹. A notre connaissance, cette colle est celle qui possède le point de fusion le plus bas du marché, c'est pourquoi elle a été retenue. Elle est solide à température ambiante, la fusion commence à 49 °C pour être totale à 62 °C. Lors de son refroidissement, la solidification débute à 60 °C et il est nécessaire d'atteindre 42 °C pour obtenir sa solidification complète (voir FIG. 4.1). Ces valeurs sont valables dans l'air, celles dans le vide seront mesurées ultérieurement (voir section 4.8.5).

Pour réaliser un système de changement d'outils adapté à la micropince, de petites quantités de colle (environ 4 nl par contact) ont été placées à chaque interface outil-actionneur ou outil-magasin (FIG. 4.2). Pour créer un échauffement local, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Nous avons retenu un échauffement par effet Joule à l'aide de résistances électriques CMS de 6 Ω placées sous chacun de ces contacts. Leur alimentation électrique génère un échauffement qui se transmet à la colle par conduction, engendrant ainsi sa liquéfaction. Lorsque l'alimentation est coupée, la température diminue engendrant la solidification de la colle. L'alimentation des diverses résistances permet donc de piloter l'état de la colle et ainsi la nature des liaisons mécaniques. De cette manière, les outils peuvent être fixés alternativement à l'actionneur (configuration de manipulation, FIG. 4.3 (a)) ou au magasin (configuration de changement d'outils, FIG. 4.3 (c)). La configuration définie par la FIG. 4.3 (b) correspond à une étape intermédiaire permettant de passer de la configuration "a" à "c" et inversement. De cette manière l'enchaînement "a-b-c" permet de déposer une paire d'outils dans le magasin et la succession "c-b-a" permet de prendre une paire d'outils dans le magasin, l'ensemble réalisant un système de changement d'outils.

1. Crystalbond 555-HMP est fabriqué par Aremco Products, Inc (USA).

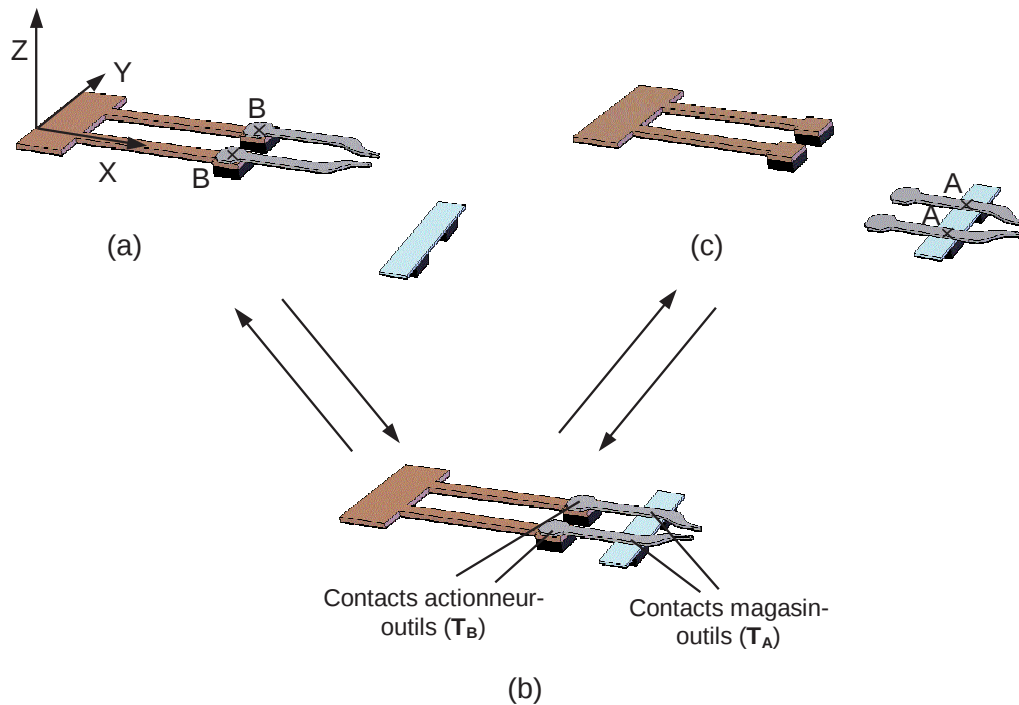


FIG. 4.3 – Schémas de l'ensemble actionneur-résistances-outils-magasin : (a) configuration de micromanipulation : les outils sont fixés à l'actionneur ; (b) configuration de changement d'outils : les outils sont fixés simultanément à l'actionneur et au magasin ; (c) configuration de disponibilité des outils : les outils sont fixés au magasin.

4.3 Mise en œuvre du système de changement d'outils

Pour réaliser des changements d'outils de manière fiable, précise et pratique, plusieurs paramètres doivent être réglés. De nombreux paramètres sont influents, les plus importants étant les suivants :

- le réglage de la position relative des deux outils lors de leur première utilisation ;
- la forme et l'amplitude du courant d'alimentation des résistances ;
- les trajectoires et les vitesses d'approche pendant les phases de prise et de dépose des outils.

Nous nous intéresserons au réglage de la position initiale des deux outils ainsi qu'aux trajectoires et vitesses d'approche (phases de développement, section 4.8.1) après avoir déterminé la stratégie d'alimentation des résistances (phase de conception). Le réglage de ces paramètres a pu être possible grâce au développement de modèles et à des mesures.

La loi horaire du courant d'alimentation influe naturellement fortement sur les performances de ce système. Les résistances sont alimentées uniquement pendant les phases de changement d'outils (phase (b) de la FIG. 4.3) c'est-à-dire quand ceux-ci sont en contact simultané avec

l'actionneur et le magasin. L'alimentation des résistances d'un contact (point B pour le contact outil-actionneur, voir FIG. 4.3), génère un échauffement des outils par conduction engendrant un possible ramollissement de la colle à l'autre contact (point A pour le contact outil-magasin, voir FIG. 4.3). Ainsi, une alimentation trop importante (en durée et intensité) engendre la liquéfaction de la colle aux deux contacts, les outils ne sont alors plus fixés, leur position ne peut donc plus être garantie. De plus, les outils utilisés sont en nickel, bon conducteur thermique. Une étude approfondie des phénomènes thermiques, qui se produisent dans chaque outil pendant les phases de changement, est alors nécessaire. Pour ce faire, nous allons d'abord nous intéresser aux hypothèses à émettre, puis, nous développerons un modèle analytique du régime stationnaire. Celui-ci nous sera utile pour identifier les coefficients des différents éléments mis en jeu lors des échanges thermiques. Ces coefficients seront alors ensuite utilisés pour modéliser le régime transitoire des phénomènes thermiques. Pour finir, la validité des différents modèles sera étudiée par confrontation de leurs résultats à des mesures.

4.4 Modélisation analytique des phénomènes thermiques

4.4.1 Mise en équation et hypothèses

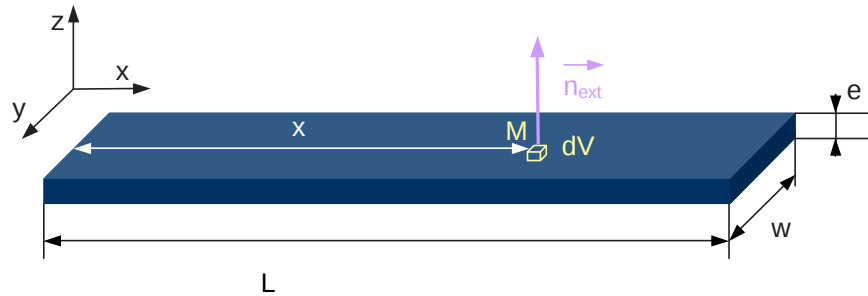


FIG. 4.4 – Caractéristiques d'une poutre. L'élément volumique dV est considéré.

Considérons la poutre représentée FIG. 4.4. Celle-ci subit des variations de températures engendrées par des phénomènes thermiques. La conservation de l'énergie de cette poutre peut être exprimée dans un élément de largeur w , de hauteur e et de longueur L par l'équation suivante [Eyg97] :

$$\int_V \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV = - \int_S (\overrightarrow{q_{cond}} + \overrightarrow{q_{conv}} + \overrightarrow{q_{ray}}) \cdot \overrightarrow{n_{ext}} \cdot dS + \int_V Q_{int} \cdot dV \quad (4.1)$$

Cette relation permettra de déterminer l'évolution de la température de tout point M de la poutre alors qu'une source de chaleur volumique (de puissance volumique Q_{int}) apporte une énergie extérieure et que des phénomènes de conduction, de convection et de rayonnement ont lieu. Le TAB. 4.1 détaille les différents paramètres intervenant dans cette équation. $\overrightarrow{n_{ext}}$

Symbole	paramètre	unité
ρ	masse volumique	kg/m^3
C	capacité calorifique	J/Kkg
V	volume de la poutre	m^3
S	surface extérieure de la poutre	m^2
$\vec{q}_{cond}$	densité de flux de conduction	W/m^2
$\vec{q}_{conv}$	densité de flux de convection	W/m^2
$\vec{q}_{ray}$	densité de flux de rayonnement	W/m^2
Q_{int}	source interne volumique de chaleur	W/m^3
λ	coefficient de conduction	W/mK
$\tilde{h}$	$2 \cdot \frac{(w+e) \cdot h}{w \cdot e}$	W/m^3K
h	coefficient de convection	W/m^2K
w	largeur de la poutre	m
e	épaisseur de la poutre	m
T_∞	température ambiante	K

TAB. 4.1 – Tableau des notations utilisées.

représente la normale à la surface de la poutre, orientée vers l'extérieur de celle-ci. Considérons que les coefficients de conduction et de convection peuvent dépendre de l'abscisse x . Dans un premier temps, nous allons étudier les phénomènes thermiques dans l'air, aussi, nous allons négliger l'influence du rayonnement. En développant les intégrales volumiques, l'équation de conservation de l'énergie devient pour un élément de longueur dx :

$$\begin{aligned}
 \int_{-e/2}^{e/2} \int_{-w/2}^{w/2} \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx dy dz = & - \int_{-e/2}^{e/2} \int_{-w/2}^{w/2} \vec{q}_{cond} \cdot \vec{n}_{ext} \cdot dy dz - \oint_l \vec{q}_{conv} \cdot \vec{n}_{ext} \cdot dl dx \\
 & + \int_{-e/2}^{e/2} \int_{-w/2}^{w/2} Q_{int} \cdot dx dy dz
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

avec dl élément d'intégration curviligne suivant la circonférence de la poutre dans le plan Y-Z. D'après la loi de Fourier :

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T \quad (4.3)$$

λ étant le coefficient de conduction de la poutre. Or, dans le cas où w et e sont petits devant L , on peut considérer que la température est homogène dans chaque section de la poutre ce qui permet d'écrire (modélisation unidirectionnelle) :

$$\overrightarrow{q_{cond}} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\nabla T} = \begin{pmatrix} -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \\ -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \\ -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \overrightarrow{n_{ext}} \approx \begin{pmatrix} -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \overrightarrow{n_{ext}} \quad (4.4)$$

D'où :

$$- \int_{-e/2}^{e/2} \int_{-w/2}^{w/2} \overrightarrow{q_{cond}} \cdot \overrightarrow{n_{ext}} \cdot dy \, dz = w \cdot e \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.5)$$

Le flux de convection naturelle (conducto-convectif) peut, quant à lui, s'écrire pour chaque surface en contact avec l'air ambiant $\overrightarrow{q_{conv}} = h \cdot (T - T_{\infty}) \cdot \overrightarrow{n_{ext}}$, où h représente le coefficient de convection de la surface considérée et T_{∞} la température ambiante de l'environnement de la poutre. Les échanges de chaleur entre la poutre et l'air ambiant se font principalement par la surface supérieure de celle-ci et sont faibles sur les côtés ou sur la surface inférieure. Cependant, considérant que le coefficient de convection est identique pour toutes les surfaces, le coefficient que nous utiliserons sera global. Les échanges convectifs se traduisent alors par l'expression :

$$\oint_l \overrightarrow{q_{conv}} \cdot \overrightarrow{n_{ext}} \cdot dl \, dx = 2 \cdot (w + e) \cdot h \cdot (T - T_{\infty}) \cdot dx \quad (4.6)$$

L'utilisation des relations (4.5) et (4.6) dans (4.2) permet d'établir l'égalité suivante :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - 2 \cdot \frac{(w + e)}{w \cdot e} \cdot h \cdot (T - T_{\infty}) \cdot dx + Q_{int} \cdot dx \quad (4.7)$$

En posant $\tilde{h} = 2 \cdot \frac{(w+e) \cdot h}{w \cdot e}$ et en dérivant par rapport à x , on obtient alors l'équation locale de la chaleur suivante :

$$\boxed{\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] - \tilde{h} \cdot (T - T_{\infty}) + Q_{int}} \quad (4.8)$$

Les différents coefficients utilisés dans cette équation sont définis dans le TAB. 4.1. Cette équation locale peut également être déduite de l'équation (4.1) en appliquant le théorème d'Ostrogradsky aux flux de chaleur surfacique.

4.4.2 Réduction du problème

Le système réel qui fait l'objet de la présente étude thermique est composé de l'actionneur piézoélectrique, d'un outil, du magasin et de deux résistances. La FIG. 4.5 schématise ce système réel (en vue de coupe latérale). La surface permettant la conduction de chaleur à

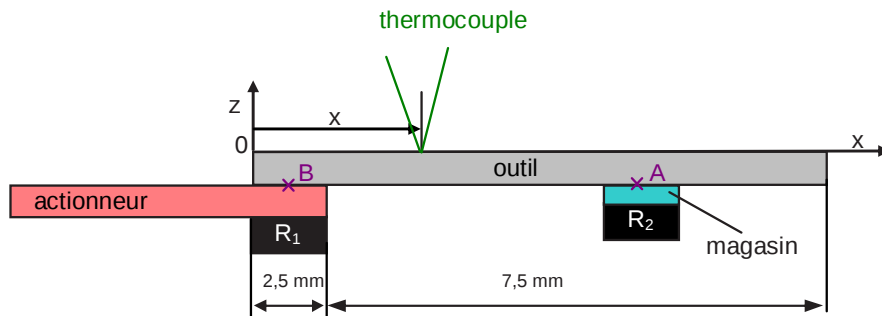


FIG. 4.5 – Schéma du système réel actionneur-outil-magasin-résistances en vue latérale. La valeur des résistances est $6\ \Omega$.

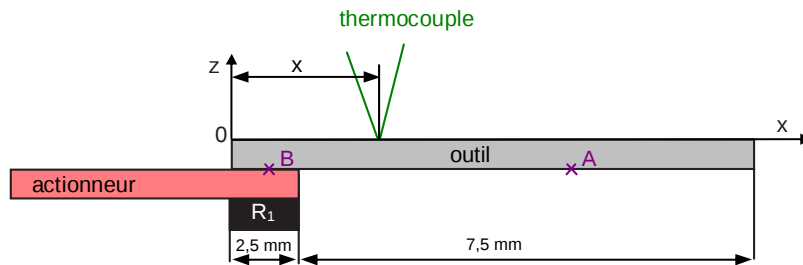


FIG. 4.6 – Schéma simplifié du système actionneur-outil-résistance.

l'outil par le contact outil-actionneur étant plus importante que celle du contact outil-magasin ($2 \times 2\ \text{mm}^2$ contre $2 \times 1\ \text{mm}^2$), la rupture de la liaison actionneur-outil sera plus délicate que celle de la liaison magasin-outil. Nous nous intéresserons donc préférentiellement au cas où les résistances de l'actionneur sont alimentées. Le but de cette modélisation est alors de déterminer les meilleures conditions permettant de garantir simultanément la liquéfaction totale de la colle au contact actionneur-outil et un échauffement minimal au contact outil-magasin et vice-versa.

Les matériaux (de l'actionneur, de l'outil et des résistances), la colle, les formes, les câbles, les liaisons entre les différents éléments sont autant de paramètres qui influencent les phénomènes thermiques en jeu. Pour simplifier le problème à étudier, considérons tout d'abord les systèmes résistance-actionneur-outil et résistance-outil représentés FIG. 4.6 et 4.7 respectivement. Les câbles d'alimentation des résistances étant multi-brins et couverts de téflon, leur modélisation est problématique, leur influence sera négligée. De plus, compte tenu des dimensions des outils ($10 \times 1 \times 0,18\ \text{mm}^3$), nous nous intéresserons d'abord à la modélisation unidirectionnelle du système le plus simplifié (résistance-outil), qui sera représenté par le schéma de la FIG. 4.8. La température sera supposée uniforme dans chaque section droite (ou élément) de la résistance ou de l'outil. Cette modélisation sera ensuite exploitée pour déterminer un modèle utilisable pour le système réel.

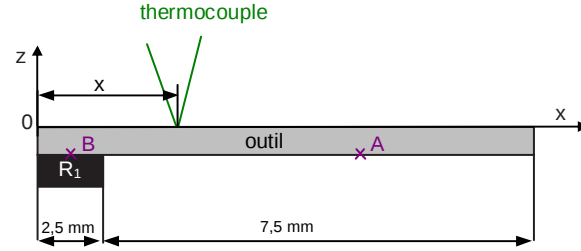


FIG. 4.7 – Schéma simplifié du système outil-résistance.

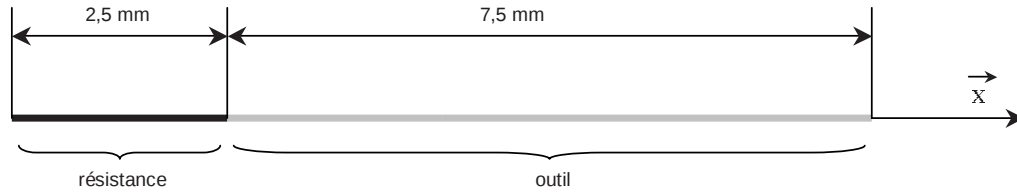


FIG. 4.8 – Schéma du modèle unidirectionnel correspondant au système outil-résistance (FIG. 4.7).

L'alimentation des résistances selon un échelon de courant d'intensité I permet de générer une quantité de chaleur par unité de temps (ou puissance) $\dot{Q}$, qui est notée Q_{int} dans ce document, telle que :

$$\dot{Q} = Q_{int} = \frac{U \cdot I}{V_{CMS}} = \frac{R \cdot I^2}{V_{CMS}} \quad (4.9)$$

Où R , U et V_{CMS} sont respectivement la résistance, la tension d'alimentation et le volume des résistances CMS. Pour toutes les études suivantes, nous considérerons les trois cas suivants :

- $I = 150 \text{ mA}$ ce qui correspond à $Q_{int} = 64 \times 10^6 \text{ W/m}^3$;
- $I = 210 \text{ mA}$ ce qui correspond à $Q_{int} = 127 \times 10^6 \text{ W/m}^3$;
- $I = 250 \text{ mA}$ ce qui correspond à $Q_{int} = 179 \times 10^6 \text{ W/m}^3$.

Le cas où $Q_{int} = 179 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ servira à identifier les paramètres des modèles, les autres cas seront ensuite utilisés pour vérifier la validité de ces modèles en les comparant aux mesures.

4.4.3 Résolution analytique du modèle unidirectionnel en régime stationnaire

Le système unidirectionnel à modéliser est composé d'une résistance accolée à un outil (FIG. 4.9). Le régime stationnaire, peut être étudié analytiquement à partir de l'équation de la chaleur (4.8). Afin de simplifier les calculs, l'origine du repère utilisé sera placée comme indiqué sur la FIG. 4.9. Si l'on considère que les coefficients de conduction de la résistance et de l'outil sont constants, le gradient de température en régime permanent constant dans chacun de ces deux éléments est déterminé par les équations suivantes :

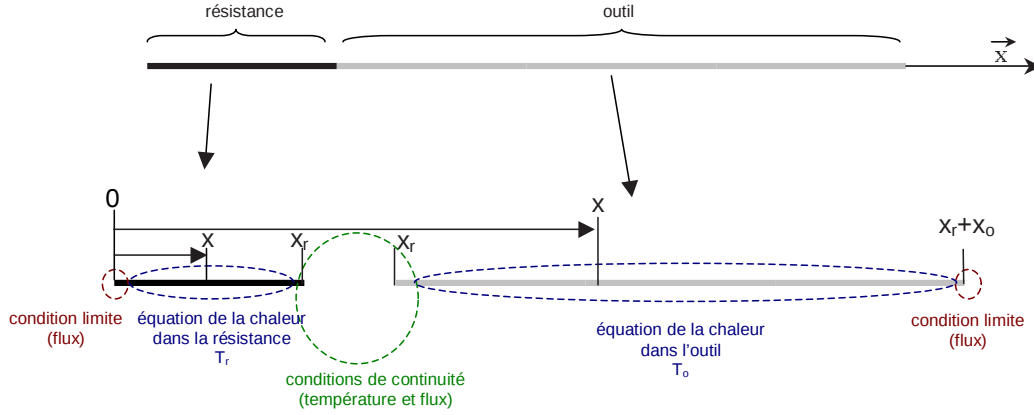


FIG. 4.9 – Schéma éclaté du système modélisé et hypothèses posées.

$$\begin{cases} \lambda_r \cdot \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} - \tilde{h}_r \cdot (T_r - T_\infty) + Q_{int} = 0 & \text{pour } 0 \leq x \leq x_r \text{ (résistance)} \\ \lambda_o \cdot \frac{\partial^2 T_o}{\partial x^2} - \tilde{h}_o \cdot (T_o - T_\infty) = 0 & \text{pour } x_r \leq x \leq x_r + x_o \text{ (outil)} \end{cases} \quad (4.10)$$

Les indices r et o correspondent aux coefficients de la résistance et de l'outil. La résolution analytique de ces équations donne les expressions de l'évolution de la température dans la résistance (T_r) et dans l'outil (T_o) :

$$\begin{cases} T_r(x) = \alpha_r \cdot e^{\sqrt{\frac{\tilde{h}_r}{\lambda_r}} \cdot x} + \beta_r \cdot e^{-\sqrt{\frac{\tilde{h}_r}{\lambda_r}} \cdot x} + T_\infty + \frac{Q_{int}}{\tilde{h}_r} & \text{pour } 0 \leq x \leq x_r \\ T_o(x - x_r) = \alpha_o \cdot e^{\sqrt{\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}} \cdot (x - x_r)} + \beta_o \cdot e^{-\sqrt{\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}} \cdot (x - x_r)} + T_\infty & \text{pour } x_r \leq x \leq x_r + x_o \end{cases} \quad (4.11)$$

Les coefficients α_r , β_r , α_o et β_o sont des constantes à déterminer à partir des conditions de continuité et aux limites (FIG. 4.9). Pour déterminer ces quatre coefficients, quatre équations sont nécessaires.

En premier lieu, au contact entre la résistance et l'outil, la température et le flux doivent être continus, donnant lieu aux deux égalités suivantes :

$$\begin{cases} T_r(x = x_r) = T_o(x - x_r = 0) \\ \lambda_r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x}(x = x_r) = \lambda_o \cdot \frac{\partial T_o}{\partial x}(x - x_r = 0) \end{cases} \quad (4.12)$$

Ensuite, aux extrémités, c'est-à-dire en $x = 0$ dans la résistance et en $x = x_r + x_o$ dans l'outil, nous supposons que le flux sortant est nul car la surface d'une section est très faible, ce qui donne les deux égalités supplémentaires suivantes :

4.5. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES THERMIQUES : MÉTHODE DES DIFFÉRENCES FINIES

$$\begin{cases} \frac{\partial T_r}{\partial x}(x=0) = 0 \\ \frac{\partial T_o}{\partial x}(x-x_r=x_o) = 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Notons que nous avons envisagé d'utiliser des mesures de température effectuées le long de l'outil en régime stationnaire pour déterminer de manière précise les conditions de flux à imposer aux limites. Cependant, la mesure étant délicate, les résultats n'étaient pas meilleurs qu'avec les conditions aux limites de flux nuls.

En résolvant le système formé des quatre équations (4.12) et (4.13), on obtient :

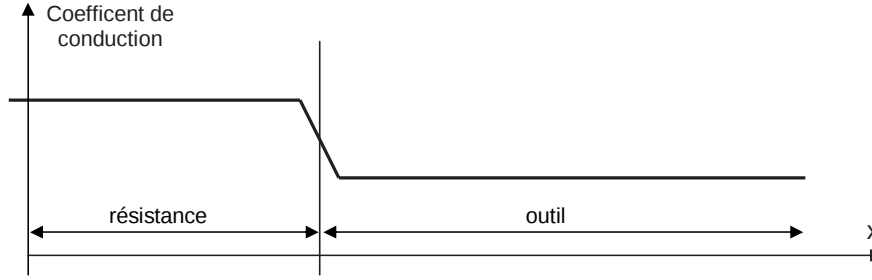
$$\begin{cases} \alpha_o = \frac{Q_{int} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_r}{h_r}} \cdot (1 - e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r})}{\lambda_r \cdot \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot (1 + e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} \cdot x_o}) \cdot (e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r} - 1) + \lambda_o \cdot \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} \cdot (e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} \cdot x_o} - 1) \cdot (e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r} + 1)} \\ \beta_o = \alpha_o \cdot e^{2 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} \cdot x_o} \\ \alpha_r = \beta_o \cdot \frac{(e^{-2 \cdot \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} \cdot x_o} + 1)}{(e^{\sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r} + e^{-\sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r})} - \frac{Q_{int}}{\tilde{h}_r \cdot (e^{\sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r} + e^{-\sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} \cdot x_r})} \\ \beta_r = \alpha_r \end{cases} \quad (4.14)$$

L'utilisation de ces expressions dans les équations (4.11) permet d'obtenir de manière analytique le gradient de température dans la résistance et dans l'outil en régime permanent constant. Les coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil demeurent inconnus à ce stade. Nous verrons ultérieurement que ces équations sont également utilisables pour déterminer ces quatre coefficients.

4.5 Modélisation numérique des phénomènes thermiques : méthode des différences finies

L'étude analytique du régime stationnaire, qui vient d'être effectuée, permet de connaître la température en tout point de la résistance ou de l'outil. Cependant, le régime transitoire doit être étudié afin de déterminer une loi de commande des résistances. Pour cela, une étude dynamique doit être réalisée. La résolution analytique d'un tel problème peut être effectuée par l'utilisation de méthodes de Green [Mor53]. Ces méthodes nécessitent la détermination et l'utilisation d'une fonction de Green. Ce point s'est avéré relativement complexe pour le problème étudié. Nous avons choisi d'utiliser une méthode de résolution numérique : la méthode des différences finies.

Le but de la modélisation numérique par différences finies est de déterminer la température en effectuant une discrétisation de temps et d'espace de la résistance et de l'outil. Le système

FIG. 4.10 – Variation du coefficient de conduction $\lambda(x)$ le long du système résistance-outil.

que nous allons modéliser ici est toujours celui représenté par la FIG. 4.8 à partir de l'équation de la chaleur (4.8). Contrairement à la modélisation analytique du régime stationnaire effectuée précédemment, une seule équation de la chaleur sera cette fois considérée et sera utilisée dans la résistance ou dans l'outil. Les coefficients de conduction et de convection sont donc dépendants de x puisqu'ils sont différents dans la résistance ou dans l'outil. L'équation utilisée est la suivante :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\tilde{h} \cdot (T - T_{\infty}) + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + Q_{int} \quad (4.15)$$

Pour aboutir à un modèle numérique, on procède à une discrétisation spatiale (indice i) et temporelle (indice k) en "découpant" la résistance et l'outil en volumes élémentaires dV . La température de chaque élément sera notée $T(x, t)$, x étant la position de l'élément discret et t l'instant considéré. En ce qui concerne les dérivées du premier ordre par rapport au temps, le schéma d'Euler par avance est utilisé [Ozi94] :

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} \approx \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t} = \frac{f(k + 1) - f(k)}{\Delta t} \quad (4.16)$$

Pour les dérivées du second ordre par rapport à l'espace x , le schéma centré classique est utilisé :

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \approx \frac{f(x + \Delta x) - 2 \cdot f(x) + f(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2} = \frac{f(i + 1) - 2 \cdot f(i) + f(i - 1)}{(\Delta x)^2} \quad (4.17)$$

Ces deux schémas seront appliqués aux différents termes de l'équation de la chaleur (4.15). Pour ce faire, l'évolution du coefficient de conduction λ sera telle que définie par la FIG. 4.10. Cette limitation de la pente à l'interface résistance-outil permet au terme $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$ de ne pas tendre vers l'infini, ce qui engendrerait des problèmes numériques. Les égalités suivantes sont alors obtenues :

4.5. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES THERMIQUES : MÉTHODE DES DIFFÉRENCES FINIES

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(x,t+\Delta t) - T(x,t)}{\Delta t} = \frac{T(i,k+1) - T(i,k)}{\Delta t} \\ \frac{\partial \lambda}{\partial x} \approx \frac{\lambda(x+\Delta x) - \lambda(x)}{\Delta x} = \frac{\lambda(i+1) - \lambda(i)}{\Delta x} \\ \frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T(x+\Delta x,t) - T(x,t)}{\Delta x} = \frac{T(i+1,k) - T(i,k)}{\Delta x} \\ \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \approx \frac{T(x+\Delta x,t) - 2 \cdot T(x,t) + T(x-\Delta x,t)}{(\Delta x)^2} = \frac{T(i+1,k) - 2 \cdot T(i,k) + T(i-1,k)}{(\Delta x)^2} \end{array} \right. \quad (4.18)$$

L'utilisation de ces différentes relations conduit à l'obtention de l'équation de récurrence de la chaleur. Celle-ci est utilisable pour déterminer la température d'un élément i à l'instant $k+1$, en fonction notamment de la température des éléments voisins à l'instant k :

$$\begin{aligned} T(i,k+1) &= \frac{\lambda(i+1)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T(i+1,k) \\ &+ \left(1 - \frac{\lambda(i+1) + \lambda(i)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} - \tilde{h}(i) \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)}\right) \cdot T(i,k) \\ &+ \frac{\lambda(i)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T(i-1,k) \\ &+ \tilde{h}(i) \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T_\infty + \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot Q_{\text{int}}(i,k) \end{aligned} \quad (4.19)$$

La température de l'ensemble des éléments i du système peut être déterminée grâce à l'utilisation de l'égalité (4.19) réécrite sous forme d'un modèle d'état. L'état du système correspond au vecteur regroupant les températures de tous les éléments de position à l'instant k . Des conditions de flux nul seront utilisées aux extrémités. Le modèle d'état discret prend ainsi la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{U}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}(k) \end{array} \right. \quad (4.20)$$

$\mathbf{X}(k)$ est l'état du système au temps k et la commande $\mathbf{U}(k)$ regroupe les sources de chaleur réparties sur la longueur du système ainsi que la température extérieure :

$$\mathbf{X}(k) = \begin{pmatrix} T_{(1,k)} \\ \vdots \\ T_{(i,k)} \\ \vdots \\ T_{(N,k)} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{U}(k) = \begin{pmatrix} Q_{\text{int}}(1,k) \\ \vdots \\ Q_{\text{int}}(i,k) \\ \vdots \\ Q_{\text{int}}(N,k) \\ T_\infty \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Les matrices $\mathbf{\Phi}$ et $\mathbf{\Gamma}$ sont obtenues à partir de l'équation (4.19) ainsi que des conditions aux limites :

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta T}{\rho_1 \cdot C_1} \left(\frac{\lambda_2}{\Delta x^2} + \tilde{h}_1 \right) & \frac{\Delta T \cdot \lambda_2}{\rho_1 \cdot C_1 \cdot \Delta x^2} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \frac{\Delta T \cdot \lambda_2}{\rho_2 \cdot C_2 \cdot \Delta x^2} & 1 - \frac{\Delta T}{\rho_2 \cdot C_2} \left(\frac{\lambda_2 + \lambda_3}{\Delta x^2} + \tilde{h}_2 \right) & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \frac{\Delta T \cdot \lambda_i}{\rho_i \cdot C_i \cdot \Delta x^2} & 1 - \frac{\Delta T}{\rho_i \cdot C_i} \left(\frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x^2} + \tilde{h}_i \right) & \frac{\Delta T \cdot \lambda_{i+1}}{\rho_i \cdot C_i \cdot \Delta x^2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 - \frac{\Delta T}{\rho_{N-1} \cdot C_{N-1}} \left(\frac{\lambda_{N-1} + \lambda_N}{\Delta x^2} + \tilde{h}_{N-1} \right) & \frac{\Delta T \cdot \lambda_N}{\rho_N \cdot C_N \cdot \Delta x^2} \\ & & & & & \frac{\Delta T \cdot \lambda_N}{\rho_N \cdot C_N \cdot \Delta x^2} & 1 - \frac{\Delta T}{\rho_N \cdot C_N} \left(\frac{\lambda_N}{\Delta x^2} + \tilde{h}_N \right) \end{pmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \frac{\Delta T}{\rho_1 \cdot C_1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \frac{\Delta T \cdot \tilde{h}_1}{\rho_1 \cdot C_1} \\ 0 & \frac{\Delta T}{\rho_2 \cdot C_2} & \ddots & & & \vdots & \frac{\Delta T \cdot \tilde{h}_2}{\rho_2 \cdot C_2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \frac{\Delta T}{\rho_i \cdot C_i} & \ddots & \vdots & \frac{\Delta T \cdot \tilde{h}_i}{\rho_i \cdot C_i} \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \frac{\Delta T}{\rho_N \cdot C_N} & \frac{\Delta T \cdot \tilde{h}_N}{\rho_N \cdot C_N} \end{pmatrix},$$

Enfin, la matrice $\mathbf{C}$ dépend de la température de sortie que l'on veut (ou que l'on peut) mesurer. La matrice $\mathbf{D}$ est nulle (ce qui correspond à un système strictement propre). Ce modèle d'état sera utilisé par la suite pour déterminer le régime transitoire de l'évolution de la température (sections 4.7 et 4.8). Notons que quelques calculs de température en régime stationnaire et en régime transitoire ont également été effectués à l'aide d'une méthode par éléments finis. Ceux-ci sont présentés en annexe C.

4.6 Identification des paramètres des différents modèles

Les différents modèles qui viennent d'être détaillés ne sont réellement exploitables que si l'on connaît les différents coefficients intervenant dans les équations à résoudre. Les coefficients sont ceux de conduction et de convection pour la résistance et l'outil. Les résistances sont des céramiques dont les propriétés thermiques sont mal connues, d'autant plus que ce ne sont pas des éléments homogènes (présence de peintures et de plots de soudage en plus de la céramique). Le matériau des outils est quant à lui bien connu puisqu'il s'agit du nickel. Cependant, la technique de réalisation par électroformage ainsi que les dimensions et la géométrie des outils, font que les coefficients habituellement utilisés à des échelles macroscopiques sont parfois peu pertinents pour d'aussi faibles dimensions [Pei01]. Pour déterminer ces quatre coefficients, nous avons utilisé deux méthodes d'identification :

- utilisation du modèle analytique en régime stationnaire. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre ;
- identification paramétrique ARX à partir des relations de récurrence issues du modèle numérique d'état. Deux relations de récurrence peuvent être utilisées selon que l'on utilise la discrétisation spatiale ou temporelle. Ces deux méthodes, difficiles à mettre en œuvre, permettent néanmoins d'établir des conclusions intéressantes, elles seront donc présentées.

4.6.1 Identification fondée sur le modèle analytique en régime stationnaire

Pour identifier les paramètres de conduction et de convection de la résistance et de l'outil, le modèle analytique du régime stationnaire sera utilisé (voir section 4.4.3) ainsi que des mesures de température le long de l'outil. Ces dernières ont lieu en régime stationnaire, qui est aussi, dans le cas présent, un régime permanent constant, pour $Q_{int} = 179 \text{ W/m}^3$. Ensuite la validité du modèle sera vérifiée en utilisant ces valeurs de coefficients par comparaison avec des mesures effectuées pour $Q_{int} = 127 \text{ W/m}^3$ et $Q_{int} = 64 \text{ W/m}^3$.

Les solutions générales décrites par les équations (4.11), dont les constantes d'intégration sont définies par les expressions (4.14), serviront de point de départ. Effectuer quatre mesures permettrait d'obtenir un système de quatre équations à quatre inconnues. Cependant, sa résolution analytique ou numérique est rendue difficile du fait de la complexité des relations obtenues (présence de nombreuses exponentielles). Nous avons donc développé une méthode permettant d'éliminer ces exponentielles et conduisant à l'identification des coefficients a , b et c définis par les expressions suivantes :

$$a = \sqrt{\frac{\tilde{h}_r}{\lambda_r}} \quad , \quad b = \sqrt{\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}} \quad \text{et} \quad c = \frac{1}{\tilde{h}_r} \quad (4.22)$$

Les équations (4.11) deviennent alors :

$$\begin{cases} T_r(x) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x} + T_\infty + Q_{int} \cdot c \\ T_o(x) = \alpha_o \cdot e^{b \cdot x} + \beta_o \cdot e^{-b \cdot x} + T_\infty \end{cases} \quad (4.23)$$

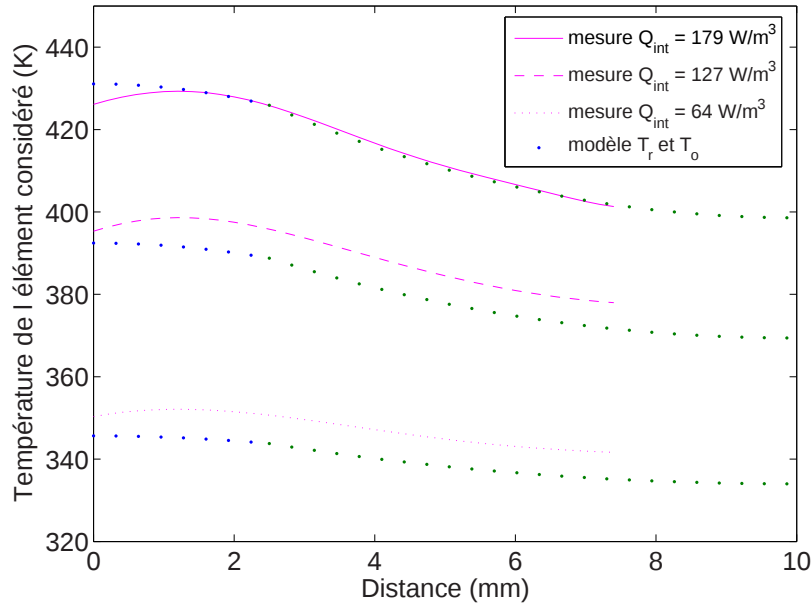


FIG. 4.11 – Mesures de températures effectuées en régime stationnaire sur le système résistance-outil, pour trois densités de chaleur. Le thermocouple utilisé pour ces mesures est placé comme indiqué sur la FIG. 4.7.

L'obtention des coefficients a et c conduit à la détermination de λ_r et $\tilde{h}_r$ (donc de h_r). De même, déterminer b revient à obtenir le rapport $\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}$ (et donc $\frac{h_o}{\lambda_o}$). De plus, des mesures de température en régime stationnaire le long de l'outil ont été effectuées à l'aide d'un thermocouple monté sur un système de micro-positionnement (FIG. 4.11). Le diamètre du thermocouple étant faible ($25 \mu\text{m}$) comparé à la taille des outils ($10 \times 1 \times 0,18 \text{ mm}^3$), son influence sur les mesures a été négligée. En utilisant ces mesures (quatre pour T_r et trois pour T_o), trois expressions peuvent être déterminées, une dépendant uniquement de a , une dépendant uniquement de c (dans la résistance) et une qui dépend uniquement de b (dans l'outil). Les expressions issues des mesures effectuées ainsi que les expressions de a et de b sont détaillées dans l'annexe D (équations (D.1), (D.3) et (D.4)).

De nombreux quadruplets (pour la résistance) et triplets (pour l'outil) de mesures ont été utilisés permettant de déterminer des valeurs moyennes de a et b et donc les rapports $\frac{h_r}{\lambda_r}$ et $\frac{h_o}{\lambda_o}$ (voir annexe D).

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} = 49 \\ b = \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} = 96 \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} \frac{h_r}{\lambda_r} = \frac{w_r \cdot e_r}{2 \cdot (w_r + e_r)} \cdot a^2 = 0,39 \quad m \\ \frac{h_o}{\lambda_o} = \frac{w_o \cdot e_o}{2 \cdot (w_o + e_o)} \cdot b^2 = 0,77 \quad m \end{cases} \quad (4.24)$$

A partir de ces valeurs, nous avons pu déterminer c qui dépend des mesures de températures effectuées en régime stationnaire dans la résistance ainsi que des coefficients a et b . L'équation (D.6) de l'annexe D présente cette expression de c . Son calcul permet d'établir le coefficient h_r :

$$h_r = \frac{w_r \cdot e_r}{2 \cdot c \cdot (w_r + e_r)} = 35,3 \quad W/m^2 K \quad (4.25)$$

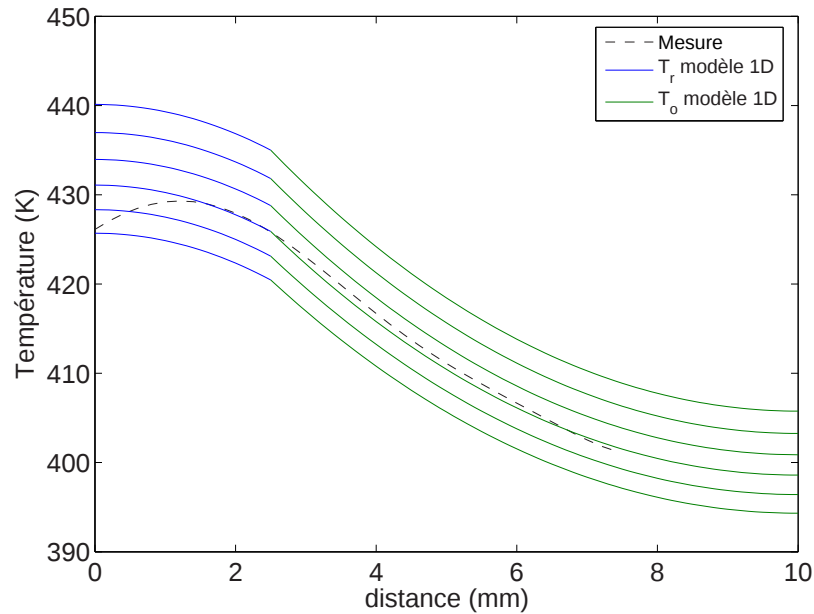


FIG. 4.12 – Tracé de cinq courbes de températures (T_r et T_o) issues du modèle unidirectionnel où h_o varie de 35 à 40 $W/m^2 K$ par pas de 1. La confrontation des résultats de ce modèle aux mesures permet de déterminer la valeur de h_o .

Ayant quatre paramètres à déterminer et n'ayant résolu que trois équations, traçons T_r et T_o pour plusieurs valeurs du paramètre h_o en utilisant les résultats déjà obtenus (a , b , et h_r) dans le modèle défini par les équations (4.23) et dont les constantes d'intégrations sont déterminées grâce aux égalités (4.14) (FIG. 4.12). La confrontation des mesures et des valeurs

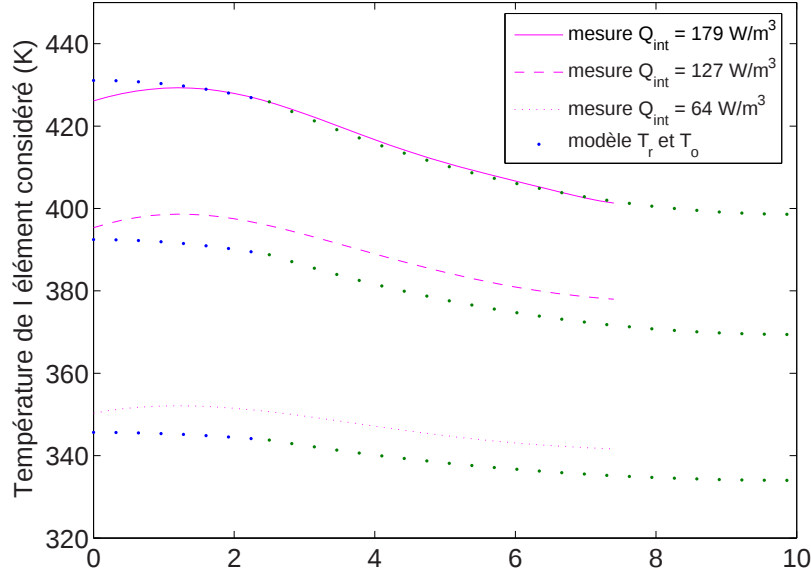


FIG. 4.13 – Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-outil pour trois densités de source de chaleur.

issues du modèle permet d'obtenir la meilleure valeur de h_o . Connaissant b , il est donc possible de déterminer λ_o . Les valeurs numériques des coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil qui ont ainsi été déterminées par cette méthode sont les suivantes :

$$\begin{cases} h_r = 35,3 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \lambda_r = 90 \text{ W/mK} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} h_o = 38 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \lambda_o = 49,3 \text{ W/mK} \end{cases} \quad (4.26)$$

Utilisant ces valeurs de coefficients déterminées pour $Q_{int} = 179 \text{ W/m}^3$, la validité du modèle peut être vérifiée par confrontation aux mesures pour $Q_{int} = 127 \text{ W/m}^3$ et $Q_{int} = 64 \text{ W/m}^3$ (FIG. 4.13). Ces résultats montrent que le modèle est utilisable pour connaître la différence de température entre deux points (notamment entre les points A et B, cf. FIG. 4.5, 4.6 et 4.7), mais s'avère moins précis pour déterminer la température absolue en un point.

4.6.2 Identification fondée sur le modèle numérique (ARX)

Pour identifier les paramètres de conduction et de convection de la résistance et de l'outil, une méthode ARX (AutoRegressive à partie eXogène) a également été utilisée. Celle-ci est fondée sur l'utilisation d'un modèle de récurrence et peut être appliquée sous deux formes, à partir d'une discrétisation spatiale ou temporelle. Chacune de ces méthodes sera présentée afin d'établir une comparaison avec celle fondée sur l'utilisation du modèle analytique du régime stationnaire développé précédemment.

Identification des paramètres : méthode par discrétisation spatiale

Théorie générale : La méthode d'identification de paramètres ARX est fondée sur un modèle de comportement de la forme [Lan93] :

$$y(i+1) = -a_1 \cdot y(i) - a_2 \cdot y(i-1) - \dots a_n \cdot y(i-n+1) + b_1 \cdot u(i) + b_2 \cdot u(i-1) + \dots b_m \cdot u(i-m+1) \quad (4.27)$$

Dans cette expression, y est la grandeur de sortie (la température dans notre cas), u est la commande (sources de chaleur dans notre cas) et les a_i et b_j sont les coefficients à identifier. Utilisons le modèle numérique défini par l'équation (4.19) pour la résistance et l'outil et intéressons nous uniquement au régime stationnaire en effectuant le changement de variable $\tilde{T} = T - T_\infty$. Cela permet d'obtenir les équations de récurrence suivantes :

$$\begin{cases} \tilde{T}_r(i+1, k) = (2 + \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r}) \cdot \tilde{T}_r(i, k) - \tilde{T}_r(i-1, k) - \frac{\Delta x^2}{\lambda_r} \cdot Q_{int}(k) & \text{dans la résistance} \\ \tilde{T}_o(i+1, k) = (2 + \frac{\tilde{h}_o \cdot \Delta x^2}{\lambda_o}) \cdot \tilde{T}_o(i, k) - \tilde{T}_o(i-1, k) & \text{dans l'outil} \end{cases} \quad (4.28)$$

En posant $a_r = -(2 + \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r})$, $b_r = -\frac{\Delta x^2}{\lambda_r}$ et $a_o = -(2 + \frac{\tilde{h}_o \cdot \Delta x^2}{\lambda_o})$, des expressions de la forme générale (4.27) sont alors obtenues pour un temps k fixe :

$$\begin{cases} y_r(i+1, k) = -a_r \cdot y_r(i, k) + b_r \cdot Q_{int}(k) - y_r(i-1, k) \\ y_o(i+1, k) = -a_o \cdot y_o(i, k) - y_o(i-1, k) \end{cases} \quad (4.29)$$

Ces expressions peuvent s'écrire de manière vectorielle. Pour cela, les vecteurs des coefficients à identifier θ sont définis par $\theta_r = (\theta_{r1} \ \theta_{r2})^T$ et $\theta_o = (\theta_{o1} \ \theta_{o2})^T$. Chacun de ces deux vecteurs est décomposé en deux termes : $\theta_{r1} = (a_r \ b_r)$ et $\theta_{r2} = (1)$ ainsi que $\theta_{o1} = (a_o)$ et $\theta_{o2} = (1)$. L'intérêt de décomposer θ_r (respectivement θ_o) en θ_{r1} et θ_{r2} (respectivement θ_{o1} et θ_{o2}) est lié aux coefficients multiplicateurs des termes $y_r(i-1, k)$ et $y_o(i-1, k)$. Ces coefficients étant unitaires, il est pertinent d'adapter la méthode d'identification afin de ne pas avoir à les identifier, le but étant d'améliorer la précision des autres coefficients à identifier.

La méthode étant appliquée pour le régime stationnaire, k tend vers l'infini. Dans la suite des calculs, nous supprimerons ce paramètre k afin de ne pas surcharger l'écriture. Les vecteurs des données connues (entrées et sorties connues à l'instant discret k tendant vers l'infini) peuvent également être définis par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_r = (\varphi_{r1} \quad \varphi_{r2})^T \text{ avec : } \varphi_{r1} = \begin{pmatrix} -y_r(2) & Q_{int} \\ -y_r(3) & Q_{int} \\ \vdots & \vdots \\ -y_r(N-1) & Q_{int} \end{pmatrix} \text{ et } \varphi_{r2} = \begin{pmatrix} -y_r(1) \\ -y_r(2) \\ \vdots \\ -y_r(N-2) \end{pmatrix} \\ \varphi_o = (\varphi_{o1} \quad \varphi_{o2})^T \text{ avec : } \varphi_{o1} = \begin{pmatrix} -y_o(2) \\ -y_o(3) \\ \vdots \\ -y_o(N-1) \end{pmatrix} \text{ et } \varphi_{o2} = \begin{pmatrix} -y_o(1) \\ -y_o(2) \\ \vdots \\ -y_o(N-2) \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (4.30)$$

Enfin, définissons les vecteurs des mesures $\mathbf{y}_r = (y_r(3) \quad y_r(4) \quad \dots \quad y_r(p))^T$ et $\mathbf{y}_o = (y_o(3) \quad y_o(4) \quad \dots \quad y_o(N))^T$. La notation $\widehat{\mathbf{y}}_r$ et $\widehat{\mathbf{y}}_o$ au lieu de $\mathbf{y}_r$ et $\mathbf{y}_o$ sera utilisée pour souligner le fait que ces vecteurs sont calculés à partir des mesures et du paramètre identifié θ . Les équations de récurrence (4.29) peuvent s'écrire sous la forme vectorielle suivante [Lju99] :

$$\begin{cases} \widehat{\mathbf{y}}_r = \varphi_r \cdot \theta_r \\ \widehat{\mathbf{y}}_o = \varphi_o \cdot \theta_o \end{cases} \quad (4.31)$$

Résolution par la méthode des moindres carrés : la méthode des moindres carrés permet d'identifier les paramètres de θ_r et de θ_o à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} \theta_r = (\varphi_r^T \cdot \varphi_r)^{-1} \cdot \varphi_r^T \cdot \widehat{\mathbf{y}}_r \\ \theta_o = (\varphi_o^T \cdot \varphi_o)^{-1} \cdot \varphi_o^T \cdot \widehat{\mathbf{y}}_o \end{cases} \quad (4.32)$$

Cependant, seules les parties θ_{r1} et θ_{o1} des vecteurs θ_r et θ_o sont à identifier. Ainsi, afin d'améliorer le résultat de la résolution, les vecteurs θ_{r1} et θ_{o1} sont directement identifiés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \theta_{r1} = (\varphi_{r1}^T \cdot \varphi_{r1})^{-1} \cdot \varphi_{r1}^T \cdot \widehat{\mathbf{y}}_r - \varphi_{r2}^T \cdot \varphi_{r2} \cdot \theta_{r2} \\ \theta_{o1} = (\varphi_{o1}^T \cdot \varphi_{o1})^{-1} \cdot \varphi_{o1}^T \cdot \widehat{\mathbf{y}}_o - \varphi_{o2}^T \cdot \varphi_{o2} \cdot \theta_{o2} \end{cases} \quad (4.33)$$

Validation de la méthode sur une évolution de température calculée : afin de tester l'efficacité de cette méthode d'identification, appliquons-la à un problème dont les paramètres sont connus. Après identification, il sera alors possible de comparer les paramètres obtenus avec ceux de départ. Les expressions (4.28), définissent la température de chaque élément de la résistance et de l'outil. L'ensemble des paramètres initiaux est fixé. Ces équations étant des relations de récurrence, la température de deux éléments aux extrémités et à la liaison résistance-outil doit être fixée. Pour ce faire, utilisons les hypothèses suivantes :

- la température du premier élément sera fixée en fonction des mesures ;

- à l'extrémité gauche de la résistance ($i=0$), le flux d'échange thermique avec l'extérieur est nul ;
- il y a continuité de température et de flux thermique à l'intersection résistance-outil.

Ces hypothèses permettent de construire l'évolution de la température en régime stationnaire. Les équations suivantes définissent le modèle qui sera utilisé comme point de départ :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_r(1) = T_{mesure}(1) \\ T_r(2) = (2 + \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r}) \cdot T_r(1) - T_r(1) - \frac{\Delta x^2}{\lambda_r} \cdot Q_{int} - \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r} \cdot T_{ext} \\ T_r(i+1) = (2 + \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r}) \cdot T_r(i) - T_r(i-1) - \frac{\Delta x^2}{\lambda_r} \cdot Q_{int} - \frac{\tilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r} \cdot T_{ext} \text{ pour } 2 \leq i \leq p \\ T_o(1) = T_r(p) \\ T_o(2) = T_o(1) + \frac{\lambda_r}{\lambda_o} \cdot (T_r(p) - T_r(p-1)) \\ T_o(i+1) = (2 + \frac{\tilde{h}_o \cdot \Delta x^2}{\lambda_o}) \cdot T_o(i) - T_o(i-1) - \frac{\tilde{h}_o \cdot \Delta x^2}{\lambda_o} \cdot T_{ext} \text{ pour } 2 \leq i \leq n-p \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Ce modèle permet de définir la liste des températures de chaque élément du système résistance-outil. Nous avons considéré que nous disposions de 32 éléments discrets représentant 10 mm. Les p premiers éléments ($p = 9$ ici) appartiennent à la résistance, les autres appartiennent à l'outil. La méthode d'identification ARX est ensuite appliquée à partir de cette liste de températures conduisant à l'identification des coefficients a_r , b_r et a_o . Ces paramètres sont obtenus avec une très bonne précision (de l'ordre de 10^{-3} pour a_r et a_o et 10^{-9} pour b_r). La reconstruction de l'évolution des températures à partir de ces coefficients donne donc des résultats qui concordent avec les valeurs de départ.

Cependant, les paramètres qui nous intéressent plus particulièrement sont les coefficients de conduction et de convection. Ceux-ci sont obtenus par les égalités suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_r = -\frac{\Delta x^2}{b_r} \\ \tilde{h}_r = (-a_r - 2) \cdot \frac{\lambda_r}{\Delta x^2} \\ \frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o} = (-a_o - 2) \cdot \frac{1}{\Delta x^2} \end{array} \right. \quad (4.35)$$

La valeur des paramètres a_r , a_o est très proche de -2 et celle de b_r très proche de zéro au point qu'il devient impossible de déterminer les coefficients physiques (λ_r , $\tilde{h}_r$ et $\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}$) de manière précise en utilisant les expressions (4.35). En ce qui concerne le paramètre b_r , cette imprécision dépend fortement du paramètre Δx . Le facteur d'échelle n'est donc pas favorable à la détermination de ce paramètre mais, cette méthode fonctionnerait si elle était appliquée à des objets de plus grandes dimensions que ceux étudiés ici ou en utilisant un Δx très petit, ce qui pose de réelles difficultés de mesure. Pour a_r et a_o , l'imprécision n'est pas liée aux dimensions mais à la nature des phénomènes physiques étudiés. Ainsi, l'utilisation de ces coefficients pour déterminer les rapports $\frac{\tilde{h}_r}{\lambda_r}$ et $\frac{\tilde{h}_o}{\lambda_o}$ sera toujours délicate et peu précise par cette méthode.

Identification des paramètres : méthode par discrétisation temporelle

La méthode d'identification paramétrique ARX précédente peut également s'appliquer au modèle numérique défini à partir d'une discrétisation temporelle. Partons de l'équation (4.19)

appliquée à la résistance et à l'outil, permettant de définir la température de chaque élément discrétisé par période d'échantillonnage. En effectuant le changement de variable :

$$\tilde{T} = T - T_{\infty} \quad (4.36)$$

puis en notant que :

$$T^*(i, k) = \tilde{T}(i + 1, k) + \tilde{T}(i - 1, k) \quad (4.37)$$

deux expressions de la forme suivante sont obtenues :

$$\begin{cases} \tilde{T}_r(i, k + 1) = -a_{r1} \cdot T_r^*(i, k) + a_{r2} \cdot \tilde{T}_r(i, k) + b \cdot Q_{int}(k) \\ \tilde{T}_o(i, k + 1) = -a_{o1} \cdot T_o^*(i, k) + a_{o2} \cdot \tilde{T}_o(i, k) \end{cases} \quad (4.38)$$

Les détails de calcul relatifs à l'exploitation de ce modèle sont présentés dans l'annexe E. En utilisant la même méthode que celle développée avec l'utilisation de la méthode par discrétisation spatiale (section 4.6.2), nous pouvons écrire ces expressions sous forme matricielle (équation (E.5), annexe E) qui peuvent être exprimées de manière simplifiée par : $\mathbf{y}_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1} \cdot \boldsymbol{\theta}$. Dans cette équation simplifiée, on retrouve les mesures $\mathbf{y}$, le vecteur des données connues $\boldsymbol{\varphi}$ et le vecteur des paramètres à identifier $\boldsymbol{\theta}$. L'utilisation de cette méthode d'identification nécessite la mesure dynamique de la température de trois éléments spatiaux discrets consécutifs (équations (E.7), annexe E) et une commande Q_{int} générée sous forme de bruit blanc pseudo-aléatoire pour augmenter le spectre d'excitation et donc la pertinence de l'identification. Cette méthode semble appropriée, eut égard à la précision d'identification qu'elle est susceptible d'apporter. Cependant, ne disposant actuellement pas des moyens expérimentaux pour effectuer cette mesure, nous n'avons pas pu la mettre en œuvre.

4.6.3 Conclusion

Pour identifier les coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil, trois méthodes ont été étudiées. La première, fondée sur le modèle analytique en régime stationnaire, a permis d'identifier ces coefficients. Nous utiliserons ces valeurs dans la suite de ce mémoire. Les deux autres méthodes sont fondées sur l'identification paramétrique ARX. En dépit de leurs potentialités, celles-ci n'ont pas permis d'aboutir à un résultat probant. La méthode d'identification paramétrique ARX utilisant une discrétisation spatiale s'est avérée mal adaptée à la fois aux problèmes thermiques et aux dimensions en jeu. La méthode d'identification paramétrique ARX utilisant une discrétisation temporelle nécessite des moyens expérimentaux que nous n'avons pas pour le moment.

4.7 Validation expérimentale des modèles

Après avoir étudié le système résistance-outil, nous disposons d'un modèle analytique en régime stationnaire, d'un modèle numérique et des différents coefficients nécessaires à ces

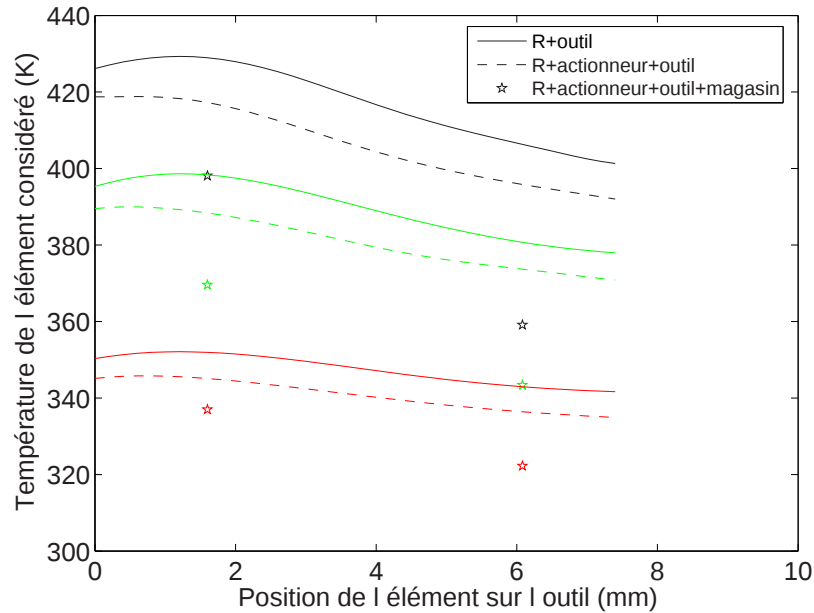


FIG. 4.14 – Influence de l'actionneur et du magasin sur la température en régime stationnaire. Pour chaque système, trois séries de mesures ont été effectuées correspondant à trois densités de chaleur différentes ($Q_{int} = 179, 127$ et 64 W/m^3). Les thermocouples utilisés sont placés comme indiqué sur les FIG. 4.5, 4.6 et 4.7.

modélisations. Nous souhaitons à présent déterminer la loi de commande du système complet résistance-actionneur-outil-magasin dans l'air. Le fonctionnement du système de changement d'outils dans le vide sera également étudié.

4.7.1 Fonctionnement sous environnement atmosphérique

Les différents modèles développés jusqu'à présent ne prennent en considération ni l'actionneur ni le magasin. Pour étudier leur influence, des mesures de températures en régime stationnaire pour les systèmes résistance-outil, résistance-actionneur-outil et résistance-actionneur-outil-magasin (FIG. 4.14) ont tout d'abord été effectuées. L'actionneur et le magasin évacuent de la chaleur par conduction et par convection. Pour caractériser ces pertes non modélisées, plusieurs méthodes sont envisageables :

- développer un modèle prenant en compte l'actionneur et le magasin. Cette méthode nécessite alors de déterminer les coefficients de conduction et de convection de ces deux éléments pour caractériser les flux de chaleur échangés ;
- considérer que les effets de ces pertes sont ceux d'un puits de chaleur ;
- négliger leur influence.

Compte tenu de la complexité de détermination précise des coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil, nous ne souhaitons pas poursuivre vers l'utilisation de

Système	h_r	λ_r	h_o	λ_o
résistance-outil	35,3	90	38	49,3
résistance-actionneur-outil	32	90	43,4	55,6
résistance-actionneur-outil-magasin	28,9	90	69,5	27

TAB. 4.2 – Valeurs numériques mesurées des coefficients de conduction (λ en W/mK) et de convection (h en W/m^2K) de la résistance et de l'outil pour trois systèmes.

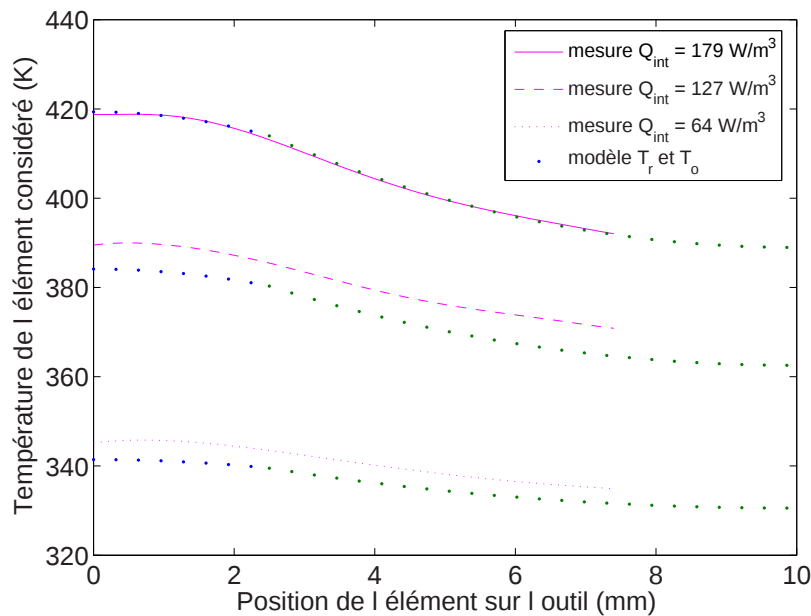


FIG. 4.15 – Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-actionneur-outil pour trois densités de source de chaleur.

méthodes d'identification. L'accumulation d'imprécisions conduirait probablement à des lois de commande non exploitables.

Négliger l'actionneur et le magasin est possible. Cependant, pour prendre en compte la chaleur absorbée réellement par ces deux éléments, les coefficients de conduction de la résistance et de l'outil utilisés dans un modèle simplifié résistance-outil doivent être ré-identifiés. Ces hypothèses conduisent à un modèle ne correspondant pas complètement aux phénomènes physiques en jeu. Cependant, cette méthode conduit à des résultats meilleurs qu'en modélisant les pertes par des puits de chaleur, elle a donc été finalement retenue.

L'application de la méthode d'identification détaillée dans la section 4.6.1 aux mesures de températures en régime stationnaire des systèmes résistance-actionneur-outil et résistance-actionneur-outil-magasin conduit aux résultats donnés dans le TAB. 4.2. De la même manière, les courbes pour $Q_{int} = 179 W/m^3$ ont permis de déterminer ces coefficients. Ensuite, ceux-ci

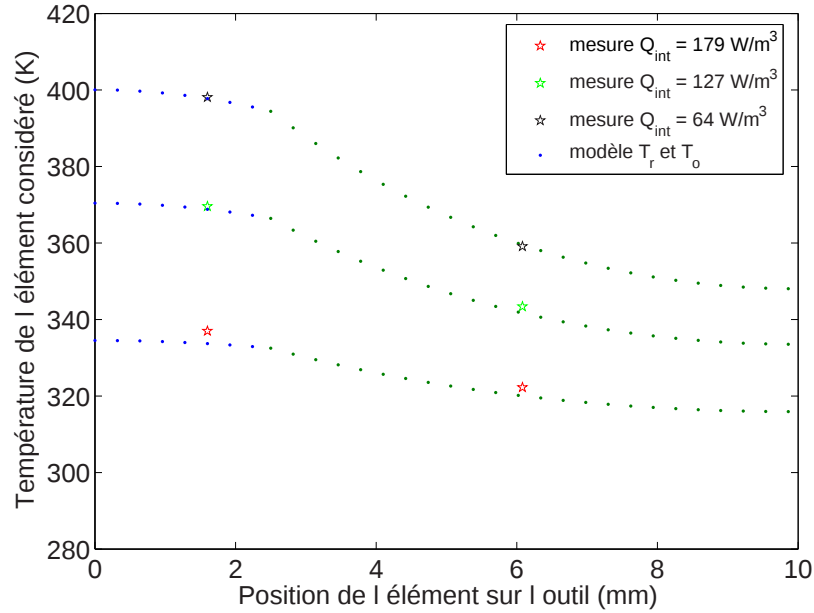


FIG. 4.16 – Comparaison du modèle aux mesures en régime stationnaire du système résistance-actionneur-outil-magasin pour trois densités de source de chaleur.

ont été utilisés dans le modèle unidirectionnel du régime stationnaire détaillé section 4.4, les courbes pour $Q_{int} = 127$ et 64 W/m^3 servant à vérifier la validité du modèle pour ces nouveaux coefficients. Les FIG. 4.15 et 4.16 permettent d'établir la bonne corrélation des mesures et du modèle utilisé pour les deux systèmes résistance-actionneur-outil et résistance-actionneur-outil-magasin en régime stationnaire.

Pour déterminer une loi de commande des résistances du système de changement d'outils, c'est-à-dire la loi horaire de leur commande, le régime transitoire doit être étudié. Pour ce faire, nous allons nous concentrer sur le système complet (résistance-actionneur-outil-magasin). Les coefficients qui seront utilisés sont ceux qui viennent d'être déterminés. Le modèle numérique défini section 4.5 sera utilisé. Dans ce modèle, le produit $\rho \cdot C$ apparaît. Celui-ci influe uniquement sur le régime transitoire. L'influence de $\rho_r \cdot C_r$ est faible, ce qui n'est pas le cas pour $\rho_o \cdot C_o$. Nous avons tracé la réponse temporelle à un échelon pour plusieurs valeurs de ce produit (FIG. 4.17). La confrontation des résultats du modèle aux mesures permet alors d'établir des valeurs optimisées. En fixant $\rho_r = 2520 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_o = 8900 \text{ kg/m}^3$, il a été possible d'établir $C_r = 790 \text{ J/Kkg}$ et $C_o = 765 \text{ J/Kkg}$.

A partir de l'ensemble de ces coefficients, la comparaison des résultats du modèle aux mesures effectuées en régime transitoire sur le système résistance-actionneur-outil-magasin (FIG. 4.18) peut être effectuée. Pour mémoire, la densité de chaleur $Q_{int} = 179 \text{ W/m}^3$ a été utilisée pour identifier les différents coefficients du modèle d'où une très bonne corrélation modèle-

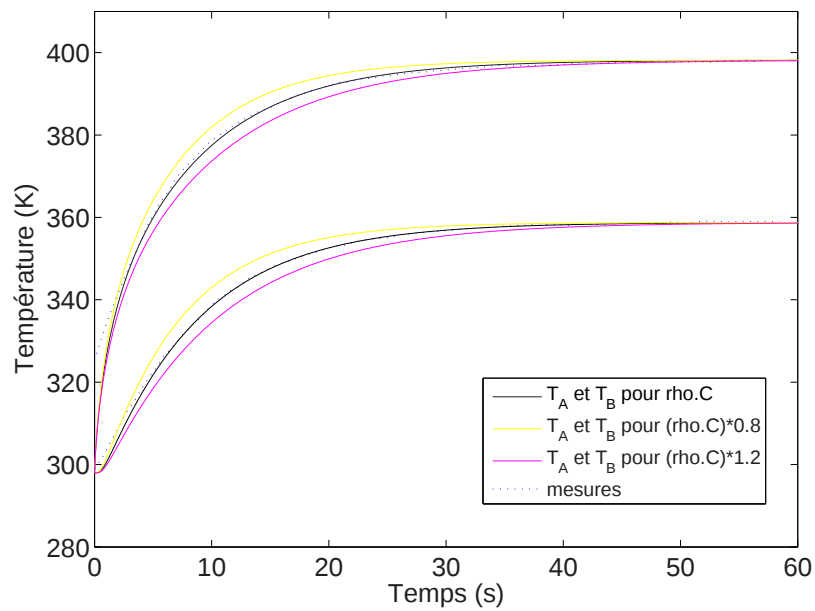


FIG. 4.17 – Influence du produit $\rho_o \cdot C_o$ sur le régime transitoire de l'évolution de la température. Ces valeurs sont simulées à partir du modèle numérique pour $\rho_o = 8900 \text{ kg/m}^3$ et $C_o = 765 \text{ J/Kkg}$.

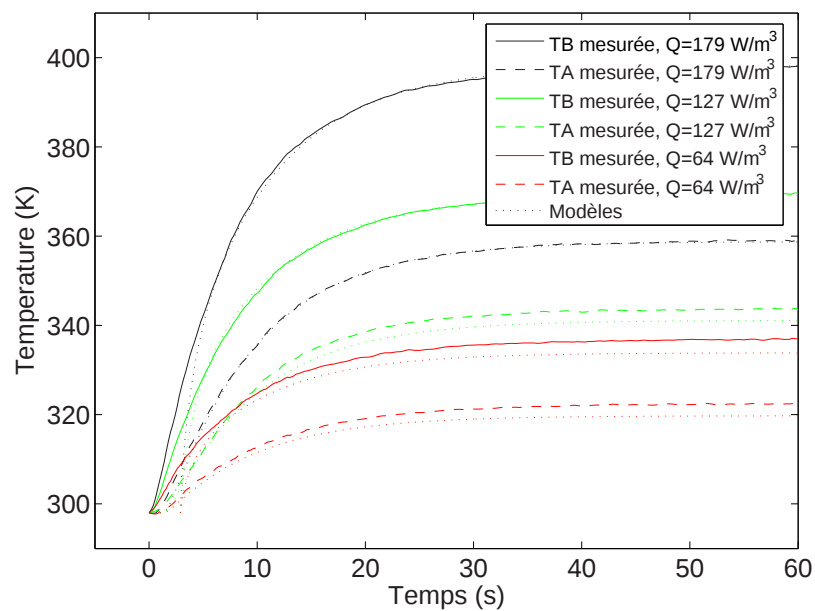


FIG. 4.18 – Comparaison du modèle aux mesures du système résistance-actionneur-outil-magasin en régime transitoire. A chaque fois les valeurs aux points A et B sont données pour trois densités de chaleur différentes. Les valeurs calculées avec le modèle 1D sont données en pointillés.

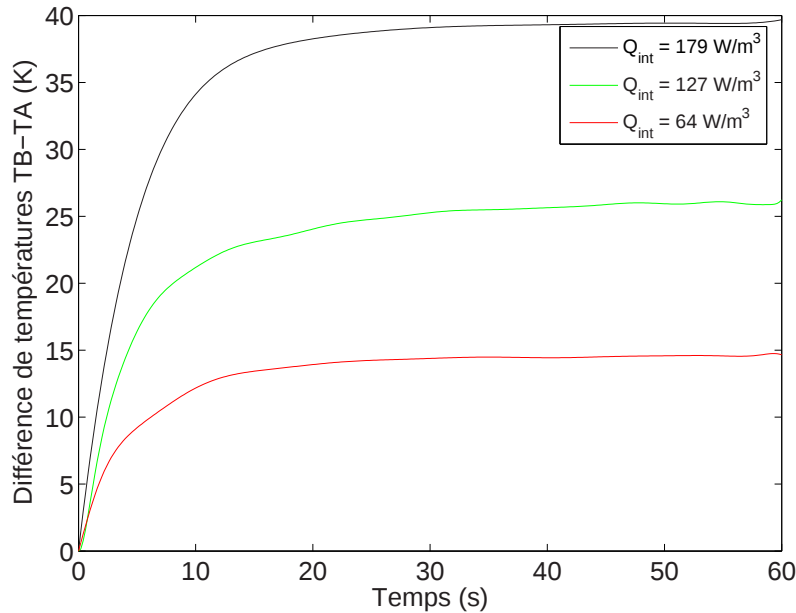


FIG. 4.19 – Différences de températures mesurées entre les points A (contact outil-magasin) et B (contact actionneur-outil) pour trois densités de chaleur.

mesures. Cette corrélation est également très bonne pour les deux autres densités de chaleur, le modèle développé est donc exploitable pour commander le système de changement d'outils. Notons également qu'un retard a été ajouté pour T_A et T_B (de respectivement 1 et 2,9 s). Ce retard s'explique en partie par la présence de l'actionneur et du magasin qui ne sont physiquement pas pris en compte dans le modèle développé et qui amènent des petites constantes de temps supplémentaires.

Pour déterminer l'intensité et la durée d'alimentation des résistances du contact actionneur-outil, les deux points suivants doivent être considérés :

- la liquéfaction de la colle au contact actionneur-outil doit être totale : T_B doit donc être nécessairement supérieure à 62°C ;
- la différence de température entre les points B (contact actionneur-outil) et A (contact outil-magasin) doit être suffisante : T_A doit être la plus faible possible et nécessairement inférieure à 49°C .

Ainsi, la FIG. 4.19 permet de constater que plus l'intensité d'alimentation des résistances est grande, plus la différence de température entre les points A et B est importante. Ainsi, l'alimentation des résistances résulte d'un compromis qui consiste d'une part à les alimenter de manière à privilégier la différence de température entre les points A et B et, d'autre part, à garantir le bon fonctionnement des différentes résistances utilisées (puissance limitée).

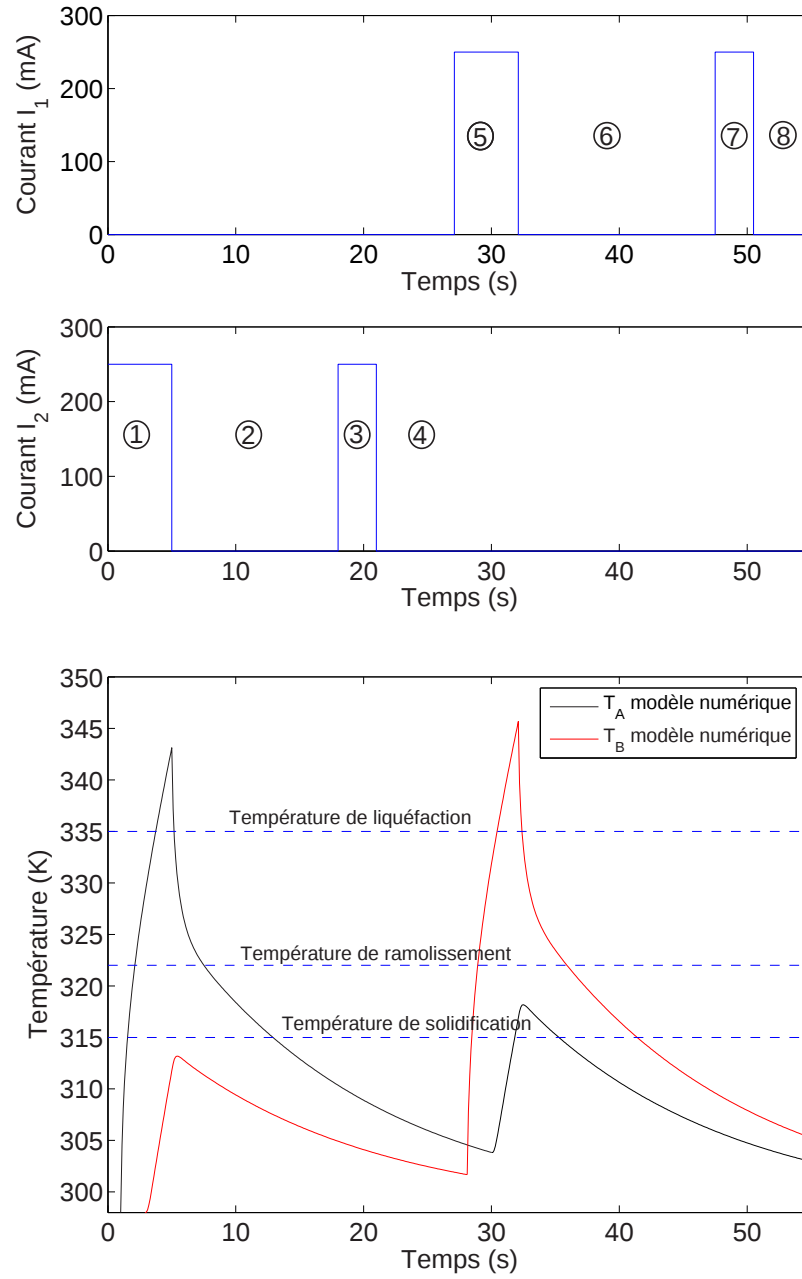


FIG. 4.20 – Exemple de cycle de températures au contact actionneur-outil (T_B) et au contact magasin-outil (T_A) en fonction des cycles d'alimentation des résistances de l'actionneur (R_1) et du magasin (R_2) respectivement par des courants constants I_1 et I_2 . Ces valeurs sont issues du modèle numérique et ne prennent pas en compte les phases 3 et 7.

L'utilisation du modèle numérique des phénomènes thermiques dans l'outil ainsi que ce compromis permettent d'établir la loi de commande des résistances (pour $R = 6 \Omega$) du système de changement d'outils. La FIG. 4.20 présente les chronogrammes d'alimentation des résistances du contact actionneur-outil (R_1) et de celles au contact outil-magasin (R_2) pendant un cycle complet de changement d'outils. Les numéros indiqués sur cette figure représentent les différentes phases de ce cycle. Initialement les outils sont fixés simultanément à l'actionneur et au magasin. Les différentes étapes de ce cycle sont les suivantes :

1. chauffage des résistances R_2 permettant de libérer le contact outil-magasin ;
2. phase de manipulation (une paire d'outils est fixée uniquement à l'actionneur) ;
3. chauffage des résistances R_2 permettant de liquéfier la colle au contact outil-magasin ;
4. fixation de cette paire d'outils dans le magasin ;
5. chauffage des résistances R_1 permettant de libérer le contact outil-actionneur ;
6. déplacements de l'actionneur seul permettant de rejoindre la position d'une seconde paire d'outils fixée dans le magasin ;
7. chauffage des résistances R_1 permettant de liquéfier la colle au contact actionneur-outils ;
8. fixation de cette seconde paire d'outils à l'actionneur et au magasin.

La FIG. 4.20 indique aussi la température calculée à l'aide du modèle numérique présenté précédemment en fonction de l'alimentation des résistances correspondantes. Il est important de noter que cette figure ne prend pas en compte les évolutions de températures engendrées par les phases 3 et 7. En effet, la phase 3 se déroule de la manière suivante :

- initialement, une paire d'outils est fixée à l'actionneur seulement. La place du magasin qui va recevoir cette paire d'outils est libre, ses résistances sont froides ;
- les résistances R_2 sont alimentées permettant le chauffage de la place du magasin considérée ;
- une fois ce chauffage terminé, les outils sont placés au contact de cette place du magasin, le temps nécessaire à la solidification de la colle est court et difficilement modélisable.

La phase 7 se déroule de manière similaire à la phase 3.

4.7.2 Fonctionnement sous environnement à vide

Dans un vide parfait, les échanges de chaleur s'effectuent principalement par conduction et par rayonnement, la convection naturelle étant nulle. La densité de flux d'énergie émise par un corps sous forme de rayonnement vaut $\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ où ε est l'émissivité du matériau et σ la constante de Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K$). Le nickel possède une faible émissivité (inférieure à 0,1, grâce à laquelle il a été utilisé pour améliorer la furtivité d'objets volants) donc l'influence du rayonnement sur le fonctionnement du système de changement d'outils doit être faible. Cependant, le modèle numérique unidirectionnel développé précédemment ne permet pas de prendre en compte facilement des non linéarités, aussi, nous n'avons pas pu l'utiliser pour prendre en compte les phénomènes thermiques dans le vide.

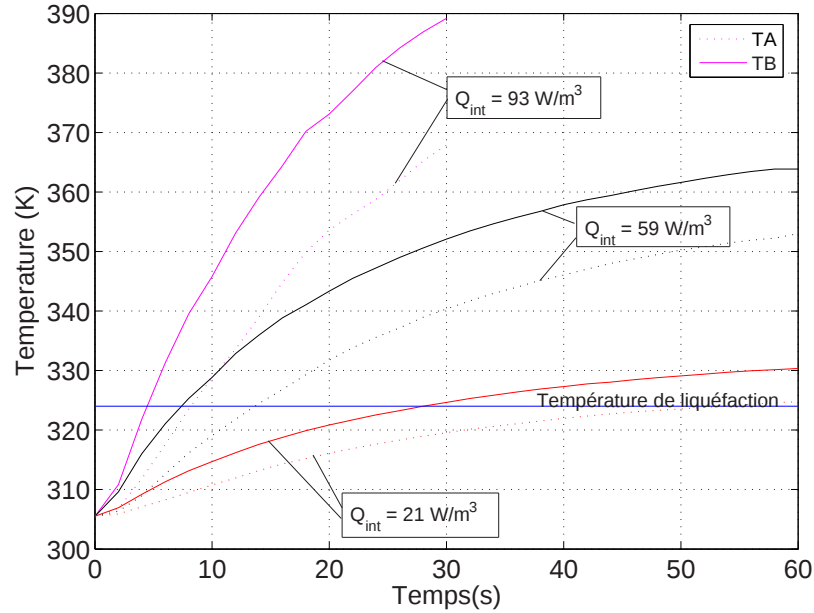


FIG. 4.21 – Mesures de la température des points A (contact outil-magasin) et B (contact outil-actionneur) pour le système réel composé d'un outil en contact avec l'actionneur et le magasin le tout disposé dans la chambre d'un MEB.

Nous avons plutôt décidé de réaliser quelques séries de mesures de températures en conditions réelles dans la chambre à vide d'un MEB. Ces mesures ont été effectuées dans un MEB de type High Vacuum. Ce type de MEB est le plus répandu mais la pression à l'intérieur de sa chambre diminue progressivement avec le temps par action d'une pompe. Les mesures présentées FIG. 4.21 et 4.22 ont été effectuées pour une pression avoisinant 10^{-5} millibars. Notons que les mesures effectuées pour des densités de chaleur de $Q_{int} = 69$ et 93 W/m^3 , ont été limitées volontairement à une durée de 30 s afin de ne pas atteindre des températures dans la chambre trop importantes, pouvant conduire à la destruction de certains matériaux. Ces mesures permettent de déterminer la durée d'alimentation des résistances pour un courant donné et pour une pression voisine de 10^{-5} millibars. De même, nous constatons que dans le vide, les critères de fonctionnement sont satisfaits : la différence de température entre les points A et B est suffisante lorsqu'il est nécessaire de ne liquéfier la colle qu'à un seul de ces points. Le système fonctionnera donc à condition de faire suffisamment d'essais expérimentaux pour trouver le meilleur compromis d'alimentation des résistances. Finalement ce type de mesures a permis d'utiliser le système de changement d'outils dans le vide (MEB).

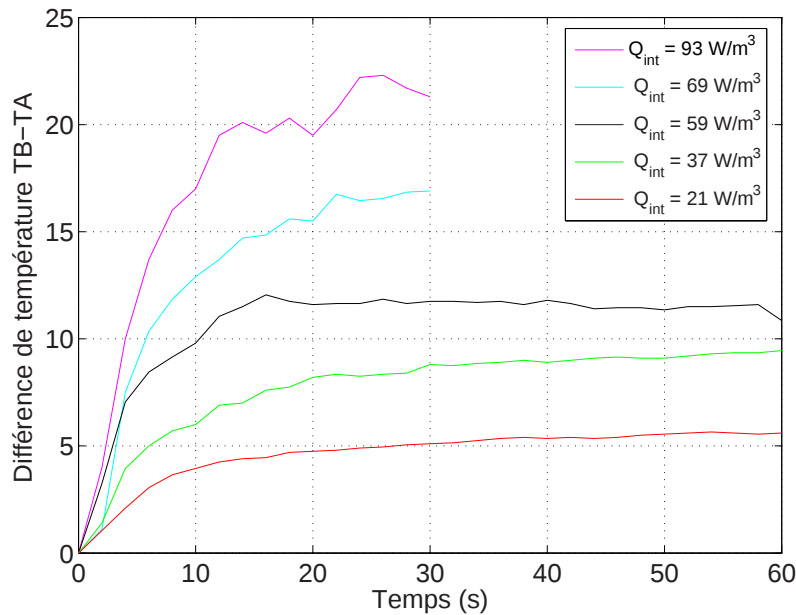


FIG. 4.22 – Différences de températures entre les points A (contact outil-magasin) et B (contact outil-actionneur) dans le vide pour cinq densités de chaleur.

4.8 Commande et caractérisation du système de changement d'outils à colle thermique

A partir des différents modèles développés dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'utilisation des lois de commande établies. Pour cela, l'intégration du système de changement d'outils dans une des stations de micromanipulation est d'abord présentée. La mise en œuvre du système de changement d'outils fondé sur l'utilisation de colle thermique reste délicate pour les raisons suivantes :

- phénomènes thermiques ;
- contraintes mécaniques ;
- maîtrise de l'environnement ;
- quantité de colle ;
- trajectoires et parallélisme des surfaces.

Après le développement de modèles thermiques, il est ainsi nécessaire de caractériser les performances de ce système de changement d'outils. Pour cette raison, comme chaque paire d'outils est utilisée à plusieurs reprises, nous allons d'abord nous pencher sur la répétabilité de positionnement des outils entre deux changements d'outils. La tenue mécanique des joints de colle sera également caractérisée. Pour finir, la compatibilité MEB de ce système de changement d'outils sera étudiée.

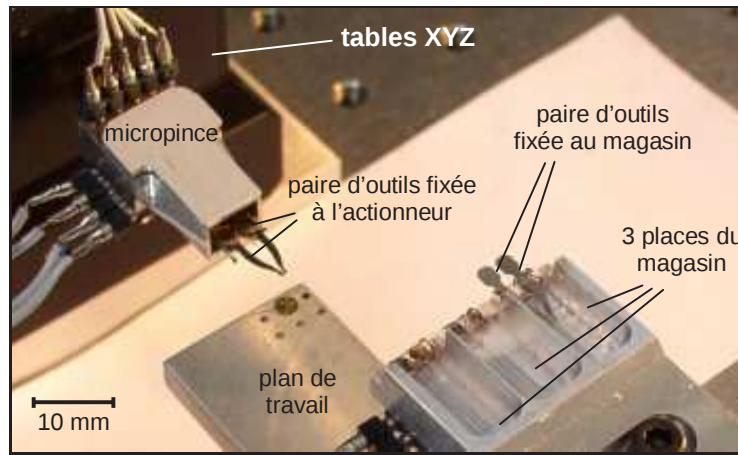


FIG. 4.23 – Mise en place du magasin d'outils dans la station de micromanipulation. Le magasin peut recevoir trois paires d'outils.

4.8.1 Intégration du système de changement d'outils dans la station de micromanipulation

L'utilisation du système de changement d'outils passe par son intégration (mécanique et électrique) dans les stations de micromanipulation existantes. Le magasin d'outils étant indépendant, il peut facilement être ajouté à toute station de micromanipulation. De même la micropince a certes subi des modifications mais qui ne concernent pas l'interface mécanique permettant sa fixation aux axes de micro-positionnement. L'intégration mécanique du système de changement d'outils ne pose donc aucun problème (FIG. 4.23). Le magasin a été conçu comme un module capable de contenir trois paires d'outils. Si une séquence d'assemblage nécessite l'utilisation de plus de trois paires d'outils, il est alors possible d'utiliser plusieurs de ces modules en les empilant. Le magasin et la micropince étant indépendants, leur position relative initiale doit être calibrée. Le parallélisme entre le plan principal de l'actionneur (plan XY) et celui du magasin a notamment beaucoup d'importance pour la réalisation de changements d'outils fiables et répétables. Ce réglage est actuellement effectué manuellement à l'aide d'un contrôle visuel².

L'interfaçage utilisateur et la commande des tables de micro-positionnement, de la micropince et du changement d'outils ont été réalisés au moyen d'un PC. Celui-ci permet de piloter, soit via un programme informatique (mode automatique), soit via un joystick (mode manuel), l'ensemble des éléments de la station de micromanipulation (voir FIG. 4.24). L'ensemble du logiciel a été développé sous Borland Builder C++.

A partir de ces éléments, un système de changement d'outils adapté à la micropince développée au LAB a été réalisé. La FIG. 4.25 présente les étapes successives d'un changement d'outils. Celui-ci permet de réaliser successivement deux tâches de micromanipulation nécessitant l'utilisation de deux paires d'outils différentes. Ainsi, il est par exemple possible de manipuler d'abord

2. C'est un point qui devra être amélioré ultérieurement.

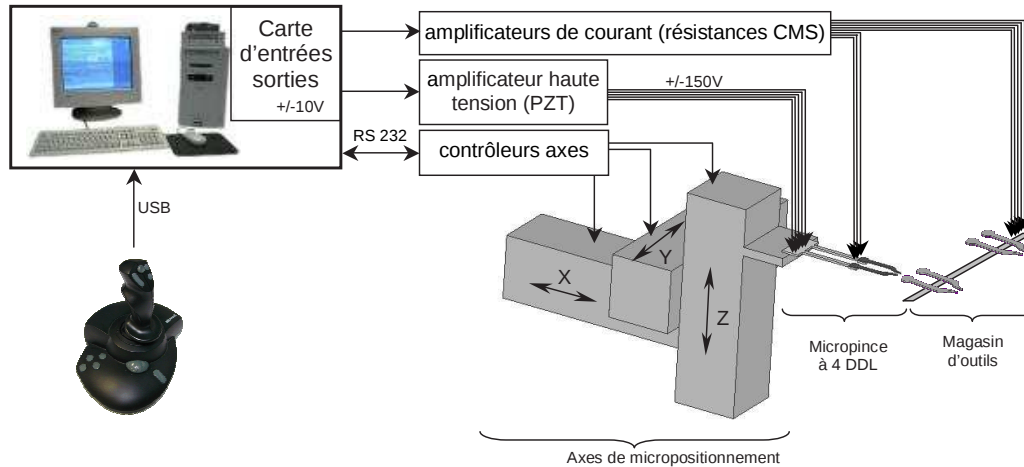


FIG. 4.24 – Schéma de câblage de la station de micromanipulation équipée des axes de micropositionnement PI (voir section 2.4.1). L'utilisateur pilote grâce au joystick et une interface PC, le robot, la micropince et le système de changement d'outils.

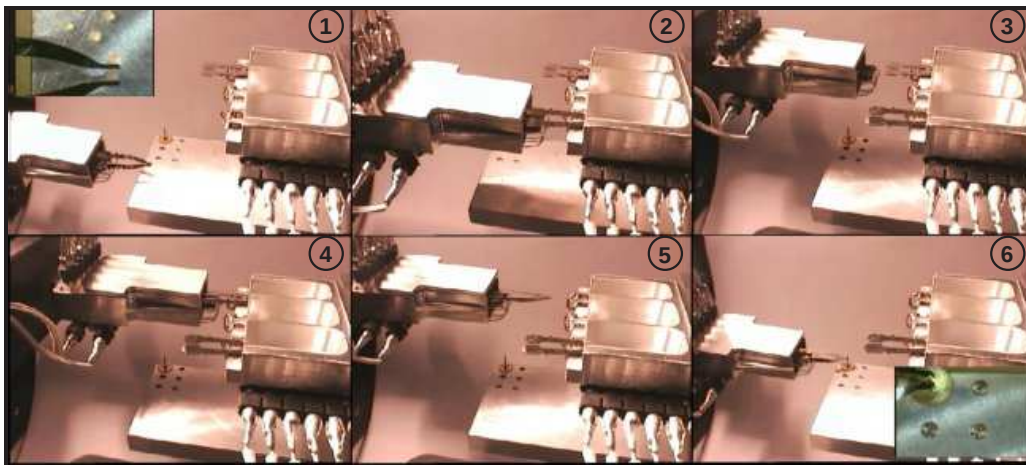


FIG. 4.25 – Etapes successives pour réaliser un changement d'outils : (1) manipulation d'un objet cubique de $300\ \mu\text{m}$ de côté ; (2) dépose des outils dans le magasin en refroidissant d'abord les contacts outils-magasin puis en chauffant les contacts outils-actionneur ; (3) l'actionneur se déplace seul pour aller chercher l'autre paire d'outils ; (4) fixation de la seconde paire d'outils à l'actionneur en refroidissant d'abord les contacts outils-actionneur puis en chauffant les contacts outils-magasin ; (5) déplacement de la pince ; (6) manipulation d'un pignon dont l'axe mesure $140\ \mu\text{m}$ de diamètre

4.8. COMMANDE ET CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS À COLLE THERMIQUE

des pièces cubiques en utilisant les outils n°2 de la FIG. 3.3 puis de manipuler un micro-pignon en utilisant la paire d'outils n°1 de cette même figure. Le passage d'une opération de micromanipulation à l'autre nécessite un cycle de changement d'outils.

4.8.2 Utilisation du système de changement d'outils

Première mise en place des outils dans la station de micromanipulation

Avant d'être utilisée pour la première fois, chaque paire d'outils doit être déposée dans le magasin et la position relative des outils doit être réglée pour réaliser des opérations de micromanipulation. Pour ce faire, le positionnement de l'altitude de l'actionneur par rapport à celle du magasin est réalisé par contrôle visuel latéral avec une précision de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$. Les outils sont ensuite déposés manuellement, ils sont alors simultanément en contact avec les spatules de l'actionneur et le magasin. Le réglage approximatif de leur position relative est effectué. Ce réglage peut ensuite être affiné grâce au système permettant le réglage relatif de la position des outils décrit paragraphe suivant. La précision de positionnement (des outils dans le magasin) obtenue est meilleure que $5\ \mu\text{m}$.

Place centrale du magasin : amélioration de la flexibilité du système de changement d'outils

Les deux résistances de l'actionneur peuvent être alimentées séparément. Il en est de même pour les deux résistances de la place centrale du magasin. Cette possibilité permet de fixer un outil au magasin, l'autre à l'actionneur. Un mouvement relatif (dans le plan des outils) entre actionneur et magasin permet alors de régler précisément la position relative des deux outils. Il est alors, par exemple, possible de modifier l'écartement initial d (FIG. 3.3) entre les outils.

Grâce à cette technique, le nombre d'outils à utiliser est réduit, procurant un gain supplémentaire de flexibilité. Pour marquer ce point, supposons que l'on doive manipuler une série d'objets prismatiques de toutes tailles comprises entre 20 et $500\ \mu\text{m}$. Sans ce système de correction de la position relative des outils, compte tenu des courses de la micropince ($320\ \mu\text{m}$ maximum), deux paires d'outils distinctes seraient nécessaires : la première ($d = 180\ \mu\text{m}$) permettant de manipuler les objets de 20 à $340\ \mu\text{m}$, la seconde ($d = 340\ \mu\text{m}$) pour manipuler les autres objets de la plage considérée. En utilisant le système de correction de la position relative des outils, une seule paire d'outils où d est modifié selon la taille de l'objet à manipuler est nécessaire.

Choix des vitesses et trajectoires d'approche lors des phases de changement d'outils

Les trajectoires et les vitesses d'approche pendant les phases de prise et de dépose des outils ont également leur importance lors d'un changement d'outils. Une vitesse de dégagement trop faible prolonge la durée du contact, ce qui se traduit par un apport de chaleur supplémentaire à l'outil. À l'inverse, une vitesse trop grande peut engendrer la destruction de l'actionneur si les liaisons ne sont pas totalement rompues. Une fois la colle d'un contact liquéfiée, une trajectoire de dégagement normale au plan de contact engendre une flexion de l'actionneur et des outils (adhésion par forces de capillarité) alors qu'une trajectoire de dégagement dans ce plan

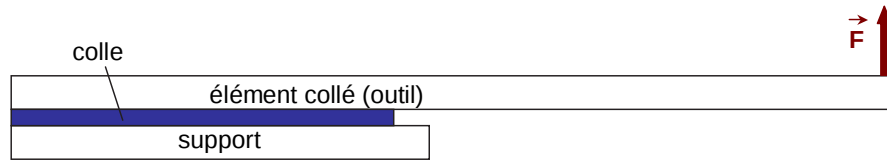
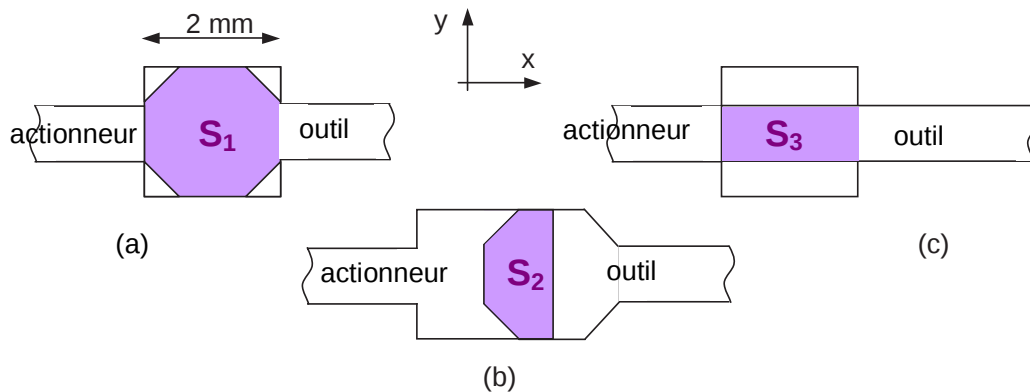


FIG. 4.26 – Essais de pelage d'un film de colle.

FIG. 4.27 – Trois types de contacts actionneur-outils : (a) spatule d'outil standard, surface de contact de $2 \times 2 \text{ mm}^2$; (b) spatule d'outil standard, surface de contact de $1 \times 2 \text{ mm}^2$; (c) spatule d'outil modifiée, surface de contact de $2 \times 1 \text{ mm}^2$.

engendre le cisaillement du film de colle. Ainsi, les trajectoires dans le plan XY (voir FIG. 4.24), exploitant le cisaillement, seront préférées.

4.8.3 Tenue mécanique des joints de colle

Comme cela a été expliqué dans la section 3.2.4, le film de colle aux contacts actionneur-outils doit être suffisamment solide pour supporter les efforts dus à la manipulation. Des mesures ont ainsi été réalisées afin de quantifier la force à appliquer à l'extrémité d'un outil pour obtenir la rupture du film de colle. Pour ce faire, le dispositif expérimental présenté FIG. 3.7 a été utilisé, l'outil étant fixé à la table de micro-positionnement par un film de colle, la surface de contact étant uniquement la spatule d'un outil. Ces mesures ont permis d'établir que 300 mN doivent être appliqués selon l'axe Y pour obtenir la rupture du film de colle. Cette valeur est supérieure aux 55 mN nécessaires à la manipulation, la tenue de la colle est donc suffisante.

Des essais en pelage [Cog04][Cog02] (force selon Z - FIG. 4.26) ont également été conduits à partir du même dispositif. Cette force dépend de la géométrie du contact actionneur-outil mais sa modélisation est difficile, nous avons donc envisagé trois types de contacts comme le montre la FIG. 4.27. Les mesures ont permis de déterminer qu'une force de pelage de respectivement 50, 50 et 27 mN (contacts de type a, b et c) doit être appliquée pour rompre le film de colle.

4.8. COMMANDE ET CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS À COLLE THERMI

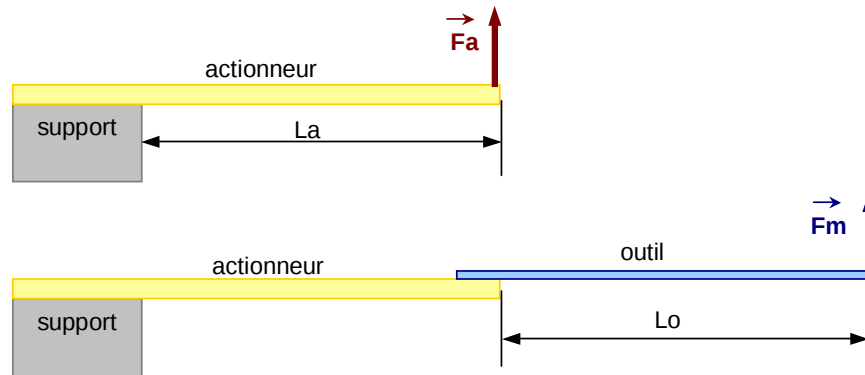


FIG. 4.28 – Détermination des forces limites de micromanipulation.

La force de rupture pour un essai de pelage semble donc dépendre de la largeur du contact (selon Y) et non de sa longueur (selon X) ou de sa surface. Ces mesures permettent de constater qu'une force de 10 mN peut être appliquée à l'extrémité de l'outil selon l'axe X sans que cela n'engendre la rupture du film de colle.

Pour compléter cette étude, nous avons souhaité comparer les forces de rupture du film de colle aux forces de rupture de l'actionneur. Le but étant d'établir qui de l'actionneur ou du film de colle cédera en premier lorsque l'ensemble actionneur-outil subit une force de flexion selon Y ou Z (FIG. 4.28). La rupture du film de colle interviendra si la force due à la manipulation (F_m) est supérieure à la force de rupture du film de colle (300 mN et 50 mN selon Y et Z respectivement). La rupture de l'actionneur aura lieu si l'effort dû à la manipulation est supérieur aux valeurs définies par les égalités (3.4).

Ainsi, la force limite de manipulation est de 110 mN et 50 mN selon Y et Z respectivement. Ces valeurs indiquent que le film de colle se rompra en premier pour une force selon Z mais l'actionneur cassera avant le film de colle pour une force appliqué selon Y. Le film de colle agit donc comme un fusible selon Z, ce qui est le plus important, procurant une sécurité des opérations de micromanipulation. Cette conclusion a été validée expérimentalement à plusieurs reprises lors d'erreurs de manipulation.

4.8.4 Répétabilité de positionnement

Les outils sont utilisés de manière séquentielle, leur positionnement est donc sujet à des imprécisions engendrées par les phases de changement d'outils. Des mesures ont été effectuées dans le but de caractériser la répétabilité de positionnement des outils entre deux cycles de changement d'outils. Pour caractériser cette répétabilité, la station de micromanipulation définie FIG. 4.24 a été utilisée. Celle-ci a permis de réaliser automatiquement des cycles de changement d'outils incluant à chaque fois des mesures de leur position selon les axes X, Y et Z. Pour ce faire, un capteur laser à triangulation³ de résolution de 10 nm a été utilisé. Il permet de mesurer

3. Capteur laser de la société Keyence de référence LC 2420.

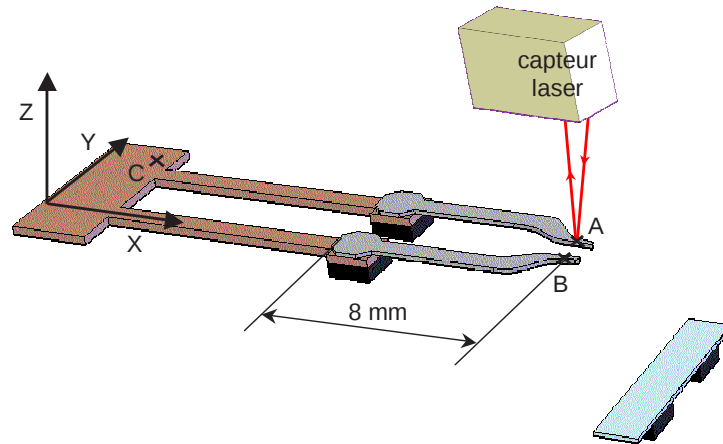


FIG. 4.29 – Schéma du système expérimental utilisé pour les mesures de répétabilité de changement d'outils. Exemple de mesures selon l'axe Z. Les points A (outil 1), B (outil 2) et C (référence) sont les positions initiales des points mesurés.

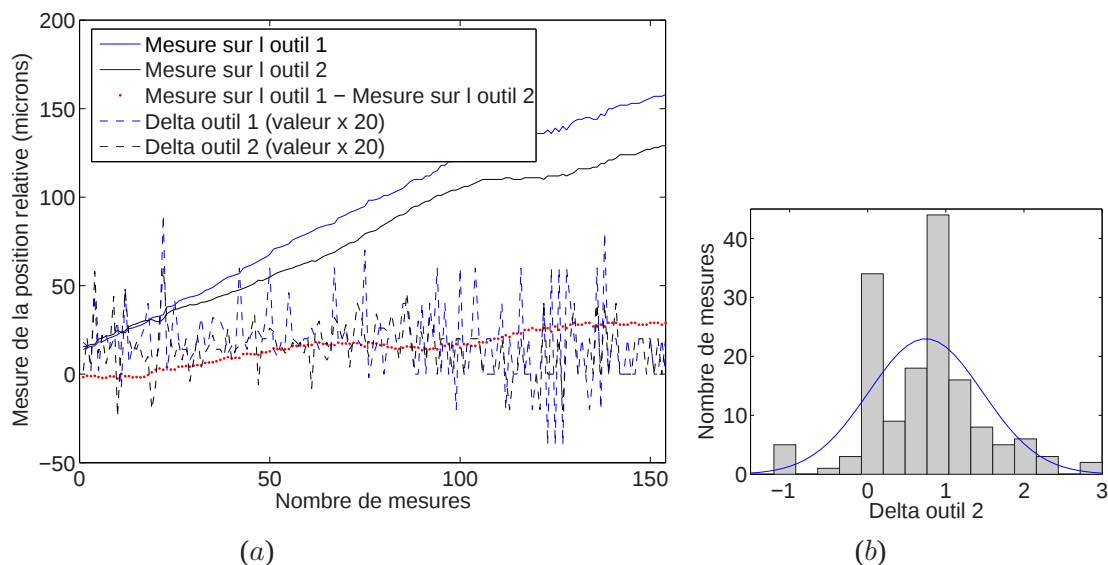


FIG. 4.30 – Dispersions de remise en position des outils (1 et 2) lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe X : (a) mesures de la précision relative de positionnement entre deux changements d'outils et variation entre deux mesures consécutives (delta) ; (b) répartition des écarts (delta).

4.8. COMMANDE ET CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS À COLLE THERMI

la position relative des points A, B et C (la FIG. 4.29 présente un exemple pour des mesures effectuées selon Z) entre chaque cycle de changement d'outils. Les mesures effectuées au point C seront utilisées comme référence et permettront de quantifier la répétabilité de positionnement propre au manipulateur. Ces mesures seront déduites de celles effectuées sur les outils (points A et B) afin de déterminer la répétabilité de positionnement des outils intrinsèque au système de changement d'outils. De même, pour ces expérimentations, l'actionneur de la micropince n'est pas alimenté afin de ne pas ajouter leur répétabilité à l'ensemble. Ainsi, le cycle de mesures suivant est utilisé :

- les outils sont uniquement fixés à l'actionneur, mesure de la position du point A (FIG. 4.29) à l'extrémité du premier outil ;
- déplacements permettant de placer le deuxième outil sous le faisceau laser du capteur ;
- mesure de la position du point B à l'extrémité du deuxième outil ;
- déplacements permettant de placer un point fixe de l'actionneur sous le faisceau laser du capteur ;
- mesure de la position du point C qui sera utilisée comme référence ;
- déplacements du manipulateur permettant de rejoindre la position de changement d'outils ;
- dépose des outils dans le magasin ;
- déplacements de l'actionneur seul fixé au manipulateur ;
- déplacements pour rejoindre la position de changement d'outils ;
- les mêmes outils que précédemment sont fixés à l'actionneur puis extraits du magasin.

Ce cycle a été répété automatiquement plusieurs centaines de fois, permettant d'établir la précision de repositionnement des outils selon les axes X, Y et Z (FIG. 4.30 (a), 4.31 (a) et 4.32 (a)). δ est la différence entre deux mesures consécutives, permettant de quantifier la déviation des outils entre deux changements d'outils consécutifs. La déviation maximale des outils ainsi obtenue entre deux changements d'outils consécutifs vaut respectivement $3,2 \mu\text{m}$, $2,3 \mu\text{m}$ et $2,8 \mu\text{m}$ selon les axes X, Y et Z. En moyenne, cette déviation est de l'ordre du micron. Les histogrammes des mesures présentées précédemment sont représentés FIG. 4.30 (b), 4.31 (b) et 4.32 (b). Ils mettent en évidence des distributions quasiment Gaussiennes. Les écarts type sont de $0,73$, $0,47$ et $1,16 \mu\text{m}$ tandis que les moyennes sont de $0,74$, $0,62$ et $0,03 \mu\text{m}$ selon X, Y et Z respectivement. Ces moyennes font état d'une déviation selon X et Y dont les causes n'ont pas été déterminées précisément. Cependant, nous supposons qu'elles sont principalement dues au manque de parallélisme entre le plan principal de l'actionneur, celui du magasin et ceux des outils. En effet, ce problème de réglage engendre une épaisseur de colle non uniforme sur l'ensemble des surfaces de contacts outil-actionneur ou outil-magasin. Ainsi, par exemple, la solidification de la colle engendre un retrait non uniforme, source de contraintes mécaniques néfastes au positionnement des outils. De même, un manque de parallélisme engendre la formation progressive d'une goutte de colle plutôt que d'un film d'épaisseur uniforme. Ce phénomène de tension de surface est favorable à l'augmentation de l'angle entre des différents plans considérés et donc à la déviation de la position des outils.

Notons qu'à l'issue de plusieurs cycles de changement d'outils ces déviations s'accumulent. Celles-ci peuvent être compensées à tout moment grâce à la place centrale du magasin (cf section

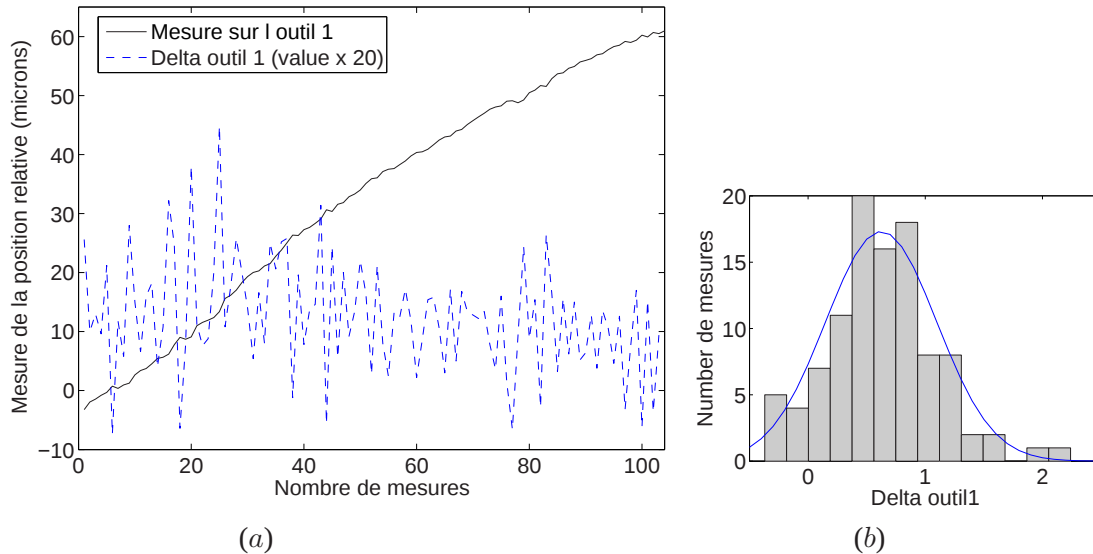


FIG. 4.31 – Dispersions de remise en position de l'outils 1 lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe Y: (a) mesures de la précision relative de positionnement entre deux changements d'outils et variation entre deux mesures consécutives (delta); (b) répartition des écarts (delta).

4.8.2) ou aux quatre degrés de libertés de l'actionneur qui permettent de repositionner chaque outil.

4.8.5 Compatibilité MEB et essais

Comme cela a déjà été mentionné, réaliser des séquences d'opérations de micromanipulation dans un environnement à vide (chambre d'un MEB par exemple) présente beaucoup d'intérêt notamment lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un matériau à l'échelle microscopique. Le manque de place dans un MEB fait qu'actuellement, pour changer de manipulateur, la procédure suivante doit être suivie :

- couper l'alimentation du champ d'électron ;
- rétablir la pression atmosphérique dans la chambre ;
- ouvrir la porte ;
- changer la micropince manuellement (sans la casser) ;
- calibrer la position des outils ;
- fermer la porte ;
- pomper pour atteindre la pression permettant de mettre en route la source d'électrons ;
- mettre en route le canon à électrons ;
- effectuer les différents réglages pour obtenir une bonne visualisation.

4.8. COMMANDE ET CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS À COLLE THERMIQUE

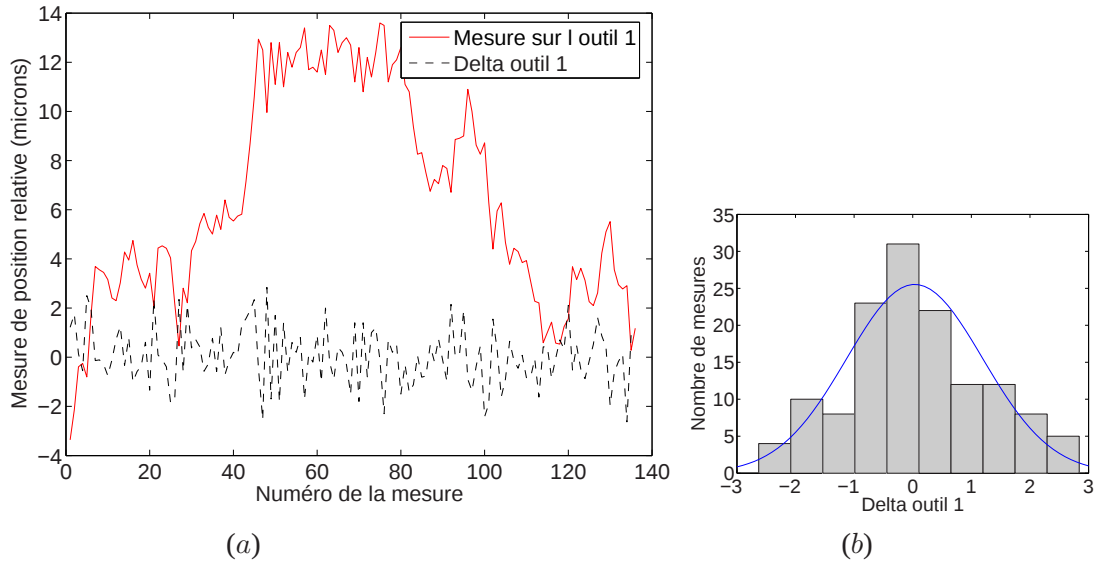


FIG. 4.32 – Dispersions de remise en position de l'outil 1 lors de cycles automatiques de prise-dépose-mesure selon l'axe Z : (a) mesures de la précision relative de positionnement entre deux changements d'outils et variation entre deux mesures consécutives (delta) ; (b) répartition des écarts (delta).

Cette procédure nécessite de 10 à 30 minutes, la phase de calibration étant délicate. Dans ce cas, l'utilisation d'un système de changement d'outils apparaît pertinente. Or, le système que nous avons conçu est fondé sur l'utilisation d'une colle thermique et les phénomènes thermiques sont fortement influencés par la pression : la conduction, la convection, le rayonnement. Les points de fusion des matériaux sont également modifiés. De plus, lors de sa fusion, la colle dégage, ce qui, dans le vide, pourrait engendrer l'arrêt du canon à électrons si la pression n'est pas maintenue sous une certaine valeur (dépendante du type de MEB utilisé). Le fabricant de la colle thermique n'a pas été en mesure de nous communiquer la nature ou le nombre de composants de la colle thermique, ni d'éventuelles caractéristiques de dégazage ou d'étude dans le vide, aussi, une étude expérimentale a été réalisée. La température de fusion de la colle dans le vide a donc tout d'abord été déterminée, puis, nous avons étudié et quantifié le dégazage généré par la colle lors de sa fusion. Pour finir, des essais du fonctionnement du système de changement d'outils dans le vide ont été effectués à partir des mesures de température présentées section 4.7.2.

Température de fusion de la colle dans le vide

Avant toute chose, il a paru indispensable de déterminer la température de fusion de la colle dans le vide. Dans ce but, des cristaux de cette colle ont été placés sur une résistance équipée d'un thermocouple. Cet ensemble a été introduit dans la chambre à vide d'un MEB de type

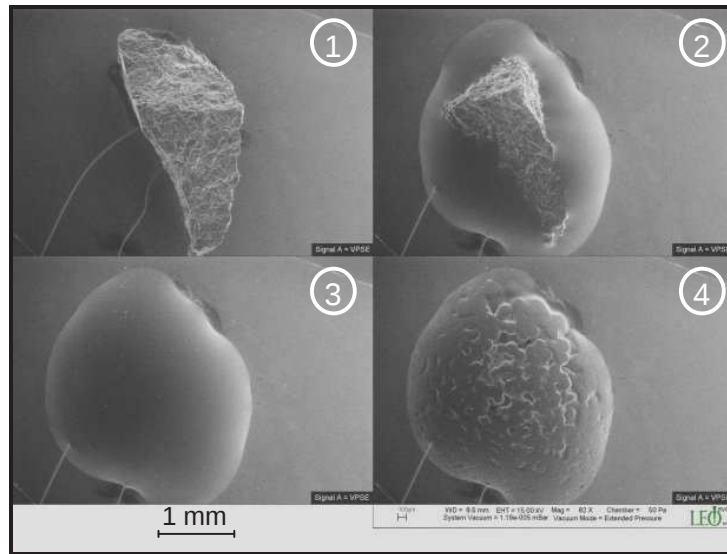


FIG. 4.33 – Etude des températures de liquéfaction et de solidification de la colle dans un environnement à vide (chambre de MEB) : (1) grain de colle solide ; (2) début de la liquéfaction de ce grain de colle ; (3) la colle est totalement liquide ; (4) la colle est totalement solide. Un nouvel échauffement de cette colle engendrerait sa liquéfaction selon la figure (3).

Variable Pressure⁴. Ce type de MEB permet la visualisation d'échantillons non métalliques par l'ajout d'un gaz. Ce gaz permet d'évacuer les électrons issus du canon à électrons qui se fixent à la surface des échantillons. Sans ce système, les échantillons diélectriques accumulent tellement d'électrons à leur surface que leur visualisation n'est pas possible. Grâce à ce MEB, nous avons pu alimenter la résistance de manière incrémentale jusqu'à obtenir la valeur exacte de la température de fusion de la colle. La FIG. 4.33 montre les différentes étapes de cycles de liquéfaction et de solidification. Nous avons pu établir que la température de liquéfaction de la colle dans la chambre d'un MEB est de 60 ° C et que sa solidification est obtenue à 37 ° C.

Dégazage

Pendant sa fusion, la colle dégaze. Afin de quantifier ce dégazage, des essais dans un MEB de type high vacuum⁵ ont été réalisés. Celui-ci ne permet d'observer que des matériaux conducteurs. Une pompe permet de réduire continuellement la pression dans la chambre. Lorsque la pression atteint environ $1,5 \times 10^{-5}$ millibars, le canon d'électrons peut être allumé, ensuite, la qualité des images obtenue augmente à mesure que la pression dans la chambre diminue. Une jauge permet de mesurer la pression à tout instant. L'évolution de la pression dans la chambre vidée de tout manipulateur ou autre élément afin d'établir une référence a donc été mesurée. Un

4. MEB de référence EVO50HV (Carl Zeiss Int.) mis à notre disposition par le fabricant LEO-Zeiss, Oberkochen, Allemagne.

5. MEB de référence 1450HV (Carl Zeiss Int.), mis à notre disposition par l'équipe AMiR (Division of Microbotics and Control Engineering) de l'université d'Oldenburg, Allemagne.

4.8. COMMANDE ET CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE CHANGEMENT D'OUTILS À COLLE THERMIQUE

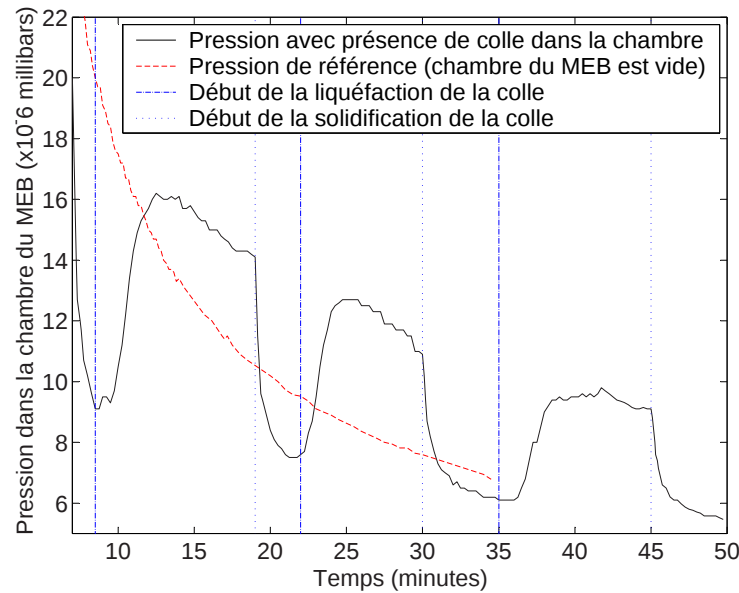


FIG. 4.34 – Influence du dégazage de la colle dans le vide : mesures de l'évolution de la pression quand la chambre du MEB est vide (pression de référence) et quand elle contient un grain de colle subissant des cycles de chauffage-refroidissement.

grain de colle a ensuite été posé sur une résistance à l'intérieur de cette même chambre. Des cycles de liquéfaction et solidification de la colle ont été générés, permettant de nouvelles mesures de pression (FIG. 4.34). Cette étude permet de confirmer que la colle dégaze lorsqu'elle est liquide, engendrant une variation de la pression de la chambre du MEB. Cependant, ce dégazage est faible et ne perturbe pas le fonctionnement du MEB puisque la pression reste toujours bien inférieure à $1,5 \times 10^{-5}$ millibars pendant cette phase.

Essais de fonctionnement du changement d'outils dans le vide

Dans le cadre du projet ROBOSEM (voir section 2.3.1), le système de changement d'outils à colle thermique a été testé et utilisé avec succès dans un MEB. La micropince a ainsi été montée sur des tables de micro-positionnement X-Y-Z actionnées piézoélectriquement. Ces tables, réalisées par le LSRO⁶ fonctionnent selon un principe stick and slip. La FIG. 4.35 présente les étapes d'un cycle de changement d'outils, réalisé dans un MEB. La FIG. 4.36 quant à elle, présente les étapes conduisant au réglage de la position relative entre deux outils (section 4.8.2).

6. Laboratoire de Systèmes Robotiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

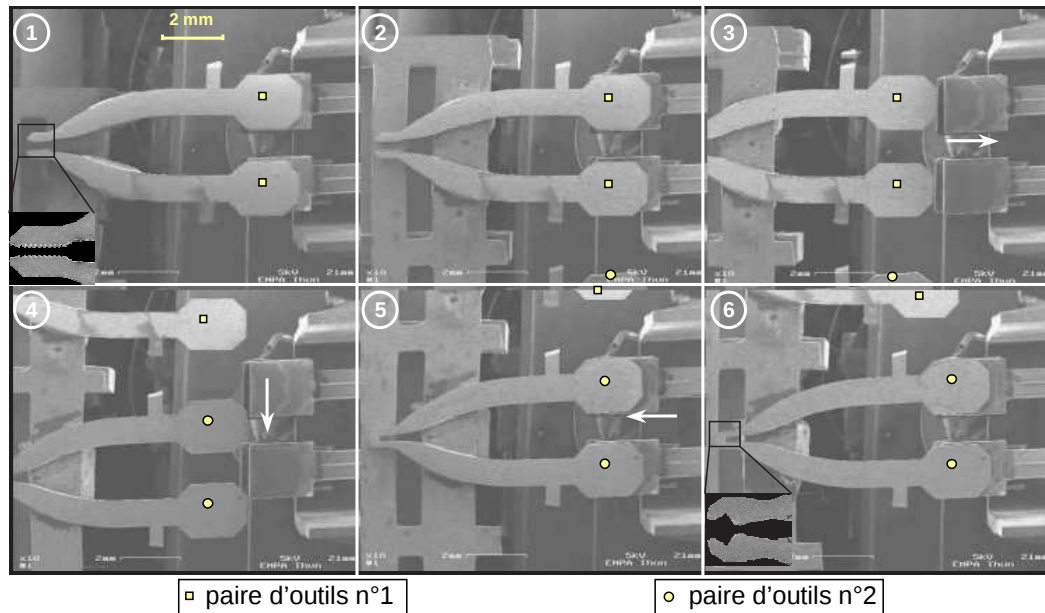


FIG. 4.35 – Etapes du cycle de changement d’outils dans un MEB : (1) la première paire d’outil est fixée à l’actionneur ; (2) les outils sont fixés simultanément au magasin et à l’actionneur ; (3) dégagement de l’actionneur seul, les outils restent fixés au magasin ; (4) déplacement de l’actionneur vers la seconde paire d’outils ; (5) la seconde paire d’outils est fixée simultanément à l’actionneur et au magasin ; (6) prise de la seconde paire d’outils hors du magasin.

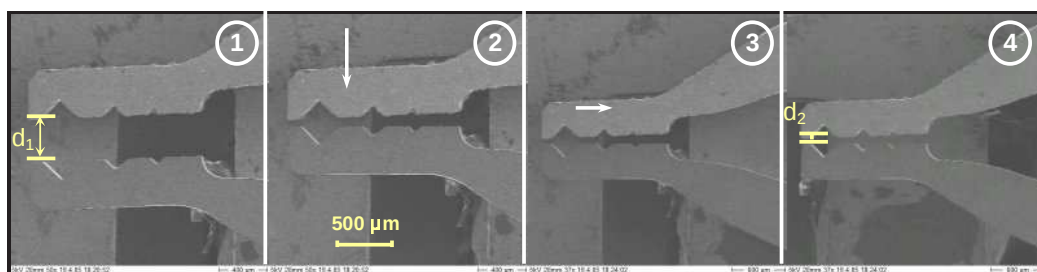


FIG. 4.36 – Etapes successives permettant de régler la position relative de deux outils : (1) un outil est fixé au magasin (celui en bas sur la figure), l’autre à l’actionneur (celui en haut), d_1 représente l’écart entre les outils ; (2) mouvement selon l’axe Y, l’écart entre les outils vaut maintenant d_2 ; (3) correction de la position relative par un mouvement selon X ; (4) prise des outils hors du magasin. d_2 représente le nouvel écart entre les outils.

4.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre un nouveau système de changement automatique d'outils adapté à la micro-robotique et fonctionnant à partir d'une colle thermique. L'état de cette colle, liquide ou solide est modifié par le contrôle de l'alimentation de résistances. Une paire d'outils peut alors être fixée soit à l'actionneur soit à un magasin d'outils.

L'étude des phénomènes thermiques dans un outil lors des phases de changement d'outils a été nécessaire. Elle a permis d'identifier les coefficients thermiques des différents éléments en jeu pour aboutir à un modèle numérique unidimensionnel. Celui-ci est alors utilisé pour déterminer l'évolution temporelle de la température de chaque point de l'outil en fonction de l'intensité d'alimentation des résistances. Grâce à ce modèle nous avons pu déterminer les conditions de fonctionnement du système de changement d'outils.

Le système de changement d'outils a été intégré à l'une de nos stations de micromanipulation, une interface PC a également été développée. A partir des conditions de fonctionnement déterminées à l'issue de l'étude thermique, plusieurs centaines de cycles de changement d'outils peuvent être effectués de manière automatique. La caractérisation du système de changement d'outils a permis d'établir que l'erreur maximale de positionnement des outils entre deux changements d'outils n'excède pas $3,2 \mu\text{m}$, $2,3 \mu\text{m}$ et $2,8 \mu\text{m}$ selon les axes X, Y et Z respectivement. Des mesures de la tenue mécanique des joints de colle ont permis d'établir que celle-ci est suffisante pour transmettre les efforts nécessaires à la manipulation ou l'insertion d'objets. Nous avons également constaté que le film de colle sert de fusible mécanique selon l'axe Z puisque sa rupture intervient avant celle de l'actionneur. Pour finir, le fonctionnement du système de changement d'outils a été validé pour une utilisation dans un MEB, et au delà, dans un environnement à vide.

Le système de changement d'outils permet de réaliser des séquences d'opérations élémentaires de micromanipulation sur des objets de formes, de tailles et de matériaux différents. Il est donc possible d'utiliser une paire d'outils adaptée à la manipulation de chaque objet selon sa forme, sa taille et son matériau. Ce système de changement d'outils apporte flexibilité et compacité à la station de micromanipulation. En effet, le volume occupé par le magasin est de $25 \times 22 \times 2 = 1100 \text{ mm}^3$ alors qu'une seule pince occupe $32 \times 13 \times 10 = 4500 \text{ mm}^3$. Les efforts de contact permettant la fixation des outils sont faibles et l'alimentation du système de changement d'outils n'est nécessaire que pendant les phases de changement.

L'étude des phénomènes thermiques a été effectuée pour des outils en nickel et un magasin en verre. Des outils en silicium ont été récemment réalisés au laboratoire. Or, le coefficient de conduction du silicium est plus faible que celui du nickel. L'utilisation de tels outils verrait donc la différence de température entre les contacts actionneur-outil et outil-magasin augmenter et, par conséquent, améliorerait l'efficacité du système de changement d'outils. De même, nous utilisons actuellement un magasin en verre. Réaliser un magasin en matériau plus conducteur que le verre (le cuivre par exemple) devrait également être favorable. Enfin, compte tenu de la

récente miniaturisation des modules à effet Peltier⁷, il est dorénavant possible d'envisager de les utiliser à la place des résistances.

7. Modules de dimensions $720 \times 720 \times 1470 \mu m^3$ chez Infineon technologies, Fraunhofer Institut, Freiburg, Allemagne.

Chapitre 5

Application des travaux à la micromanipulation et au micro-assemblage : améliorations et perspectives

Ce chapitre présente des exemples d'opérations effectuées avec les stations de micromanipulation présentées en section 2.4 et le système de changement d'outils développé. Pour faciliter et sécuriser certaines opérations, un plan de travail compliant a été développé. Son utilisation pour mesurer les efforts exercés par l'effecteur sur le plan de travail est à l'étude, les résultats déjà obtenus et des perspectives de recherche intéressantes seront présentés.

5.1 Introduction

Que ce soit en mode téléopéré ou automatique, pour effectuer des opérations de micromanipulation avec succès, il est nécessaire de disposer d'un manipulateur performant (cinématique, résolution, domaine atteignable, outils adaptés,...) et d'un système de vision qui permette de rendre compte de la scène avec suffisamment de précision (pour envisager une commande référencée vision). Pour qualifier les "performances" des éléments constitutifs des stations de micromanipulation réalisées, nous avons effectué de nombreuses opérations de manipulation et d'assemblage. Quelques exemples seront donnés et mettront en avant certains besoins comme le contrôle des efforts engendrés pendant les phases de micromanipulation, c'est-à-dire des forces de contact entre deux objets, un objet et le manipulateur ou un objet et le plan de travail (c'est-à-dire la surface sur laquelle sont déposés les objets à manipuler).

Plusieurs solutions permettant la mesure d'effort sont en cours d'étude au LAB. De nombreuses équipes de recherche s'intéressent actuellement au développement de capteurs d'ef-

fort adaptés à la micro-robotique. Il ne s'agit pas d'une problématique simple (voir section 1.3.4). Les difficultés, principalement dues à des contraintes d'encombrement et de résolution, ont conduit certaines équipes à mettre au point des systèmes souples, dits *compliant* (la *compliance* pouvant être passive ou active). Leur but est de limiter les efforts de contact entre les différents éléments (manipulateurs, objets, plan de travail) afin de préserver leur intégrité ou de faciliter certaines opérations de micromanipulation telles que les opérations d'insertion. Nous avons ainsi réalisé un plan de travail monté sur une structure souple (support *compliant*) dont la conception et la réalisation seront présentées dans ce chapitre.

Pour finir, nous envisageons d'utiliser ce support *compliant* comme capteur d'effort. Nous présenterons les travaux actuellement réalisés ainsi que les différentes perspectives qui nous semblent intéressantes dans ce but.

5.2 Exemples d'opérations de micromanipulation

Tout au long de nos travaux, de nombreuses opérations de micromanipulation et de micro-assemblage ont été effectuées afin de valider le fonctionnement des différents éléments constituant les deux stations de micromanipulation présentées section 2.4 et le système de changement d'outils (voir chapitre 4) réalisés. La FIG. 5.1 montre quelques exemples d'opérations de micromanipulation et de micro-assemblage réalisées. Tout d'abord, les outils en nickel ont été utilisés pour des opérations de micromanipulation des objets artificiels de formes, de dimensions et de matériaux variés suivants :

- grains de sel (cubes de 70 à 600 μm de côté, voir FIG. 5.1 (a)) ;
- billes en verre de 1 μm à 1 mm de diamètre (voir FIG. 5.1 (a) et (e)) ;
- billes en titane de 100 à 400 μm de diamètre ;
- grains d'alliage de nickel-Cobalt de formes aléatoires et de dimensions inférieures à 500 μm ;
- grains d'olivine (minéral de structure chimique $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$) de formes aléatoires et de dimensions comprises entre 10 et 50 μm ;
- éprouvettes de traction miniatures de dimensions $3 \times 1 \times 0,05 \text{ mm}^3$ (voir FIG. 5.1 (f)).

Des opérations de micromanipulation dans l'air (FIG. 5.1 (a), (b) et (c)), dans un milieu liquide (FIG. 5.1 (e)) et dans la chambre à vide d'un MEB (FIG. 5.1 (d) et (f)) ont également été effectuées avec succès. De même des opérations plus complexes de micro-assemblage de composants ont été réalisées, permettant de valider la dextérité de la micropince, la structure des stations de micromanipulation et le fonctionnement du système de changement d'outils (FIG. 5.1 (c) et (d)). L'assemblage des micro-composants suivants a ainsi été étudié :

- roulement de diamètre extérieur de 1,6 mm (le diamètre des cinq billes est de 200 μm), voir FIG. 5.1 (d) ;
- MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical System) dont une lentille qui mesure 200 μm de diamètre ;

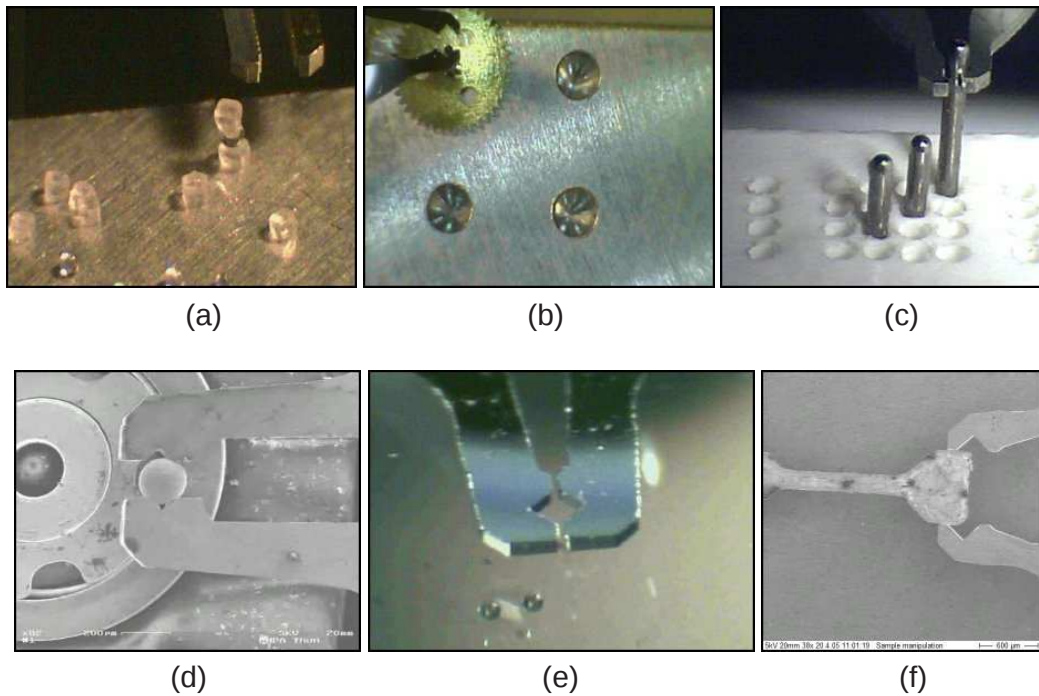


FIG. 5.1 – Exemples d'opérations de micromanipulation et de micro-assemblage : (a) empilement de cubes de $200\ \mu\text{m}$ de côté et de sphères de $200\ \mu\text{m}$ de diamètre ; (b) opération de prise/dépose d'un pignon de montre (le diamètre de l'axe mesure $140\ \mu\text{m}$) ; (c) opérations de prises/déposes de pions dans une matrice de perçages ; (d) opération d'assemblage d'un roulement de diamètre extérieur de $1,6\ \text{mm}$ dans un MEB : manipulation d'une bille (diamètre de $200\ \mu\text{m}$) ; (e) manipulation de billes de $50\ \mu\text{m}$ et de $150\ \mu\text{m}$ de diamètre dans un milieu liquide ; (f) manipulation d'une éprouvette pour essais de traction dans un MEB ($3 \times 1 \times 0,05\ \text{mm}^3$).

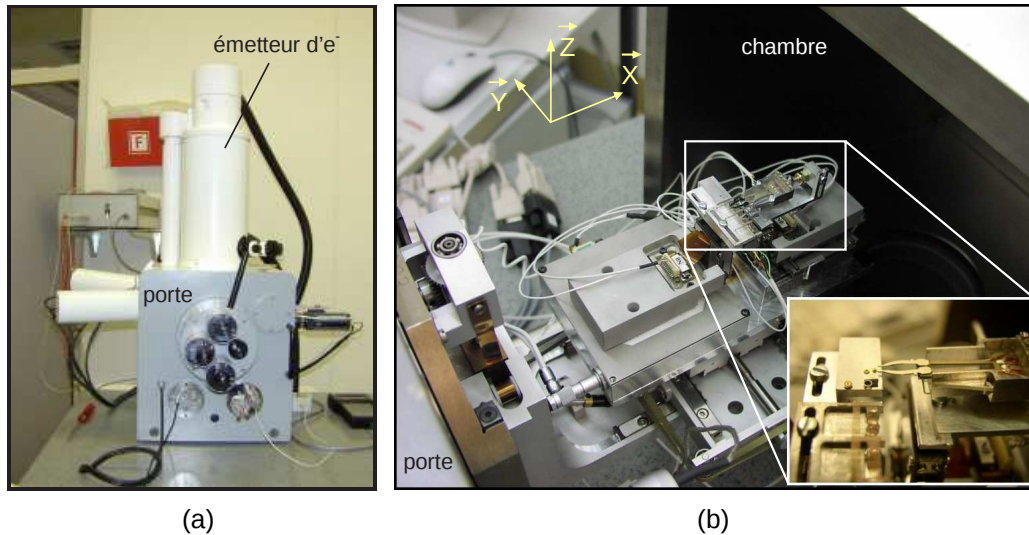


FIG. 5.2 – Système utilisé dans le cadre du projet ROBOSEM (voir section 2.3.1) pour effectuer des opérations de micromanipulation dans un MEB : (a) le MEB ; (b) la micropince est montée sur une table de micro-positionnement XYZ, le magasin et le plan de travail sont montés sur une seconde table de structure identique.

- micro-engrenages composés de pions et de pignons d’axe de $300\ \mu\text{m}$ de diamètre, voir FIG. 5.1 (c) ;
- mécanismes de montres, voir FIG. 5.1 (b) ;
- fil de $20\ \mu\text{m}$ de diamètre à insérer dans un trou percé dans une aiguille ophtalmique.

Notons que pour certaines applications de micromanipulation dans un MEB (dans le cadre du projet ROBOSEM), la micropince et le système de changement d’outils ont été montés sur des tables de micro-positionnement développées par l’EPFL¹ (voir FIG. 5.2). Deux tables de micro-positionnement identiques ont été utilisées, elles possèdent trois DDL de translation selon une structure XYZ, sont actionnées par effet stick-slip piézoélectrique et leurs courses sont de 10 mm.

5.2.1 Manipulation d’un grain d’olivine

Des biologistes s’intéressent à la réaction de certaines bactéries en présence de fer. Pour cela, ils utilisent un milieu liquide comportant ce type de bactéries. Un grain d’olivine (minéral contenant du fer) de dimensions de l’ordre de la dizaine de micromètres doit alors être saisi dans l’air pour être déposé dans le milieu liquide avec une précision d’environ $5\ \mu\text{m}$ (voir FIG. 5.3). Les outils ayant été utilisés pour manipuler le grain sont retirés du milieu liquide et l’observation du comportement des bactéries peut alors commencer.

1. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

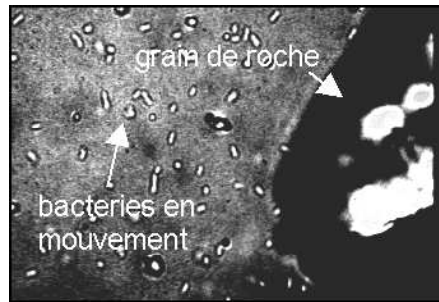


FIG. 5.3 – Bactéries en présence d'un grain de roche (olivine), (avec l'autorisation de L. Lemelle et C. Place qui travaillent sur ce thème de recherche à l'ENS de Lyon).

Les contraintes particulières de cette application sont les suivantes :

- utilisation d'outils biocompatibles, jetables, ou pouvant être décontaminés à l'issue de chaque opération ;
- précision de positionnement des grains en milieu liquide ;
- réalisation de la prise, du transport et de la dépose d'un grain malgré sa géométrie aléatoire.

Des essais d'opérations de micromanipulation de grains d'olivine de $20\text{ }\mu\text{m}$ à $50\text{ }\mu\text{m}$ ont été réalisés avec les dispositifs présentés dans ce mémoire. La condition portant sur la précision de positionnement des grains s'est avérée particulièrement contraignante, principalement en raison de l'épaisseur des outils en nickel ($180\text{ }\mu\text{m}$) source de problèmes d'adhésion et de traînée hydrodynamique. De plus, le nickel est un matériau non biocompatible. Cette problématique fait l'objet d'un projet en cours au LAB. Celui-ci a d'ores et déjà conduit à la réalisation d'une première version d'outils en silicium adaptés aux objets de dimensions inférieures à $50\text{ }\mu\text{m}$ et aux particularités de cette application (voir FIG. 3.4).

5.2.2 Assemblage d'un roulement

De nombreux micro-mécanismes sont produits industriellement et sont actuellement assemblés manuellement ou par des machines dédiées. Par exemple, de nombreux roulements, notamment pour des produits de luxe, dont le diamètre extérieur mesure moins de 2 mm , sont actuellement assemblés manuellement. Pour ce type d'industries, l'utilisation de moyens robotisés fonctionnant en mode téléopéré ou automatique et adaptés aux petites séries est intéressant.

Cette problématique a conduit à l'étude et la réalisation de l'assemblage de roulements de diamètre extérieur de $1,6\text{ mm}$ de diamètre et de billes de diamètre de $200\text{ }\mu\text{m}$. Ceux-ci sont composés de neuf pièces (bague extérieure, axe, cage, bague intérieure et cinq billes). La FIG. 5.4 présente les principales opérations d'assemblage de ce roulement. L'utilisation du système de changement d'outils a été nécessaire à plusieurs reprises permettant d'une part de disposer de différentes paires d'outils et, d'autre part, de régler la distance entre deux outils. L'assemblage de roulements de ce type est une problématique d'un projet européen actuellement soumis.

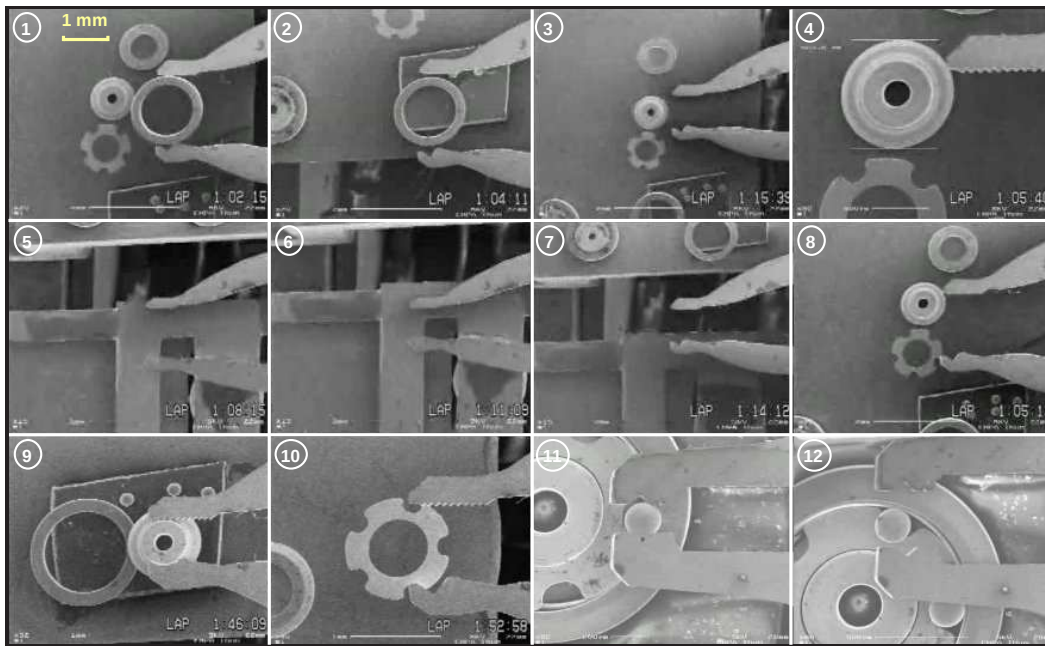


FIG. 5.4 – Assemblage d'un roulement à billes dans un MEB: séquence d'opérations élémentaires de micromanipulation : (1) prise de la bague extérieure du roulement, la distance entre les deux outils d mesure 1,6 mm et correspond au diamètre de cette bague ; (2) dépose de la bague extérieure sur le plan de travail ; (3) phase d'approche de l'axe ; (4) mesure du diamètre de l'axe, celui-ci est trop petit pour être manipulé, la distance entre les outils doit être réglée par utilisation du magasin d'outils ; (5) fixation d'un outil dans le magasin (6) réglage de la distance entre les deux outils ; (7) la même paire d'outils est toujours fixée à l'actionneur mais la distance les séparant n'est plus que de 1 mm ; (8) phase d'approche de l'axe ; (9) manipulation de l'axe ; (10) manipulation de la cage ; (10 à 11) phase de changement d'outils ; (11) manipulation d'une bille avec ces nouveaux outils ; (12) manipulation d'une seconde bille.

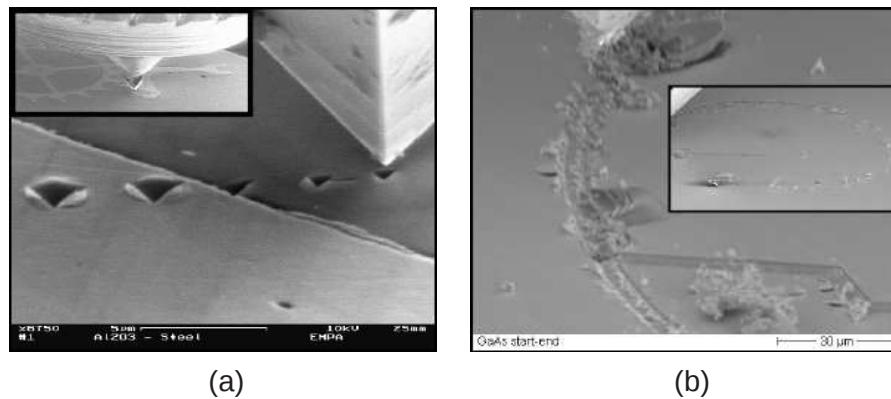


FIG. 5.5 – Essais mécaniques de nano-indentation et de nano-rayures [Maz04].

5.2.3 Manipulation d'éprouvettes de traction miniatures

La réalisation d'essais mécaniques dans la chambre d'un MEB permet de visualiser les effets d'une action mécanique sur un matériau avec une précision bien meilleure qu'avec d'autres moyens de visualisation plus conventionnels de type optique. Par exemple, le projet ROBOSEM a conduit au développement (par des partenaires du projet) de deux démonstrateurs permettant la réalisation d'essais de nano-indentation et de nano-rayures dans un MEB (voir FIG. 5.5). Cette contribution à l'étude des propriétés des matériaux a permis aux mécaniciens de valider des phénomènes supposés théoriquement mais jamais observés jusqu'alors.

Dans la même optique, des machines de traction d'éprouvettes très petites sont en cours de développement. Leur but est de permettre la visualisation de phénomènes conduisant à la rupture d'un matériau via un MEB. Après chaque essai, il est nécessaire d'ouvrir la chambre du MEB pour remplacer l'éprouvette cassée. Ainsi, l'utilisation d'un manipulateur équipé d'un système de changement d'outils à l'intérieur de la chambre du MEB permet de remplacer les morceaux d'éprouvettes cassées par une nouvelle éprouvette sans avoir à ouvrir la chambre du MEB à chaque fois. Ceci a fait l'objet d'essais (voir FIG. 5.1 (f)) et représente également des perspectives intéressantes.

5.2.4 Conclusion

Les différentes opérations de micromanipulation qui viennent d'être présentées ont mis en évidence la capacité des stations développées. La diversité des objets manipulés a également mis en évidence la flexibilité de ces stations de micromanipulation. Cependant, les essais réalisés ont également permis de constater certains besoins. Considérons par exemple l'assemblage de micro-engrenages nécessitant l'insertion de pions dans des perçages (voir FIG. 5.1 (c)). L'opération de prise de pions est souvent délicate puisque ceux-ci se positionnent souvent entre les outils de la micropince, de manière inclinée par rapport à la direction souhaitée (direction d'insertion ou direction de l'axe des perçages). L'insertion des pions dans leur perçage respec-

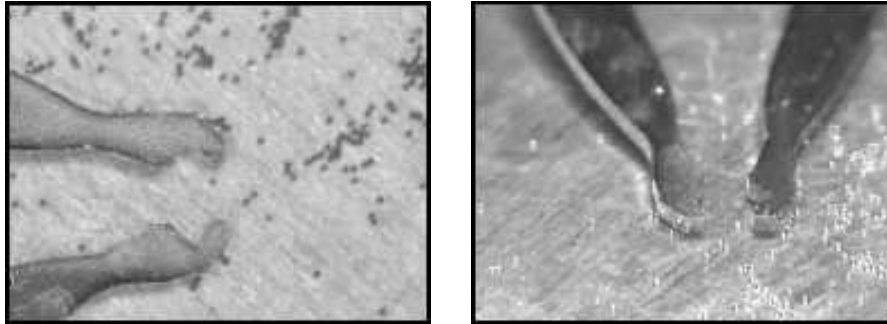


FIG. 5.6 – Billes de $50\ \mu\text{m}$ de diamètre disposées autour d'une paire d'outils en nickel (épaisseur de $180\ \mu\text{m}$).

tif est alors difficile. Ce phénomène d'inclinaison est probablement dû au manque de maîtrise des forces de serrage et rend la phase d'insertion particulièrement délicate. D'un point de vue général, les problèmes les plus importants que nous avons recensé sont les suivants :

- le contrôle des efforts en jeu pendant les phases de micromanipulation permettrait de diminuer les risques de rupture des éléments fragiles (objets manipulés, actionneur et outils de la micropince) et de réaliser certaines opérations nécessitant une grande précision ;
- l'utilisation d'un, voire deux, axe(s) rotatif(s) pour assembler les roulements permettrait d'améliorer le positionnement des billes ;
- l'utilisation d'une gamme d'outils plus variée, notamment mieux adaptée à la manipulation d'objets de dimensions inférieures à $50\ \mu\text{m}$ (voir FIG. 5.6).

5.3 Conception et réalisation du support compliant

Certaines équipes de recherche ont développé des systèmes compliant pour limiter les efforts en jeu entre éléments fragiles ou pour améliorer la précision de positionnement lors d'opérations d'assemblage [Lee03][Pop02b]. Ces systèmes peuvent se décliner de différentes manières. La solution la plus répandue consiste à réaliser des micropinces dont une partie est souple [Yan01][Lee03][Dec04a]. Popa et al. s'intéressent, quant à eux, à la fixation de plusieurs fibres optiques sur un support à l'aide d'une colle à réticulation lente (pour limiter les contraintes résiduelles). Ils ont alors développé un système compliant permettant le maintien des fibres pendant cette phase de fixation [Pop02b]. Pour finir, il est également intéressant de fixer le plan de travail (surface où sont déposés les objets à manipuler) sur une structure compliant en utilisant, par exemple, des principes de déformations mécaniques ou de lévitation [Cho01].

Compte tenu des problèmes constatés lors de phases de micromanipulation (section 5.2.4), l'utilisation d'un système compliant semble être une alternative intéressante pour contrôler les efforts en jeu. Dans ce but, nous avons retenu le développement d'un support compliant qui consiste à suspendre le plan de travail à une structure souple. Ce système a pour but d'éliminer

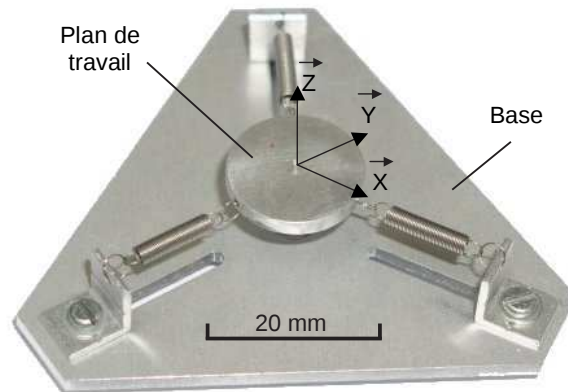


FIG. 5.7 – Support compliant composé d'un plan de travail sur lequel sont disposés les objets à manipuler, suspendu à trois ressorts.

tout risque de rupture d'éléments fragiles (objets à manipuler, actionneur et outils de la micro-pince), tout problème pouvant engendrer une perte de précision des axes du manipulateur et d'améliorer la faisabilité de certaines opérations de micromanipulation.

5.3.1 Structure du support compliant

Le support compliant que nous avons réalisé consiste à suspendre le plan de travail à trois ressorts identiques, ce qui permet de garantir simultanément souplesse et stabilité (FIG. 5.7). Les objets à manipuler étant disposés sur celui-ci, leur manipulation engendre des forces sur le plan de travail, modifiant sa position d'équilibre. Ces mouvements offrent des informations visuelles précieuses concernant les efforts en jeu pendant les phases de micromanipulation. Cela permet, par exemple, de déterminer précisément l'instant où un contact est établi avec le support compliant. La compliance du support conçu est ici passive. Sa structure fait qu'il est indépendant des autres éléments des stations de micromanipulation, il peut donc être facilement inséré ou retiré selon les besoins.

5.3.2 Position d'équilibre du plan de travail

Lorsque le support compliant est au repos, le plan de travail subit l'action des trois ressorts ainsi que les effets de la pesanteur (FIG. 5.8), il est alors possible de calculer sa position d'équilibre. Celle-ci dépend de la raideur des ressorts, de leur longueur ainsi que du poids du plan de travail. La masse des ressorts a été négligée. Le réglage du point de fixation des ressorts (point A) correspond au paramètre a . Nous supposons que l'action de chaque ressort sur le plan de travail est identique, celui-ci subit donc une translation selon l'axe de la pesanteur (Z). L'application du principe fondamental de la statique au plan de travail en projection sur l'axe Z donne l'équation suivante :

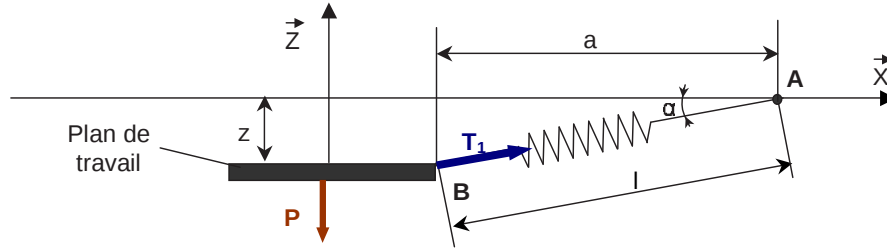


FIG. 5.8 – Support compliant au repos en vue latérale.

$$P = 3 \cdot T_1 \cdot \sin \alpha \quad (5.1)$$

Où P est le poids du plan de travail ($P = 2,5$ mN pour un plan de travail de diamètre 15 mm réalisé en aluminium). $T_1 = k \cdot (l - l_{init})$ est la tension de chaque ressort, k et l_{init} étant respectivement la raideur et la longueur au repos de chaque ressort. La géométrie du support compliant nous permet d'exprimer la valeur de $\sin \alpha$ selon la relation suivante :

$$\sin \alpha = \frac{z}{l} = \frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (5.2)$$

Les relations (5.1) et (5.2) permettent d'écrire l'expression traduisant l'équilibre du plan de travail :

$$P = 3 \cdot k \cdot \left(1 - \frac{l_{init}}{\sqrt{a^2 + z^2}}\right) \cdot z \quad (5.3)$$

Cette équation peut être résolue numériquement pour déterminer l'altitude du plan de travail en fonction des paramètres de poids, de raideur, de longueur initiale des ressorts et du réglage a .

5.3.3 Phase de conception : maximisation de la sensibilité du support compliant

Pour réaliser le support compliant, l'influence des paramètres suivants doit être étudiée :

- la longueur et la raideur des ressorts (l_{init} et k) ;
- le réglage de la position des points de fixation des ressorts (a) ;
- le poids du plan de travail (P).

Ces paramètres influent directement sur la sensibilité s du support compliant, la sensibilité étant ici définie comme le rapport entre l'allongement des ressorts et la force exercée sur le plan de travail :

$$s = \frac{l - l_{init}}{P} \quad (5.4)$$

Pour déterminer ces paramètres, nous allons maximiser la sensibilité, donc la souplesse du support compliant. Pour cela, en utilisant l'équation (5.3) et en notant que $z^2 = l^2 - a^2$, nous pouvons écrire :

$$P = 3 \cdot k \cdot (l - l_{init}) \cdot \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{l} \quad (5.5)$$

Maximiser s revient à minimiser le rapport $\frac{dP}{dl}$. Ce rapport est déterminé par l'expression suivante :

$$\frac{dP}{dl} = 3 \cdot k \cdot \frac{l_{init}}{l^2} \cdot \sqrt{l^2 - a^2} + 3 \cdot k \cdot \frac{l - l_{init}}{\sqrt{l^2 - a^2}} \quad \text{où } l \text{ vérifie l'équation (5.5)} \quad (5.6)$$

Notons que les spires des ressorts de traction sont jointives, ainsi, à proximité de la position d'équilibre, une force importante doit être appliquée au plan de travail pour engendrer un déplacement suffisant au décollement des spires. Pour cette raison, nous utiliserons des ressorts de compression dont les spires ne sont pas jointives. Compte tenu des caractéristiques dimensionnelles de la station de micromanipulation dans laquelle le support compliant sera inséré, la longueur des ressorts au repos ne peut excéder 15 mm. Les ressorts que nous avons utilisés mesurent 12,2 mm au repos et ont une raideur de 54 mN/mm.

Pour déterminer le meilleur compromis pour les paramètres a et P , nous avons tracé la caractéristique de sensibilité en fonction de ces deux paramètres (FIG. 5.9 et 5.10). La meilleure sensibilité est obtenue pour une longueur a la plus proche possible de 17,5 mm (longueur d'un ressort au repos et de ses crochets de fixation) et pour un plan de travail le plus léger possible. Les courbes présentées FIG. 5.10 permettent de constater l'influence des paramètres a et P sur la sensibilité. Le réglage de a étant délicat, nous constatons qu'il est préférable de régler ce paramètre de manière à ne pas dépasser 17,5 mm. Pour finir, comme nous avons pu réaliser un plan de travail où P vaut 2,5 mN, la meilleure sensibilité théorique que nous obtenons à proximité de la position d'équilibre est :

$$s = 0,1 \text{ mm/mN} \quad (5.7)$$

Dans cette configuration, une force de 10 mN appliquée au plan de travail selon sa normale, engendre une translation verticale de ce dernier de 1,5 mm.

5.3.4 Exemple d'utilisation du support compliant

Le support compliant a été inséré dans les différentes stations de micromanipulation et son utilité a été largement confirmée. Sa souplesse permet de limiter les efforts exercés par la micropince sur le plan de travail. De même, chaque contact sur le plan de travail engendre un

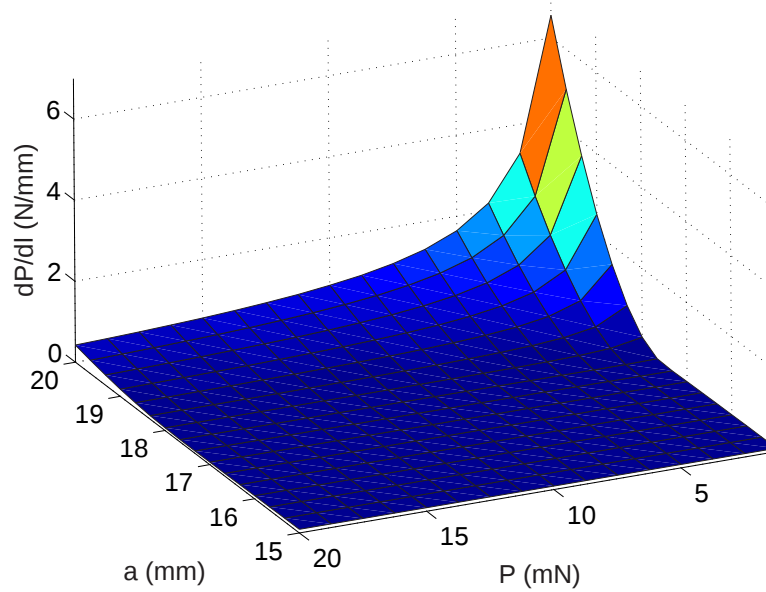


FIG. 5.9 – Influence des paramètres a et P sur la sensibilité du support compliant.

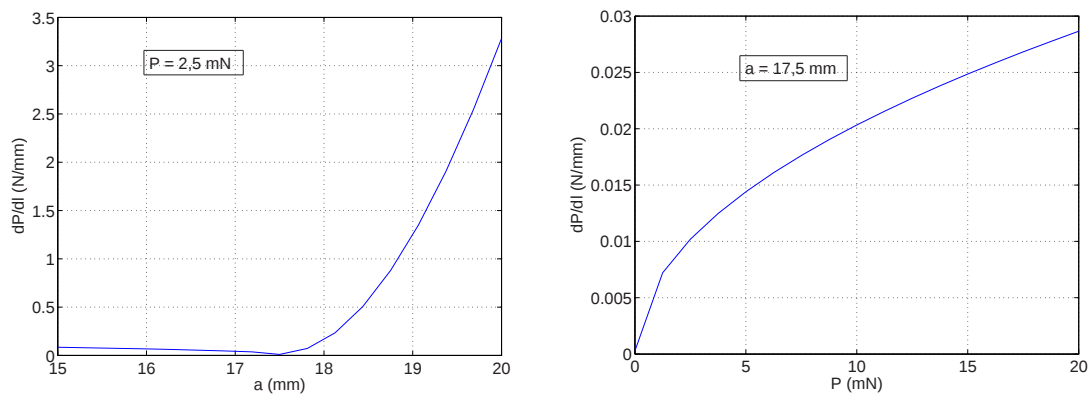


FIG. 5.10 – Influence du paramètre a sur la sensibilité pour $P = 2,5$ mN et influence du paramètre P sur cette même sensibilité pour $a = 17,5$ mm.

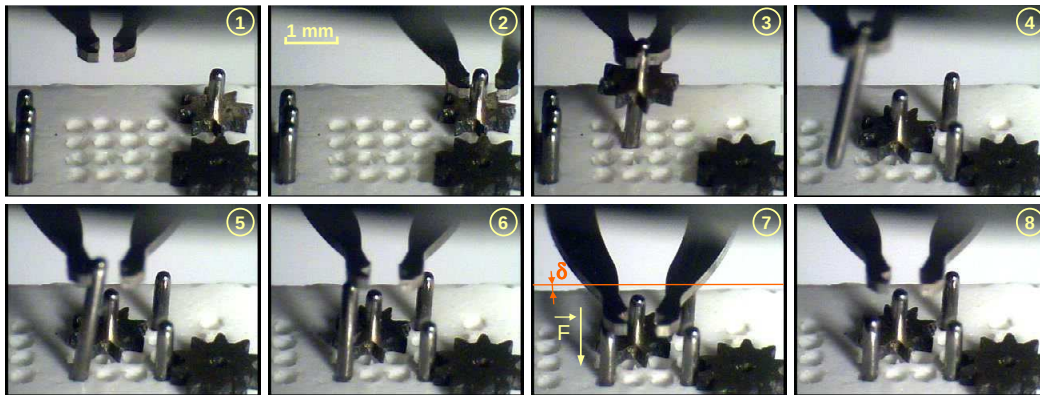


FIG. 5.11 – Séquence de micro-assemblage d'un micro-mécanisme. Le diamètre des pions est de $300\ \mu\text{m}$. Le support compliant est utilisé. (1) situation initiale ; (2) phase d'approche ; (3) le premier pignon est saisi, positionné puis relâché ; (4) deux pions ont été manipulés, le troisième est saisi mais celui-ci se positionne de travers ; (5) ce positionnement empêche l'insertion, le pion est alors relâché, il n'est pas inséré ; (6) pour insérer ce pion, la micropince est utilisée ; (7) elle permet d'appliquer une force dans la direction de l'axe de ce pion, le support compliant se déforme de δ sous l'action de la force appliquée ; (8) une fois la phase d'insertion réussie, la force exercée par la micropince est relâchée.

déplacement amplifié par le système de vision, le rendant particulièrement perceptible. Le support développé permet également de compenser certaines erreurs de positionnement (de l'objet entre les doigts de la pince ou de l'objet dans le composant final).

Par exemple, l'opération d'insertion de pions dans des perçages, qui avait été décrite comme délicate (section 5.2.4), est maintenant possible grâce à ce support compliant (voir FIG. 5.11). La sensibilité du support utilisé pour cette application est de $0,031\ \text{mm/mN}$. La phase de prise engendre toujours une inclinaison des pions par rapport à la direction d'insertion. Malgré cette inclinaison, l'extrémité du pion est insérée dans le perçage correspondant (FIG. 5.11 (5)), le pion est ensuite relâché (FIG. 5.11 (6)) puis la micropince est utilisée pour exercer une force axiale sur le pion permettant son insertion (FIG. 5.11 (7)). Le support compliant permet alors de contrôler la force exercée pendant cette phase d'insertion.

Malgré ces avantages, le support compliant engendre des contraintes parfois néfastes à la réalisation de certaines opérations. Par exemple, son utilisation rend l'assemblage de roulements plus difficile. En effet, la stabilité du mécanisme partiellement assemblé est précaire. Par ailleurs, l'amortissement du support est faible, ce qui occasionne des vibrations néfastes pouvant engendrer le désassemblage du roulement. Ainsi, le support compliant est un apport substantiel pour certaines opérations mais peut représenter un obstacle à l'assemblage de certains composants, son utilisation doit donc être choisie et non-systématique.

5.4 Perspectives d'utilisation du support compliant comme capteur d'effort

Le contrôle et la mesure des efforts en jeu pendant les phases de micromanipulation est nécessaire pour plusieurs raisons. D'abord, comme nous l'avons vu dans la section 5.3, il est essentiel de préserver les différents éléments constitutifs des stations de micromanipulation (fragilité éventuelle des actionneurs et des organes terminaux, précision des axes de micro-positionnement). Ensuite, la mesure des forces de manipulation constitue une étape importante surtout dans une optique d'automatisation. Plusieurs solutions sont envisagées pour mesurer les forces de manipulation :

- utiliser un capteur externe, monté sur l'actionneur ou sur les outils de la micropince. Cette solution a été étudiée au LAB à partir de capteurs réalisés à l'ITE² (FIG. 5.12) ;
- utiliser l'effet piézoélectrique direct de l'actionneur [Bre98] [Ber03] mais la céramique ne peut pas être utilisée simultanément comme actionneur et comme capteur ;
- utiliser un capteur qui se situe sur le plan de travail.

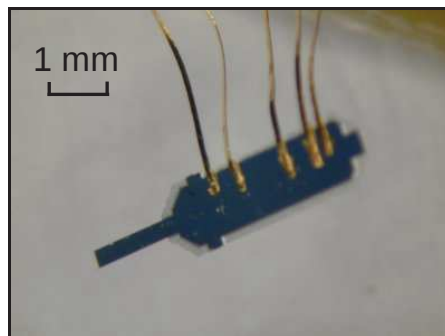


FIG. 5.12 – Capteur d'effort fabriqué par technologies silicium. Celui-ci a été monté au LAB sur une micropince [Per04].

L'état de l'art présenté au chapitre 1 nous a permis de mettre en évidence que la réalisation de capteurs d'effort utiles aux systèmes de micromanipulation demeure délicate (section 1.3.4). D'une manière générale, il n'existe pas de capteur d'effort à proprement parler puisque la force est toujours mesurée indirectement via la mesure d'un déplacement ou d'une déformation [Asc99]. Pour ces raisons et compte tenu des autres travaux en cours au LAB sur cette problématique, l'utilisation de la structure du support compliant présenté dans la section précédente comme capteur d'effort nous a parue intéressante.

Le support compliant a une structure parallèle de la famille des plate-formes de Stewart. La plate-forme de Stewart est un mécanisme qui présente de nombreux avantages en termes de précision, de résolution et de rigidité par rapport aux structures sérielles [Das00][Ste65]. En effet, les erreurs ne sont pas cumulatives et le rapport résistance/poids est très élevé comparé aux

2. Institute of Electron Technology, Varsovie, Pologne.

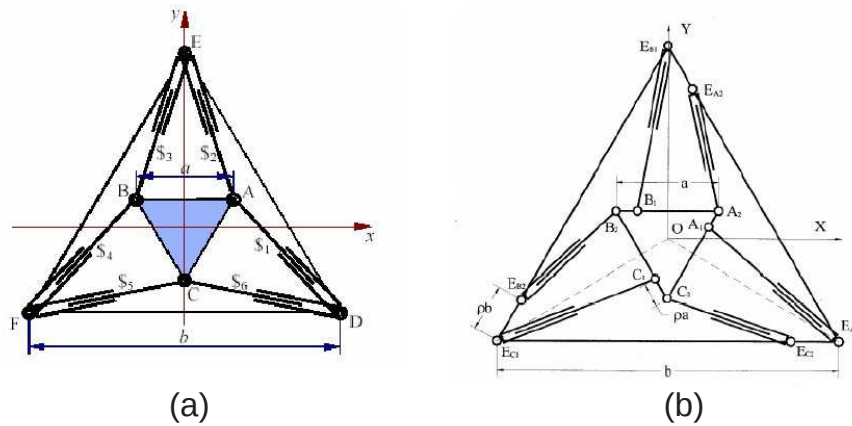


FIG. 5.13 – Exemples de structures parallèles de la famille des plate-formes de Stewart.

structures conventionnelles des manipulateurs à chaîne ouverte.

5.4.1 Utilisation de structures parallèles de type plate-forme de Stewart comme capteur d'effort

Des recherches bibliographiques montrent que des plate-formes parallèles de type Stewart ont été utilisées comme capteur d'effort. L'allongement des bras (liens permettant de suspendre le plan de travail) est mesuré, la force exercée sur la plate-forme est alors déterminée. Si les premiers travaux dans ce sens semblent remonter à Gaillet et Reboulet [Gai83], les travaux conduisant aux résultats les plus intéressants ont été effectués au début des années 90 [Ngu91a] et se poursuivent encore actuellement [Zan04][Dai00][Cho99a]. Ces plate-formes se distinguent de notre support compliant dans le sens où elles ne sont pas composées de trois ressorts mais de six, soit selon une structure de type 3-3 (FIG. 5.13 (a)) soit selon une structure spéciale 6-6 due à Griffis (FIG. 5.13 (b)).

La structure proposée par Nguyen et al. est celle qui semble la plus proche de celle de notre support compliant [Ngu91a]. Une structure de type plate-forme de Stewart à six bras équipés de capteurs mesurant leur allongement est réalisée. Le plan de travail possède six DDL comme celui du support compliant. La structure présentée fait état de compliance passive et sert de capteur de force et de couple. Pour déterminer la force et le couple exercés sur le plan de travail à partir des mesures d'allongements des bras, ces auteurs utilisent une modélisation de la position du centre de gravité du plan de travail et des trois angles nautiques. Les mesures permettent de déterminer la position du plan de travail (modèle géométrique direct), puis, partant de cette position, les forces exercées par chaque bras sur le plan de travail sont calculées. Pour finir, le principe fondamental de la statique est utilisé conduisant aux composantes de la force et du couple extérieur recherchés.

Les auteurs expliquent qu'il n'existe pas de solution unique permettant d'obtenir le modèle géométrique direct (ce qui est un problème général des structures parallèles). En effet, le modèle géométrique inverse (détermination de la longueur de chaque bras connaissant la position du plan de travail) est un système de six équations couplées fortement non-linéaires à six inconnues. De ce fait, une méthode numérique est présentée pour résoudre ce système. Le détail de cette méthode est présentée dans [Ngu91b] et celle-ci semble donner de bons résultats.

D'un point de vue général, ces méthodes numériques peuvent s'appliquer à tout modèle inverse de la forme :

$$\mathbf{L} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) \quad (5.8)$$

Où $\mathbf{L}$ est le vecteur des longueurs des six bras et $\mathbf{X}$ le vecteur des six coordonnées caractérisant la position du plan de travail dans l'espace pour en déduire un modèle direct. La jacobienne $\mathbf{J}$ est alors utilisée et définie telle que :

$$d\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{X}} \cdot d\mathbf{X} = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{X} \quad (5.9)$$

Une méthode itérative rapide, comme par exemple la méthode de Newton du premier ordre, peut alors être utilisée pour inverser le système :

$$\mathbf{L}_{k+1} - \mathbf{L}_k = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) \quad (5.10)$$

Soit :

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \mathbf{J}^{-1} \cdot (\mathbf{L}_{k+1} - \mathbf{L}_k) \quad (5.11)$$

Cette méthode n'est utilisable que s'il est possible de calculer l'inverse de la jacobienne. Contrairement aux structures à six bras proposées dans la littérature, notre support compliant ne permet pas cette inversion. En effet, sa structure donne trois mesures alors qu'il faut déterminer six paramètres pour caractériser la position du plan de travail, la jacobienne n'est donc pas inversible.

Dans certains cas, il est possible d'utiliser non pas une inverse mais une pseudo-inverse comme expliqué dans [Mer97], le but étant de privilégier la position la plus stable du plan de travail. Ceci peut s'avérer intéressant dans le cadre du support compliant, nous nous y intéresserons donc. Avant cela, l'instrumentation du support compliant sera approfondie puisqu'elle représente une problématique complexe d'un point de vue technique, nécessitant notamment la mesure de l'allongement de ressorts particulièrement souples et sur une plage inférieure à 500 μm (effort de 25 mN appliqué sur le plan de travail).

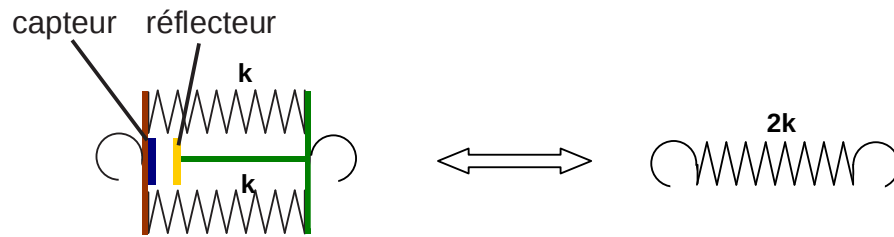


FIG. 5.14 – Détails des systèmes à ressorts équipant le support compliant. Ceux-ci sont composés de deux ressorts, d'un capteur (émetteur-récepteur infra-rouge) et d'un réflecteur utilisés pour mesurer l'allongement des ressorts. Trois de ces systèmes permettent de suspendre le plan de travail.

5.4.2 Instrumentation du support compliant

La majorité de l'instrumentation des structures parallèles présentées dans la littérature est placée à l'extrémité du manipulateur, entre l'effecteur (généralement une pince) et le système permettant de générer des déplacements. La structure que nous avons choisie, à l'inverse, incorpore les capteurs au niveau du plan de travail. Cela permet de simplifier le montage, l'accessibilité et les connexions. Les capteurs utilisés pour mesurer l'allongement des ressorts doivent avoir des caractéristiques très précises, à savoir :

- un encombrement très faible de l'ordre de quelques millimètres cube ;
- une masse la plus faible possible ;
- une plage de mesure inférieure à 500 μm ;
- une résolution la plus élevée possible, de préférence inférieure au micromètre.

Compte tenu de ces caractéristiques, nous avons utilisé un capteur infra-rouge, dont l'émetteur et le récepteur se trouvent dans le même boîtier³, un réflecteur étant nécessaire. Ce capteur ne possède que trois broches, ce qui limite l'influence des câbles. Son encombrement ($7 \times 3 \times 1,9 \text{ mm}^3$) est compatible avec les dimensions du support compliant.

Pour implanter le capteur choisi, nous avons développé des systèmes composés de deux ressorts de compression⁴, d'un capteur et d'un réflecteur (FIG. 5.14). Chaque ressort du support compliant présent dans la section précédente est remplacé par ce type de système à ressort (FIG. 5.15). L'utilisation de deux ressorts par système permet d'optimiser le parallélisme entre le capteur et le réflecteur qui lui est associé. Chaque ressort utilisé possède une raideur de 27 mN/mm, la raideur globale d'un système à ressort est alors de 54 mN/mm. La FIG. 5.15 illustre l'intégration des systèmes à ressort dans le support compliant.

La course du capteur doit être de quelques centaines de microns. Or, nous souhaitons utiliser la partie la plus pentue de la caractéristique du capteur (FIG. 5.16 (a)), afin d'obtenir la meilleure résolution possible. Nous nous intéresserons donc préférentiellement à la zone où la

3. capteur de référence SFH 900 (SIEMENS), voir annexe F.

4. référence des ressorts utilisés : VD-2004 (FERROFLEX).

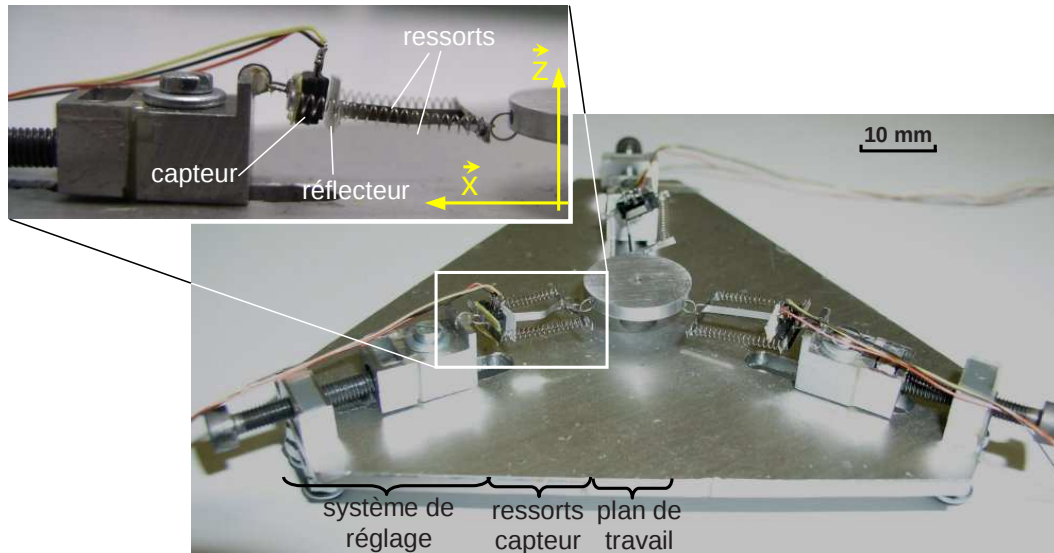


FIG. 5.15 – Support compliant équipé d'un plan de travail suspendu par trois systèmes à ressorts. Chacun de ces systèmes est équipé d'un capteur permettant de mesurer l'allongement des ressorts lorsque le plan de travail se déplace.

distance capteur-réflecteur est comprise entre 0 et 1 mm.

Un montage électronique approprié a été réalisé afin d'utiliser au mieux cette zone du capteur (voir annexe F). Ce montage permet d'obtenir une tension comprise entre -10,6 et +10,6 V (tension acceptable par les cartes d'acquisition utilisées) dont l'offset et le gain sont réglables. Grâce à ce montage, la caractéristique du capteur est linéaire sur une plage de déplacements de l'ordre de 200 μm (FIG. 5.16 (b)). Ainsi, comme le support compliant utilise trois capteurs, les distances capteurs-réflecteurs sont réglées mécaniquement de manière grossière, puis la modification de chaque offset permet d'obtenir finalement un réglage identique pour chaque capteur.

Pour vérifier la possibilité de mesurer l'allongement des ressorts du support compliant, nous avons monté les capteurs précédemment décrits. Le parallélisme capteur-réflecteur est influencé par de nombreux éléments tels que les câbles d'alimentation ou la rigidité même de la structure supportant chaque capteur. Ainsi, nous avons considéré le déplacement vertical du plan de travail. Celui-ci correspond à l'application d'une force normale à celui-ci et située en son centre. Une comparaison modèle-mesure peut ainsi aisément être conduite.

D'un point de vue théorique, nous avons considéré l'évolution de l'allongement des ressorts (Δl) engendré par une translation verticale du plan de travail (Δz) comme représenté FIG. 5.17. D'après la géométrie du système, nous pouvons écrire les égalités suivantes :

$$l'^2 = (z + \Delta z)^2 + a^2 = (l + \Delta l)^2 \quad (5.12)$$

5.4. PERSPECTIVES D'UTILISATION DU SUPPORT COMPLIANT COMME CAPTEUR D'EFFORT163

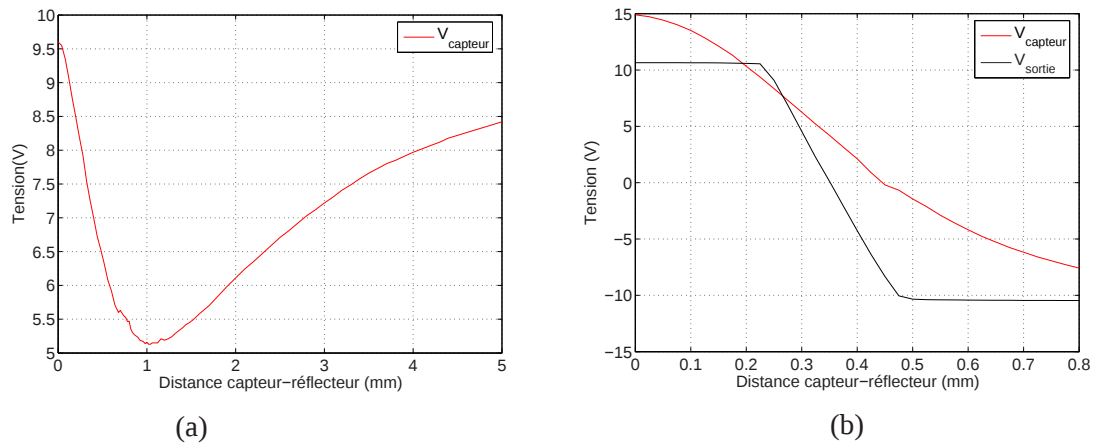


FIG. 5.16 – Comparaison de la caractéristique brute du capteur SFH 900 (V_{capteur}) avec celle délivrée par le montage électronique (V_{sortie}). Celle-ci possède un gain et un offset réglables. De plus elle est limitée à $\pm 10,6$ V pour être compatible avec les valeurs acceptables par les cartes d'entrées-sorties du PC.

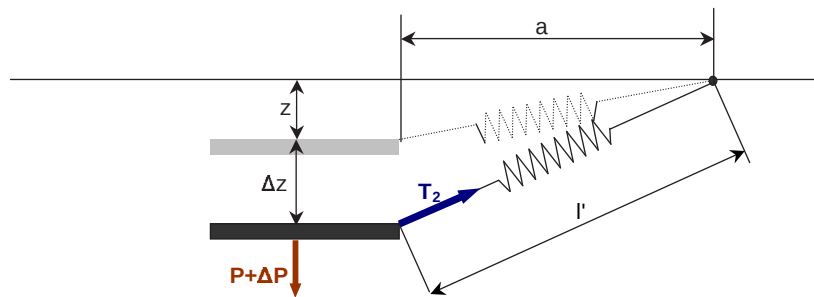


FIG. 5.17 – Mouvement du plan de travail lorsque celui-ci subit une force verticale appliquée en son centre.

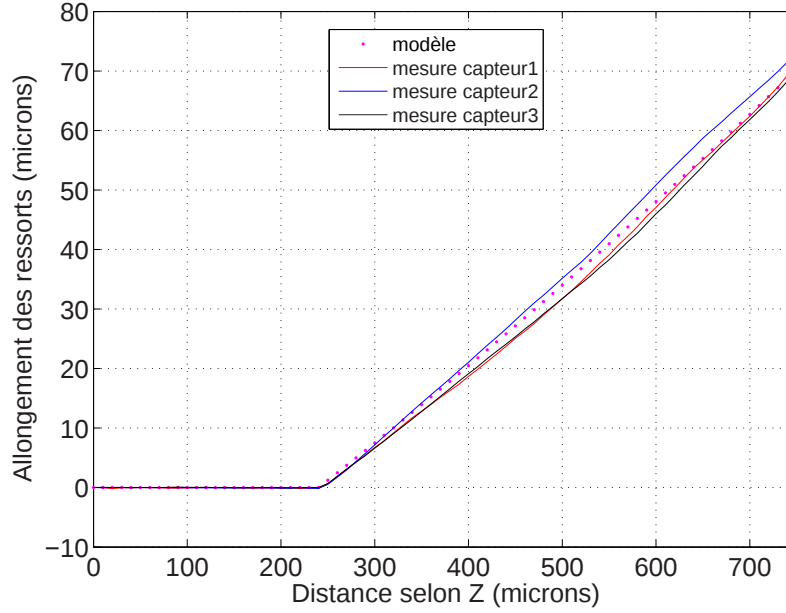


FIG. 5.18 – Comparaison modèle-mesures lorsque le plan de travail subit un déplacement vertical.

où l et z caractérisent la position du plan de travail au repos tels que $l = \sqrt{a^2 + z^2}$ et z solution de l'équation 5.3. Le déplacement désiré est alors décrit par l'égalité suivante :

$$\Delta l = \sqrt{(z + \Delta z)^2 + a^2} - \sqrt{a^2 + z^2} \quad (5.13)$$

Pour confronter cette égalité à l'expérimentation, nous avons utilisé un système permettant d'imposer une translation selon l'axe Z du plan de travail. Nous avons alors mesuré la tension délivrée par chaque capteur, puis, grâce à la caractéristique (tension-distance capteur-rélecteur) de chaque capteur, nous avons pu en déduire l'allongement de chaque ressort. La FIG. 5.18 permet de comparer les résultats expérimentaux à ceux théoriques issus de la relation (5.13). La résolution de mesure obtenue est de l'ordre de $3,4 \mu\text{m}$ (ce qui correspond à une résolution de $100 \mu\text{N}$ pour la composante de force selon Z) validant la possibilité de mesurer l'allongement des ressorts du support compliant.

5.4.3 Analyse du capteur réalisé

Cette section se propose d'étudier la possibilité de réaliser un système de mesure d'effort avec le support compliant, d'en voir les limites pour, éventuellement, pouvoir proposer des solutions plus performantes.

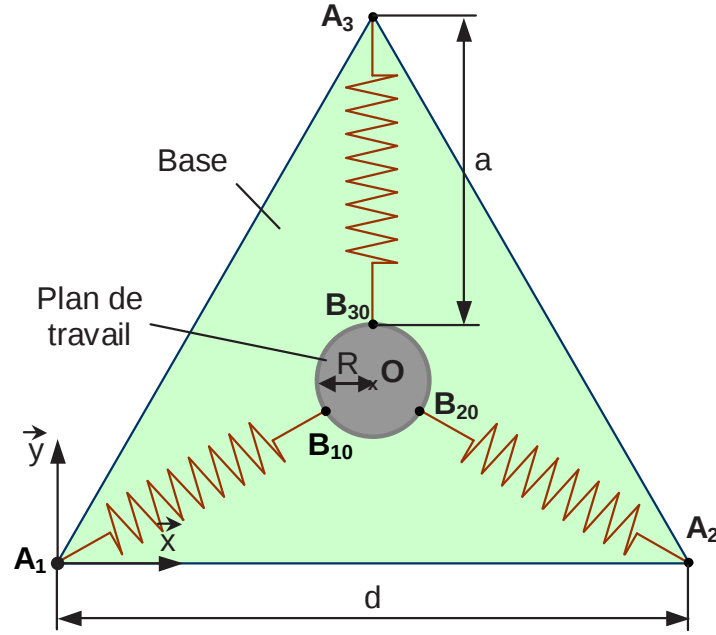


FIG. 5.19 – Schéma du support compliant et notations.

Equilibre statique du plan de travail

Les coordonnées articulaires sont les longueurs l_i des trois ressorts. Nous considérerons comme point de départ la configuration de la FIG. 5.19. Les points $A_i, i \in [1,3]$ sont les points de fixation des ressorts à la base :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ et } A_3 = \begin{pmatrix} \frac{d}{2} \\ \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Les points $B_{i0}, i \in [1,3]$ sont les points de fixation des ressorts au plan de travail lorsque celui-ci est au repos, c'est-à-dire ne subissant que l'action de son poids :

$$B_{10} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3} \cdot a}{2} \\ \frac{a}{2} \\ -z \end{pmatrix}, B_{20} = \begin{pmatrix} d - \frac{\sqrt{3} \cdot a}{2} \\ \frac{a}{2} \\ -z \end{pmatrix}, B_{30} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2} - a \\ -z \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

La position d'équilibre du plan de travail est connue et définie par les points B_{i0} . Celui-ci quitte sa position d'équilibre lorsqu'il subit l'action d'une force extérieure $\vec{F}$ appliquée en un point P . La nouvelle position du plan de travail est alors définie par les points $B_i, i \in [1,3]$ tels que :

$$B_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}, \text{ avec } i \in [1,3] \quad (5.16)$$

Par ailleurs, le plan de travail subit également l'action de rappel des trois ressorts $\vec{F}_i$ et les effets de la pesanteur $\vec{P}$. L'application du principe fondamental de la statique conduit à l'obtention de deux égalités vectorielles. La première concerne les forces :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0} \quad (5.17)$$

La seconde concerne les moments, la notation $\overrightarrow{M_{A_1}(\vec{F}_1)}$ sera utilisée pour définir le moment au point A_1 de la force $\vec{F}_1$:

$$\overrightarrow{M_{A_1}(\vec{F}_1)} + \overrightarrow{M_{A_1}(\vec{F}_2)} + \overrightarrow{M_{A_1}(\vec{F}_3)} + \overrightarrow{M_{A_1}(\vec{P})} + \overrightarrow{M_{A_1}(\vec{F})} = \vec{0} \quad (5.18)$$

L'équation (5.17) permet alors de déterminer les composantes de la force $\vec{F}$ selon les égalités suivantes :

$$\boxed{\vec{F} = -\vec{F}_1 - \vec{F}_2 - \vec{F}_3 - \vec{P}} \quad \text{avec} \quad \vec{F}_i = k \cdot (l_i - l_{init}) \cdot \frac{\overrightarrow{A_i B_i}}{\|A_i B_i\|} \quad (5.19)$$

La détermination des forces $\vec{F}_i$ passe par la détermination des coordonnées des points B_i . Pour ce faire, la méthode présentée section 5.4.1 va être appliquée au support compliant.

Résolution du modèle géométrique direct par pseudo-inverse de jacobienne

Pour déterminer la position des points B_i à partir des mesures de longueur des ressorts l_i , six équations peuvent être déterminées. Tout d'abord la longueur des ressorts est connue et peut être utilisée pour déterminer les trois relations suivantes :

$$\begin{cases} \|\overrightarrow{A_1 B_1}\|^2 = l_1^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \|\overrightarrow{A_2 B_2}\|^2 = l_2^2 = (x_2 - d)^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \|\overrightarrow{A_3 B_3}\|^2 = l_3^2 = (x_3 - \frac{d}{2})^2 + (y_3 - \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2})^2 + z_3^2 \end{cases} \quad (5.20)$$

De même, lorsque le plan de travail se déplace, la distance entre les points B_i reste constante ce qui permet de déterminer les trois équations de contraintes suivantes :

$$\begin{cases} \left\| \overrightarrow{B_1 B_2} \right\|^2 = 3 \cdot R^2 = (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 \\ \left\| \overrightarrow{B_2 B_3} \right\|^2 = 3 \cdot R^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \\ \left\| \overrightarrow{B_3 B_1} \right\|^2 = 3 \cdot R^2 = (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2 \end{cases} \quad (5.21)$$

où R représente le rayon du plan de travail (FIG. 5.19). Les relations géométriques (5.20) et de contraintes (5.21) donnent un système de six équations à neuf inconnues (les x_i , y_i et z_i , $i \in \{1,3\}$). Celui-ci peut s'écrire sous la forme $\mathbf{L} = \mathbf{f}(\mathbf{X})$, où les vecteurs de données $\mathbf{L}$, d'inconnues $\mathbf{X}$ et de fonctions vectorielles $\mathbf{f}$ sont définis par :

$$\begin{cases} \mathbf{L} = (l_1^2 \ l_2^2 \ l_3^2 \ 0 \ 0 \ 0)^T \\ \mathbf{X} = (x_1 \ y_1 \ z_1 \ x_2 \ y_2 \ z_2 \ x_3 \ y_3 \ z_3)^T \\ \mathbf{f} = (f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6)^T \end{cases} \quad (5.22)$$

Inverser ce système pour déterminer les inconnues $\mathbf{X}$ n'est pas possible exactement puisqu'il correspond à un problème de six équations à neuf inconnues (trois équations de positions (5.20) et trois équations de contraintes (5.21)). Un autre choix de variables (position du centre de gravité et angles d'Euler par exemple) aurait conduit à un système de trois équations à six inconnues qui ne peut pas plus se résoudre exactement. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la pseudo-inverse de la jacobienne $\mathbf{J}$ définie telle que :

$$d\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{X}} \cdot d\mathbf{X} = \mathbf{J}(\mathbf{X}) \cdot d\mathbf{X} \quad (5.23)$$

En discrétisant cette expression avec k comme pas d'échantillonnage, on obtient l'expression de récurrence suivante :

$$\mathbf{L}_{k+1} - \mathbf{L}_k = \mathbf{J} \cdot (\mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{X}_k) \quad (5.24)$$

Le vecteur des solutions $\mathbf{X}_{k+1}$ peut alors être calculé par itérations successives à partir du vecteur caractérisant la position du plan de travail au repos $\mathbf{X}_0$ et de la pseudo-inverse de la jacobienne $\mathbf{J}^+$ selon l'expression suivante :

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \mathbf{J}^+(\mathbf{X}_k) \cdot (\mathbf{L}_{k+1} - \mathbf{L}_k) \quad (5.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} \mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T \cdot (\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^T)^{-1} \\ \mathbf{X}_0 = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot a}{2} \quad \frac{a}{2} \quad -z \quad d - \frac{\sqrt{3} \cdot a}{2} \quad \frac{a}{2} \quad -z \quad \frac{d}{2} \quad \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2} - a \quad -z \right)^T \end{cases} \quad (5.26)$$

Tous calculs faits, $\mathbf{J}$ s'écrit :

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{x_1}{l_1} & \frac{y_1}{l_1} & \frac{z_1}{l_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x_2-d/2}{l_2} & \frac{y_2}{l_2} & \frac{z_2}{l_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{x_3-d/2}{l_3} & \frac{y_3-\sqrt{3}\cdot d/2}{l_3} & \frac{z_3}{l_3} \\ 2\cdot(x_1-x_2) & 2\cdot(y_1-y_2) & 2\cdot(z_1-z_2) & 2\cdot(x_2-x_1) & 2\cdot(y_2-y_1) & 2\cdot(z_2-z_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\cdot(x_2-x_3) & 2\cdot(y_2-y_3) & 2\cdot(z_2-z_3) & 2\cdot(x_3-x_2) & 2\cdot(y_3-y_2) & 2\cdot(z_3-z_2) \\ 2\cdot(x_1-x_3) & 2\cdot(y_1-y_3) & 2\cdot(z_1-z_3) & 0 & 0 & 0 & 2\cdot(x_3-x_1) & 2\cdot(y_3-y_1) & 2\cdot(z_3-z_1) \end{pmatrix} \quad (5.27)$$

En connaissant les coordonnées des points B_i et en utilisant les équations (5.19), il est possible de déterminer les forces exercées par chaque ressort sur le plan de travail et donc la force $\vec{F}$. Cette méthode a été essayée mais ne donne pour le moment pas de résultat concluant. Ces résultats expliquent certainement pourquoi, dans la littérature, toutes les structures parallèles utilisées comme capteur d'effort utilisent six ressorts et non trois comme le support compliant que nous avons développé.

Perspectives

L'instrumentation du support compliant permet de mesurer précisément l'allongement des trois ressorts. Cette phase technique est délicate principalement pour des raisons de souplesse des ressorts et de raideur des câbles d'alimentation des capteurs qui perturbent le parallélisme entre capteur et réflecteur. Cependant, les expérimentations ont montré une bonne correspondance avec le modèle établi pour une translation verticale du plan de travail.

L'utilisation des trois mesures d'allongement pour déterminer les composantes d'une force extérieure quelconque appliquée sur le plan de travail s'avère peu concluant en regard de la structure et les calculs effectués. L'approfondissement des méthodes de calculs de pseudo-inverse conduiront peut être à la solution. De même, le comportement du plan de travail pourrait être modélisé en utilisant des méthodes fondées sur l'énergie pour déterminer la position la plus stable. Un autre avantage du support compliant réside dans le fait qu'il est utilisé pour des opérations de micromanipulation, ses déplacements sont donc restreints. Dans ce cas, la linéarisation des équations du modèle géométrique inverse pourrait être étudiée. Le système développé pourrait également être couplé à un système de vision permettant de mesurer (par traitement d'images) les coordonnées du point d'application de la force appliquée sur le plan de travail.

Pour finir, il est également envisageable de modifier la structure même du support compliant en suspendant le plan de travail à six systèmes de ressorts au lieu de trois comme les systèmes rencontrés dans la littérature (deux exemples de structures envisageables sont présentés FIG. 5.20).

5.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la réalisation d'opérations de micromanipulation et de micro-assemblage en utilisant les différentes stations de micromanipulation réalisées. Ces essais nous ont permis de valider le fonctionnement des différents éléments constitutifs de ces stations mais aussi de constater certains manques comme le contrôle d'efforts.

Pour répondre à ce besoin, un support compliant a été réalisé, il a pour but d'apporter de la souplesse au plan de travail. Cette souplesse permet de prévenir les risques de rupture de l'actionneur ou d'imprécision des axes de micro-positionnement lors des phases de manipulation. L'apport de cette compliance sur le gain d'efficacité de certaines opérations d'assemblage telles que les phases d'insertion a également été constaté.

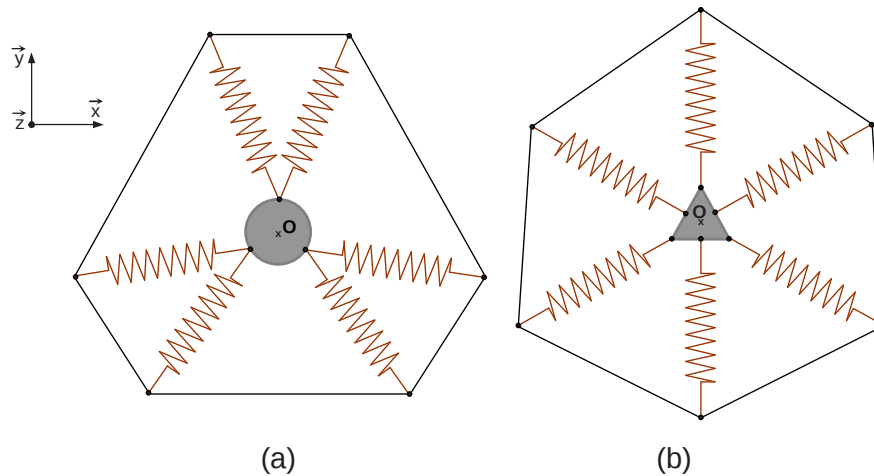


FIG. 5.20 – Exemples de structures envisageables de support compliant possédant six systèmes ressorts-capteurs : (a) deux systèmes ressorts-capteurs sont fixés au même point du plan de travail ; (b) les points de fixation au plan de travail des trois systèmes ajoutés se trouvent au milieu des segments des points de fixation existant déjà.

Nous avons ensuite envisagé d'utiliser le support compliant pour mesurer les composantes d'une force qui serait appliquée sur le plan de travail. Dans ce but, des capteurs ont été ajoutés permettant de mesurer l'allongement des trois ressorts. Nous avons pu vérifier la bonne corrélation du modèle aux mesures pour une force appliquée au centre du plan de travail et dirigée selon l'axe de la pesanteur (la résolution obtenue est de $100 \mu\text{N}$). Cela représente une première étape qui montre la faisabilité de cette solution pour la mesure d'efforts de micromanipulation à l'aide de capteurs à bas coût. Pour le moment, nous pouvons extraire une information binaire sur le contact entre l'objet manipulé et la plate-forme et effectuer des mesures selon l'axe Z . Ces informations sont très utiles en micromanipulation car l'information selon cet axe est toujours délicate à estimer lors de l'utilisation d'un système de vision situé au-dessus de la scène.

Le support compliant présente l'avantage d'être indépendant du reste du manipulateur, il peut donc être implanté facilement dans de nombreux types de stations de micromanipulation. Pour cette raison, nous avons envisagé plusieurs perspectives afin d'aboutir à la mesure d'une force quelconque exercée sur le plan de travail. Certaines solutions permettent de conserver la structure du support compliant réalisé. La souplesse du support est alors conservée (une force de 10 mN appliquée sur le plan de travail engendre un déplacement de $1,5 \text{ mm}$). Certaines solutions, en revanche, nécessitent la modification de la structure du support compliant. Par exemple, l'augmentation du nombre de systèmes à ressorts (six au lieu de trois, voir FIG. 5.14) représente une solution intéressante.

Conclusion

La micro-robotique nourrit, depuis une dizaine d'années, de nombreuses problématiques scientifiques répondant simultanément à des besoins industriels. L'état de l'art présenté dans ce mémoire a permis de mettre en évidence les problématiques d'un des thèmes majeurs de la micro-robotique à savoir la micromanipulation et le micro-assemblage. De nombreuses équipes de recherche ont d'ores et déjà développé des systèmes permettant la manipulation, voire l'assemblage, de composants de manière téléopérée et beaucoup plus rarement de manière automatique. Ce mode de fonctionnement constitue encore aujourd'hui un enjeu scientifique et un champ de recherche ouvert. Les systèmes de manipulation doivent prendre en compte les particularités du micro-monde notamment en ce qui concerne les dimensions (entre $1\text{ }\mu\text{m}$ et 1 mm). Celles-ci sont sources de nombreuses difficultés de manipulation d'autant plus si elles doivent être conduites de manière automatique. Ces difficultés concernent principalement la visualisation de la scène, le contrôle des efforts exercés ainsi que les effets des forces d'adhésion. La réalisation d'un système compact et flexible permettant la micromanipulation ou le micro-assemblage automatique constitue un domaine réellement émergent où de nombreux travaux restent à faire.

Dans cette optique, nous avons réalisé deux stations de micromanipulation constituées d'une micropince, d'axes de micro-positionnement ainsi que d'un système novateur permettant de changer automatiquement les organes terminaux de cette micropince. La première de ces stations est utilisée dans le cadre des travaux effectués au laboratoire tandis que la seconde est davantage dédiée aux applications dans un environnement à vide de type MEB.

Le système de changement d'outils permet de fixer temporairement une paire d'outils à l'actionneur de la micropince ou à un magasin. Le principe de fixation est fondé sur une colle thermique qui peut être cycliquement liquéfiée ou solidifiée. Certaines phases de changement d'outils sont délicates ce qui engendre des incertitudes de positionnement des outils voire leur détachement. Aussi, nous avons développé différents modèles des phénomènes thermiques de conduction et de convection se produisant dans les outils pendant ces phases. Ces modèles ont permis de dimensionner la loi de commande applicable pour l'alimentation des éléments chauffants et donc le fonctionnement du système de changement d'outils.

L'erreur de positionnement des outils a été quantifiée lors de centaines de cycles de changements d'outils en mode automatique. A l'issue de chaque changement, cette erreur est en moyenne de $1\text{ }\mu\text{m}$ et ne dépasse pas $3,2\text{ }\mu\text{m}$ selon chaque direction de l'espace. Une dérive a

été constatée, mais celle-ci peut être compensée grâce aux différents degrés de libertés de la micropince ou en utilisant le système de changement d'outils pour corriger la position relative des deux outils.

Des essais mécaniques ont permis de déterminer que la tenue des joints de colle entre outils et actionneur est suffisante pour garantir la transmission des efforts de manipulation. Nous avons également pu vérifier qu'en cas de force excessive appliquée à l'extrémité de l'outil (selon la normale de leur plan principal), le film de colle se rompt, préservant ainsi l'actionneur de la micropince (fragile et onéreux). Pour finir, différentes mesures ont permis de valider le fonctionnement du système de changement d'outils dans la chambre à vide d'un MEB.

Ce système de changement d'outils apporte une grande flexibilité ainsi qu'une grande compacité aux systèmes de micromanipulation. Cela s'avère particulièrement utile pour réaliser des opérations de micromanipulation dans des espaces confinés. De plus, ce système de changement est très bon marché et les parties onéreuses (actionneurs, micromanipulateurs) sont conservées. Le principe de fixation fondé sur l'utilisation d'une colle thermique nous semble original, innovant et s'avère particulièrement adapté aux dimensions considérées. Son utilisation peut être généralisée à de nombreuses applications comme à d'autres micropinces ou d'autres types d'effecteurs mais aussi au maintien de composants pour permettre, par exemple, leur assemblage.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont également conduit à la réalisation d'un support compliant. Sa faible raideur, égale à 6,7 N/m (une force de 10 mN engendre un déplacement vertical de 1,5 mm), permet de limiter les efforts en jeu et d'améliorer la faisabilité de certaines opérations de micromanipulation telles que celles d'insertion. L'instrumentation de ce support a été étudiée dans le but de mesurer l'allongement des ressorts et d'en déduire par modèle, la force appliquée au plan de travail. La faisabilité de cette solution a été validée pour une force engendrant une translation verticale du plan de travail. Dans cette configuration, la résolution des mesures est de 100 μ N. Ces travaux présentent des perspectives intéressantes dans le but de mesurer des efforts suivant n'importe quelle direction. Ils doivent donc être poursuivis.

Les systèmes de manipulation constitués d'un micromanipulateur cartésien, de la micropince, du système de changement d'outils ainsi que du support compliant ont été utilisés pour réaliser des opérations de manipulation ou d'assemblage de composants. Les stations de micromanipulation résultent ici d'un assemblage d'éléments, leur structure est donc modulaire, autrement dit modifiable. Elles permettent notamment de manipuler successivement des objets de caractéristiques (dimensions, géométries, matériaux) différentes en utilisant à chaque fois une paire d'outils adaptée. Ces opérations peuvent être effectuées dans l'air, en milieu aqueux ou dans la chambre à vide d'un MEB.

Les travaux présentés ici ont mis en avant de nombreuses perspectives. Tout d'abord, une expérience importante concernant la manipulation d'objets dont les dimensions sont comprises entre 50 μ m et 1 mm a été acquise. Cette expérience doit être utilisée au profit de la manipulation d'objets de dimensions plus petites, comprises entre 1 et 50 μ m. Cela passe notamment par la réalisation d'outils adaptés à ce type d'objets. Ce point fait déjà objet d'un nouveau projet en cours au laboratoire. De plus, les systèmes développés constituent une avancée importante

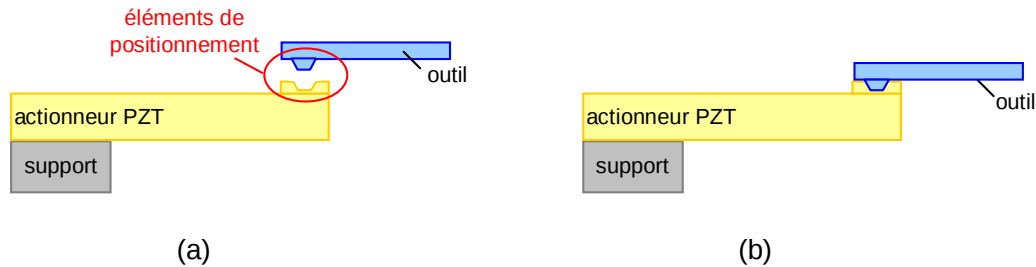


FIG. 5.21 – Ajout d'éléments de positionnement à l'interface outil-actionneur : (a) l'outil n'est pas positionné sur l'actionneur ; (b) l'outil est positionné sur l'actionneur.

notamment en vue d'automatisation future. Pour cela, une commande référencée vision ou utilisant une mesure d'effort est à développer. Cette perspective constitue un des enjeux majeurs de la micro-robotique et plus particulièrement de la réalisation d'une micro-usine, c'est pourquoi, ils font actuellement objet de plusieurs projets au laboratoire.

Des travaux à venir peuvent également consister à améliorer certains points du système de changement d'outils. Par exemple, la précision de positionnement des outils à l'extrémité de l'actionneur peut être améliorée par ajout d'éléments aux contacts entre outils et actionneur (voir FIG. 5.21). Ces éléments peuvent être fabriqués à l'aide de procédés de micro-fabrication en salle blanche qui permettent de réaliser des pièces en silicium particulièrement précises en suivant ses plans cristallins. Des pièces de formes pyramidales (males ou femelles) s'imbriquant parfaitement peuvent alors être réalisées.

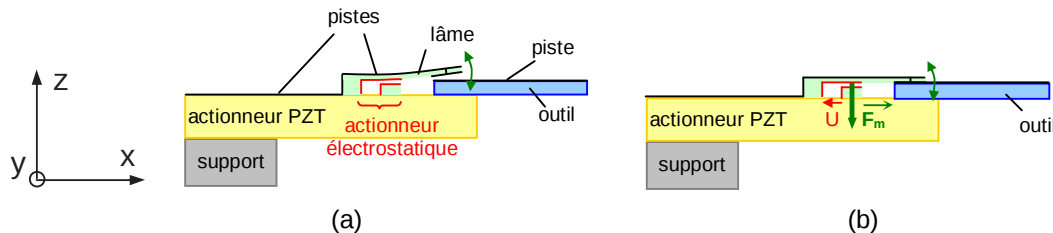


FIG. 5.22 – Système de connecteur électrique pour changement d'outils fondé sur une lame déformable. La déformation de cette lame est commandée par un actionneur électrostatique : (a) l'actionneur électrostatique n'est pas alimenté, il n'y a pas connexion électrique entre les pistes disposées sur l'actionneur et celles sur l'outil ; (b) une différence de potentiel U est imposée entre les deux électrodes de l'actionneur électrostatique créant une force d'attraction F_m . La lame se déforme alors engendrant la connexion électrique des pistes disposées sur l'actionneur et celles sur l'outil.

De même, un système de changement d'outils permettant la connexion électrique présenterait de nombreux intérêts. Ainsi, l'intégration de capteurs de force fixés aux outils est actuellement à l'étude. De plus, compte tenu des problèmes d'adhésion, la connexion électrique des outils permettrait de leur appliquer un potentiel (diélectrophorèse, réduction des forces

électrostatiques). Un tel système de connexion peut, par exemple, être réalisé par des poutres déformables et actionnables par forces électrostatiques (voir FIG. 5.22).

Finalement, les travaux présentés dans ce mémoire contribuent à apporter des solutions à des problématiques scientifiques liées à l'étude et au développement de systèmes robotisés utilisés à des fins de micromanipulation et de micro-assemblage. Dans ce cadre, la micro-robotique peut trouver de nombreuses applications industrielles. Celles-ci ne cessent de croître depuis quelques années et leur portée est encore mal connue.

Annexe A

Etude d'une poutre en flexion

Cette annexe présente la modélisation des doigts de l'actionneur piézoélectrique par des poutres élancées (voir section 2.2.2). Le but de cette modélisation est de déterminer la force admissible par cet actionneur avant rupture.

Considérons une poutre, encastree d'un côté et libre de l'autre, subissant une force de flexion à son extrémité libre (FIG. A.1). Cette poutre a pour dimensions $0,4 \times 1 \times 15 \text{ mm}^3$, elle possède donc une direction privilégiée selon l'axe X. Nous cherchons à déterminer l'effort que peut subir cette poutre à son extrémité avant rupture. Pour cela, nous allons utiliser la théorie de la résistance des matériaux, considérant que les déformations subies par la poutre sont petites et que le matériau de cette poutre est homogène et isotrope.

La section (selon le plan Y-Z) située à l'extrémité de la poutre subit un moment de flexion engendré par la force F_Z , selon l'expression :

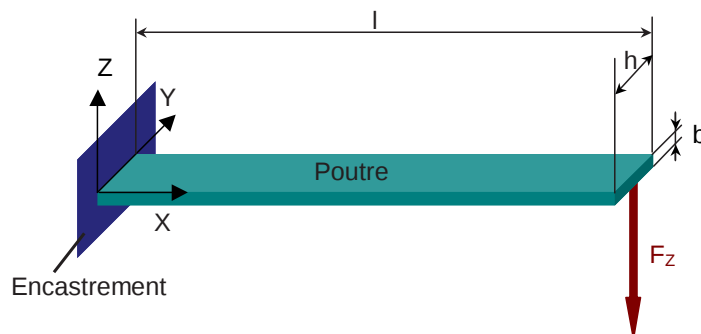


FIG. A.1 – Modèle de poutre encastree-libre subissant une force de flexion selon l'axe Z.

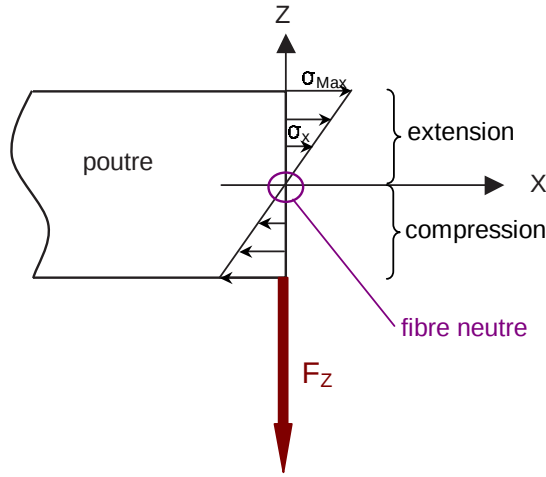


FIG. A.2 – Répartition de contraintes à l'extrémité d'une poutre subissant une force de flexion selon Z.

$$M_f = F_Z \cdot l \quad (\text{A.1})$$

Par ailleurs, l'expression de ce moment peut également être définie en fonction des contraintes internes du matériau. Comme la poutre travaille en flexion selon Z, les principales contraintes (σ) dans le matériau seront dirigées selon la direction principale de la poutre (X). L'expression du moment est alors définie par :

$$M_f = \int_S z \cdot \sigma_x \, dS \quad (\text{A.2})$$

où S est la surface de la section considérée, elle se situe donc dans le plan Y-Z. Lorsque la poutre fléchit, la moitié de celle-ci subit des contraintes de compression et l'autre des contraintes d'extension. Il est possible de considérer que la répartition de ces contraintes est linéaire comme représenté en FIG. A.2 ($\sigma_x = \frac{2 \cdot z \cdot \sigma_{max}}{b}$), σ_{max} est la contrainte admissible par le matériau. La fibre neutre est la partie de la poutre qui ne subit aucune contrainte. A partir de ces hypothèses, l'expression du moment de flexion devient :

$$M_f = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{2 \cdot z^2 \cdot \sigma_{max}}{b} \, dy \, dz \quad (\text{A.3})$$

Après résolution, nous obtenons l'égalité suivante :

$$M_f = F_Z \cdot l = \frac{\sigma_{max} \cdot b^2 \cdot h}{6} \quad (\text{A.4})$$

Ainsi, la rupture de la poutre intervient lorsque la force de flexion selon Z vérifie l'expression :

$$F_Z = \frac{\sigma_{max} \cdot b^2 \cdot h}{6 \cdot l} \quad (\text{A.5})$$

La même étude peut être conduite pour une force de flexion appliqué selon l'axe Y et conduira à l'expression suivante :

$$F_Y = \frac{\sigma_{max} \cdot h^2 \cdot b}{6 \cdot l} \quad (\text{A.6})$$

Annexe B

Caractérisation de la force de serrage de la micropince MMOC

Lors des phases de micromanipulation, un objet est maintenu entre les doigts de la micropince par l'action d'une force de serrage. Cette annexe présente les détails de calculs effectués conduisant à l'estimation de cette force pour différentes configurations. Les valeurs obtenues par ces calculs ont été utilisées pour le dimensionnement de l'actionneur de la micropince.

Un objet est maintenu entre les deux extrémités des doigts de la micropince (outils). Les forces en jeu, dans cette configuration, sont décrites par le schéma FIG. B.1. En utilisant le principe fondamental de la dynamique, l'équilibre de l'objet est décrit par l'équation suivante :

$$\vec{P} + \vec{F}_{T1} + \vec{F}_{T2} + \vec{F}_{N1} + \vec{F}_{N2} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{B.1})$$

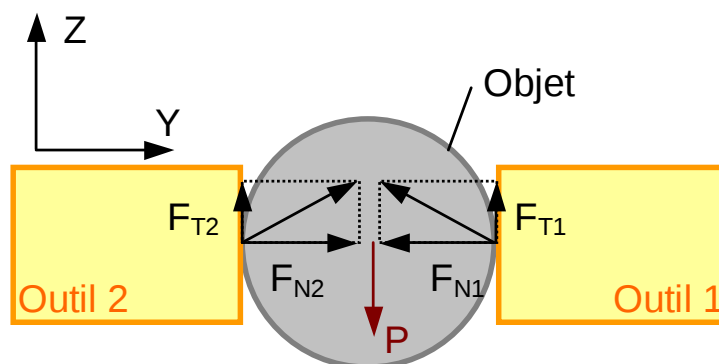


FIG. B.1 – Forces en jeu lors du maintien d'un objet entre les doigts de la micropince.

où $\vec{a}$ est l'accélération que peut subir l'objet pendant une phase de déplacement et m la masse de l'objet manipulé. Par ailleurs, en considérant un coefficient de frottement f aux contacts outils-objet, les égalités suivantes sont vérifiées :

$$\vec{F}_{T1} = f \cdot \vec{F}_{N1} \quad \text{et} \quad \vec{F}_{T2} = f \cdot \vec{F}_{N2} \quad (\text{B.2})$$

Selon les opérations de manipulation effectuées, plusieurs configurations peuvent être envisagées. Tout d'abord, la configuration la plus commune consiste à maintenir un objet de manière statique ($\vec{a} = \vec{0}$). Dans ce cas, nous pourrions supposer que les intensités de chaque force exercée par un outil sur l'objet sont identiques, ainsi :

$$P - 2 \cdot f \cdot F_N = 0 \quad (\text{B.3})$$

En considérant que l'objet le plus lourd à manipuler pèse 1 g et que le coefficient de frottement entre outils et objet soit de 0,1, la force de serrage à appliquer par les outils sur l'objet F_N est de l'ordre de 50 mN. Après application d'un coefficient de sécurité, le dimensionnement de l'actionneur de la micropince a été effectué pour une force de serrage de 55 mN.

Considérons maintenant une configuration de déplacement nécessitant une phase d'accélération. Pour une accélération de 10g dirigée selon l'axe Z, l'équation B.1, en projection selon cet axe, permet de déterminer qu'un objet pesant 0,1 g peut être maintenu. Pour une accélération latérale selon Y, l'objet est maintenu tant que la force normale exercée par chaque outil reste dirigée vers l'objet selon l'équation :

$$F_N = m \cdot a \quad (\text{B.4})$$

Dans ce cas, pour une accélération de 10g, un objet ne doit pas peser plus de 0,5 g pour être maintenu.

Annexe C

Modélisation numérique des phénomènes thermiques par éléments finis

Cette annexe présente l'utilisation d'un logiciel de calcul par éléments finis pour modéliser les phénomènes thermiques du système de changement d'outils. Les modèles utilisables et utilisés seront présentés. Les valeurs des paramètres déterminées section 4.7.1 sont utilisés dans cette simulation et conduisent à des résultats peu satisfaisants. Cependant, cette méthode est principalement utilisée pour déterminer de manière qualitative l'influence du rayonnement.

C.1 Introduction

L'étude thermique liée au fonctionnement du système de changement d'outils est réalisable par le biais d'une simulation par éléments finis. Cette méthode présente de nombreux intérêts :

- la définition de géométries tridimensionnelles complexes permettant d'enrichir les modèles réalisés et ainsi d'être plus proche des phénomènes physiques réellement mis en jeu ;
- l'étude de l'influence de chaque phénomène physique permettant notamment de caractériser l'influence du rayonnement ;
- la comparaison immédiate des effets des conditions aux limites ;
- l'étude facilitée pour des problèmes multi-physiques ;
- la définition de zones d'intérêts.

En revanche, l'utilisation d'une méthode par éléments finis présente une certaine rigidité. Elle nécessite la connaissance de l'ensemble des paramètres physiques en jeu et elle peut diffi-

cilement être utilisée à des fins d'identification de ces paramètres.

C.2 Modélisation numérique des phénomènes thermiques

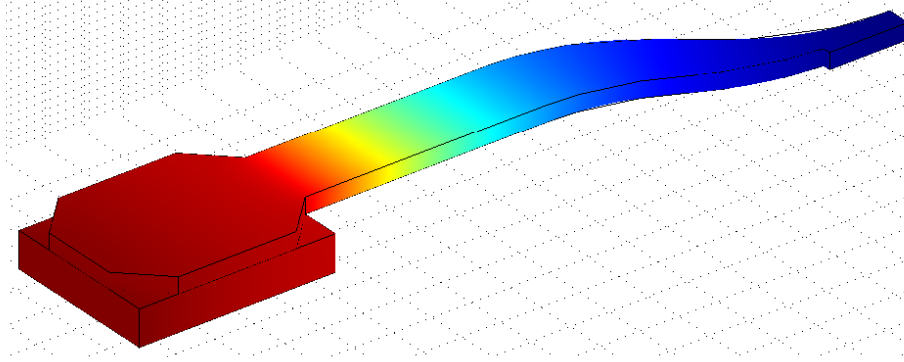


FIG. C.1 – Système résistance-outil utilisé pour effectuer des simulations sous FEMLAB.

Pour conduire cette étude, le logiciel FEMLAB a été utilisé (version 3.0 de la société Comsol). Celui-ci permet la résolution de problèmes tridimensionnels multi-physiques et, entre autres, thermiques. La géométrie utilisée est représentée en FIG. C.1. Il est possible de résoudre des problèmes prenant en compte les phénomènes de conduction, de convection et de rayonnement. De même, les problèmes étudiés peuvent être résolus en mode stationnaire ou transitoire. Les phénomènes de conduction sont définis par des conditions imposées à l'intérieur de chaque élément utilisé, selon la relation :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div} (\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}(T)}) = Q_{int} \quad (\text{C.1})$$

Q_{int} représente la densité volumique de chaleur par unité de temps dans la résistance. Les phénomènes de convection et de rayonnement se définissent sur chaque surface extérieure de chaque élément constituant le système étudié. Il est possible d'imposer une température, une isolation ou un flux défini par l'équation :

$$\overrightarrow{n_{ext}} \cdot (k \cdot \overrightarrow{\text{grad}(T)}) = q_o + h \cdot (T_{\infty} - T) + C \cdot (T_{\infty}^4 - T^4) \quad (\text{C.2})$$

Le vecteur unitaire $\overrightarrow{n_{ext}}$ est normal à la surface considérée et orienté vers l'extérieur de l'élément considéré. q_o est une densité de flux passant à travers la surface. T_{∞} est la température loin du système étudié. Pour finir, la constante C caractérise le rayonnement et vaut $\varepsilon \cdot \sigma$ où ε est l'émissivité du matériau et σ la constante de Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}$). Pouvoir imposer des conditions sur chaque surface en contact avec l'extérieur est également utile pour vérifier la pertinence des hypothèses utilisées pour construire nos modèles analytiques.

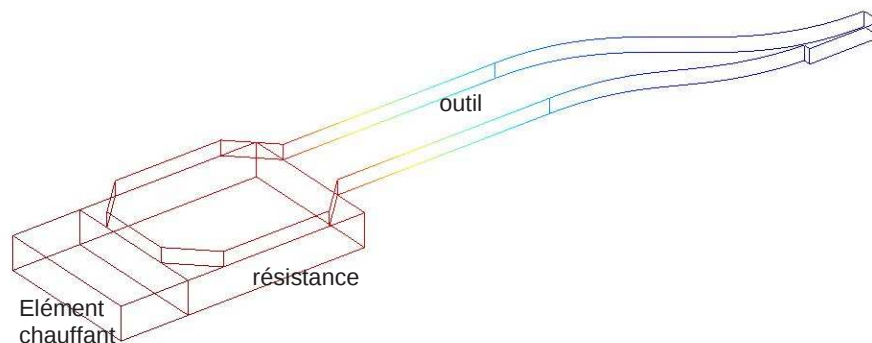


FIG. C.2 – Système élément chauffant-résistance-outil utilisé pour effectuer des simulations sous FEMLAB.

C.3 Résultats

Les résultats obtenus par cette modélisation par éléments finis ont été comparés avec ceux issus des mesures et des autres modèles utilisés jusqu'alors. Les températures obtenues par le modèle éléments finis développé sous FEMLAB sont très supérieures à celles issues des mesures ou du modèle unidirectionnel. La différence entre les deux modèles semble difficilement explicable même si nous pensons qu'elle est due aux hypothèses effectuées au niveau du contact résistance-outil et des câbles d'alimentation. Nous avons alors modifié le système modélisé en ajoutant un élément chauffant (les résistances sont alors passives) selon le schéma FIG. C.2. La température de cet élément chauffant est fixée à une valeur définie par la mesure de la température de la résistance. La corrélation des résultats obtenus par simulation avec les mesures est moyennement satisfaisante comme le montre la FIG. C.3. Pour cette raison, le modèle numérique unidirectionnel de type différences finies développé au chapitre 4 a été utilisé pour commander le système de changement d'outils. Le modèle à éléments finis n'a été utilisé que pour étudier qualitativement l'influence du rayonnement sur le fonctionnement du système.

C.4 Influence du rayonnement

Le système modifié qui vient d'être présenté a été utilisé pour étudier l'influence du rayonnement. Cette étude est plutôt qualitative pour les deux raisons suivantes :

- l'échauffement du système est imposé par un élément chauffant dont la température est fixée, ce qui ne permet pas de quantifier précisément l'influence du rayonnement ;
- la corrélation des résultats aux mesures est assez moyenne.

Les résultats obtenus permettent de constater que l'influence du rayonnement sur le fonctionnement du système de changement d'outils est faible (FIG. C.4). En effet, le nickel possède une faible émissivité, inférieure à 0,1 (grâce à laquelle il a été utilisé pour améliorer la furtivité d'objets volants).

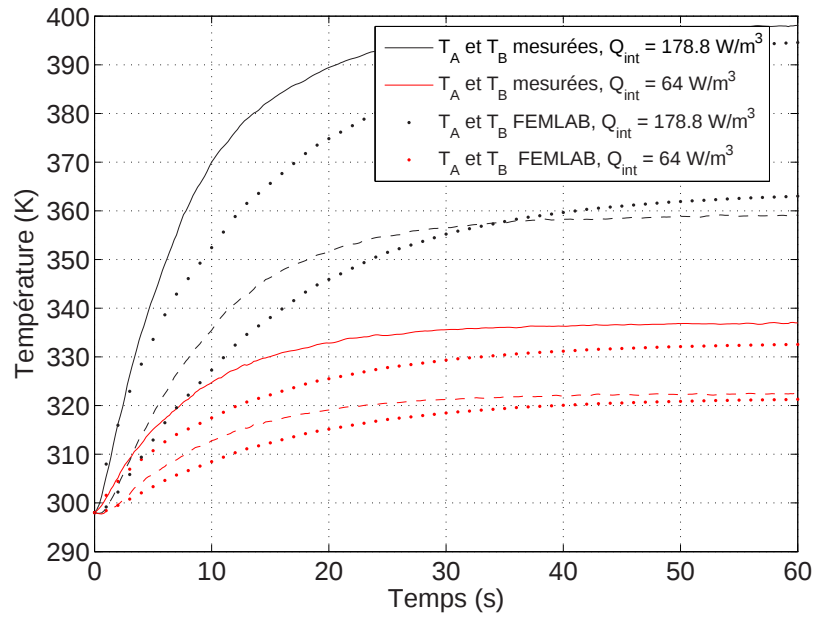


FIG. C.3 – Comparaison des mesures et des résultats issus du modèle développé sous FEMLAB des températures aux points A et B pour deux densités de chaleur.

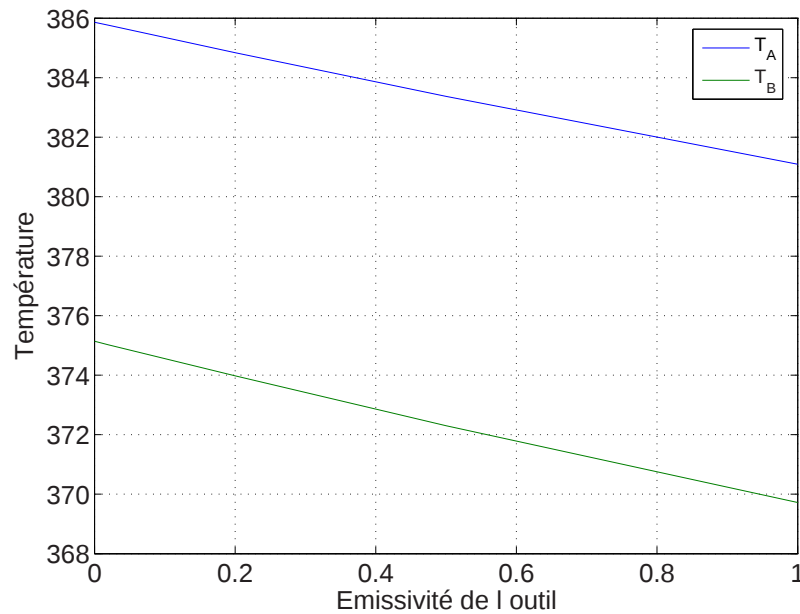


FIG. C.4 – Etude de l'influence du rayonnement par éléments finis (FEMLAB) sur la température des points A et B en régime stationnaire pour le système résistance-outil.

Annexe D

Identification paramétrique à partir du modèle analytique en régime stationnaire

La détermination des coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil est nécessaire à la modélisation des phénomènes thermiques du système de changement d'outils. Cette détermination est possible grâce à une méthode d'identification paramétrique à partir du modèle analytique en régime stationnaire présenté section 4.4. Cette annexe présente les détails de cette méthode.

La méthode d'identification proposée nécessite des mesures de températures effectuées en régime stationnaire. Les mesures utilisées sont présentées sur la FIG. D.1. Ces mesures permettent de déterminer les sept équations (quatre pour la résistance, trois pour l'outil) suivantes :

$$\begin{cases} T_r(x_{r1}) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_{r1}} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_{r1}} + T_\infty + Q_{int} \cdot c \\ T_r(x_{r2}) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_{r2}} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_{r2}} + T_\infty + Q_{int} \cdot c \\ T_r(x_{r3}) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_{r3}} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_{r3}} + T_\infty + Q_{int} \cdot c \\ T_r(x_r) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_r} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_r} + T_\infty + Q_{int} \cdot c = T_j \end{cases} \quad (D.1)$$

$$\begin{cases} T_o(x_{o1}) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_{o1}} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_{o1}} + T_\infty \\ T_o(x_{o2}) = \alpha_r \cdot e^{a \cdot x_{o2}} + \beta_r \cdot e^{-a \cdot x_{o2}} + T_\infty \\ T_o(0) = \alpha_r + \beta_r + T_\infty = T_j \end{cases} \quad (D.2)$$

Ces équations forment deux systèmes dont la résolution permet de déterminer pour le premier une fonction dépendant uniquement de a , pour le second une fonction dépendant uniquement de b selon les expressions suivantes :

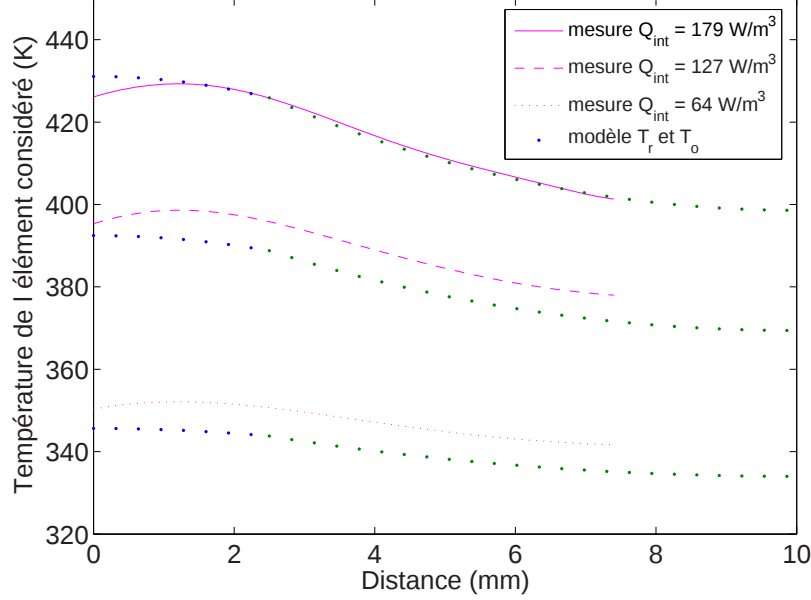


FIG. D.1 – Mesures de températures effectuées en régime stationnaire sur les systèmes résistance-outil pour trois densités de chaleur. Le thermocouple utilisé pour ces mesures est placé comme indiqué sur la FIG. 4.7.

$$\begin{aligned}
 f_r(a) = & e^{a \cdot (x_r - x_{r3})} \cdot (e^{a \cdot x_{r1}} - e^{a \cdot x_{r2}}) \cdot (e^{a \cdot x_{r1}} - e^{a \cdot x_{r3}}) \cdot (e^{a \cdot x_{r2}} - e^{a \cdot x_{r3}}) \cdot T_j \\
 & + e^{a \cdot (x_{r1} - x_{r3})} \cdot (e^{a \cdot x_r} - e^{a \cdot x_{r2}}) \cdot (-e^{a \cdot x_r} + e^{a \cdot x_{r2}}) \cdot (e^{a \cdot x_{r2}} - e^{a \cdot x_{r3}}) \cdot T_r(x_{r1}) \\
 & + e^{a \cdot (x_{r2} - x_{r3})} \cdot (e^{a \cdot x_r} - e^{a \cdot x_{r1}}) \cdot (e^{a \cdot x_{r1}} - e^{a \cdot x_{r3}}) \cdot T_r(x_{r2}) \\
 & - T_r(x_{r3}) \cdot (e^{a \cdot x_r} - e^{a \cdot x_{r1}}) \cdot e^{a \cdot x_r} - e^{a \cdot x_{r2}}) \cdot (e^{a \cdot x_{r1}} - e^{a \cdot x_{r2}})
 \end{aligned} \quad (D.3)$$

$$\begin{aligned}
 f_o(b) = & T_\infty - T_o(x_{o2}) + e^{a \cdot (x_{o1} - x_{o2})} \cdot \frac{T_o(x_{o1}) - T_\infty + e^{a \cdot x_{o1}} \cdot T_\infty - e^{a \cdot x_{o1}} \cdot T_j}{1 - e^{2 \cdot a \cdot x_{o1}}} \\
 & + e^{a \cdot x_{o2}} \cdot \frac{T_j + -T_\infty + e^{a \cdot x_{o1}} \cdot T_\infty + e^{a \cdot x_{o1}} \cdot T_o(x_{o1})}{1 - e^{2 \cdot a \cdot x_{o1}}}
 \end{aligned} \quad (D.4)$$

Le tracé des caractéristiques $f_r(a)$ et $f_o(b)$ a été effectué (sous MATLAB) et permet de déterminer une valeur de a et une de b telles que $f_r(a) = 0$ et $f_o(b) = 0$. De nombreux quadruplets (pour la résistance) et triplets (pour l'outil) de mesures ont été utilisés permettant de déterminer des valeurs moyennes de a et b et donc les rapports $\frac{h_r}{\lambda_r}$ et $\frac{h_o}{\lambda_o}$.

$$\begin{cases} a = \sqrt{\frac{h_r}{\lambda_r}} = 49 \\ b = \sqrt{\frac{h_o}{\lambda_o}} = 96 \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} \frac{h_r}{\lambda_r} = \frac{w_r \cdot e_r}{2 \cdot (w_r + e_r)} \cdot a^2 = 0,39 \quad m \\ \frac{h_o}{\lambda_o} = \frac{w_o \cdot e_o}{2 \cdot (w_o + e_o)} \cdot b^2 = 0,77 \quad m \end{cases} \quad (\text{D.5})$$

Ensuite, la résolution du système (D.1) que nous avons effectué pour déterminer $f_r(a)$ a également conduit à l'expression de c selon l'égalité :

$$c = \frac{(e^{a \cdot (x_r - x_{r2})} - e^{a \cdot (x_{r2} - x_r)}) \cdot [-e^{a \cdot x_{r1}} \cdot (T_\infty - T_j) + e^{a \cdot x_r} \cdot (T_\infty - T_r(x_{r1}))] - (e^{a \cdot (x_r - x_{r1})} - e^{a \cdot (x_{r1} - x_r)}) \cdot [-e^{a \cdot x_{r2}} \cdot (T_\infty - T_j) + e^{a \cdot x_r} \cdot (T_\infty - T_r(x_{r2}))]}{(-e^{a \cdot x_{r1}} + e^{a \cdot (x_{r2} - x_{r1})} + e^{a \cdot x_{r2}} - e^{a \cdot (2 \cdot x_r - x_{r2})} + e^{a \cdot (x_r \cdot x_{r1} - x_{r2})} - e^{a \cdot (2 \cdot x_r \cdot x_{r2} - x_{r1})}) \cdot Q_{int}} \quad (\text{D.6})$$

Les étapes précédentes ayant permis de déterminer les rapports $\frac{h_r}{\lambda_r}$ et $\frac{h_o}{\lambda_o}$, c peut alors être aisément calculé. De plus, d'après l'équation (4.22), nous pouvons déterminer directement h_r selon la formule :

$$h_r = \frac{w_r \cdot e_r}{2 \cdot c \cdot (w_r + e_r)} = 35,3 \quad W/m^2.K \quad (\text{D.7})$$

Ces éléments de calculs ont conduit à la détermination de h_r , λ_r et $\frac{h_o}{\lambda_o}$. Ces valeurs sont utilisables dans le modèle analytique en régime stationnaire pour tracer l'évolution de la température T_r et T_o en fonction du paramètre h_o . La confrontation des résultats du modèle et des mesures permet de déterminer h_o (section 4.4.3).

Annexe E

Identification des paramètres : méthode ARX par discrétisation temporelle

La détermination des coefficients de conduction et de convection de la résistance et de l'outil est nécessaire à la modélisation des phénomènes thermiques du système de changement d'outils. Cette détermination est possible grâce à une méthode d'identification paramétrique ARX par discrétisation temporelle effectuée à partir du modèle numérique présenté section 4.5. Cette annexe présente les détails de cette méthode.

La méthode d'identification paramétrique ARX (AutoRégressive à partie eXogène) peut s'appliquer au modèle récurrent que nous avons défini à partir d'une discrétisation temporelle. Partons de l'équation (4.19) qui définit la température de chaque élément discrétisé à chaque incrément temporel. En effectuant le changement de variable $\tilde{T} = T - T_\infty$, cette équation devient, dans la résistance :

$$\begin{aligned}\tilde{T}_r(i, k+1) &= \frac{\lambda_r}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_r \cdot C_r} \cdot \tilde{T}_r(i+1, k) \\ &+ \left(1 - \frac{2 \cdot \lambda_r}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_r \cdot C_r} - \tilde{h}_r \cdot \frac{\Delta t}{\rho_r \cdot C_r}\right) \cdot \tilde{T}_r(i, k) \\ &+ \frac{\lambda_r}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_r \cdot C_r} \cdot \tilde{T}_r(i-1, k) \\ &+ \frac{\Delta t}{\rho_r \cdot C_r} \cdot Q_{\text{int}}(i, k)\end{aligned}\tag{E.1}$$

et dans l'outil :

$$\begin{aligned}
\widetilde{T}_o(i, k+1) &= \frac{\lambda_o}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_o \cdot C_o} \cdot \widetilde{T}_o(i+1, k) \\
&+ \left(1 - \frac{2 \cdot \lambda_o}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_o \cdot C_o} - \widetilde{h}_o \cdot \frac{\Delta t}{\rho_o \cdot C_o}\right) \cdot \widetilde{T}_o(i, k) \\
&+ \frac{\lambda_o}{\Delta x^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_o \cdot C_o} \cdot \widetilde{T}_o(i-1, k)
\end{aligned} \tag{E.2}$$

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \widetilde{T}_r(i, k+1) = -a_{r1} \cdot \widetilde{T}_r(i+1, k) + a_{r2} \cdot \widetilde{T}_r(i, k) - a_{r3} \cdot \widetilde{T}_r(i-1, k) + b \cdot Q_{int}(k) \\ \widetilde{T}_o(i, k+1) = -a_{o1} \cdot \widetilde{T}_o(i+1, k) + a_{o2} \cdot \widetilde{T}_o(i, k) - a_{o3} \cdot \widetilde{T}_o(i-1, k) \end{cases} \tag{E.3}$$

Notons que $a_{r1} = a_{r3}$ et que $a_{o1} = a_{o3}$. En posant $\widetilde{T}^*(i, k) = \widetilde{T}(i+1, k) + \widetilde{T}(i-1, k)$, les deux équations précédentes deviennent :

$$\begin{cases} \widetilde{T}_r(i, k+1) = -a_{r1} \cdot \widetilde{T}_r^*(i, k) + a_{r2} \cdot \widetilde{T}_r(i, k) + b \cdot Q_{int}(k) \\ \widetilde{T}_o(i, k+1) = -a_{o1} \cdot \widetilde{T}_o^*(i, k) + a_{o2} \cdot \widetilde{T}_o(i, k) \end{cases} \tag{E.4}$$

Sous forme matricielle, cette équation donne :

$$\begin{pmatrix} \widetilde{T}_r(i, 1) \\ \widetilde{T}_r(i, 2) \\ \vdots \\ \widetilde{T}_r(i, m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widetilde{T}_r(i+1, 0) + \widetilde{T}_r(i-1, 0) & -\widetilde{T}_r(i, 0) & Q_{int}(0) \\ \widetilde{T}_r(i+1, 1) + \widetilde{T}_r(i-1, 1) & -\widetilde{T}_r(i, 1) & Q_{int}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \widetilde{T}_r(i+1, m-1) + \widetilde{T}_r(i-1, m-1) & -\widetilde{T}_r(i, m-1) & Q_{int}(m-1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{r1} \\ a_{r2} \\ b \end{pmatrix} \tag{E.5}$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme simplifiée :

$$\mathbf{y}_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1} \cdot \boldsymbol{\theta} \tag{E.6}$$

Avec

$$\mathbf{y}_{k+1} = \begin{pmatrix} \widetilde{T}_r(i, 1) \\ \widetilde{T}_r(i, 2) \\ \vdots \\ \widetilde{T}_r(i, m) \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varphi}_{k+1} = \begin{pmatrix} \widetilde{T}_r(i+1, 0) + \widetilde{T}_r(i-1, 0) & -\widetilde{T}_r(i, 0) & Q_{int}(0) \\ \widetilde{T}_r(i+1, 1) + \widetilde{T}_r(i-1, 1) & -\widetilde{T}_r(i, 1) & Q_{int}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \widetilde{T}_r(i+1, m-1) + \widetilde{T}_r(i-1, m-1) & -\widetilde{T}_r(i, m-1) & Q_{int}(m-1) \end{pmatrix}$$

et $\boldsymbol{\theta} = \begin{pmatrix} a_{r1} \\ a_{r2} \\ b \end{pmatrix}$ (E.7)

Dans cette équation simplifiée, on retrouve les mesures y , le vecteur des données connues φ et le vecteur des paramètres à identifier θ . Nous pouvons constater que, pour utiliser cette méthode d'identification, il sera nécessaire d'obtenir la mesure dynamique de la température de trois éléments spatiaux consécutifs. Les solutions sont obtenues grâce à l'égalité suivante :

$$\theta_r = (\varphi_r^T \cdot \varphi_r)^{-1} \cdot (\varphi_r^T \cdot y_r) \quad (\text{E.8})$$

Cette méthode d'identification permet de déterminer trois équations pour la résistance et deux pour l'outil :

$$\begin{cases} \rho_r \cdot C_r = \frac{\Delta t}{b} \\ \lambda_r = \frac{a_{r2} \cdot \Delta x^2 \cdot \rho_r \cdot C_r}{\Delta t} \\ h_r = (a_{r1} + 1 - \frac{2 \cdot \lambda_r \cdot \Delta t}{\rho_r \cdot C_r \cdot \Delta x^2}) \cdot \frac{\rho_r \cdot C_r \cdot V_r}{S_r \cdot \Delta x^2} \\ \lambda_o = \frac{a_{o2} \cdot \Delta x^2 \cdot \rho_o \cdot C_o}{\Delta t} \\ h_o = (a_{o1} + 1 - \frac{2 \cdot \lambda_o \cdot \Delta t}{\rho_o \cdot C_o \cdot \Delta x^2}) \cdot \frac{\rho_o \cdot C_o \cdot V_o}{S_o \cdot \Delta x^2} \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

A partir de ces valeurs, il est alors possible de calculer l'évolution temporelle de la température de chaque élément discrétisé en espace.

$$\begin{cases} T_{calculé}(i,0) = T_{\infty} \\ T_{calculé}(i,k+1) = -a_{r1} \cdot (T_{calculé}(i+1,k) - T_{\infty}) + a_{r2} \cdot (T_{calculé}(i,k) - T_{\infty}) \\ \quad - a_{r3} \cdot (T_{calculé}(i-1,k) - T_{\infty}) + b \cdot Q_{int}(k) + T_{ext} \quad \text{pour } 1 \leq i \leq p \\ T_{calculé}(i,k+1) = -a_{o1} \cdot (T_{calculé}(i+1,k) - T_{\infty}) + a_{o2} \cdot (T_{calculé}(i,k) - T_{\infty}) \\ \quad - a_{o3} \cdot (T_{calculé}(i-1,k) - T_{\infty}) + T_{\infty} \quad \text{pour } p+1 \leq i \leq n \\ T_{calculé}(0,k) = T_{calculé}(1,k) = T_{initial} \\ T_{calculé}(n+1,k) = T_{calculé}(n,k) \end{cases} \quad (\text{E.10})$$

Pour utiliser cette méthode d'identification, il est nécessaire que la commande $Q_{int}(k)$ soit générée sous forme de bruit blanc afin d'augmenter le spectre d'excitation de commande et ainsi la pertinence de l'identification obtenue. Il est également nécessaire de mesurer l'évolution temporelle de trois éléments discrets consécutifs. Ne disposant actuellement pas du matériel pour réaliser ces mesures, nous ne l'avons pas mise en œuvre.

Annexe F

Caractéristiques du capteur de position SFH 900

Cette annexe présente les caractéristiques nécessaires à l'utilisation du capteur SFH 900. Ce capteur est utilisé pour mesurer l'allongement des ressorts du support compliant. Un montage électronique a également été réalisé dans le but de traiter le signal du capteur.

F.1 Données du capteur SFH 900

Les principales données nécessaires à l'utilisation de capteurs SFH 900 sont détaillées FIG. F.1. Ces données sont celles qui ont été utilisées pour réaliser les différents montages.

F.2 Montage électronique

Un montage électronique a été réalisé permettant de traiter la tension délivrée par le capteur SFH 900 (FIG. F.2). Les repères des trois bornes du capteur sont 1, 2 et 3. Le traitement permet d'obtenir une tension variant de -10,6 V à +10,6 V compatible avec les cartes d'entrées-sorties. Par sécurité, cette tension est limitée à ces valeurs.

Le gain de la caractéristique tension-distance émetteur-réflexeur peut être réglé afin d'optimiser la sensibilité de la mesure.

Un offset est également utilisé. Son réglage revient à modifier la distance émetteur-réflexeur. Cette possibilité permet de définir un réglage identique pour les trois capteurs du support compliant.

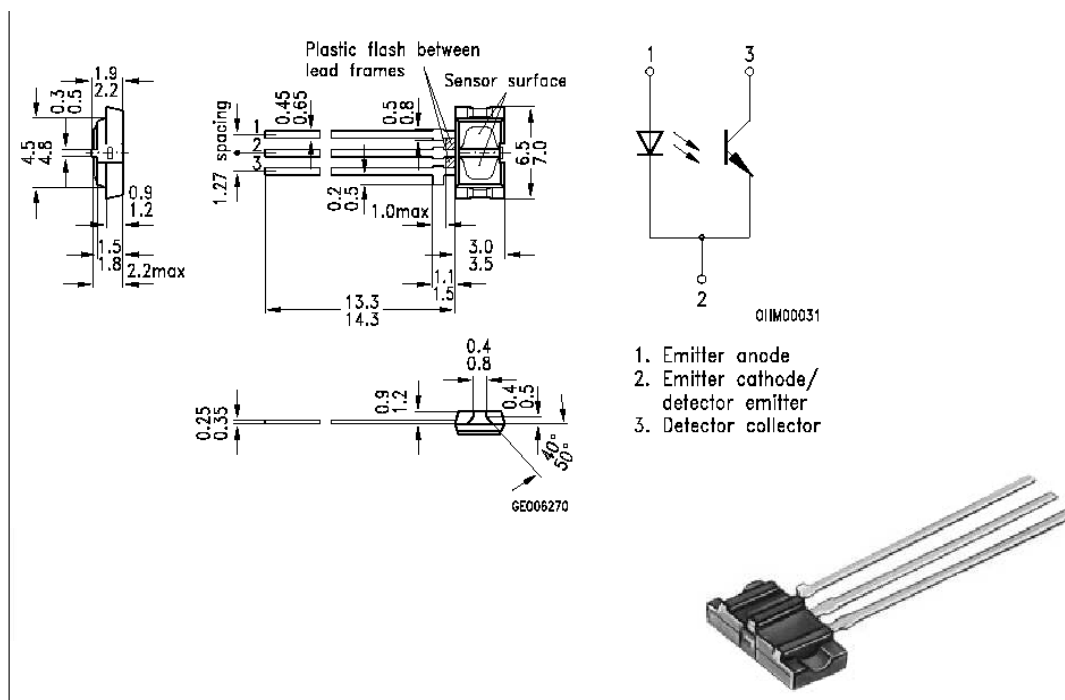


FIG. F.1 – Caractéristiques dimensionnelles et brochage du capteur SFH 900.

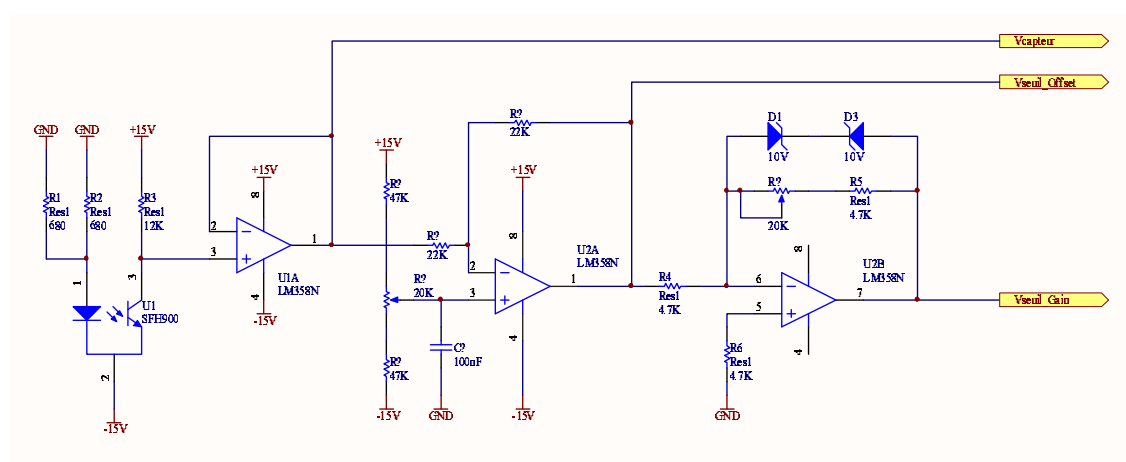


FIG. F.2 – Montage électronique permettant de traiter la tension délivrée par le capteur SFH 900.

Annexe G

Index des vidéos disponibles sur le Cédérom

Cette annexe présente la liste des vidéos disponibles sur le Cédérom joint. Quelques éléments d'explications concernant le contenu de ces vidéos sont également présentés.

Objet de la vidéo	nom du fichier	durée	vitesse
Effets d'adhésion d'une bille de 100 μm de diamètre dans l'air.	Adhesion_bille_air.avi	39 s	x 1
Manipulation de billes de 200 μm de diamètre puis manipulation de billes de 50 μm placées dans une goutte d'eau.	Billes_eau.m1v	26 s	x 3
Insertion de billes dans le roulement partiellement assemblé. Le diamètre des billes mesure 200 μm . Des effets d'adhésion sont visibles.	Billes_roulement_MEB.avi	52 s	x 1
Cycle de changement d'outils dans un MEB.	Changement_outil_MEB.avi	45 s	x 5
Cycle de manipulation d'un grain de sel de 300 μm de côté, changement d'outils dans l'air, changement des outils puis manipulation d'un pignon dont l'axe mesure 140 μm de diamètre.	Changement_outil_air.avi	55 s	x 3
Correction de la distance séparant les deux outils à l'aide du système de changement d'outils dans le MEB.	Correction_gap_MEB.avi	29 s	x 1
Opération de prise, transport et dépose d'une éprouvette de traction dans un MEB.	Eprouvette_traction_MEB.avi	19 s	x 1
Empilement de deux grains de sel de 300 μm de côté dans l'air.	Grains_sel_air.m1v	15 s	x 3
Manipulation présentée à mi-parcours du projet ROBOSEM, un pignon est saisi par la micropince montée sur le MM3A puis transporté et finalement déposé sur le Z-tilt5.	LAB_EPFL_ROBOSEM.m1v	3'42 s	x 1
Insertion de pions et pignons dans leurs perçages respectifs. Le diamètre des pions mesure 300 μm .	Mecanisme_air.m1v	49 s	x 3
Pénétration des outils dans un ménisque aqueux. Un grain d'olivine est maintenu entre les doigts de la pince pendant cette phase.	Pénétration_eau.avi	6 s	x 1
Opérations de prise, déplacement et dépose d'un pignon dont l'axe mesure 140 μm .	Pignon_air.m1v	20 s	x 3
Assemblage partiel d'un roulement dans un MEB nécessitant la correction de la distance séparant les deux outils.	Roulement_MEB.avi	59s	x 6

Bibliographie

- [Aba00] J. Abadie. Etude et réalisation de micro-actionneurs intégrés à base l’alliage à mémoire de forme. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Laboratoire d’Automatique de Besançon, 2000.
- [Agn03a] J. Agnus. Contribution à la micromanipulation : étude, réalisation, caractérisation et commande d’une micropince piézoélectrique. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Laboratoire d’Automatique de Besançon, 2003.
- [Agn03b] J. Agnus, P. De Lit, C. Clévy, and N. Chaillet. Description and performances of a four-degrees-of-freedom piezoelectric microgripper. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 66–71, 2003.
- [Agn04] J. Agnus, C. Clévy, Y. Urushima, R. Perez, A. Hubert, and N. Chaillet. A micro-manipulation station based on a new integrated microprehensile microrobot on chip (mmoc). In *35th International symposium on robotics*, Paris, France, March 2004.
- [Agn05] J. Agnus, P. Nectoux, and N. Chaillet. Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on a mmoc microgripper. In *CIRA*, 2005.
- [Ara95] F. Arai, D. Ando, T. Fukuda, Y. Nonoda, and T. Oota. Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 236–241, 1995.
- [Ara97] F. Arai and T. Fukuda. A new pick up and release method by heating for micromanipulation. In *International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pages 383–388, Nagoya, Japan, 1997.
- [Ara98] F. Arai, D. Andon, Y. Nonoda, T. Fukuda, H. Iwata, and K. Itoigawa. Integrated microendeffector for micromanipulation. *ASME/IEEE Transaction on Mechatronics*, 3(1):17–23, March 1998.
- [Asc99] G. Asch. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 1999.
- [Aut00] K. Autumn, W.P. Chang, R. Fearing, T. Hsieh, T. Kenny, L. Liang, W. Zesch, and R.J. Full. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 405:681–685, 2000.
- [Aut02] K. Autumn et al. Evidence for van der waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(19):11993–12502, September 2002.
- [Bec02] E. Beckert, M. Mohaupt, G. Harnisch, and R. Eberhardt. Handling of microoptical components for microassembly. *SPIE*, 4755:531–542, 2002.

- [Bel99] Y. Bellouard, T. Lehnert, J.E. Bidaux, T. Sidler, R. Clavel, and R. Gotthardt. Local annealing of complex mechanical devices: a new approach for developing monolithic micro-devices. *Materials Science and Engineering*, 273-275:795–798, 1999.
- [Ben98] H. Benzaoui. Modélisation thermomécanique et commande d'actionneurs en alliages à mémoire de forme pour la microrobotique. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Laboratoire d'Automatique de Besançon, 1998.
- [Ber03] A. Bergander. *Control, wear testing & integration of stick-slip micropositioning*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2003.
- [Boh98] K. F. Bohringer, R. S. Fearing, and K. Y. Goldberg. *Handbook of industrial robotics, Chapter Microassembly*. Wiley and sons, 1998.
- [Bou02] A. Bourjault and N. Chaillet. *La microrobotique*. Hermès, 2002.
- [Bre98] J. M. Breguet. Actionneurs "stick and slip" pour micro-manipulateurs. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 1998.
- [Bre01] J. M. Breguet and A. Bergander. Toward the personal factory? *SPIE*, 4568:293–303, 2001.
- [Bru00] H. Van Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, G. Reinhart, N. Roth, M. Weck, and E. Zussman. Assembly of microsystems. *Annals of the CIRP*, 49(2):451–472, 2000.
- [Car00] M.C. Carroza, A. Eisinberg, A. Mencias, D. Campolo, S. Micera, and P. Dario. Toward a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10:271–276, 2000.
- [Cho99a] S. W. Choi, Y. J. Choi, and S. Kim. Using a compliant wrist for teleoperated robot. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 585–589, 1999.
- [Cho99b] S. Koelemeijer Chollet and J. Jacot. Cost efficient assembly of microsystems. *mst news*, 9(1):30–32, 1999.
- [Cho01] K. B. Choi, S. H. Kim, and B. W. Choi. Moving-magnet type precision miniature platform for fine positioning and compliant motion. *Mechatronics*, 11:921–937, 2001.
- [Cho03] S. Koelemeijer Chollet, F. Bourgeois, and J. Jacot. Economical justification of flexible microassembly cells. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 48–53, Besançon, France, July 2003.
- [Clé02] C. Clévy. Etude et réalisation d'un micromanipulateur piézoélectrique monolithique permettant les changements d'outils. Mémoire de DEA, Université de Franche-Comté, Laboratoire d'Automatique de Besançon, 2002.
- [Clé02] C. Clévy, J. Agnus, and N. Chaillet. Micro-robot On Chip (MOC): vers la micro-usine flexible. *LEA d'Arc et Senans*, Septembre 2002.
- [Clé04a] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus, and N. Chaillet. A micromanipulation cell including a microtools changer. In *International Workshop on Microfactories*, pages 166–169, Shanghai, China, October 2004.
- [Clé04b] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus, and N. Chaillet. Station de micromanipulation équipée d'un changeur d'outils. *LEA d'Arc et Senans*, Septembre 2004.

- [Clé04c] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Changeur d'outils pour station de micromanipulation. *RTP microrobotique*, Décembre 2004.
- [Clé04d] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. A new micro-tools exchange principle for micromanipulation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, September 2004.
- [Clé05] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus, and N. Chaillet. A micromanipulation cell including a tool changer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15:292–301, September 2005.
- [Cog02] P. Cognard. Collage des matériaux - mécanismes. classification des colles. Dans les *Techniques de l'ingénieur*, 2002.
- [Cog04] P. Cognard. Colles et adhésifs pour emballages - généralités. Dans les *Techniques de l'ingénieur*, 2004.
- [Coh98] M. B. Cohn, K. F. Bohringer, J. M. Noworolski, A. Singh, C. G. Keller, K. Y. Goldberg, and R. T. Howe. Microassembly technologies for mems. In *Proceeding of SPIE Micromachining and Microfabrication*, 1998.
- [Cug02a] O. Cugat. *Micro-actionneurs électroactifs*. Hermès, 2002.
- [Cug02b] O. Cugat. *Micro-actionneurs électromagnétiques MAGMAS*. Hermès, 2002.
- [Daf04] M. Dafflon, T. Wimbock, J.P. Bacher, and R. Clavel. Analyse et caractéristique du système de vision d'une plateforme de micromanipulation. In *RTP microrobotique*, Lausanne, Suisse, Décembre 2004.
- [Dai00] J. S. Dai and D. R. Kerr. A six-component contact force measurement device based on the Stewart platform. *Instn Mech Engrs*, 214(C):687–697, 2000.
- [Dal05] K. A. Daltorio, A. D. Horchler, S. Gorb, R. E. Ritzmann, and R. D. Quinn. A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4018–23, 2005.
- [Das00] B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya. The Stewart platform manipulator: a review. *Mechanism and Machine Theory*, 35(1):15–40, 2000.
- [Dec03a] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and J. K. Mills. Construction of a 3d mems microcoil using sequential robotic microassembly operations. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and R&D expo*, Washington D.C., USA, November 2003.
- [Dec03b] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and J. K. Mills. Microassembly of 3-d mems structures utilizing a mems microgripper with a robotic manipulator. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3193–3199, Taipei, Taiwan, September 2003.
- [Dec04a] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and J. K. Mills. Microassembly of 3-d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2):176–189, April 2004.
- [Dec04b] N. Dechev, W. L. Clerghorn, and J. K. Mills. Tether and joint design for micro-components used in microassembly of 3d microstructures. In *SPIE Micromachining and Microfabrication, Photonics West*, San Jose, USA, January 2004.
- [Dio05] F. Dionnet. Télé-micro-manipulation par adhésion. Thèse de doctorat, Université Paris 6-Pierre et Marie Curie, 2005.

- [Dri05a] M. Driesen, T. Varidel, S. Regnier, and J. M. Breguet. Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15:259–267, 2005.
- [Dri05b] W. Driesen et al. Micron: Small autonomous robot for cell manipulation application. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 856–861, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Ebe98] R. Eberhardt, T. Scheller, G. Tittelbach, and V. Guyenot. Automated assembly of micro-optical components. *SPIE*, 3202:117–127, 1998.
- [Ehr01] W. Ehrfeld, M. Begemann, U. Berg, A. Lohf, F. Michel, and M. Nienhaus. Highly parallel mass fabrication and assembly of microdevices. *Microsystem Technologies*, 7:145–150, 2001.
- [Eyg97] B. Eyglument. *Manuel de thermique : théorie et pratique*. Hermès, 2ième edition, 1997.
- [Fat00] S. Fatikow, J. Seyfried, S. Fahlbusch, A. Buerkle, and F. Schmoeckel. A flexible microrobot-based microassembly station. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 27(1-2):135 – 169, January 2000.
- [Fat04] S. Fatikow, A. Kortschack, H. Hudson, T. Sievers, and T. Wich. Towards fully automated microhandling. In *International Workshop on Microfactories*, pages 34–39, Shanghai, China, 2004.
- [Fea95] R. S. Fearing. Survey of sticking effects for micro parts handling. In *International workshop on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburg, USA, 1995.
- [Fed98] J. T. Feddema and R. W. Simon. Visual servoing and cad-drivent microassembly. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pages 18–24, December 1998.
- [Fer03] A. Ferreira. Strategies of human-robot interaction for automatic microassembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3076–3081, Tapei, Taiwan, September 2003.
- [Fis98] R Fischer, D Zuhlke, and J Hanks. Gripping technology for automated microassembly. *SPIE*, 3202(Microrobotics and Microsystem Fabrication):12–19, 1998.
- [Fla94] J. M. Flaus. *La régulation industrielle*. Régulateurs PID, prédictifs et flous. Hermès, 1994.
- [Fun02] C. K. M. Fung, I. Elhajj, W. J. Li, and N. Xi. A 2-d pvdf force sensing system for micro-manipulation and micro-assembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1489–94, Washington DC, USA, May 2002.
- [Fur99] K. Furuta. Experimental processing and assembling system (microfactory). In *The fifth International Micromachine Symposium*, pages 173–177, Tokyo, Japan, October 1999.
- [Gai83] A. Gaillet and C. Reboulet. An isostatic six component force and torque sensor. In *13 th International Symposium on Industrial Robotics*, 1983.
- [Gar00] C. Gartner, V. Blumel, A. Kraplin, and T. Possner. Micro-assembly processes for beam transformation systems of high-power laser diode bars. *mst news*, 1:23–24, 2000.

- [Gau03] A. Gautier, F. Lamarque, C. Prelle, I. Garidi, L. Mialhe, and T. Restout. Machine d'alignement de plaques perforées. In *RTP microrobotique*, Bourges, France, Décembre 2003.
- [Gau04] T. Gaugel, M. Bengel, D. Malthan, J. Schliesser, J. Kegeler, and G. Munz. Miniaturized reconfigurable micro-assembly system. In *International Precision Assembly Seminar*, Bad Hofgastein, Austria, February 2004.
- [Gau05] M. Gauthier, B. Lopez-Walle, and C. Clévy. Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums. In *CIRA05*, Espoo, Finland, June 2005.
- [Gei03] A. K. Geim, S.V. Dubonos, I. V. Grigorieva, K. S. Novoselov, A. A. Zhukov, and S. Y. Shapoval. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Materials*, 2:461–463, June 2003.
- [Geo04] A. Georgiev, P. K. Allen, and W. Edstrom. Visually-guided protein crystal manipulation using micromachined silicon tools. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 236–241, Sendai, Japan, September 2004.
- [Had00] Y. Haddab. Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Laboratoire d'automatique de Besançon, 2000.
- [Hat90] Y. Hatamura and H. Morishita. Direct coupling between nanometer world and human world. In *MEMS*, pages 203–208, 1990.
- [Hat97] Y. Hatamura, M. Nakao, and T. Sato. Construction of an integrated manufacturing system for 3d microstructure-concept, design and realization. *Annals of the CIRP*, 46(1):313–318, 1997.
- [Her05] D. Heriban. Etude d'une stratégie de lâcher pour la micromanipulation : utilisation de la diélectrophorèse. Mémoire de Master Recherche, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques, 2005.
- [Hoh99] M. Hohn and C. Robl. Qualification of standard industrial robots for micro-assembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3085–90, Detroit, USA, May 1999.
- [Hui00] E. E. Hui, R. T. Howe, and M. S. Rodgers. Single-step assembly of complex 3-d microstructures. In *MEMS*, pages 602–607, Japan, 2000.
- [IMM] <http://www.imm-mainz.de/v0/vvseitene/vvleistung/getriebe.html>.
- [Inf] <http://www.infotech.oulu.fi/Annual/2002/OPME.html>.
- [Kas99] T. Kasaya, H. Miyazaki, S. Saito, and T. Sato. Micro object handling under sem by vision-based automatic control. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2189–2196, Detroit, USA, 1999.
- [Kim03] D. H. Kim, B. Kim, S. M. Kim, and H. Kang. Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1864–1869, October 2003.
- [Kle] <http://www.nanotechnik.com/mm3a.html>.

- [Kor05] P. Korhonen, Q. Zhou, J. Laitinen, and S. Sjøvall. Automatic dextrous handling of micro components using a 6 dof microgripper. In *CIRA*, 2005.
- [Koy96] K. Koyano and T. Sato. Micro object handling system with concentrated visual fields and new handling skills. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2541–2548, Minneapolis, USA, April 1996.
- [Kra04] B.E. Kratochvil, K.B. Yesin, V. Hess, and B.J. Nelson. Design of a visually guided 6 dof micromanipulator system for 3d assembly of hybrid mems. In *International Workshop on Microfactories*, pages 128–133, Shanghai, China, 2004.
- [Lam03] P. Lambert, P. Letier, and A. Delchambre. Capillary and surface tension forces in the manipulation of small parts. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, Besançon, France, July 2003.
- [Lam04] P. Lambert, V. Vandaele, and A. Delchambre. Non-contact handling in micro-assembly: state of the art. In *IPAS*, pages 67–76, Bad Hofgastein, Austria, February 2004.
- [Lam05] P. Lambert and A. Delchambre. Design rules for a capillary gripper in microassembly. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, Montréal, Canada, July 2005.
- [Lan93] Ioan Doré Landau. *Identification et commande des systèmes*. Traité des nouvelles technologies, série Automatique. Hermès, 1993.
- [Lee03] W. H. Lee, B. H. Kang, Y. S. Oh, H. Stephanou, A. C. Sanderson, G. Skidmore, and M. Ellis. Micropeg manipulation with compliant microgripper. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3213–3218, Tapei, Japan, 2003.
- [Lit04] P. De Lit, J. Agnus, C. Clévy, and N. Chaillet. A four-degree-of-freedom microprehensile microrobot on chip. *Assembly Automation*, 24(1):33–42, 2004.
- [Liu04] J. Liu, Y. X. Zhou, and T. H. Yu. Freeze tweezer to manipulate mini/micro objects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14:269–276, 2004.
- [Lju99] L. Ljung. *System identification, theory for user*. Prentice Hall PTR, 2nd edition, 1999.
- [Maz04] S. Mazerolle, R. Rabe, S. Fahlbusch, J. Michler, and J. M. Breguet. High precision robotics system for scanning electron microscopes. In *International Workshop on Microfactories*, 2004.
- [Men97] A. Menciassi, M. C. Carroza, C. Ristori, G. Tiezzi, and P. Dario. A workstation for micromanipulation of micro objects. In *ICAR*, pages 253–258, Monterey, USA, July 1997.
- [Men04] A. Menciassi, A. Eisenberg, I. Izzo, and P. Dario. From "macro" to "micro" manipulations: models and experiments. *ASME/IEEE Transaction on Mechatronics*, 9(2):311–319, 2004.
- [Mer97] J. P. Merlet. *Les robots parallèles*. Collection robotique. Hermès, 2ième edition, 1997.
- [Mil04] G. Milton, Y. Gharbia, and J. Katupitiya. Vision based ultra-precision centering of optical fibers for microlens fabrication. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3045–49, Sendai, Japan, October 2004.

- [Mit93] M. Mitsuishi, K. Kobayashi, T. Nagao, Y. Hatamura, T. Sato, and B. Kramer. Development of tele-operated micro-handling/machining system based on information transformation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1473–78, Yokohama, Japan, July 1993.
- [Miy97] H. Miyazaki and T. Sato. Mechanical assembly of three-dimensional microstructures from fine particles. *Advanced robotics*, 11(2):139–185, 1997.
- [Miy00a] H. Miyazaki, Y. Tomizawa, K. Koyano, T. Sato, and N. Shinya. Adhesion force measurement system for micro-objects in a scanning electron microscope. *Review of scientific instruments*, 71(8):3123–3131, august 2000.
- [Miy00b] H. Miyazaki, Y. Tomizawa, S. Saito, T. Sato, and N. Shinya. Adhesion of micrometer-sized polymer particles under a scanning electron microscope. *Journal of applied physics*, 88(6):3330–3340, september 2000.
- [Mor53] P. M. Morse and H. Feshbach. *Methods of theoretical physics*, volume 1. Mc Graw-Hill, 1953.
- [Mor93] H. Morishita and Y. Hatamura. Development of ultra precise micro manipulator system under stereo sem observation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1717–21, Yokohama, Japan, July 1993.
- [Nan] http://www.nanomotor.de/p_nanomotor.htm.
- [Ngu91a] C.C. Nguyen, S. S. Antrazi, and Z. L. Zhou. Analysis and implementation of a 6 dof steward platform-based force sensor for passive compliant robotic assembly. In *Proceeding of Southeastcon*, volume 2, pages 880–884, April 1991.
- [Ngu91b] C.C. Nguyen, Z. L. Zhou, S. S. Antrazi, and C. E. Campbell. Efficient computation of forward kinematics and jacobian matrix of a Stewart platform-based manipulator. In *Proceeding of Southeastcon*, 1991.
- [Nie98] M. Nienhaus, W. Ehrfeld, F. Michel, V. Greaff, and A. Wolf. Automatic microassembly of radar sensors for automotive applications. In *SPIE Conference on Micromachining and Microfabrication Process Technology IV*, volume 3511, pages 135–142, Santa Clara California, USA, September 1998.
- [Nie00a] M. Nienhaus, W. Ehrfeld, Y. Ansel, U. Berg, F. Schmitz, and M. Begemann. Strategies and new developments for automated microassembly. In *MICRONORA 2000*, pages 59–62, September 2000.
- [Nie00b] M. Nienhaus, W. Ehrfeld, U. Berg, F. Schmitz, and H. Soultan. Tools and methods for automated assembly of miniaturized gear systems. *SPIE*, 4194:33–43, 2000.
- [NOR] http://www.rfnorika.com/eng/system/sys_001.html.
- [Oha04] K. Ohara, K. Ohba, T. Tanikawa, M. Hiraki, S. Wakatsuki, and M. Mizukawa. Hands free micro operation for protein crystal analysis. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1728–33, Sendai, Japan, October 2004.
- [Ozi94] M. N. Ozisik. *Finite difference methods in heat transfert*. CRC Press, 1994.
- [Pei01] J. Peirs. *Design of micromechatronic systems: scalelaws, technologies, and medical applications*. PhD thesis, K.U.Leuven Dept. of Mech. Eng., Leuven, Belgium, 2001.

- [Per04] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. 2 dof piezoactuator for micromanipulation tasks. In *ACTUATOR*, pages 767–770, Bremen, Germany, June 2004.
- [Per05] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Modelling, fabrication and validation of a high performance 2 dof microgripper. *ASME/IEEE Transaction on Mechatronics*, 10(2), April 2005.
- [Pop02a] D. Popa, G. Hun Kang, J. Sin, and J. Zou. Reconfigurable micro-assembly system for photonics applications. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1495–1500, Washington DC, USA, May 2002.
- [Pop02b] D. O. Popa and H. E. Stephanou. Micro and meso scale robotic assembly. Technical report (Zyvex company), 2002.
- [Rak04] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, and F. Lutz. Modular and re-organisable micromanipulation station. In *RTP Microrobotique*, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [Ral00] S. J. Ralis, B. Vikramaditya, and B. J. Nelson. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies. *IEEE Transaction on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(2):123–131, 2000.
- [Rei97] G. Reinhart and M. Hohn. Growth into miniaturisation - flexible microassembly automation. *Annals of the CIRP*, 46(1):7–10, 1997.
- [Ros05] A. Rosenthal and J. Voldman. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning. *Biophysical Journal*, 88, 2005.
- [Rou05] P. Rougeot, S. Régnier, and N. Chaillet. Forces analysis for micro-manipulation. In *CIRA*, 2005.
- [Sai99] S. Saito, H. Miyazaki, and T. Sato. Pick and place operation of a micro object with high reliability and precision based on micro physics under sem. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2736–2743, Detroit Michigan, USA, May 1999.
- [Sai02] S. Saito, H. T. Miyazaki, and T. Sato. Micro-object pick and place operation under sem based on micro-physics. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 14(3):227–237, 2002.
- [Sat93] T. Sato, K. Koyano, M. Nakao, and Y. Hatamura. Novel manipulator for micro object handling as interface between micro and human worlds. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1674–81, Yokohama, Japan, July 1993.
- [Sav04] M. Savia, Q. Zhou, and H. N. Koivo. Simulating adhesion forces between arbitrarily shaped objects in micro/nano-handling operations. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1722–1727, Sendai, Japan, September 2004.
- [Sch01] F. Schmoeckel and H. Worn. Remotely controllable mobile microrobots acting as nano positioners and intelligent tweezers in scanning electron microscopes (sems). In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3909–3913, Seoul, Korea, May 2001.
- [She04] Y. Shen, N. Xi, U. C. Wejinya, and W. J. Li. High sensitive 2-d force sensor for assembly of surface mems devices. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3363–3368, Sendai, Japan, September 2004.

- [Shi00] E. Shimada, J.A. Thompson, J. Yan, R. Wood, and R.S. Fearing. Prototyping milli-robots using dextrous microassembly and folding. In *ASME IMECE/DSCD*, pages 1–8, Orlando, USA, November 2000.
- [Sit02] M. Sitti and R.S. Fearing. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs. In *2nd Conference on Nanotechnology*, Washington D.C., USA, August 2002.
- [Sit03] M. Sitti and R. S. Fearing. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1164–1170, Tapei, Japan, September 2003.
- [Ski00] G. D. Skidmore, M. Ellis, E. Parker, N. Sarkar, and R. Merkle. Micro assembly for top down nanotechnology. In *International symposium on Mechatronics and human science*, pages 3–9, Nagoya, Japan, 2000.
- [Smi89] J. G Smits and S. I. Dalke. The constituent equations of piézoelctric bimorphs. In *International Ultrasonic Symposium*, pages 781–784, 1989.
- [Ste65] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. *Proc. of Institute of Mechanical Engineers*, 180(15-1):371–386, 1965.
- [Sun05] L. Sun, H. Xie, and L. Chen. Task-reconfigurable system for mems assembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 844–848, Barcelona, Spain, April 2005.
- [Taf05] A. Tafazzoli, C. Pawashe, and M. Sitti. Atomic force microscope based two-dimensional assembly of micro/nanoparticles. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, Montréal, Canada, July 2005.
- [Tan99a] T. Tanikawa and T. Arai. Development of a micro-manipulation system having a two-fingered micro-hand. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 15(1):152–162, Feb 1999.
- [Tan99b] T. Tanikawa, T. Arai, and N. Koyachi. Development of small-sized 3 dof finger module in micro hand for micro manipulation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 876–881, 1999.
- [Tan01a] M. Tanaka. Development of desktop machining microfactory. *RIKEN Review : Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Techniques*, 34:46–49, 2001.
- [Tan01b] T. Tanikawa, M. Kawai, N. Koyachi, T. Arai, T. Ide, S. Kaneko, R. Ohta, and T. Hirose. Force control system for autonomous micro manipulation. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 610–615, Seoul, Korea, May 2001.
- [Thé99] S. Théoleyre. Techniques de coupure en moyenne tension. Dans *les Techniques de l’ingénieur*, 1999.
- [Tho01] J.A Thompson and R.S. Fearing. Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui HI, 2001.
- [Tic04] M. Tichem, D. Lang, and B. Karpuschewski. A classification scheme for quantitative analysis of micro-grip principles. *Assembly Automation*, 24(1):88–93, 2004.
- [Tsu04] K. Tsui, A. A. Geisberger, M. Ellis, and G. Skidmore. Micromachined end-effector and techniques for directed mems assembly. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14:542–549, 2004.

- [Ude05] T. Udeshi and K. Tsui. Assembly sequence planning for automated micro assembly. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, 2005.
- [Wat04] T. Watanabe, N. Fujino, and Z. Jiang. Micromanipulation using squeeze effect. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3357–62, Sendai, Japan, September 2004.
- [Wec03] M. Weck and C. Peschke. Assembling hybrid microsystems. IAP Workshop-Advanced Mechatronic Systems-Louvain la Neuve, October 2003.
- [Wec04] M. Weck and C. Peschke. Equipment technology for flexible and automated micro-assembly. *Microsystem Technologies*, 10(3):241–246, 2004.
- [Whi02] G. M. Whitesides and B. Grzybowski. Self-assembly at all scale. *Science*, 295:2418–21, 2002.
- [Win04] B. Winzek, S. Schmitz, and T. Sterzl. Microgrippers with shape memory thin film actuators. In *IPAS*, pages 77–84, Bad Hofgastein, Austria, February 2004.
- [Yam01] Y. Yamamoto, T. Hashimoto, T. Okubo, and T. Itoh. Task analysis of ultra-precision assembly processes for automation of human skills. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2093–2098, Maui, USA, October 2001.
- [Yam03] Y. Yamamoto, R. Konishi, Y. Negishi, and T. Kawakami. Prototyping ubiquitous micro-manipulation system. In *International Conference on Advanced Mechatronics*, pages 709–714, 2003.
- [Yan01] G. Yang, J. A. Gaines, and B. J. Nelson. A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3d microassembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 133–138, Seoul, Korea, May 2001.
- [Yan03] G. Yang, J. A. Gaines, and B. J. Nelson. A supervisory wafer-level 3d microassembly system for hybrid mems fabrication. *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, 37:43–68, 2003.
- [Zan04] H. Zang, Y. Bellouard, E. Burel, R. Clavel, A. N. Poo, and D. W. Huttmacher. Shape memory alloy microgripper for robotic microassembly of tissue engineering scaffolds. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 4918–4924, New Orleans, USA, April 2004.
- [Zes97] W. Zesch, M. Brunner, and A. Weber. Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1761–66, April 1997.
- [Zho98] Y. Zhou, B. J. Nelson, and B. Vikramaditya. Fusing force and vision feedback for micromanipulation. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1220–1225, Leuven, Belgium, May 1998.
- [Zho99] Y. Zhou and B. J. Nelson. Force controlled microgripping. In *SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly*, pages 211–221, Boston, USA, September 1999.
- [Zho00] Y. Zhou and B. J. Nelson. The effect of material properties and gripping force on micrograsping. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1115–1120, San Francisco CA, USA, April 2000.

- [Zho04] Q. Zhou, A. Aurelian, B. Chang, C. Del Corral, and H. N. Koivo. Microassembly system with controlled environment. *Journal of Micromechatronics*, 2(3-4):227–248, 2004.
- [Zuh96] D. Zuhlke, R. Fisher, and J. Hanks. Schrittweise in die automatisierte mikromontage. *G & M*, 104(9):627–630, 1996.

Résumé

Les tâches de saisie, de manipulation et d'assemblage d'objets de très petites dimensions sont parmi les thèmes majeurs en micro-robotique. La "micromanipulation" s'adresse d'une manière générale à la manipulation d'objets de dimensions globalement comprises entre 1 μm et 1 mm et requiert une résolution de positionnement en rapport avec ces dimensions. Le micro-assemblage consiste à réaliser une séquence d'opérations élémentaires conduisant à l'obtention de micro-composants constitués de différentes pièces. La manipulation de chacune de ces pièces nécessite d'utiliser des effecteurs dédiés, adaptés à leurs particularités (géométrie, dimensions, propriétés mécaniques). Différents types d'outils doivent ainsi être utilisés séquentiellement pour réaliser un micro-assemblage.

Dans ce but, une station de micromanipulation a été réalisée. Elle est composée d'une micropince montée sur un manipulateur à trois degrés de liberté. Un système permettant de changer automatiquement l'extrémité de la micropince (i.e. les outils) a plus particulièrement été étudié et réalisé. Il permet de fixer alternativement les outils à l'actionneur de la micropince ou à un magasin en utilisant une colle thermique. Celle-ci est liquéfiée par chauffage ou solidifiée par refroidissement.

Ce système de changement d'outils apporte une flexibilité notablement accrue à la station de micromanipulation et permet de réaliser des opérations de micro-assemblage dans des espaces restreints comme par exemple la chambre d'un microscope électronique à balayage. Un plan de travail compliant a également été réalisé. Il permet de limiter les efforts en jeu pendant les opérations de micromanipulation et d'améliorer ainsi le taux de réussite des opérations délicates.

Mots-clés : micromanipulation, micro-assemblage, changement d'outils, automatisation, flexibilité, micro-usine, microscope électronique à balayage.

Abstract

Micromanipulation tasks, transfer and assembly of very small objects are among the main issues of micro-robotics. Micromanipulation deals with the manipulation of objects with 1 μm to 1 mm in size and requires a positioning accuracy in regard with the considered dimensions. Micro-assembly consists in a sequence of elementary tasks leading to the production of micro-components composed of single parts. Manipulating each of these parts requires to use dedicated effectors, adapted to their particularities (geometry, dimensions, mechanical properties). To perform a micro-assembly process, several different tools have to be used successively.

In this aim, a micromanipulation station has been developed. It is composed of a microgripper fixed at the tip of a three degrees of freedom manipulator. A new system allowing the exchange of the tip part of the microgripper (i.e. the tools) has particularly been studied and designed. This system enables to fix alternatively the tools either at the tip of the actuator of the microgripper or in a magazine. The principle of this system is based on the use of a thermal glue that can be liquefied by heating or solidified by cooling down.

This tool changer brings flexibility to the micromanipulation station and enables to perform micro-assembly tasks in confined spaces such as in the vacuum chamber of a scanning electron microscope. A compliant work plane has also been designed to reduce competing forces during micromanipulation tasks. It also permits to increase the chances of success for delicate operations.

Keywords: micromanipulation, micro-assembly, tool changer, automation, flexibility, micro-factory, scanning electron microscope.