HAL
open science

Contribution à la conception et à la commande des systèmes micromécatroniques.- Amélioration des performances par la conception et la commande -

Yassine Haddab

▶ **To cite this version:**

Yassine Haddab. Contribution à la conception et à la commande des systèmes micromécatroniques.- Amélioration des performances par la conception et la commande -. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Franche-Comté, 2012. tel-01088282

HAL Id: tel-01088282

https://hal.science/tel-01088282v1

Submitted on 5 Dec 2014

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.

Habilitation à diriger des recherches

Yassine Haddab

Ingénieur en électronique et automatique
DEA en informatique, automatique et productique
Docteur de l'Université de Franche-Comté

Maître de Conférences à l'ENSMM (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques) de Besançon

Contribution à la conception et à la commande des systèmes micromécatroniques

- Amélioration des performances par la conception et la commande -

Université de Franche-Comté

Jury :

Hannes Bleuler	Professeur à l'EPFL, Lausanne.
Nicolas Chaillet	Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon.
Franck Chollet	Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon.
Philippe Lutz	Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon.
Michel de Mathelin	Professeur à Télécom Physique Strasbourg, Strasbourg. (rapporteur)
Philippe Poignet	Professeur à l'Université de Montpellier 2. Montpellier. (rapporteur)
Stéphane Régnier	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris. (rapporteur)
Alina Voda	Maître de conférences HDR à Polytech Grenoble, UJF, Grenoble.

Décembre 2012

Sommaire

1 INTRODUCTION 9

2 CURRICULUM VITÆ ET PRESENTATION 11

2.1 SITUATION ACTUELLE 11
2.2 PARCOURS UNIVERSITAIRE 11
2.3 RESUME DE LA THESE DE DOCTORAT 12
2.4 PARCOURS PROFESSIONNEL 13
2.5 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT 13
2.6 ACTIVITES D'ENCADREMENT 15
2.6.1 Thèses de doctorat soutenues 15
2.6.2 Thèses de doctorat en cours 15
2.6.3 Post-doctorants 16
2.6.4 Stages de Master 16
2.6.5 Encadrement de stagiaires de la TDU (Tokyo Denki University) 16
2.7 PARTICIPATION A DES PROJETS DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX 17
2.8 REVIEWS ET EXPERTISES SCIENTIFIQUES 17
2.9 RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES ET ADMINISTRATIVES 17
2.10 ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES 18
2.11 COLLABORATIONS INTERNATIONALES 19
2.12 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES 20

3 CONTEXTE ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE 21

3.1 CONTEXTE GENERAL 21
3.2 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX DE RECHERCHE 21
3.2.1 Environnement de la thèse de doctorat 21
3.2.2 L'équipe micro-usine 22
3.2.3 L'équipe SAMMI 24
3.2.4 L'équipe CODE 25
3.3 LA PLURIDISCIPLINARITE 26
3.4 LES MEMS : MOYEN DE MICROFABRICATION ET CHAMP APPLICATIF 26
3.4.1 Bref historique des MEMS 27
3.4.2 Les MEMS en tant que moyen pour la réalisation de microrobots 28
3.4.3 Les MEMS en tant que champ applicatif pour la microrobotique 29
3.5 ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET INTERACTIONS AVEC LA RECHERCHE 31
3.6 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE 31

4 STRUCTURATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE 35

4.1 INTRODUCTION 35
4.2 CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES MICROMECATRONIQUES 35
4.2.1 Microrobots et systèmes micromécatroniques 35
4.2.2 Spécificités de la commande dans le micromonde 37
4.2.3 Approches de commande dans le micromonde 38
4.3 TRAVAUX DE RECHERCHE REALISES 40
4.3.1 Organisation de mes travaux de recherche 40
4.3.2 Travaux en conception 42
4.3.3 Travaux en commande 57

5 LA MICROROBOTIQUE NUMERIQUE 81

5.1 INTRODUCTION 81
5.2 FONDEMENTS DE LA MICROROBOTIQUE NUMERIQUE 82
5.2.1 Module mécanique bistable 83
5.2.2 Axe de robot utilisant des modules mécaniques bistables 83
5.2.3 Microrobots numériques 84
5.3 POSITIONNEMENT DE LA MICROROBOTIQUE NUMERIQUE PAR RAPPORT AUX MICROROBOTS ACTUELS 85
5.4 CONCEPTION ET CARACTERISATION DE MODULES MECANIQUES BISTABLES 86
5.4.1 Conception d'un module bistable pour la microrobotique 86
5.4.2 Caractéristiques dynamiques des modules bistables 89

5.4.3 Elaboration d'une stratégie de commande ... *91*
5.5 MICROROBOTS NUMERIQUES POUR LE MICROPOSITIONNEMENT PRECIS ... 92
5.5.1 Structure du microrobot DiMiBot ... *93*
5.5.2 Modélisation du microrobot DiMiBot ... *94*
5.6 CONCLUSION ... 98

6 ANALYSE DES BRUITS DANS LES MICROSYSTEMES ... 99

6.1 INTRODUCTION ... 99
6.2 PRISE EN COMPTE DES BRUITS PAR UNE APPROCHE GLOBALE ... 100
6.2.1 Mesure de micro-forces par jauges d'extensométrie embarquées ... *101*
6.2.2 Amélioration des performances de commande en position et en force ... *106*
6.3 ANALYSE DES BRUITS PREPONDERANTS DANS LE MICROMONDE ... 108
6.3.1 Principales sources de bruit affectant les microsystèmes ... *109*
6.3.2 Analyse des bruits sur des poutres centimétriques ... *111*
6.3.3 Analyse des bruits sur des poutres submillimétriques ... *115*
6.4 ESSAI DE REPRESENTATION DES NIVEAUX DE BRUIT EN FONCTION DES DIMENSIONS DES MICROSYSTEMES 116
6.5 CONCLUSION ... 117

7 PERSPECTIVES ... 119

7.1 APPROCHE MICROROBOTIQUE PLURIDISCIPLINAIRE POUR LA NANOMANIPULATION ... 120
7.2 DEVELOPPEMENTS FUTURS POUR LA MICROROBOTIQUE NUMERIQUE ... 121
7.3 CONCEPTS NOUVEAUX POUR LES MICROSYSTEMES NOMADES ... 122
7.4 AUTRES PERSPECTIVES ... 122

8 CONCLUSION ... 125

9 BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE ... 127

10 BIBLIOGRAPHIE GENERALE ... 131

Table des illustrations

Fig. 1. Station de micromanipulation réalisée durant la thèse de doctorat. 22
Fig. 2. Prototypes de micro-usines réalisées au Japon : micro-usine de bureau développée au MEL (à gauche) et station d'assemblage de microsystèmes optiques d'Olympus Optical (à droite). 23
Fig. 3. Fonctions essentielles d'un microsystème idéal. 26
Fig. 4. Un microprocesseur (à gauche) assurant des fonctions de calcul et de stockage de données et un microrobot numérique (MEMS) permettant d'effectuer des fonctions de positionnement mécanique précis à partir d'un actionnement électro-thermo-mécanique. 27
Fig. 5. Exemples de systèmes microrobotiques réalisés en technologie MEMS. 28
Fig. 6. Chronologie des problématiques en conception et en production de MEMS (source MANCEF). 29
Fig. 7. Prévisions globales du marché mondial des MEMS (source MANCEF). 30
Fig. 8. Positionnement de mes travaux en termes de performance des microsystèmes illustré sur la précision de positionnement. 32
Fig. 9. Effet de la réduction des dimensions sur les forces volumiques et surfaciques. 36
Fig. 10. Anatomie d'une rétroaction dans le micromonde. 37
Fig. 11. Micropince comportant des organes terminaux en aluminium. 38
Fig. 12. Stratégies de commande dans le micromonde. 39
Fig. 13. Organisation des travaux de recherche menés en conception et en commande des microsystèmes. 40
Fig. 14. Principaux démonstrateurs réalisés dans le cadre de mes travaux de recherche et d'encadrement. 42
Fig. 15. Formes d'organes terminaux de micropinces permettant d'accroître la plage de dimensions des micro-objets manipulés. 43
Fig. 16. Station de micromanipulation équipée d'un système de changement d'outil. 43
Fig. 17. Principe de fonctionnement d'actionneurs en mode stick-slip. 44
Fig. 18. Exemples de systèmes exploitant le principe stick-slip : robot MINIMAN [83] et micromanipulateur MM3A-EM (© Kleindiek Nanotechnik). 44
Fig. 19. Structure du TRING-module : (a) vue générale, (b) actionneurs utilisés et (c) vue du module en appui sur un tube en verre. 45
Fig. 20. Station de micromanipulation à 6 ddl comportant deux TRING-modules et deux poutres piézoélectriques. 45
Fig. 21. Schéma de la commande U/F développée et performances obtenues pour une consigne de 10 μm. 46
Fig. 22. Résultat expérimental de l'asservissement de la position x du TRING-module en mode sous-pas. 48
Fig. 23. Structure du système de convoyage réalisé. 49
Fig. 24. Représentation d'un micro-objet posé sur la partie mobile déplacée par un stack piézoélectrique. 49
Fig. 25. Réponse du système de convoyage lorsque l'actionneur piézoélectrique est soumis à un échelon de tension électrique de 100V. 51
Fig. 26. Principe de la commande en boucle ouverte par modelage de l'entrée (input shaping)....51
Fig. 27. Comparaison des réponses expérimentales en position de la partie mobile sans et avec utilisation du modelage de l'entrée. 51
Fig. 28. Contact entre deux surfaces à l'échelle microscopique. 52
Fig. 29. Représentation de deux surfaces rugueuses en contact selon Greenwood-Williamson. ...53
Fig. 30. Représentation des supports utilisés. 53
Fig. 31. Topographie d'une surface de silicium obtenue par AFM (Atomic Force Microscope)...54
Fig. 32. (a) - position standard d'une tête d'AFM, (b) - position verticale utilisée pour la mesure des forces de friction. 54

Fig. 33. Station de mesure des forces de friction à l'aide d'un AFM (à gauche) et relevé de la force mesurée sur un micro-objet de 300×300 μm^2 (à droite). 55
Fig. 34. Station réalisée pour le convoyage de micro-composants par sservissement visuel. 56
Fig. 35. Convoyage d'un micro-composant de 300×300 μm^2 par effet inertiel et asservissement visuel. 56
Fig. 36. Structure et fonctionnement d'un bilame piézoélectrique. 57
Fig. 37. Réponse indicielle de l'actionneur piézoélectrique. 58
Fig. 38. Réponses indicielles des modèles G_n, G_1 et G_2. 59
Fig. 39. Diagrammes de Bode des modèles G_n, G_1 et G_2. 60
Fig. 40. Schéma d'asservissement utilisé. 60
Fig. 41. Structure de synthèse multi-objectif employée. 61
Fig. 42. Forme standard du système bouclé augmenté des fonctions de pondération. 61
Fig. 43. Les différents transferts utilisés. 63
Fig. 44. Représentation des incertitudes du modèle. 64
Fig. 45. (a) - asservissement d'un système avec incertitudes, (b) - schéma équivalent. 64
Fig. 46. Choix de la fonction de pondération W_1 définissant les performances du système. 65
Fig. 47. Choix de la fonction de pondération W_3 permettant de garantir la stabilité robuste et comparaison avec les écarts des modèles extrêmes par rapport au modèle nominal. 66
Fig. 48. Réponses indicielles des trois systèmes bouclés. 67
Fig. 49 Signaux de commande des trois systèmes bouclés. 67
Fig. 50. Approximation de l'hystérésis par un ensemble de segments de droites en vue de la synthèse d'un correcteur robuste. (a) - approximation pluri-linéaire, (b) - approximation quadrilatérale. 68
Fig. 51. Emploi d'une jauge d'extensométrie pour la mesure de la force appliquée sur une poutre. 70
Fig. 52. Signaux d'entrée/sortie associés à la poutre. 70
Fig. 53. Réponse du système à l'application d'un échelon de tension de 15 V mesurée à l'aide d'un capteur optique par triangulation. 71
Fig. 54. Chaîne utilisée pour la mesure à l'aide de jauges. 71
Fig. 55. Tension fournie par le capteur à jauges embarquées en réponse à l'application d'un échelon de tension de 15 V. 72
Fig. 56. Filtrage temps réel du signal issu du capteur à jauges à l'aide d'un algorithme de Kalman. 72
Fig. 57. Représentation de l'ADN par James Watson et Francis Crick en 1953. 73
Fig. 58. Nanotweezers réalisé à l'Université de Tokyo. (a) structure générale et constitution, (b) photographie d'un prototype microfabriqué et (c) structure des actionneurs électrostatiques à peignes inter-digités utilisés (comb-drives). 74
Fig. 59. Photographie d'un bundle d'ADN maintenu entre les deux doigts du nanotweezers. 75
Fig. 60. Détection de la variation de la fréquence de résonance à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL). 75
Fig. 61. Modèle de l'ensemble pince-bundle d'ADN. 76
Fig. 62. Diminution de la fréquence de résonance grâce à un retour d'état avec observateur. 77
Fig. 63. Variation de la fréquence de résonance en boucle ouverte et en boucle fermée pour une même variation de raideur. 78
Fig. 64. Station à surface active pour le transport d'objets. 79
Fig. 65. Exemples d'architectures de microrobots. 82
Fig. 66. Principe d'un module mécanique bistable. 83
Fig. 67. Axe de robot sériel utilisant 5 modules bistables. 84
Fig. 68. Exemples d'architectures de microrobots numériques. 84

Fig. 69. Vue générale d'un module bistable développé pour la microrobotique. (a) - module bistable, (b) - mécanisme bistable, (c) - actionneur thermique, (d) - stop block 1 et (e) - stop block 2.....87
Fig. 70. Image MEB d'un module bistable avant activation et après activation. 88
Fig. 71. Détail du bloc d'arrêt 2 après activation. Le module est dans sa position stable 1. 88
Fig. 72. Caractéristique force-position de l'un des modules bistables réalisés. 89
Fig. 73. Principe de mesure pour l'analyse du comportement dynamique des modules bistables. 90
Fig. 74. Transition de la position stable 1 à la position stable 2. 90
Fig. 75. Transition de la position stable 2 à la position stable 1. 91
Fig. 76. Chronogramme des tensions appliquées pour la stratégie de commande en boucle ouverte. 92
Fig. 77. Comparaison des résultats obtenus sans et avec stratégie de commande.....92
Fig. 78. Un microrobot DiMiBot à 4 modules bistables. 93
Fig. 79. Architecture du microrobot : modèle cinématique (à gauche) et représentation CAO (à droite). 94
Fig. 80. Structure élémentaire composée d'un module bistable et de deux poutres (AB et BC)....94
Fig. 81. Espace atteignable théorique d'un DiMiBot (a) - à 4 modules bistables et (b) - à 6 modules bistables.....95
Fig. 82. Analyse de la répétabilité du DiMiBot à 4 modules bistables à l'aide d'un MEMS Analyzer. Espace atteignable (à gauche) et MSA-500 (à droite). 97
Fig. 83. Manipulation par poussée d'une bille de 150 μm de diamètre à l'aide d'un DiMiBot. Trajectoire de l'organe terminal (à gauche) et séquence de mots binaires de commande (à droite). 98
Fig. 84. Mesure de la position d'un doigt de micropince enserrant un micro-objet.....100
Fig. 85. Principe de la mesure de force par mesure d'un déplacement. 101
Fig. 86. Comparaison entre la réponse du système à l'application d'un échelon de tension de 15 V mesurée à l'aide d'un capteur optique par triangulation (à gauche) et la tension fournie par le dispositif de mesure à jauges intégrées pour un même signal d'excitation. 102
Fig. 87. Spectre du bruit de mesure. 103
Fig. 88. Dilemme mesure dynamique/filtrage du bruit. 103
Fig. 89. Principe du filtre de Kalman.....104
Fig. 90. Distribution du bruit de mesure.....104
Fig. 91. Comparaison entre les déplacements mesuré et estimé en régime statique. 105
Fig. 92. Comparaison entre les déplacements mesuré et estimé en régime dynamique.....105
Fig. 93. Micropince FTG-100 de la société FemtoTools [57]. 106
Fig. 94. Commande en force du serrage d'une bille en verre de 80 μm de diamètre. 107
Fig. 95. Comparaison entre la force mesurée par le système de mesure intégré à la micropince et la force filtrée pour une consigne de 10 μN. 108
Fig. 96. Transmission des mouvements du sol. 109
Fig. 97. Niveau en dB de bruits courants.....110
Fig. 98. Exemple de bruit thermique mesuré aux bornes d'une résistance.....111
Fig. 99. Poutres en aluminium fabriquées par électroérosion à fil. 112
Fig. 100. Station d'analyse du bruit acoustique à l'intérieur de la chambre anéchoïque de l'institut FEMTO-ST.....113
Fig. 101. Densités spectrales de puissance des vibrations mesurées à l'extrémité des poutres, sur table anti-vibration avec une faible activité humaine (30 dB). 114
Fig. 102. Leviers utilisés pour l'analyse des bruits à l'échelle submicrométrique (réf. CSC12 de MikroMasch Inc.). 115
Fig. 103. Tendances des effets des différents bruits dans les microsystèmes de type poutre. 116
Fig. 104. Microactionneur piézoélectrique par empilement P-249.20 (à droite) commercialisé par la société PI (Physik Instrumente). 119

Fig. 105. Exemples de nanocomposants : murs (échantillons) de 150 nm d'épaisseur (à gauche) et commutateur de courant continu à nanotubes de carbone (à droite). Source : LPN (Laboratoire de Photonique et de Nanostructures). 120
Fig. 106. Exemple de perspective à long terme de la microrobotique numérique. 121
Fig. 107. Principe d'un asservissement de position de l'extrémité d'une poutre à l'aide d'un correcteur mécanique microfabriqué : analyse du comparateur sous ANSYS (à gauche) et structure générale (à droite). 122

1 Introduction

Les micro- et nanotechnologies constituent des disciplines clés dans les sciences du XXIème siècle. Leurs développements requièrent la disponibilité de systèmes et d'outils capables d'effectuer des tâches de manipulation et de caractérisation à l'échelle submicrométrique. L'une des approches les plus pertinentes pour aborder cette problématique consiste à développer des systèmes micromécatroniques et plus particulièrement des systèmes microrobotiques. La microrobotique concerne la conception, la fabrication et la commande de systèmes capables d'exécuter des tâches robotisées, pour manipuler et caractériser des micro-objets ou des nano-objets [84].

Durant les deux dernières décennies, de nombreux projets de recherche ont été menés à travers le monde, pour le développement de microrobots. Les avancées en conception de nouveaux micro-actionneurs et en microfabrication ont permis d'accroître considérablement leurs précisions. Cependant, les exigences toujours plus fortes en termes de précision (nanométrique) et de fiabilité, requises notamment dans de nouvelles applications telles que la caractérisation de nanocomposants dans des environnements confinés (à l'intérieur d'un TEM[1] par exemple) font que l'optimisation de la structure mécanique seule est insuffisante. La recherche de performances ultimes requiert le développement de méthodes en rupture avec les pratiques courantes et tirant profit des différentes sciences mises en jeux dans les approches « système ».

Ce mémoire, rédigé en vue de l'obtention d'une Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), présente mes travaux de recherche et d'encadrement menés après l'obtention de mon doctorat. Ceux-ci concernent l'accroissement des performances des microsystèmes pour l'exécution de tâches microrobotiques de plus en plus précises et de plus en plus fiables. Cette problématique, fondamentalement pluridisciplinaire, est abordée selon deux orientations différentes et complémentaires : la conception de microrobots adaptés aux contraintes du micromonde (le monde des objets de taille micrométrique) et la commande des microsystèmes en tenant compte de leurs spécificités.

Si de nombreuses études ont porté sur la conception de micropréhenseurs et l'analyse de leurs interactions avec les micro-objets manipulés, peu de travaux ont eu pour but la conception de porteurs robotiques véritablement adaptés aux spécificités du micromonde. Dans ce cadre, une approche totalement nouvelle au niveau international pour la conception d'architectures de microrobots a été développée. Elle exploite, à la fois, les possibilités offertes par les technologies de microfabrication et la commande numérique en boucle ouverte, afin d'obtenir des microrobots de petite taille, capables d'intervenir dans des environnements confinés et caractérisés par un faible coût de fabrication et d'exploitation. Cette nouvelle approche nommée « microrobotique numérique » est fondée sur la conception et la réalisation de microrobots à partir de modules mécaniques bistables et de structures déformables. Elle représente un nouveau paradigme dans le domaine de la microrobotique autorisant la conception de nouvelles cinématiques adaptées au micromonde. D'autres travaux en conception de microsystèmes ont été réalisés pour remplir des fonctions essentielles dans une « micro-usine[2] ». Il s'agit des fonctions de manipulation et de convoyage de microcomposants. Ainsi, un système de micromanipulation à doigts indépendants exploitant le principe de l'actionnement stick-slip et un dispositif de convoyage à effet inertiel ont été conçus, modélisés et fabriqués. Ils ont notamment permis d'élargir considérablement la plage des dimensions des objets manipulés.

---

[1] TEM : Transmission Electron Microscope (Microscope Electronique en Transmission).
[2] Micro-usine : usine de petite taille permettant l'assemblage ou la fabrication de microsystèmes.

Mes travaux de recherche sont également focalisés sur la commande des microsystèmes. Dans ce cadre, des approches de commande robustes, fondées sur la norme H_∞, ont été mises en œuvre pour la prise en compte des incertitudes et des non-linéarités, très présentes à ces échelles dimensionnelles. Les résultats obtenus ont montré le potentiel important de l'emploi de correcteurs robustes dans le contexte des microsystèmes. Ces derniers représentent un champ applicatif nouveau pour la recherche en commande robuste. D'autre part, la quête de précisions ultimes m'a conduit à analyser les origines du bruit à l'échelle nanométrique et à prendre en compte leurs effets dans les lois de commande. Ces études ont permis notamment d'améliorer sensiblement les performances de micro-capteurs embarqués et d'accroître la résolution de mesure de raideurs dans des applications biologiques sur des molécules d'ADN.

Dans les microsystèmes, la validation des approches théoriques par des expérimentations est une absolue nécessité tant les aléas sont nombreux. La volonté permanente de mener mes travaux jusqu'à l'application et la mise en œuvre, peut être illustrée par les nombreux démonstrateurs technologiques réalisés dont certains sont décrits dans ce document.

Le premier chapitre regroupe mon curriculum vitæ, mes activités d'enseignement et d'encadrement, mes collaborations nationales et internationales ainsi que mes publications scientifiques.

Le deuxième chapitre décrit le contexte dans lequel se sont déroulés mes travaux de recherche et d'encadrement ainsi que mon positionnement scientifique.

Le troisième chapitre constitue le cœur de ce mémoire, car il décrit les différents travaux réalisés ainsi qu'une stratégie que je propose pour la commande des microsystèmes en fonction de leurs spécificités.

Parmi les différents travaux effectués, deux projets font, chacun, l'objet d'un chapitre entier illustrant mes activités en conception et en commande. J'ai choisi de les présenter de manière détaillée pour leurs caractères particulièrement innovants. Il s'agit de la microrobotique numérique et de l'analyse des bruits dans les microsystèmes qui sont décrits respectivement dans les chapitres quatre et cinq.

A la fin de ce mémoire sont présentées des perspectives à mes travaux et une conclusion résume les éléments pertinents de ces recherches.

2 Curriculum vitæ et présentation

L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière synthétique les principaux éléments de mon parcours professionnel et de décrire mes activités de recherche, d'enseignement et d'organisation de ma recherche. Mes implications dans les projets nationaux et internationaux ainsi que dans l'encadrement de doctorants et de stagiaires y sont également décrites.

2.1 Situation actuelle

Enseignant Maître de Conférences en 61ème section à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) de Besançon.

Chercheur Membre de l'Institut FEMTO-ST – département AS2M (Automatique et Systèmes MicroMécatroniques), UMR CNRS 6174, équipe CODE (COnception et commanDE des systèmes micromécatroniques).

2.2 Parcours universitaire

Décembre 2000 : Diplôme de Docteur de l'Université de Franche-Comté, spécialité Automatique et Informatique, mention Très Honorable avec les félicitations du jury. Titre : Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique. Directeurs de thèse : A. Bourjault et N. Chaillet.

Jury :
K. YOUCEF-TOUMI, Professeur, MIT Cambridge, Etats-Unis (Président)
M. de MATHELIN, Professeur, ENSPS, Université Louis Pasteur, Strasbourg (Rapporteur)
M. RICHETIN, Professeur, Université de Clermont-Ferrand (Rapporteur)
M. AROUS, Chef de projet Goodyear, Hysys Consulting, Lissieu
A. BOURJAULT, Professeur, ENSMM, Besançon
N. CHAILLET, Maître de Conférences, HDR, Université de Franche-Comté Besançon
F. MUNERATO Maître de Conférences, Université de Metz
N. PIAT, Professeur, ENSMM, Besançon

Juillet 1997 : Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Informatique, Automatique et Productique à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) de Besançon, option Microrobotique, obtenu avec la mention Très Bien (classé

1er). Thème du stage : conception et réalisation du système de commande d'un nanotranslateur piézoélectrique.

Juin 1996 : Diplôme d'Ingénieur d'Etat en électronique à l'Institut d'Electronique de l'Université de Tizi-Ouzou (Algérie), classé Major de la promotion. Thème du stage : étude et conception d'un logiciel de validation et de simulation de systèmes flexibles de production modélisés par réseaux de Petri.

2.3 Résumé de la thèse de doctorat

Intitulé : Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique.

Mes recherches doctorales ont été réalisées au sein du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB, UMR CNRS 6596) dans le contexte du pôle national « microrobotique » du CNRS.

Résumé : la micromanipulation constitue l'une des fonctions principales de la microrobotique. Elle concerne la manipulation d'objets dont la taille est comprise globalement entre 1 µm et 1 mm. La maîtrise de la manipulation d'objets à ces dimensions représente des enjeux stratégiques et économiques majeurs. La conception et la réalisation de micromanipulateurs se heurtent à de nombreuses difficultés liées, d'une part aux problèmes de fabrication et, d'autre part à la complexité des interactions qui se produisent à ces échelles dimensionnelles. Le travail mené dans le cadre de cette étude a consisté en la conception et la réalisation d'un nouveau système de micromanipulation constitué d'une micropince à actionneurs piézoélectriques et d'un micropositionneur utilisant des fils en alliage à mémoire de forme (AMF). La micropince, pour laquelle un modèle physique du comportement dynamique a été développé, est caractérisée par une résolution de positionnement de 10 nm, largement compatible avec l'exécution de tâches dans le micromonde[3]. Elle permet également la mesure ou l'estimation des forces exercées sur les objets manipulés. Cette propriété est particulièrement intéressante lorsqu'il s'agit de saisir des micro-objets fragiles (organismes biologiques, microcomposants optiques, électroniques...). Le micropositionneur réalisé est constitué d'une table de micropositionnement et d'un bras portant la micropince. Un micro-objet peut être déplacé dans un volume de 6 mm^3 avec une résolution de 1 µm. Plusieurs essais de micromanipulation ont été réalisés avec succès. Le système conçu est caractérisé par une grande simplicité de réalisation et par un coût extrêmement faible, ce qui permet d'envisager son utilisation dans des applications industrielles et biomédicales. Les travaux réalisés dans cette thèse ont nécessité une approche pluridisciplinaire. Ainsi, des structures micromécaniques ont été fabriquées pour obtenir une micropince à deux doigts de serrage et un micropositionneur 3D. Un modèle pour la commande d'unimorphes piézoélectriques a été établi et ses paramètres identifiés à l'aide d'instruments de mesure de haute précision. Une loi de commande fondée sur un asservissement numérique par retour d'état et sur un observateur de Luenberger a été élaborée et implémentée en temps réel. Enfin, le système a été validé par l'exécution de diverses tâches tenant compte des spécificités du micromonde.

Mots-clés : microrobotique, micromanipulation, micropince, piézoélectricité.

[3] Micromonde : le monde des objets de taille micrométrique.

2.4 Parcours professionnel

Depuis mon recrutement en tant que maître de conférences (septembre 2002), j'ai effectué mes travaux de recherche au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB UMR CNRS 6596) au sein de l'équipe micro-usine, puis dans l'équipe SAMMI (Système Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage). Cette dernière a été créée suite à la fusion entre les équipes « micro-usine » et « microrobotique et micromécatronique ». Le LAB est depuis le 1er janvier 2008 le département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) de l'institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174. Le 1er janvier 2012, une nouvelle restructuration du département AS2M a conduit à la création de nouvelles équipes. Depuis cette date, j'exerce mes activités de recherche au sein de l'équipe CODE (COnception et commanDE des systèmes micromécatroniques).

Depuis septembre 2003 : Maître de Conférences titulaire à l'ENSMM de Besançon.

Septembre 2002 : Maître de Conférences stagiaire à l'ENSMM de Besançon.

Septembre 2001 : ATER (poste complet) à l'Université de Franche-Comté.

Septembre 2000 : ATER (½ poste) à l'Université de Franche-Comté.

Sept. 1997 à déc. 2000 : préparation d'une thèse de doctorat à l'Université de Franche-Comté.

2.5 Activités d'enseignement

Mes activités d'enseignement concernent les domaines de l'automatique, de la robotique et de la microrobotique. Je suis responsable de deux modules d'enseignement à l'ENSMM dans la formation d'ingénieur. J'attache beaucoup d'importance au transfert des connaissances de la recherche vers l'enseignement. Dans ce cadre, j'ai mis en place à l'ENSMM un cours sur la commande robuste des systèmes micromécatroniques ainsi que sur les systèmes de micromanipulation. J'ai également réalisé des travaux pratiques sur la micromanipulation, en lien avec mes travaux de recherche.

Enseignement à l'ENSMM

Etant enseignant-chercheur à l'ENSMM, j'effectue la majorité de mon service d'enseignement dans cet établissement, au sein de l'équipe d'enseignement d'automatique. J'interviens principalement dans les modules suivants du cursus ingénieur :

- automatique, asservissements linéaires continus et échantillonnés (TD et TP),
- modélisation et commande par l'approche d'état (cours, TD et TP),
- commande robuste (cours, TD et TP),
- commande par microcontrôleur (cours, TD et TP),
- robotique industrielle (TP),
- module projet (cours et encadrement de projets).

Dans le cursus ingénieur, je suis responsable de deux modules :

- le module « commande par microcontrôleur » dont le but est de permettre aux élèves-ingénieurs d'acquérir les connaissances nécessaires à la synthèse de correcteurs numériques et à l'intégration des lois de commande dans des microcontrôleurs. Dans ce cadre, j'ai réalisé un cours complet, des travaux dirigés ainsi que des travaux pratiques de commande de systèmes mécatroniques.

- le module « projet » dans lequel les étudiants mettent en œuvre des connaissances pluridisciplinaires pour la résolution de problèmes de commande et l'implantation de correcteurs pour la commande de processus réels.

Par ailleurs, j'ai introduit un cours de commande robuste des systèmes micromécatroniques pour l'option mécatronique de l'ENSMM dans lequel les étudiants sont sensibilisés aux problèmes d'incertitudes et de sensibilité des microsystèmes à l'environnement. Des travaux pratiques inspirés de mes travaux de recherche permettent à l'étudiant de mettre en œuvre des outils et des méthodes de robustesse et de modélisation incertaine pour la commande robuste de microsystèmes tels que des bilames piézoélectriques.

Je contribue également à l'enseignement de l'automatique dans le Master européen EU4M (European Union Master's Course in Mechatronic and Micro-mechatronic Systems) ainsi qu'à l'encadrement de stagiaires.

Enseignement à l'Université de Franche-Comté

De septembre 2000 à août 2002, j'ai participé à l'enseignement de l'automatique à l'Université de Franche-Comté en tant que ATER (½ poste) puis en poste complet (depuis septembre 2001). Je suis intervenu dans la formation de Licence dans laquelle j'ai effectué des travaux pratiques d'automatique linéaire et non-linéaire ainsi qu'un cours sur la commande par l'approche d'état.

Je suis également intervenu, durant plusieurs années, en tant que vacataire dans le Master Mécatronique de l'UFC dans lequel je donnais un cours sur la micromanipulation. Celui-ci est fortement inspiré de mes travaux de recherche.

Participation à l'organisation d'une école d'été

J'ai participé à l'organisation de l'école d'été Highlights in Microtechnology 2009 (HIM, http://www.highlights-microtech.org/). Dans cette formation franco-suisse de niveau Master j'étais membre du comité scientifique, organisateur pour la partie française et intervenant en enseignement.

Autres activités pédagogiques

- Travaux pratiques sur la micromanipulation dans le cadre de l'école d'été HIM (Highlights in Microtechnology) en juin 2007, 2008 et 2009.

- Cours intitulé « introduction to control in the microworld » à l'école d'été « Summer school in Microrobotics and Self-assembly for hybrid MEMS » organisée dans le cadre du projet européen HYDROMEL, juin-juillet 2010.

- Cours « micromanipulation, perception et commande dans le micromonde » au centre Technifutur (centre de formation belge pour les entreprises) à Liège, octobre 2010.

- Publication d'un article de vulgarisation scientifique dans la collection des Techniques de l'Ingénieur sur l'utilisation de MATLAB/SIMULINK pour l'analyse et la commande de systèmes [48].

2.6 Activités d'encadrement

2.6.1 Thèses de doctorat soutenues

Micky Rakotondrabe, Développement et commande modulaire d'une station de micro-assemblage. Novembre 2003 – novembre 2006.
Taux d'encadrement : 50% (Philippe Lutz 50%).

Devenir : Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté.

Mickaël Paris, Conception et commande de systèmes d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision. Novembre 2004 – décembre 2008.
Taux d'encadrement : depuis octobre 2005 60% (Philippe Lutz 40%).

Devenir : Post-Doctorant au CEA de Fontenay-aux-roses.

Qiao Chen, Microrobotique numérique fondée sur l'utilisation de modules bistables : conception, fabrication et commande de modules monolithiques. Octobre 2006 – mars 2010.
Taux d'encadrement : 60% (Philippe Lutz 40%).

Devenir : Cadre à la Jinshan Science and Technology, entreprise chinoise de haute technologie (http://english.jinshangroup.com/).

Nicolas Lafitte, Conception, réalisation et commande de micro-pinces à actionneurs électrostatiques pour la caractérisation de brins d'ADN. Octobre 2008 – avril 2012.
Taux d'encadrement : 33% (Dominique Collard 33% et Yann Le Gorrec 33%) – collaboration LIMMS / IIS Univ. Tokyo.

Devenir : Post-Doctorant à l'Université de Tokyo.

2.6.2 Thèses de doctorat en cours

Mokrane Boudaoud, Analyse et modélisation des bruits à l'échelle microscopique pour la commande des microsystèmes. Octobre 2009.
Taux d'encadrement : 50% (Philippe Lutz 25% et Yann Le Gorrec 25%).

Vincent Chalvet, Conception, réalisation et commande de nouvelles architectures microrobotiques fondées sur l'emploi de microstructures bistables. octobre 2009.
Taux d'encadrement : 60% (Philippe Lutz 40%).

2.6.3 Post-doctorants

Artur Zarzycki, Développement de process de microfabrication de microrobots numériques. Octobre 2009 - octobre 2010.
Taux d'encadrement : 50% (Philippe Lutz 50%).

2.6.4 Stages de Master

Mokrane Boudaoud, Commande en effort d'une micropince électrostatique.
Février 2009 – juillet 2009.
Taux d'encadrement : 100%.

El Hani Boumaraf, Positionnement à haute précision d'une cible par asservissement visuel.
Février 2006 – juillet 2006.
Taux d'encadrement : 50% (Sounkalo Dembélé 50%).

Qiao Chen, Micromanipulation utilisant la mesure de force par jauges d'extensométrie.
Mai 2006 – septembre 2006.
Taux d'encadrement : 50% (Philippe Lutz 50%).

Basile Uccheddu, Commande d'une pince microfabriquée à résolution nanométrique.
Avril 2007 – septembre 2007.
Taux d'encadrement : 100%.

Romain Vandenborght, Etude d'un asservissement purement mécanique pour application dans les MEMS. Juin 2007 – septembre 2007.
Taux d'encadrement : 100%.

Plusieurs encadrements de stages de DEA et de PFE ingénieurs ENSMM de 2002 à 2006.

2.6.5 Encadrement de stagiaires de la TDU (Tokyo Denki University)

Coopération entre la TDU et l'ENSMM. Stagiaires :

Kiyomi TAKEI : Thème du PFE : Study of Digital Microrobots that use Bistable Mechanism, soutenue en juin 2005 (durée : 6 mois).

Hideaki NOHARA : Thème : système anti-vibration pour dispositif de positionnement précis, soutenue en juillet 2007 (durée : 5 mois).

2.7 Participation à des projets de recherche nationaux et internationaux

Projets nationaux :

NANOROBUST : Caractérisation multiphysique de nano-objets et manipulation robotisée sous environnement MEB. 2011-2015.

HAMECMOPSYS : Approche Hamiltonienne pour l'analyse et la commande des systèmes multiphysiques à paramètres distribués. 2011-2015.

Projets internationaux :

EUPASS : Evolvable Ultra-Precision Assembly Systems. 2004-2009.

HYDROMEL : Hybrid ultra precision manufacturing process based on positional- and self-assembly for complex micro-products. 2006-2010.

NANOHEAT : MultidomaiN plAtform for iNtegrated MOre-tHan-MoorE/Beyond CMOS systems charActerisation & diagnostics. 2012-2015.

2.8 Reviews et expertises scientifiques

- Organisation et participation à une mission d'expertise au Japon pour le compte du ministère de la recherche. Thème : la recherche et le développement de micro-usines au Japon. Août 2003. Rapport de l'expertise disponible à l'ADIT et à l'adresse suivante : http://www.bulletins-electroniques.com/japon/rapports/SMM03_056.

- Reviewer pour les journaux IEEE Transactions on Mechatronics (T-Mech), IFAC Mechatronics, JESA (Journal Européen de Systèmes Automatisés) ainsi que pour les conférences IEEE/RSJ IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems) et IEEE ICRA (International Conference on Robotics and Automation).

- Membre du jury de soutenance de thèse de Vincent Vandaele, le 6 février 2008 à l'Université Libre de Bruxelles (ULB). Sujet : Contactless Handling for Micro-Assembly: Acoustic Levitation.

2.9 Responsabilités scientifiques et administratives

- Responsable de la tâche 3 : « commande robuste pour la manipulation très précise et la caractérisation » du projet ANR NANOROBUST (Caractérisation multiphysique de nano-objets et manipulation robotisée sous environnement MEB). Ce projet, initié en novembre 2011 et devant durer quatre années, a pour objectif la manipulation et la caractérisation de micro- et

nanocomposants (membranes, échantillons de matière de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseurs, nanofils, nanotubes de carbone, etc.) dans un MEB (Microscope Electronique à Balayage). Mon rôle dans ce projet consiste à coordonner les travaux de caractérisation et de filtrage du bruit ainsi que la commande de microrobots pour l'exécution de tâches à l'intérieur d'un MEB. Ces travaux font l'objet d'une collaboration entre l'institut FEMTO-ST et l'ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique) de l'UPMC (Université Pierre et Marie Curie), Paris.

- Responsable d'un sous-projet (WorkPackage) WP2.2 « Microassembly Processes » dans le projet européen HYDROMEL : ultra precision manufacturing process based on positional and self-assembly for complex micro-products (2006-2010). Ce sous-projet regroupait les partenaires suivants : EMPA : Swiss federal laboratories for materials testing and research (Suisse), UNIOL : Universite d'oldenburg (Allemagne), ARC Seibersdorf Research GmbH (Autriche), HUT : Helsinki University of Technology (Finlande), NASCATEC : Nanoscale Technologies GmbH (Allemagne) et KNT : Klocke Nanotechnik (Allemagne). Mon rôle était de coordonner les travaux effectués par tous ces partenaires dans le domaine du micro-assemblage.

- Dépôt et suivi d'un brevet (en charge de la rédaction et du suivi d'un dépôt de brevet CNRS lié à mes travaux sur la microrobotique numérique [7]).

- Membre du Conseil d'Orientation Scientifique (COS) du département AS2M depuis sa création à janvier 2012.

- Membre titulaire élu à la commission des spécialistes CSE de la section 61 à l'ENSMM et à l'Université de Franche-Comté depuis 2004 jusqu'à la suppression des commissions.

- Membre de commissions de recrutement de maîtres de conférences à l'ENSMM, à l'UFC et à l'Université de Strasbourg (UDS).

- Membre élu au conseil scientifique de l'ENSMM de 2004 à 2007 et depuis janvier 2011 à ce jour.

- Chargé de l'achat d'un gros équipement : j'ai été chargé au sein de l'institut FEMTO-ST de mener à bien la spécification, le lancement de l'appel d'offres et la négociation de l'achat d'un instrument scientifique utilisé par plusieurs départements de l'institut. Il s'agit d'un analyseur de MEMS (MEMS analyzer) permettant la caractérisation dynamique de microsystèmes. Cet instrument est aujourd'hui fonctionnel.

2.10 Organisation de manifestations scientifiques

- Co-organisation et coordination du workshop international MicroControl'12 (New Trends and Challenges in Modeling and Control of Microsystems – From Theoretical Concepts to Implementation), Besançon, les 31 mai et 1er juin 2012. (http://www.microcontrol12.ens2m.fr/).

- Co-organisation du workshop SMART-MEMS (Automatique et Traitement du Signal pour les MEMS et les Microsystèmes) à l'UMMTO (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou), Tizi-Ouzou (Algérie), les 11 et 12 juin 2012. Ce workshop a été co-organisé par FEMTO-ST et l'UMMTO.

- Participation à l'organisation du workshop IWMF 2006 (International Workshop on MicroFactories), Besançon, octobre 2006.

- Organisation d'un séminaire sur la commande dans le micro-monde à Besançon dans le cadre du GDR Robotique. Février 2008.

- Participation à l'organisation d'un séminaire conjoint des groupes MOSAR du GDR MACS et Manipulation Multi-Echelle du GDR Robotique sur la commande dans le micromonde. Besançon, janvier 2009. Ce séminaire a fait l'objet d'un numéro spécial de la revue JESA dont je suis co-éditeur.

- Co-organisation d'un tutoriel à la conférence internationale IEEE ICRA 2011 (Micky Rakotondrabe, Ioan Alexandru Ivan, Yassine Haddab, Yann Le Gorrec and Nicolas Chaillet. Dynamics, characterization and control at the micro/nano scale. Shanghai, Chine, mai 2011.

2.11 Collaborations internationales

- Participation au projet européen EUPASS : Evolvable Ultra-Precision Assembly SystemS (2004 à 2008).

- Participation au projet européen HYDROMEL (Responsable d'un sous-projet (WorkPackage) WP2.2 « Microassembly Processes ») : Hybrid ultra precision manufacturing process based on positional and self-assembly for complex micro-products (2006-2010).

- Co-encadrement d'une thèse de doctorat dans le cadre d'une collaboration avec le LIMMS/Université de Tokyo sur la manipulation de molécules d'ADN.

- Encadrement de deux stagiaires dans le cadre des échanges ENSMM–TDU (Tokyo Denki University) en 2005 et en 2007.

- Collaboration avec le Japon, programme PHC (Partenariat Hubert Curien) Sakura. J'ai participé au montage d'un projet de collaboration scientifique avec le Japon (univ. de Tokyo) intitulé « Design and control of silicon nanotweezers for DNA bundle manipulation in solution » ayant pour but la manipulation de molécules d'ADN. Dans ce cadre, j'ai effectué deux séjours scientifiques à l'Université de Tokyo (en 2009 et en 2010).

- Collaboration avec l'Algérie, dans le cadre de la convention d'échange CNRS/DPGRF N° 24597 - OASYS : Traitement du signal et Automatique pour les Microsystèmes. J'ai participé au montage de ce projet international impliquant trois établissements : FEMTO-ST, le CDTA (Centre de Développement des Technologies Avancées) d'Alger et l'UMMTO (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou – Algérie) et j'ai encadré une stagiaire de Magister de l'UMMTO durant son séjour d'un mois à l'institut FEMTO-ST (mars-avril 2011).

- Participation à l'organisation du workshop SMART MEMS'12 (automatique et traitement du signal pour les MEMS et les microsystèmes) à l'UMMTO (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou – Algérie) les 11 et 12 juin 2012. Cette manifestation scientifique a été organisée conjointement par l'institut FEMTO-ST et l'UMMTO.

- Participation à l'organisation en juin 2010 de l'Ecole d'été HYDROMEL à Besançon dans le domaine de la microrobotique et du micro-assemblage.

2.12 Publications scientifiques

Type de publication	***Nombre***	*Observations*
Chapitres de livres	5	- dans : Advanced Mechatronics and MEMS Devices, Springer, 2012. - dans, Encyclopedia of Nanotechnology, Springer, 2012. - dans : Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology, Springer, 2011 - dans : Micro nanosystems & systems on chips: modeling, control and estimation, Wiley, 2010. - dans : Micro-Assembly Technologies and Applications. IFIP International Federation for Information Processing. Springer, 2008.
Coédition de numéros spéciaux de journaux	1	- La commande dans le micromonde, dans la revue JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés), Hermes – Lavoisier, 2010.
Brevets d'invention	1	- Micro-robot, procédé de commande, procédé de simulation et programmes d'ordinateur associés. CNRS / Université de Franche-Comté / ENSMM. Dépôt INPI : février 2011, extension à l'international : janvier 2012.
Articles de revues à comité de lecture	12	IEEE T-Mech, IEEE TCST, IFAC Mechatronics, RSI, JMNM Springer, JESA.
Conférences internationales à comité de lecture	26	IEEE/RSJ IROS, IEEE ICRA, IEEE/ASME MESA, IEEE ICARCV, IEEE/ASME AIM, IWMF, TMMF, EUSPEN, IMECE, SPIE, IARP, Mechatronics.
Conférences nationales à comité de lecture	1	CIFA.
Articles de vulgarisation scientifique	1	Collection des Techniques de l'Ingénieur, 2010.
Tutoriels dans des conférences internationales	2	IEEE ICRA.
Rapports d'expertise scientifique	1	Rapport sur la recherche et le développement de micro-usines au Japon. Août 2003, ADIT.
Présentations dans des ateliers et groupes de travail	7	GDR MACS (GT MOSAR), GDR Robotique (GT3), colloques.

Les références complètes des publications scientifiques sont données en page 127.

3 Contexte et positionnement scientifique

3.1 Contexte général

Que ce soit durant mes années de thèse ou pendant mon parcours d'enseignant-chercheur, les travaux de recherche que j'ai menés ont eu pour cadre général la microrobotique. Cette discipline scientifique qui concerne la conception, la fabrication et la commande de systèmes capables d'exécuter des tâches robotisées pour manipuler et caractériser des microcomposants a largement influencé les objectifs scientifiques fixés. L'évolution de la microrobotique durant la dernière décennie a mis en évidence de nombreux verrous scientifiques et technologiques, qui ont nourri mes problématiques scientifiques. Les travaux présentés dans ce manuscrit ont contribué à lever certains de ces verrous avec des résultats applicables bien au-delà de la microrobotique, plus généralement dans les microsystèmes. Dans les parties suivantes, sont présentés les différents aspects qui ont guidé ma réflexion et qui ont eu une influence majeure sur le choix des thématiques traitées. Je décris, tout d'abord, la chronologie des étapes de mon parcours scientifique. Les travaux menés ont naturellement été influencés par les objectifs visés par les différentes équipes auxquelles j'ai appartenu. Par la suite, je présente le caractère pluridisciplinaire lié aux travaux en microrobotique. Les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ont joué un rôle important en offrant, d'une part des moyens de microfabrication sans équivalent et, d'autre part un champ applicatif infini. Ils feront l'objet de la troisième partie. Enfin, je préciserai mon positionnement scientifique dans le contexte décrit précédemment.

3.2 Chronologie des travaux de recherche

3.2.1 Environnement de la thèse de doctorat

Mon premier contact avec le monde de la recherche fut les travaux réalisés dans le cadre de ma thèse de doctorat. A mon arrivée au LAB (Laboratoire d'Automatique de Besançon), UMR CNRS 6596, l'axe de recherche « Microrobotique » était en pleine effervescence. Le CNRS, à l'instar des grands organismes de recherche, a initié le « programme microsystème » visant à développer les travaux de recherche en France autour des microsystèmes. Dans ce cadre, le LAB était en charge de la coordination du pôle national microrobotique. Ma thèse de doctorat a été encadrée par Messieurs Alain Bourjault, Professeur à l'ENSMM et Directeur du LAB et Nicolas Chaillet, à cette époque Maître de Conférences à l'UFC (Université de Franche-Comté) et chargé d'animer une équipe de recherche en microrobotique. Les travaux réalisés durant mon doctorat ont consisté en l'étude, la réalisation et la commande d'un système de micromanipulation permettant d'effectuer des tâches de positionnement précis et de mesure des forces exercées sur des micro-objets manipulés. Les travaux de recherche en microrobotique consistaient essentiellement à trouver des alternatives aux actionneurs habituellement utilisés en robotique conventionnelle (moteurs électromagnétiques, vérins pneumatiques ou hydrauliques, etc.) et qui ne sont plus utilisables compte-tenu des exigences de précision dans le micromonde et la difficulté de fabriquer et d'assembler des versions miniaturisées de ces actionneurs. C'est alors que les matériaux actifs ont pris le dessus sur les actionneurs conventionnels et ont fait l'objet de nombre de travaux pour déterminer les meilleures configurations d'actionnement, établir des modèles et synthétiser des lois de commande appropriées. Les travaux menés dans le cadre de ma thèse ont été riches en enseignements et m'ont permis d'appréhender les grandes problématiques posées par les exigences du micromonde. La Fig. 1 montre la station de micromanipulation réalisée dans le cadre de mon doctorat. Elle comporte une micropince constituée de deux doigts

permettant la saisie de micro-objets dont la taille varie de quelques dizaines de micromètres à un millimètre. Chaque doigt, constitué d'un bilame PZT[4]-laiton, fléchit sous l'application d'une tension électrique grâce à l'effet piézoélectrique inverse. Un système de positionnement 3D actionné par des fils en Alliage à Mémoire de Forme (AMF) permet d'effectuer des déplacements dans l'espace et d'amener le micro-objet à manipuler entre les doigts de la micropince. Ce principe de séparation des degrés de liberté (en opposition avec les architectures robotiques conventionnelles) permet d'une part une réalisation aisée du système de micromanipulation et, d'autre part, l'utilisation d'une caméra fixe pour l'observation de l'objet manipulé. Durant cette thèse, j'ai également établi un modèle d'actionneur piézoélectrique appliqué à la microrobotique, un observateur de Luenberger pour l'estimation de la force de serrage des micro-objets saisis et j'ai réalisé la commande en temps-réel de la station de micromanipulation. Cette station a permis d'effectuer plusieurs tâches mettant en œuvre des composants de petite taille parmi lesquelles nous pouvons citer une contribution à l'assemblage de mécanismes d'horlogerie [95].

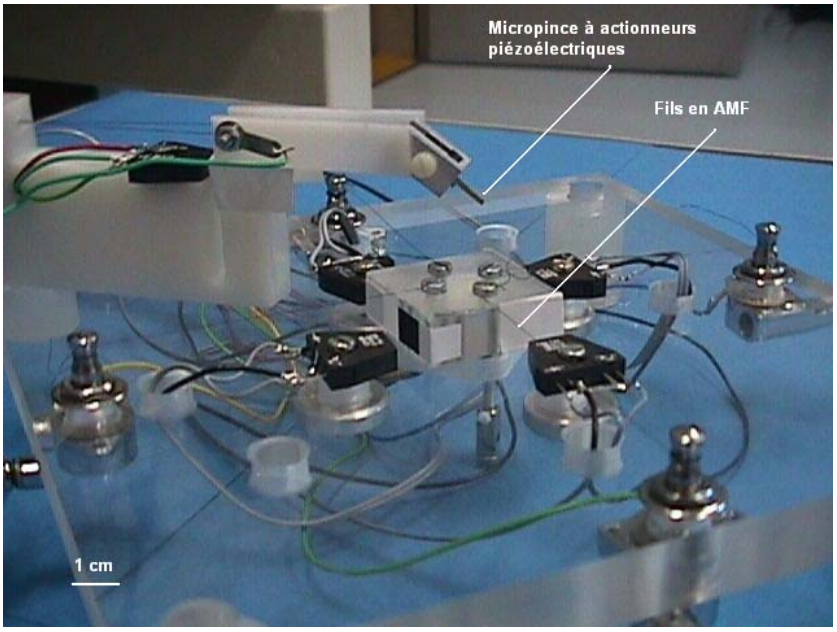


Fig. 1. Station de micromanipulation réalisée durant la thèse de doctorat.

3.2.2 L'équipe micro-usine

Ma titularisation en tant que Maître de Conférences à l'ENSMM en septembre 2002 a coïncidé avec une restructuration des activités de recherche au LAB. J'ai été intégré à l'équipe « micro-usine », dirigée par Philippe Lutz, Professeur à l'UFC, dont le but était de concevoir des usines de très petite taille pour répondre à des besoins en assemblage en petite et moyenne série de système microtechniques. Le concept de « micro-usine » est né pour répondre au besoin d'assembler des microsystèmes dont les composants ont des tailles comprises entre quelques dizaines de micromètres et quelques millimètres. L'objectif est ici de mettre en rapport la taille des produits fabriqués avec celle de l'outil de production assurant leur fabrication. L'utilisation de systèmes de production de dimensions habituelles conduit à des problèmes difficiles à surmonter : coûts d'investissement et de fonctionnement des outils de production, artifices de fabrication pour pallier les rapports de taille, réalisation microtechnique de mécanismes macrotechniques etc. Pour de nombreux produits, il en résulte une situation non concurrentielle même pour des systèmes automatisés. On cherche alors à concevoir des usines portables, très peu gourmandes en énergie,

[4] Le PZT (Plomb Zirconate Titanate) est un matériau piézoélectrique de synthèse.

nécessitant un seul opérateur humain de conduite et aisément maintenables par remplacement direct des microrobots et micromachines les constituant [107]. Ce concept de micro-usine a été introduit en 1990 par les chercheurs japonais du Mechanical Engineering Laboratory (MEL). Le ministère de l'industrie et du commerce extérieur du Japon (MITI) a initié un programme de recherche national « Micromachine » qui a conduit à des prototypes de micro-usine au MEL en 1999 et en 2000, à un système d'assemblage pour des produits micro-optiques et à un système de télé-opération de micropièces chez Olympus Optical (voir Fig. 2). Au début des années 2000, plusieurs autres pays ont organisé des programmes de recherche visant le développement de micro-usines. Des prototypes originaux ont vu le jour, notamment en Allemagne et aux Etats-Unis.

Fig. 2. Prototypes de micro-usines réalisées au Japon : micro-usine de bureau développée au MEL (à gauche) et station d'assemblage de microsystèmes optiques d'Olympus Optical (à droite).

Dans le cadre des travaux menés au sein de notre équipe, j'ai organisé en 2003 une mission d'expertise (à laquelle j'ai pris part) visant à analyser le développement des micro-usines au Japon [51]. Cette mission nous a permis de visiter les différents laboratoires et entreprises japonais actifs dans ce domaine. La réflexion entreprise à l'issue de cette mission nous a conduits à poser les bases d'un concept de micro-usine original, qui a fait l'objet de développements au sein de l'équipe « micro-usine du LAB ». Il s'agit du concept de micro-usine modulaire dans laquelle la modularité concerne non seulement le matériel, mais également les systèmes de commande et de supervision. La micro-usine serait ainsi constituée de cellules modulaires interchangeables. Dans ce cadre, j'ai proposé deux concepts nouveaux : l'un pour la réalisation d'un micromanipulateur et le second pour le développement d'un dispositif de convoyage et de micropositionnement. Ces deux concepts ont notamment fait l'objet de deux sujets de thèse que j'ai proposés et co-encadrés avec le Pr Philippe Lutz. Le premier, consiste en un manipulateur à doigts indépendants. Ce dernier répond à la nécessité de manipuler, à l'aide d'un système unique, des composants dont les dimensions peuvent varier dans de larges proportions. Un micromanipulateur modulaire multi-ddl utilisant des actionneurs piézoélectriques et offrant plusieurs degrés de liberté a été réalisé [12][36][37][39][40]. Outre la réponse aux besoins en micro-usine, ce travail a mis en évidence plusieurs problématiques liées aux incertitudes (dues notamment à la sensibilité des systèmes à l'environnement) à ces échelles et aux non-linéarités des actionneurs piézoélectriques (hystérésis et dérive lente). Ces phénomènes ne peuvent plus être négligés aux niveaux de précision micrométriques requis. La synthèse de lois de commande robustes associée à une modélisation physique fine a permis d'améliorer considérablement les performances du micromanipulateur [10][11][32][33][34][38][40]. Le second concept développé a été celui d'un système de convoyage (feeding) permettant le positionnement de micro-objets. Toujours dans un souci de généricité, un

principe à effet inertiel permettant le convoyage et le positionnement de micro-objets de caractéristiques géométriques diverses a été réalisé [27][127].

3.2.3 L'équipe SAMMI

En 2005, une nouvelle restructuration du LAB a eu lieu. Elle avait notamment pour but de regrouper les activités existantes pour constituer de nouvelles équipes à forte visibilités nationale et internationale. C'est alors que l'équipe SAMMI (Systèmes Automatisés de Micromanipulation et MIcro-assemblage) est née. Suite à mon intégration dans cette équipe et en accord avec ses nouvelles orientations, j'ai décidé d'étendre mes travaux en conception à la microrobotique de manière plus générale. L'objectif était d'aborder des problématiques qui dépassent le cadre de la micro-usine et de développer des activités en commande pour les microsystèmes, devenues nécessaires pour accroître les performances des tâches robotisées dans le micromonde. Le développement de la microrobotique était en plein essor. Au niveau international, les efforts des chercheurs étaient portés principalement sur la commande des microactionneurs [75][63], sur la conception et la commande de préhenseurs ainsi que sur l'étude des interactions entre l'organe terminal et l'objet manipulé. Cependant, très peu de travaux ont visé la conception de porteurs robotiques adaptés aux spécificités du micromonde. Les rares porteurs décrits dans la littérature sont fondés sur une réduction homothétique des architectures utilisées dans les robots conventionnels. Ces bras robotisés sont pourtant indispensables pour l'exécution d'une tâche microrobotique complète. Dans ce contexte, j'ai proposé une approche totalement nouvelle au niveau international pour la conception d'architectures de microrobots, en rupture avec les pratiques habituelles. Elle exploite à la fois les possibilités offertes par les technologies de microfabrication (devenues très accessibles grâce à la centrale de technologie MIMENTO) et la commande numérique en boucle ouverte afin d'obtenir des microrobots de petite taille, capables d'intervenir dans des environnements confinés et caractérisés par un faible coût de fabrication et d'exploitation [1]. Largement inspirée de l'électronique numérique (en particulier en ce qu'elle apporte par rapport à l'électronique analogique), cette nouvelle approche nommée « microrobotique numérique » est fondée sur la conception et la réalisation de microrobots à partir de « modules élémentaires » possédant deux états mécaniques stables et répétables, pouvant être commandés en boucle ouverte par une information binaire. La position globale du microrobot sera alors commandée par un mot binaire représentant l'état des différents modules. Cette approche représente un nouveau paradigme dans le domaine de la microrobotique autorisant la conception de nouvelles cinématiques adaptées au micromonde. Dans la suite, un chapitre y sera entièrement consacré.

La seconde activité majeure développée depuis 2005 est la commande des microsystèmes. Cette dernière prend une part de plus en plus importante dans mes activités de recherche. Dans un premier temps utile à la commande des systèmes conçus (des approches de commande robuste et d'observation ont été mises en œuvre notamment pour la commande des systèmes réalisés dans le cadre de la micro-usine), l'automatique est devenue peu à peu une activité de recherche et d'encadrement à part entière. En effet, compte-tenu de l'effet d'échelle (réduction très importante des dimensions des systèmes), les microsystèmes présentent des spécificités jusqu'alors peu étudiées au plan de la commande. Ils sont, par exemple, très sensibles aux variations des modèles et aux bruits. Par ailleurs, les faibles dimensions de ces systèmes n'autorisent pas une intégration aisée de capteurs. La recherche de la robustesse (de la stabilité et des performances) et l'analyse des bruits et leur prise en compte sont des éléments clés de l'accroissement des performances. Ainsi, il m'est apparu nécessaire de mener des travaux scientifiques, dans ce sens, pour développer un domaine nouveau à l'échelle internationale : l'automatique à l'échelle micrométrique. Les premiers travaux développés en commande ont concerné le pilotage des différents éléments du système de micromanipulation pour la micro-usine. Une synthèse de contrôleur H_∞ a notamment permis de contrer les effets des non-linéarités apparaissant dans les

actionneurs piézo-électriques [11][12]. Par ailleurs, une approche de commande en boucle ouverte par modelage de l'entrée (input shaping) a permis d'améliorer considérablement le comportement dynamique du système de convoyage conçu, ce qui a autorisé son utilisation pour effectuer des tâches de positionnement précis et d'asservissement visuel de trajectoires [26][27]. Ces deux travaux ont été menés dans le cadre de l'encadrement de deux thèses. Par la suite, les systèmes utilisés ou conçus par l'équipe devenant encore plus petits grâce à l'accès aux technologies de microfabrication à travers notamment la centrale MIMENTO, les performances attendues sont passées à l'échelle nanométrique induisant une sensibilité encore plus forte au bruit. C'est pourquoi j'ai initié une démarche d'analyse et de prise en compte des bruits dans le micromonde. Cette démarche a consisté, dans un premier temps, en des travaux personnels sur l'utilisation du filtrage optimal de Kalman pour l'amélioration de la mesure de force par jauge d'extensométrie (élimination des bruits sans perte de dynamique). Cette étude a permis, d'une part l'amélioration de la mesure de force par un rapport de 40 et, d'autre part l'intégration de capteurs embarqués dans un manipulateur pour une utilisation nomade [8]. Dans un deuxième temps, j'ai proposé et encadré un stage de master sur la commande en effort d'une micropince électrostatique. Ces travaux ont notamment permis, grâce à une commande LQG de piloter la position d'une micropince actionnée électrostatiquement avec filtrage du bruit [4][28]. Suite aux résultats obtenus, j'ai proposé un sujet de thèse de doctorat dans le domaine de l'analyse et la modélisation des bruits à l'échelle microscopique, thèse que je co-encadre avec les Professeurs Philippe Lutz et Yann Le Gorrec. Cette thèse (en cours) a d'ores et déjà permis d'aboutir à des résultats importants concernant la caractérisation des bruits dans les microsystèmes. Une caractérisation fréquentielle des bruits dominants à ces échelles en fonction de la taille des microsystèmes a été établie [13][20]. Elle a notamment montré l'importance de l'effet des bruits acoustiques et des vibrations transmises par le sol sur les structures de taille centimétrique et la prédominance de l'effet du bruit thermique sur les structures de dimensions submillimétriques. Il convient cependant de noter que l'originalité de ces travaux réside dans le fait que la caractérisation effectuée a pour but d'aboutir à des modèles de bruit liés à une réalité physique, mais véritablement exploitables pour la commande. Ces travaux se démarquent des nombreux travaux rapportés dans la littérature qui décrivent avec précision les interactions physiques mais qui sont souvent peu exploitables en pratique.
D'autres travaux en commande on été menés dans le cadre du co-encadrement d'une thèse de doctorat avec le LIMMS (Laboratory for Integrated Micro Mechatronic Systems) CNRS-IIS UMI 2820 et l'Université de Tokyo. Cette thèse a concerné la caractérisation de la variation de raideur de molécules d'ADN sous l'effet d'enzymes et l'amélioration des performances par la commande.
La commande des microsystèmes a également fait l'objet de plusieurs manifestations scientifiques que j'ai co-organisé dans le cadre du GDR robotique. L'une d'entre-elles a conduit à l'édition d'un numéro spécial de la revue JESA [6].

3.2.4 L'équipe CODE

Depuis janvier 2012, les activités de recherche du département AS2M sont organisées autour de plusieurs équipes encore plus spécialisées. Depuis cette date, je suis membre de l'équipe CODE (COnception et commanDE des systèmes micromécatroniques) pilotée par Yann Le Gorrec, Professeur à l'ENSMM. Mes activités s'inscrivent dans la continuité des travaux décrits précédemment. Je coordonne notamment un workpackage dédié à la commande dans le projet ANR NANOROBUST et je participe également au projet ANR HAMECMOPSYS. Par ailleurs, j'ai co-organisé (en mai et juin 2012) un workshop international intitulé "New Trends and Challenges in Modeling and Control of Microsystems" qui a regroupé des théoriciens de la commande et des spécialistes des microsystèmes.

3.3 La pluridisciplinarité

S'il est une caractéristique commune aux travaux de recherche en microrobotique et en microsystèmes, c'est sans nul doute la pluridisciplinarité. Au-delà de son rôle de jonction naturelle entre différentes sciences et technologies, cette caractéristique influe de manière considérable sur les choix thématiques offrant parfois une grande latitude dans les voies à explorer et nécessitant, d'autres fois, l'acquisition de grandes quantités de connaissances. Dans tous les cas, la recherche en microrobotique et en microsystèmes requiert un recyclage permanent et un apprentissage régulier de nouvelles sciences et techniques qui, parfois, n'appartiennent pas à la discipline scientifique initiale du chercheur et qui occupent un temps d'étude non négligeable. La pluridisciplinarité pose le problème de la spécialisation. Si l'hyperspécialisation est de nos jours un vecteur majeur de l'innovation, l'approche « système » avec ses multiples facettes et la nécessité de résoudre les problèmes d'intégration sont fondamentales pour le développement de microsystèmes intelligents. La Fig. 3 représente de façon symbolique les fonctions essentielles d'un microsystème moderne. Chacune d'elles fait appel à un domaine scientifique spécifique.

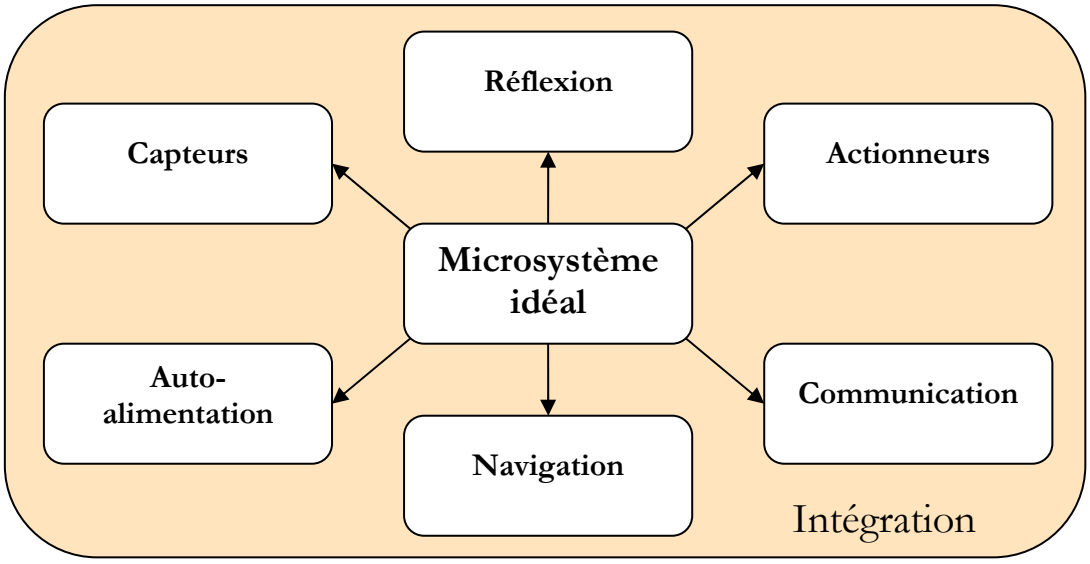


Fig. 3. Fonctions essentielles d'un microsystème idéal.

La majorité de mes travaux de recherche s'inscrivent dans cette approche « système » et mettent en œuvre de multiples concepts issus de domaines très différents tels que l'automatique, la mécanique et plus généralement la physique, le traitement du signal, l'électronique et l'informatique.

3.4 Les MEMS : moyen de microfabrication et champ applicatif

Parallèlement au développement de la microrobotique, les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ont connu des évolutions considérables. Les MEMS sont des microsystèmes, qui ont la particularité d'être fabriqués par des procédés dits de microfabrication en salle blanche. Ces méthodes de fabrication utilisent, généralement, comme matériau de base le silicium (mais d'autres matériaux peuvent être utilisés) conditionné en wafer et des procédés de lithographie, de dépôts de résines, de masquage et d'attaques chimiques pour fabriquer des structures simples ou complexes. Les MEMS se démarquent des dispositifs microélectroniques par le fait que ces derniers permettent de réaliser uniquement des fonctions électriques ou électroniques alors qu'un MEMS, selon le cas, peut offrir également des fonctions mécaniques, optiques ou fluidiques (voir Fig. 4).

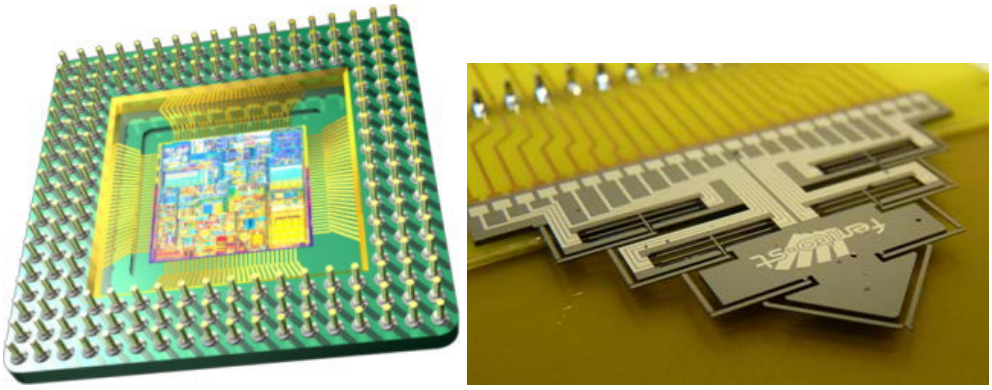


Fig. 4. Un microprocesseur (à gauche) assurant des fonctions de calcul et de stockage de données et un microrobot numérique (MEMS) permettant d'effectuer des fonctions de positionnement mécanique précis à partir d'un actionnement électro-thermo-mécanique.

Le rapprochement entre la microrobotique et les MEMS a été pressenti dès les premières réalisations de microrobots. Alors qu'on constatait la difficulté d'assembler des systèmes mécaniques de petite taille comportant de nombreuses pièces, l'intérêt pour des procédés de microfabrication de systèmes monolithiques s'est fait sentir. Ajouté à cela la précision que l'ont peut atteindre grâce aux machines utilisées actuellement en salle blanche, la technologie MEMS est apparue comme un moyen incontournable pour la réalisation de microrobots et de systèmes péri-microrobotiques. Par ailleurs, le besoin en nouveaux MEMS pour satisfaire les demandes émanant des nouvelles technologies telles que les systèmes optiques, le stockage de l'information, la biologie ou la microchirurgie, a placé la microrobotique en position privilégiée pour la manipulation et le packaging. Les MEMS représentent, aujourd'hui, un champ applicatif infini pour la microrobotique.

3.4.1 Bref historique des MEMS

Les prémices, de ce que nous appelons aujourd'hui « les MEMS », sont apparues dès les années 1950 durant lesquelles des firmes telles que Bell Labs, Honeywell ou Allied Signal ont produit les premiers dispositifs à destination de l'industrie aéronautique : des capteurs de pression de très petite taille. Cependant, entre les années 1950 et les années 1970, l'industrie des MEMS était considérée comme une branche de la microélectronique. La gravure du silicium, du verre et du quartz était le principal procédé de microfabrication. Par la suite, des agences américaines telles que l'US Air Force et le NIH (National Institute of Health) ont largement œuvré pour le développement des MEMS.

A la fin des années 1970, l'industrie automobile est devenue le premier client de l'industrie des MEMS avec notamment des produits tels que les injecteurs de carburant et les capteurs de pression.

Le terme MEMS a été utilisé à partir des années 1980. Depuis, de nouvelles technologies pour la fabrication des MEMS ont vu le jour à l'image de la technologie LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) à rayons X ou UV. Les MEMS, jusque là presque exclusivement assimilés à des capteurs, ont peu-à-peu intégré des actionneurs.

Les années 1990 ont été caractérisées par les premiers succès industriels francs de MEMS contenant des capteurs, des actionneurs et un calculateur. Les concepteurs de microsystèmes ont

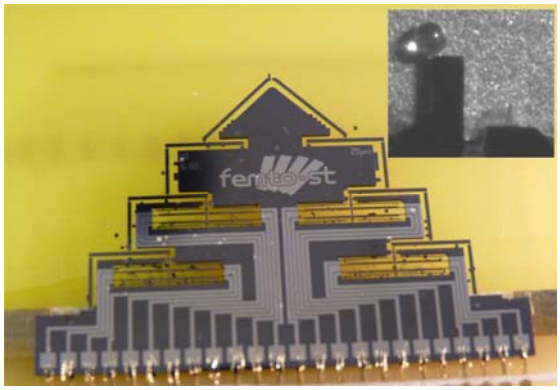
réalisé que le packaging et l'intégration pouvaient représenter jusqu'à 70% du coût de fabrication d'un MEMS [119].

Tirés par les technologies modernes, les MEMS sont devenus de plus en plus complexes, intégrant des fonctionnalités de plus en plus évoluées.

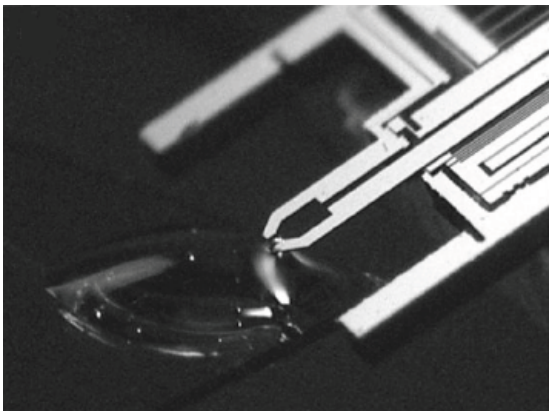
Aujourd'hui, plus de 600 entreprises de par le monde fondent leur stratégie de développement sur le marché des MEMS [122]. Les accéléromètres pour le déclenchement d'airbags et les têtes d'imprimantes jet-d'encre représentent des marchés très importants.

3.4.2 Les MEMS en tant que moyen pour la réalisation de microrobots

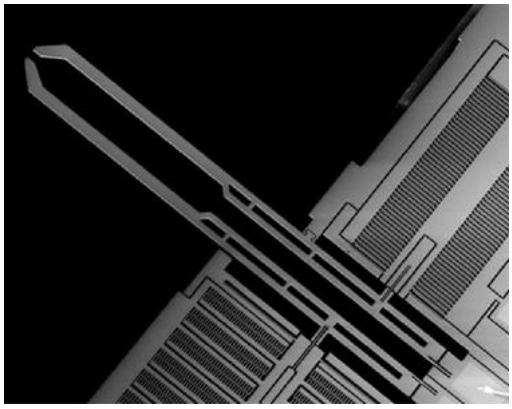
Après les premières réalisations microrobotiques fondées sur l'assemblage de micro-actionneurs et de structures mécaniques amplificatrices de mouvement, la technologie MEMS s'est imposée en procédé de fabrication privilégié pour la microrobotique. La possibilité de fabriquer des structures mécaniques complexes contenant des parties aussi fines que 10 µm ou moins et des actionneurs intégrés tels que les peignes inter-digités (comb-drives) ou les actionneurs thermiques, et cela sur un même substrat, a permis d'atteindre des performances et une compacité précédemment inaccessibles. Les machines de microfabrication en salle blanche permettent aujourd'hui une grande répétabilité de fabrication. L'intérêt de la technologie MEMS pour la microrobotique est amplifié par la large diffusion de logiciels de CAO et de simulation conviviaux offrant une grande liberté de conception. La Fig. 5 montre quelques exemples de systèmes microrobotiques réalisés en technologie MEMS.



Microrobot numérique (FEMTO-ST)



Nanotweezer (LIMMS – IIS – Univ. Tokyo)



Microgripper (FemtoTools GmbH)

Fig. 5. Exemples de systèmes microrobotiques réalisés en technologie MEMS.

3.4.3 Les MEMS en tant que champ applicatif pour la microrobotique

La production de MEMS et le marché, qui en découle, représentent un champ applicatif majeur qui suffit à lui seul à motiver le développement de microrobots performants. Toutes les études, effectuées par les organismes spécialisés dans l'analyse de la production et du marché des MEMS tels que MANCEF (The Micro and Nanotechnology Commercialization Education Foundation) [122] ou Yole Développement, s'accordent à dire que le marché des MEMS est en pleine expansion et que cette tendance s'accentuera durant la prochaine décennie. Dans son document d'analyse sur les MEMS intitulé « International Micro/Nano Roadmap », MANCEF décrit les tendances fortes des futurs MEMS et met en évidence des verrous technologiques pour lesquels la microrobotique peut apporter des solutions. Outres les besoins habituels en micromanipulation et en micropositionnement de composants de très faibles tailles, les défis majeurs des MEMS de demain résident d'une part dans le packaging (voir Fig. 6) et d'autre part dans le test de fiabilité et de durée de vie. Si le packaging et le test de dispositifs microélectroniques peuvent être effectués sur des bancs d'assemblage et de mesure standardisés, la situation est plus complexe lorsqu'il s'agit des MEMS. En effet, les composants microélectroniques assurant uniquement des fonctions électriques, leurs formes sont standardisées et adaptées à la manipulation physique et à la mesure électrique par pointes de touche. En revanche, les MEMS avec leurs fonctions multiples possèdent des formes très diverses, qui requièrent des dispositifs de manipulation et de caractérisation surs et versatiles, et sont capables d'assurer un positionnement nanométrique et parfois un contrôle des efforts.

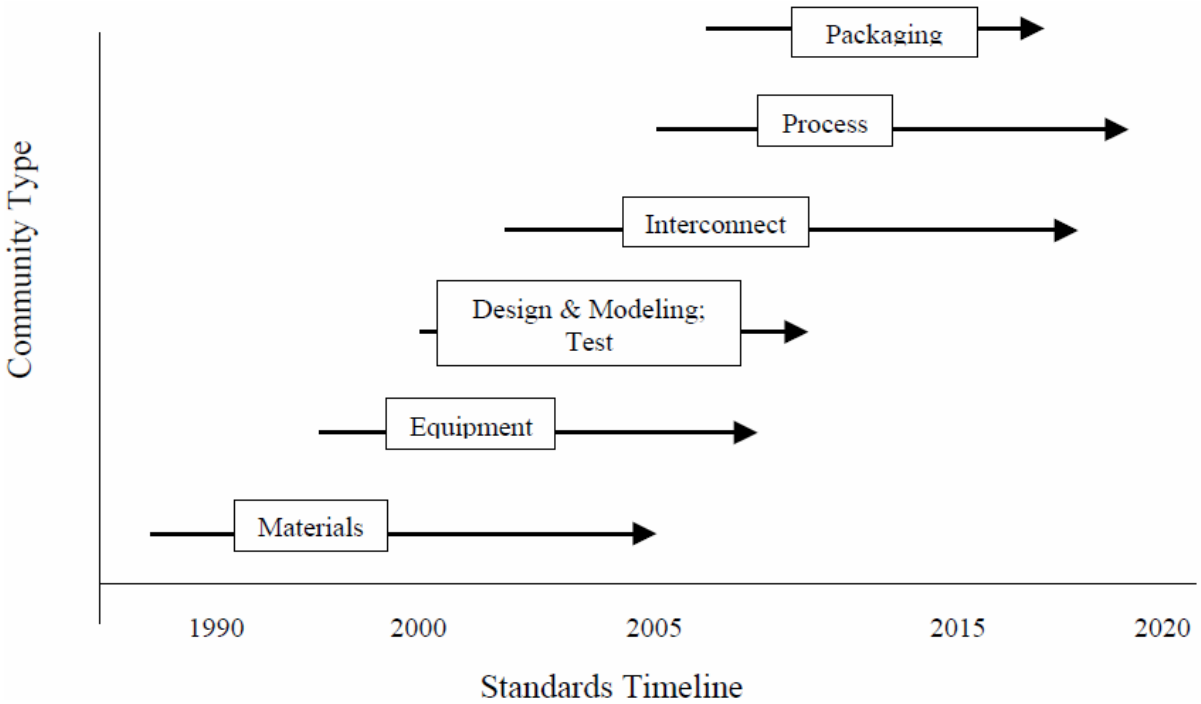


Fig. 6. Chronologie des problématiques en conception et en production de MEMS (source MANCEF).

Les MEMS continuent à se développer dans les secteurs économiques dans lesquels ils sont très présents tels que l'automobile, la téléphonie mobile ou l'aéronautique. Cependant, les avancées les plus significatives sont attendues dans les disciplines émergentes telles que la microfluidique, les bioMEMS et les micro-sources d'énergie. A titre d'exemple, les bioMEMS, pressentis comme un secteur de prédilection des MEMS de demain, évoluent actuellement de dispositifs contenant un simple capteur ou actionneur à des systèmes capables d'effectuer des tâches in-vitro et in-vivo et intégrant une « intelligence ».

Le Tableau 1 liste les applications actuelles et émergentes des MEMS [119].

Applications actuelles	*Applications émergentes*
Accéléromètres	Capteurs anticollision
Capteurs chimiques	Solénoïdes sur puce
Gyroscopes	Dispenseurs de médicaments
Têtes de disques durs	Nez électroniques
Prothèses d'audition	Inclinomètres
Diagnostiques in-vitro	Buses d'injection
Imagerie infrarouge	Lab-on-chip
Capteurs magnéto-résistifs	Têtes magnéto-optiques
Microspectromètres	Micromoteurs
Afficheurs optiques	Microrelais
Pacemakers	Interrupteurs optiques
Capteurs de pression	Vannes de projection
Têtes d'imprimantes	Composants RF

Tableau 1. Applications actuelles et émergentes des MEMS (source MANCEF).

L'analyse de ces différents produits a permis d'émettre des prévisions sur le marché mondial des MEMS. Ces tendances sont illustrées sur la Fig. 7.

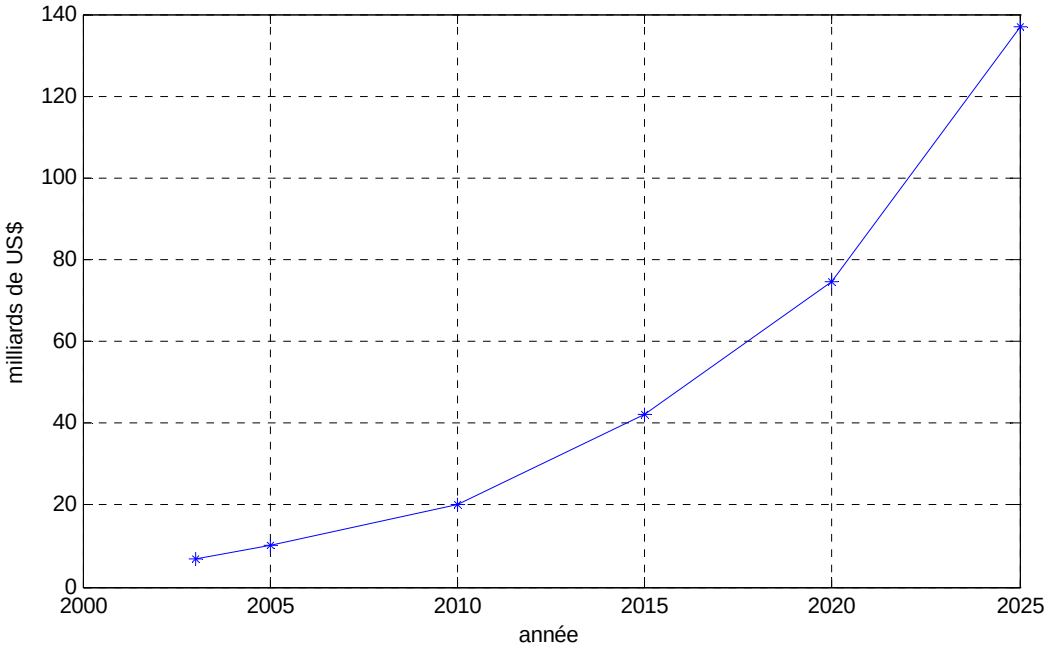


Fig. 7. Prévisions globales du marché mondial des MEMS (source MANCEF).

Les MEMS représentent donc un enjeu économique majeur de notre ère. L'ampleur de leurs évolutions sera bridée par la fiabilité, le test, la métrologie et le packaging à l'échelle micro- et nanométrique, problématiques devant être au cœur des développements en microrobotique.

3.5 Activités d'enseignement et interactions avec la recherche

Etant enseignant à l'ENSMM et conformément au statut de l'enseignant-chercheur, je consacre la moitié de mon activité professionnelle aux tâches d'enseignement, de mise en place des cours TDs et TPs et d'encadrement des élèves. La spécificité des enseignements dispensés à l'ENSMM autour des microtechniques et leurs caractères pratiques propres aux écoles d'ingénieur en SPI (Sciences Pour l'Ingénieur) a permis une interaction importante avec mes activités de recherche. Ces interactions se sont concrétisées, d'une part par le transfert de connaissances de ma recherche développée vers l'enseignement et, d'autre part par le recrutement d'élèves ingénieurs de l'ENSMM et d'étudiants de l'Université de Franche-Comté pour effectuer des doctorats et des stages de Master au sein de nos équipes de recherche.

Dans le cadre de mes activités d'enseignement, les principales actions de transfert sont listées ci-dessous :
- mise en place d'un nouveau cours à l'ENSMM destiné aux élèves de l'option mécatronique sur la commande robuste des systèmes micromécatroniques. L'objectif de ce cours est de sensibiliser les élèves-ingénieurs aux spécificités de la commande des microsystèmes et d'introduire des outils de la commande robuste pour tenir compte de ces spécificités lors de la synthèse de correcteurs,

- réalisation d'un cours sur la micromanipulation destiné aux Masters en mécatronique à l'Université de Franche-Comté et à l'ENSMM,

- montage et mise en œuvre de travaux pratiques sur les micro-actionneurs piézoélectriques. L'objectif est ici de s'initier aux actionneurs employés en microrobotique et à l'instrumentation spécifique utilisée pour l'identification des paramètres des modèles. La commande temps-réel en position de ces actionneurs est effectuée à l'aide de systèmes temps-réel dSPACE,

- mise en place d'un TP de microrobotique fondé sur l'utilisation des forces d'adhésion pour la manipulation de microcomposants et leurs applications à l'assemblage de mécanismes d'horlogerie. Ce TP se démarque des TPs classiques de robotique par le fait que l'effecteur utilisé est une simple goutte d'eau permettant ainsi d'exploiter l'adhésion solide-liquide.

Au-delà de leur utilité comme support pédagogique, ces travaux pratiques et les approches modernes qui y sont présentées, visent à introduire de nouvelles techniques en milieu industriel. Ce transfert s'effectue, d'une part par les élèves recrutés dans des entreprises de microtechniques (très présentes dans le bassin industriel franc-comtois) et, d'autre part par les échanges avec des partenaires industriels à travers l'AIP (ateliers inter-établissements de productique) de Besançon.

Au plan international, j'ai effectué des enseignements en lien avec mes thématiques de recherche dans des écoles d'été (HIM : Highlights in Microtechnology et projet européen HYDROMEL), à TECHNIFUTUR, établissement d'enseignement technique à Liège, en Belgique ainsi que dans le cadre du master européen EU4M (European Union Master's Course in Mechatronic and Micro-mechatronic Systems).

3.6 Positionnement scientifique

Le choix des thématiques développées durant mon parcours en recherche résulte de l'analyse de l'évolution des activités en microrobotique au niveau international, de l'identification des verrous technologiques majeurs et de ma culture scientifique qui favorise l'approche systémique. Durant

les premières années du développement de la microrobotique, les chercheurs se sont focalisés sur la recherche de principes d'actionnement, la modélisation des actionneurs réalisés et leur commande. Par la suite, de nombreux prototypes de préhenseurs ont vu le jour permettant d'atteindre de bonnes performances en précision et en répétabilité (de l'ordre du micromètre). Ces performances ont poussé les chercheurs à manipuler des objets de plus en plus petits laissant apparaître le problème de l'adhésion. En effet, la prédominance des forces surfaciques sur les effets de volume à ces échelles dimensionnelles fait que les micro-objets restent collés au préhenseur. Plusieurs stratégies ont alors été développées pour réduire l'effet de ces forces d'adhésion ou au contraire les exploiter afin de faciliter l'exécution des tâches de micromanipulation. Nous pouvons notamment citer les travaux remarquables effectués à l'ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique)[137][133], anciennement LRP (Laboratoire de Robotique de Paris). De nombreux travaux ont alors vu le jour à travers le monde pour comprendre et modéliser les interactions physiques à ces échelles. Cependant, les systèmes conçus devenant de plus en plus performants, avec notamment des résolutions submicrométriques, les modèles développés d'actionneurs et de microsystèmes ainsi que les lois de commande pratiquées deviennent de moins en moins fiables et insuffisants pour garantir une bonne répétabilité. En effet, à ces niveaux d'exigence de précision, les microsystèmes sont confrontés, d'une part à la présence de niveaux de bruits très importants et, d'autre part aux variations des paramètres des modèles sous l'influence d'effets extérieurs tels que la température ou le taux d'humidité. On est alors à la limite des performances des instruments de mesure. Les modèles deviennent incertains et la prise en compte de ces incertitudes apparaît comme un élément important pour l'accroissement des performances et la fiabilisation des tâches. Une approche pluridisciplinaire mettant en œuvre les modèles des microsystèmes, les outils de la commande robuste et le traitement du signal est alors indispensable pour lever le verrou de la précision à l'échelle submicrométrique. Il est important ici de différencier la précision statique de la précision dynamique. En effet, seule, la garantie d'une bonne précision dynamique permet un suivi de trajectoire sans risque lors de la manipulation de micro- ou nano-objets. Cette approche pluridisciplinaire, peu étudiée à travers le monde ayant pour but de repousser les limites de la précision, représente l'un des thèmes majeurs développés dans mes travaux de recherche. La Fig. 8 illustre le positionnement de mes travaux sur la performance des microsystèmes.

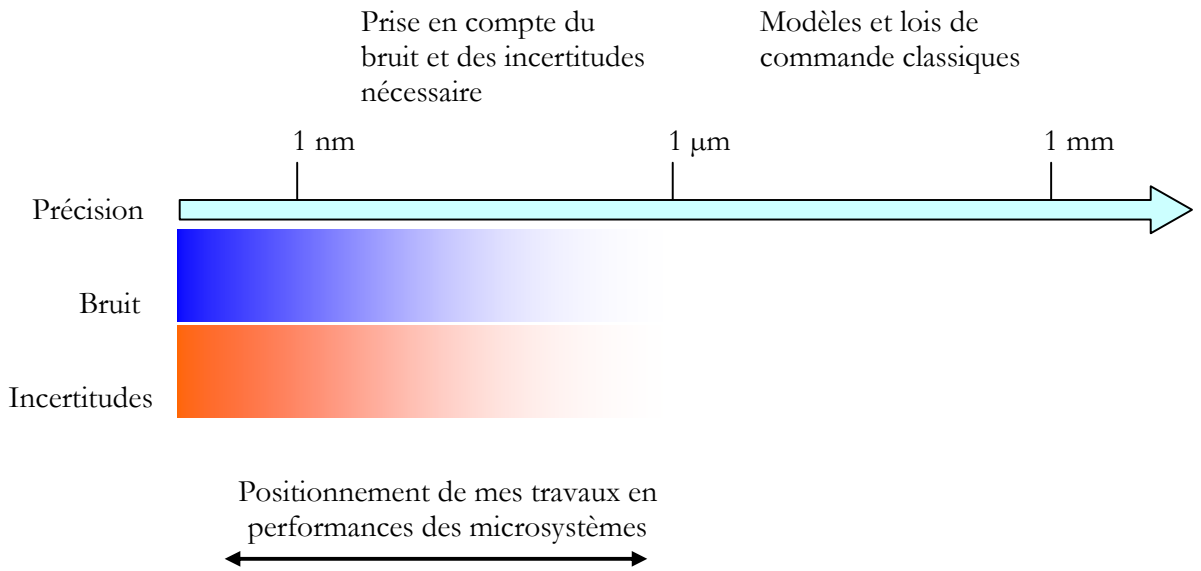


Fig. 8. Positionnement de mes travaux en termes de performance des microsystèmes illustré sur la précision de positionnement.

Ce positionnement, illustré par le paramètre « précision de positionnement » du microsystème considéré peut être rapporté à la notion de force en considérant la raideur des structures mécaniques. Notons que ces travaux concernent les performances des microrobots de manipulation et se démarquent des travaux visant à rechercher des précisions de positionnement élevées dans des instruments de microscopie [146].

Le deuxième aspect caractérisant mes travaux de recherche concerne la conception et la réalisation d'architectures nouvelles de microrobots. Les travaux des chercheurs en conception de microrobots se concentrent essentiellement sur l'étude de préhenseurs et de leurs interactions avec les micro-objets manipulés. En revanche, les architectures de robots ou bras robotisés, pourtant essentiels pour la réalisation de tâches microrobotiques complètes, n'ont pas connu de développements significatifs. Les structures de microrobots existantes sont fondées sur la miniaturisation d'architectures pensées pour la robotique traditionnelle ou plus simplement constituées de la juxtaposition d'axes asservis disponibles dans le commerce, mais coûteux. Dans tous les cas, ces architectures sont souvent inadaptées au travail dans le micromonde, soit en raison de leur taille, soit en raison des performances limitées ou de leurs cinématiques inadaptées. Dans ce cadre, j'ai proposé et développé des travaux de recherche sur une approche unique de conception de microrobots microfabriqués fondée sur l'utilisation de modules mécaniques bistables. L'objectif de cette approche appelée « microrobotique numérique », à laquelle le chapitre 5 est dédié, est d'obtenir des microrobots adaptés au micromonde, faciles à commander et capables d'évoluer dans des environnements confinés.

Le troisième point ayant guidé ma réflexion concerne la réalisation de systèmes microrobotiques à faible coût. De mon point de vue, à l'instar de la robotique classique, l'impact de la microrobotique sur le monde industriel et expérimental est conditionné par la large disponibilité (accessible notamment aux PME : petites et moyennes entreprises et aux TPE : très petites entreprises) de microrobots à faible coût et faciles d'utilisation. La mise en œuvre de cellules microrobotiques requiert généralement l'emploi d'instruments de mesure externes encombrants et coûteux. Les efforts dans le sens de la réduction du coût et de la facilité d'emploi apparaissent notamment dans la microrobotique numérique où les robots sont commandés en boucle ouverte sans l'usage de capteurs, et dans le remplacement de capteurs externes par des capteurs embarqués à faible coût grâce à l'emploi de méthodes de traitement du signal.

Enfin, la totalité des travaux menés a été effectuée avec le souci permanent de porter l'idée jusqu'à l'implémentation et l'expérimentation. Ainsi de nombreux bancs expérimentaux ont été réalisés afin de valider les études théoriques et diverses tâches microrobotiques ont été exécutées. Certains de ces démonstrateurs seront décrits dans les chapitres suivants. Par ailleurs, l'apport de la centrale de technologie MIMENTO, dans ces travaux, a été très important dans la mesure où l'accès aux technologies de microfabrication en salle blanche a permis de réduire considérablement la taille des systèmes conçus et d'accroître leur répétabilité et leur fiabilité.

4 Structuration des travaux de recherche

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des différents travaux de recherche menés. Dans un premier temps, les caractéristiques essentielles des systèmes micromécatroniques sont brièvement rappelées. Par la suite, les difficultés liées à la commande dans le micromonde sont discutées et une stratégie pour celle-ci est proposée. Enfin, les projets développés ainsi que les principaux résultats sont décrits. Bien que les contributions soient pluridisciplinaires, les travaux menés ont été classés en deux groupes selon que leur contribution majeure concerne la conception ou la commande.

4.2 Caractéristiques des systèmes micromécatroniques

4.2.1 Microrobots et systèmes micromécatroniques

Les microrobots et, plus généralement, les systèmes micromécatroniques sont des processus de petites tailles comportant des fonctions de perception de l'environnement, de traitement de l'information et d'actionnement caractérisés par de grandes précisions. Ils sont destinés à exécuter des tâches dans le micromonde (telles que des tâches de positionnement, de manipulation ou de tri de micro-objets). Cependant, la miniaturisation des systèmes traditionnels est confrontée à des barrières technologiques, qui nécessitent de repenser complètement les fonctions d'actionnement et de perception. En effet, la réalisation de microsystèmes ne peut être obtenue par réduction des dimensions des systèmes conventionnels. Les actionneurs traditionnels utilisés ne peuvent être facilement miniaturisés. De plus, les jeux dans les engrenages et les mécanismes empêchent l'obtention de précisions compatibles avec le micromonde. C'est pourquoi les principes d'actionnement largement utilisés dans les systèmes traditionnels, tels que les effets électromagnétiques, sont généralement abandonnés au profit d'autres effets physiques mieux adaptés au micromonde, tels que l'effet électrostatique ou les effets physiques se produisant dans les matériaux actifs (voir Tableau 2) [134]. Cependant, l'emploi de ces actionneurs conduit à des comportements fortement non-linéaires [11][55]. Outre l'emploi d'actionneurs différents, on trouve dans les microsystèmes des nouvelles structures d'actionnement. A titre d'exemple, nous pouvons citer les structures à actionneurs répartis (souvent appelées smart-surfaces) constituées d'une matrice de micro-actionneurs servant, par exemple, à véhiculer des micro-objets sur une surface [87] ou des structures à actionneurs répartis sur un treillis [93]. Ces structures posent des problèmes de modélisation et de commande spécifiques et complexes [92][94].

Effet d'actionnement	*Déformation (%)*	*Rendement (%)*	*Temps de réponse*
piézoélectrique	0,2	>90	court
magnétostrictif	0,2	60	court
électrostrictif	32	90	court
dilatation thermique	1	<10	long
transition de phase (AMF[5])	6 à 8	<1	long
électrostatique	50	>90	court
muscle naturel	>40	>35	moyen

Tableau 2. Principales caractéristiques des actionneurs les plus utilisés dans le micromonde comparées à celles d'un muscle naturel.

[5] AMF : Alliage à Mémoire de Forme (tel que le NiTiNol).

Un second aspect caractéristique des microsystèmes réside dans la complexité de la physique du micromonde. Bien que les lois de la physique admises dans les systèmes conventionnels soient applicables dans le micromonde, les rapports des amplitudes des forces sont différents [134]. La dynamique à l'échelle humaine est principalement régie par les forces inertielles (forces volumiques). A l'inverse, dans le micromonde les effets surfaciques sont prépondérants par rapport aux forces volumiques. Cette différence, illustrée sur la Fig. 9, a pour origine la réduction des dimensions et est connue sous le nom d' « effet d'échelle ». Cette situation pose des problèmes spécifiques en microrobotique liés aux interactions entre l'organe terminal et les objets manipulés tel que le lâcher (ou la dépose). En effet, après l'ouverture d'une micropince, l'objet manipulé reste souvent collé à l'un des doigts de la pince. Cette problématique est inexistante dans le macromonde. Les forces surfaciques (forces électrostatiques, forces de van der Waals, forces de capillarité), souvent négligeables à l'échelle macroscopique, provoquent l'adhésion des micro-objets [102][113]. Contrairement à la robotique conventionnelle dans laquelle la précision de positionnement est déterminée exclusivement par le porteur, les performances des microrobots dépendent de l'action combinée du porteur et de l'organe terminal.

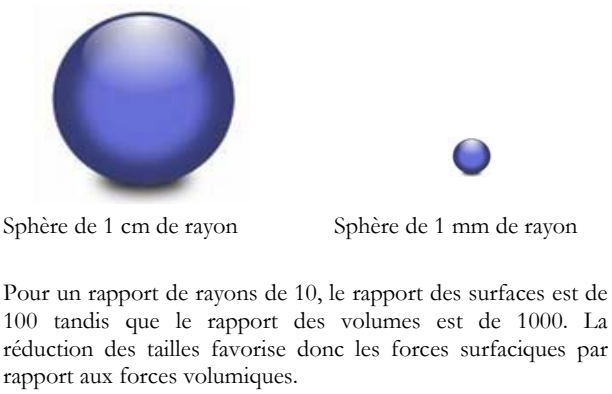


Fig. 9. Effet de la réduction des dimensions sur les forces volumiques et surfaciques.

Il n'est pas possible d'appréhender le micromonde sans considérer la notion d'incertitude à laquelle le praticien des microsystèmes est continuellement confronté. L'incompatibilité des échelles dimensionnelles empêche l'accès direct de l'homme au micromonde. Que ce soit pour l'observation ou la manipulation, l'usage d'interfaces est nécessaire (microscopes, caméras, organes haptiques, calculateurs, etc.)[126]. Outre leur prix très élevé, ces instruments sont utilisés à la limite de leurs capacités introduisant ainsi de nombreuses erreurs de mesure (erreurs sur la taille des objets observés, sur la position d'organes terminaux de préhenseurs, etc.). L'espace de perception est souvent localisé et la profondeur de champ très faible. Il en résulte de grandes difficultés lors de l'exécution de tâches de micromanipulation. Par ailleurs, les opérations d'identification des paramètres des modèles de ces microsystèmes sont complexes et conduisent à des incertitudes paramétriques à prendre en compte lors de leurs modélisations.

Si les travaux en microrobotique ont permis une avancée significative concernant la réalisation et la modélisation de fonctions élémentaires telles que l'actionnement ou la perception, l'obtention de microsystèmes complets et intelligents reste un enjeu important des recherches actuelles. Les développements attendus concernent notamment :

- la réalisation de cinématiques de robots adaptées au micromonde,
- la robustesse des structures micromécaniques et de la commande,

- la réalisation de microsystèmes capables d'agir dans des TEM (Transmission Electron Microscope) ou dans des environnements confinés,
- la réalisation de systèmes micromécatroniques nomades.

4.2.2 Spécificités de la commande dans le micromonde

Compte-tenu des petites dimensions caractérisant les microsystèmes, de l'emploi de nouveaux actionneurs ainsi que des niveaux extrêmement faibles des signaux véhiculés, certaines difficultés de commande apparaissent de manière plus marquée que dans les systèmes de taille conventionnelle. Celles-ci sont résumées sur la Fig. 10 et décrites dans la suite.

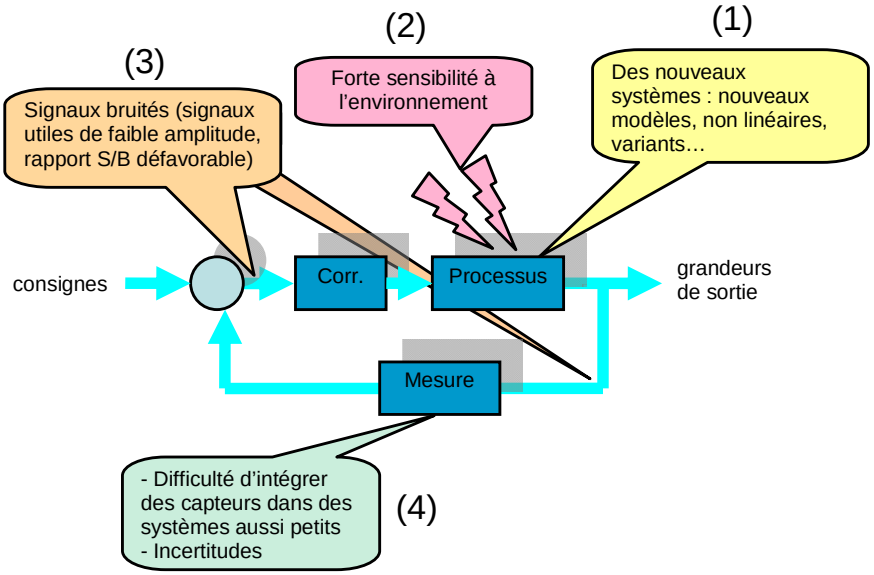


Fig. 10. Anatomie d'une rétroaction dans le micromonde.

1 - L'utilisation de nouveaux actionneurs (en particulier de matériaux actifs) et de structures déformables pour la réalisation des microsystèmes requiert le développement de nouveaux modèles prenant en compte les non-linéarités et les variations de comportements qui ne peuvent plus être négligées. De manière générale, nous arrivons aux limites des modèles LTI (Linear Time Invariant ou modèles linéaires invariants dans le temps) qui représentent de manière insuffisante le comportement du microsystème à commander. Par ailleurs, de nouvelles problématiques de commande distribuée, issues de l'approche bottom-up, sont apparues [16][94].

2 - L'automaticien des microsystèmes doit également tenir compte de la forte sensibilité aux variations des conditions environnementales, telles que la température, la pression atmosphérique, le taux d'humidité ou encore la présence de flux divers (lumineux, aériens etc.). A titre d'exemple, considérons la micropince représentée sur la Fig. 11 dont les organes terminaux sont des poutres en aluminium ayant une longueur L_0 = 1 mm à la température ambiante. Sous l'effet d'une élévation de température ΔT, les poutres s'allongent d'une valeur :

$$\Delta L = \alpha . L_0 . \Delta T$$

Avec :

$$\alpha = 23.10^{-6} / °C \quad \text{(dans le cas de l'aluminium.)}$$

Le Tableau 3 donne les élongations de chaque poutre pour diverses variations de température.

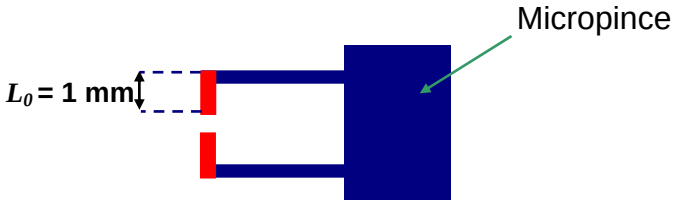


Fig. 11. Micropince comportant des organes terminaux en aluminium.

ΔT (°C)	*ΔL (µm)*
100	2,3
10	0,23
1	0,023

Tableau 3. Dilatation thermique d'une poutre en aluminium de longueur 1 mm sous l'effet d'une variation de température.

Il est aisé de constater que sous l'effet d'une variation de température, sans compensation, l'écrasement de l'objet manipulé (de valeur $2.\Delta L$) est non négligeable et le risque d'endommagement est grand pour un objet fragile. Dans la pratique, cet écrasement peut être plus important, car il résulte de l'effet combiné des variations de toutes les conditions environnementales.

3 - Un autre aspect important de la commande des microsystèmes concerne le traitement du bruit. Les faibles amplitudes des signaux véhiculés font que le rapport signal/bruit est très souvent défavorable. Dans les microsystèmes, les déplacements générés sont compris entre 10 nm et 100 µm et les forces produites sont comprises entre 1 nN et 10 mN. Dans certains cas, le bruit possède une amplitude comparable à celle des signaux utiles et devient la principale limitation à la précision du système [8]. Il est donc nécessaire d'introduire des fonctions de filtrage afin de tenir compte de ces bruits lors de la synthèse des lois de commande.

4 - Les capteurs, nécessaires à l'acquisition d'informations pour le bouclage, sont réputés difficiles à intégrer dans les microsystèmes. De nombreux microrobots et microsystèmes font usage de capteurs extéroceptifs efficaces, mais encombrants et coûteux. La mise en place de capteurs dans les microsystèmes implique la disponibilité de corps d'épreuve de très petite taille et l'accessibilité de l'emplacement pour la mesure. Bien que certains capteurs puissent être intégrés (jauges piézorésistives [8], capteurs capacitifs [151], etc.), le conditionnement des signaux produits et la connectique doivent faire l'objet d'une attention particulière. Dans certains cas, la rigidité des fils électriques utilisés pour recueillir les signaux issus des capteurs, peut modifier le comportement dynamique du microsystème instrumenté. Les techniques d'observation et d'estimation sont des outils particulièrement bien adaptés à ce contexte et elles permettent de réduire le nombre de capteurs à intégrer.

4.2.3 Approches de commande dans le micromonde

Les approches classiques de commande fondées sur les modèles LTI n'étant plus adaptées au micromonde, il convient d'adopter une stratégie pour la commande des microsystèmes adaptée

aux différents besoins. Pour cela, deux classes de microsystèmes seront considérées. La première concerne les systèmes dans lesquels de très hautes performances sont recherchées. Il s'agit principalement des dispositifs utilisés en laboratoires ou pour des applications critiques. La seconde concerne la production de masse de microsystèmes pour des applications non critiques, voire des MEMS « jetables ». Dans le premier cas, la mise en œuvre de lois de commande complexes et l'usage de moyens coûteux sont acceptables compte-tenu des niveaux d'exigence alors que dans la seconde, des approches moins coûteuses et simples à mettre en œuvre seront favorisées. Nous proposons le développement de deux approches de commande répondant à ces deux classes de microsystèmes (voir Fig. 12).

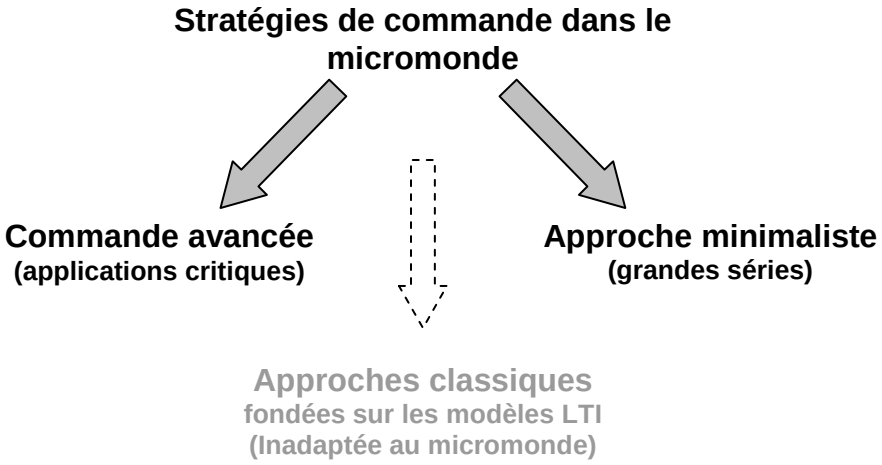


Fig. 12. Stratégies de commande dans le micromonde.

- L'emploi de méthodes de commande avancées vise à atteindre des performances ultimes par la recherche de modèles et de lois de commande évolués tenant compte des incertitudes de modélisation, des variations, des effets environnementaux et de la présence du bruit. Le Tableau 4 résume les principales difficultés rencontrées ainsi que les méthodes de la théorie de l'automatique à privilégier. La prise en compte de ces différents aspects conduit souvent à des correcteurs d'ordre élevé. C'est pourquoi des calculateurs performants doivent être employés pour le calcul en temps réel de la loi de commande.

Caractéristiques	***Outils de l'automatique adaptés***
Non-linéarités	Modèles non-linéaires, modèles multiples
Modèles variant, sensibilité à l'environnement	Commande robuste
Absence (ou manque) de capteurs	Observateurs, estimateurs
Présence du bruit et recherche de dynamiques rapides	Filtrage optimal (filtrage de Kalman, filtrage particulaire)

Tableau 4. Principales caractéristiques de la commande dans le micromonde et outils de l'automatique adaptés.

Plusieurs de mes travaux, décrits dans la suite, s'inscrivent dans cette démarche. Ils concernent notamment la synthèse de correcteurs robustes et le filtrage du bruit.

- L'approche minimaliste est fondée sur des considérations économiques. Elle vise à obtenir de bonnes performances tout en réduisant les moyens mis en œuvre. Elle favorise les méthodes de commande en boucle ouverte sans utilisation de capteurs et l'amélioration des performances dès la conception du microsystème. Deux travaux illustrent cette approche : la commande d'un système de micro-convoyage à l'aide d'une technique de modelage de l'entrée « Input Shaping » (voir paragraphe 4.3.2.2), et la microrobotique numérique qui permet d'obtenir une répétabilité de 90 nm avec une commande en boucle ouverte grâce à la robustesse mécanique des structures réalisées (voir partie 5).

4.3 Travaux de recherche réalisés

4.3.1 Organisation de mes travaux de recherche

Les travaux de recherche menés s'articulent autour de deux aspects majeurs : la conception d'architectures nouvelles pour la microrobotique et la commande dans le micromonde. Ces deux voies ont un même objectif : l'amélioration des performances. Ces dernières sont ici considérées au sens large. Il s'agit soit de performances en termes de résolution en position ou en force atteintes par les systèmes étudiés, soit de l'accroissement des possibilités d'utilisation de ces systèmes ou robots (convoyage de divers types de micro-objets avec un système unique, saisie de micro-objets, dont les dimensions varient très largement, à l'aide d'une micropince unique, etc.). Plusieurs de ces travaux ont été proposés et dirigés dans le cadre de thèses de doctorat ou de stages de Master ou de DEA. La Fig. 13 donne une vue synthétique de l'organisation de ces travaux. Dans chaque projet, les aspects de conception et de commande ont été étudiés. Ces derniers sont fortement liés entre-eux (et parfois interdépendants) en raison du caractère pluridisciplinaire des microsystèmes. Les travaux sont classés selon la nature de la contribution majoritaire (conception ou commande).

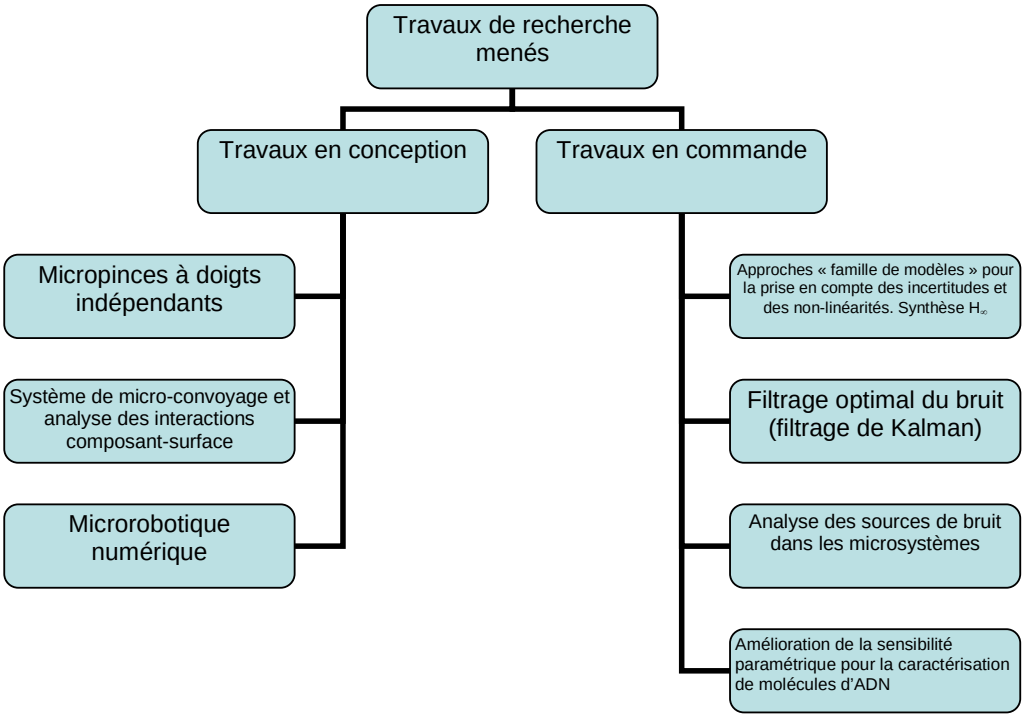


Fig. 13. Organisation des travaux de recherche menés en conception et en commande des microsystèmes.

L'objectif visé par chaque projet est précisé dans le Tableau 5.

Projet	***But recherché***
Micropinces à doigts indépendants.	Manipulation de micro-objets dans une large gamme de dimensions (quelques dizaines de micromètres à 1 centimètre).
Système de micro-convoyage et analyse des interactions composant-surface.	Convoyage et positionnement de micro-objets de formes diverses ayant des dimensions comprises entre 50 μm et 1 mm à l'aide d'un convoyeur unique.
Microrobotique numérique.	Développement d'architectures nouvelles de microrobots et commande en boucle ouverte.
Approches « famille de modèles » pour la prise en compte des incertitudes et des non-linéarités. Synthèse H_∞.	Prise en compte des variations de modèle et des non-linéarités par une approche de commande robuste.
Filtrage optimal du bruit (filtrage de Kalman).	Amélioration des performances de capteurs embarqués sur des microsystèmes et filtrage du bruit de mesure sans réduction de la bande passante.
Analyse des sources de bruit dans les microsystèmes.	Détermination des bruits agissant sur les microsystèmes en vue de leur prise en compte dans les lois de commande.
Amélioration de la sensibilité paramétrique pour la caractérisation de molécules d'ADN.	Utilisation d'outils de l'automatique pour l'accroissement de la sensibilité de mesures dans des expériences biologiques.

Tableau 5. Synthèse des objectifs des différents projets de recherche.

La mise en œuvre de ces projets et la volonté permanente de mener les travaux jusqu'à leurs applications peuvent être illustrées par les démonstrateurs technologiques réalisés (voir Fig. 14). A l'exception du nanotweezer de caractérisation de molécules d'ADN, tous les systèmes technologiques ont été réalisés à FEMTO-ST. On peut notamment observer une évolution des objets micromécatroniques vers des structures MEMS. Ces démonstrateurs ont permis de confronter les aspects théoriques aux difficultés de l'expérimentation dans le micromonde.

Les paragraphes suivants décrivent brièvement les différents projets menés ainsi que les principaux résultats obtenus. Deux de ces projets, représentatifs de contributions originales en conception de microsystèmes et en commande, sont décrits de manière plus détaillée dans les chapitres 5 et 6. Il s'agit de la microrobotique numérique et de la prise en compte du bruit pour la commande des microsystèmes.

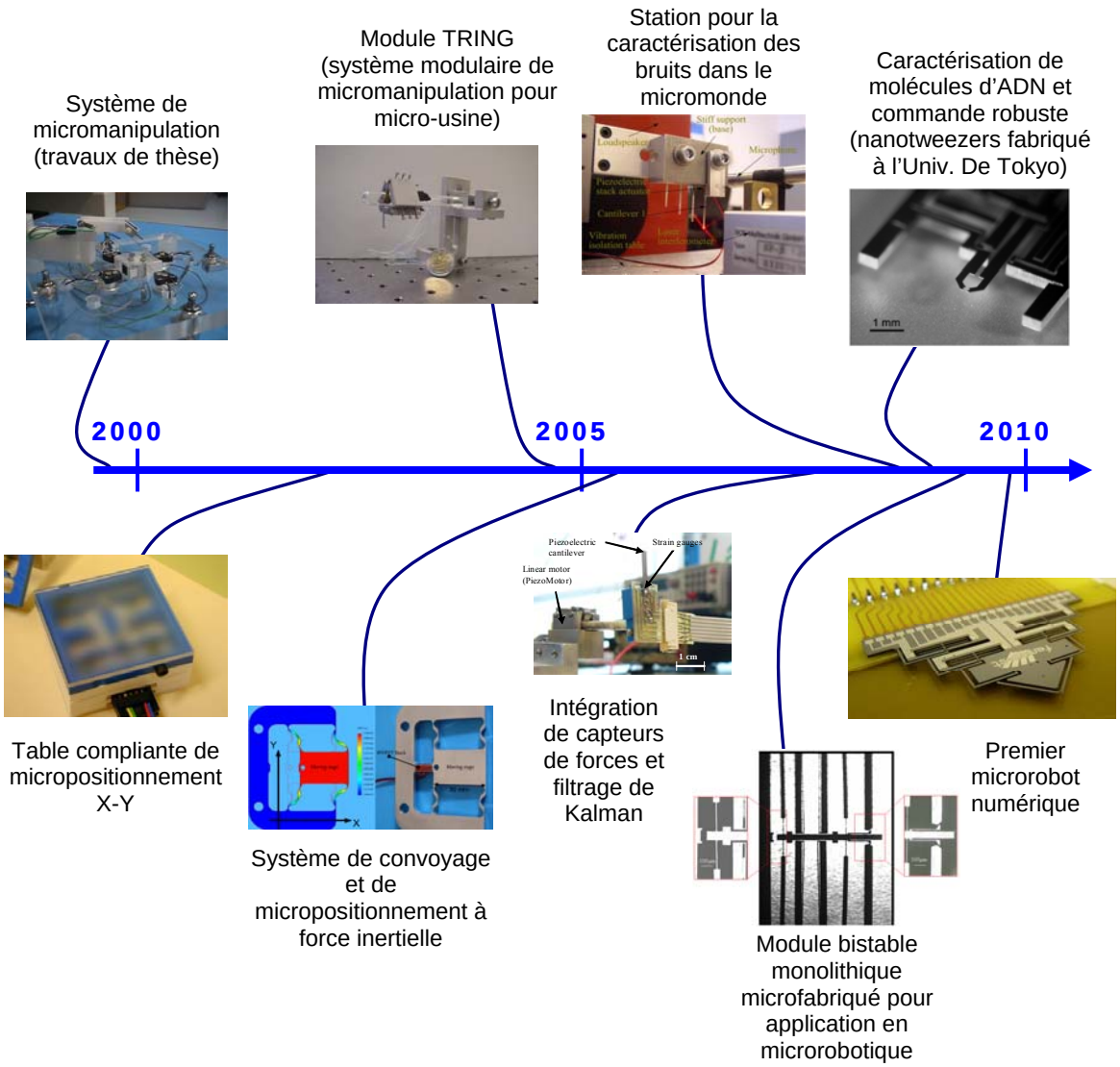


Fig. 14. Principaux démonstrateurs réalisés dans le cadre de mes travaux de recherche et d'encadrement.

4.3.2 Travaux en conception

4.3.2.1 Micropinces à doigts indépendants

Le projet décrit ici a été développé dans le cadre de l'équipe « micro-usine » pour répondre à l'une des fonctions principales dans tout système de micro-assemblage : la manipulation de micro-objets. Compte-tenu de la nature des systèmes à assembler (pièces micromécaniques, mécanismes d'horlogerie, etc.), nous nous sommes orientés vers la manipulation à doigts de serrage. De nombreux prototypes de micropinces avaient été développés dans notre laboratoire et à travers le monde exploitant des actionneurs piézoélectriques [41][67][74], électrostatiques[70] ou en AMF [118]. Cependant, quelque soit le principe d'actionnement utilisé, la plage de dimensions des objets manipulés est limitée par l'écartement maximal entre les doigts. Selon la micropince utilisée, la limite est généralement comprise entre 30 µm et 200 µm. Or les micromécanismes comportent souvent des composants dont les dimensions peuvent varier dans de grandes proportions (de quelques dizaines de µm à quelques mm ou plus). L'assemblage de tels systèmes ne peut donc se faire à l'aide d'une micropince unique. L'emploi de plusieurs pinces est possible

mais pose de nombreux problèmes d'encombrement et de coordination, en particulier dans l'espace réservé à chaque cellule dans le projet micro-usine de notre laboratoire, soit un cube de 10 cm d'arête. Diverses solutions peuvent alors être envisagées. La Fig. 15 montre des exemples d'organes terminaux permettant d'élargir sensiblement la plage des dimensions des objets manipulables en jouant sur la profondeur de leur insertion entre les deux doigts [96]. Ces structures ne peuvent cependant être exploitées que si un espace suffisant est disponible autour de l'objet à saisir.

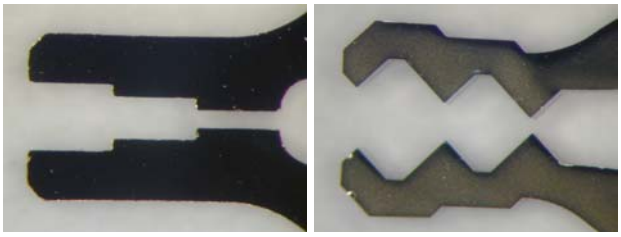


Fig. 15. Formes d'organes terminaux de micropinces permettant d'accroître la plage de dimensions des micro-objets manipulés.

Une autre approche consiste à utiliser un manipulateur unique et un dispositif de changement d'outils. Malgré les difficultés liées à la miniaturisation, une station de micromanipulation exploitant ce principe a été réalisée (voir Fig. 16) [72]. Elle utilise une colle thermique pour solidariser des organes terminaux avec l'extrémité d'actionneurs piézoélectriques. L'inconvénient majeur est la complexité des opérations de changement d'outil et leur lenteur.

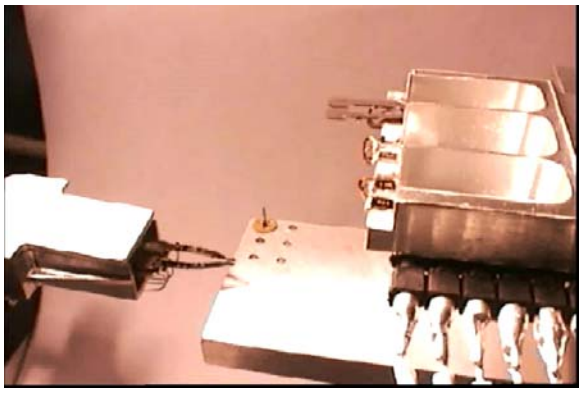


Fig. 16. Station de micromanipulation équipée d'un système de changement d'outil.

Dans tous les cas décrits, la principale limitation à la plage des dimensions des objets manipulés est due aux faibles amplitudes de déplacement des microactionneurs utilisés en mode proportionnel. Dans le but d'offrir une grande flexibilité de manipulation et une plage de dimensions des objets manipulés théoriquement illimitée, un système de manipulation utilisant des doigts indépendants a été proposé et réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat (thèse de Micky Rakotondrabe). Afin de lever la limitation des déplacements des micro-actionneurs, le mode de fonctionnement stick-slip a été exploité [62]. La Fig. 17 présente de manière symbolique son principe de fonctionnement. Le système représenté consiste en un corps rigide équipé d'actionneurs piézoélectriques et posé sur un plan. Les actionneurs sont conçus de manière à fléchir sous l'effet de l'application d'une tension électrique U. Si une tension électrique en forme de dents de scie est appliquée, le système peut se déplacer en effectuant des petits pas grâce à la succession de deux phases : la première se produit pendant l'application de la rampe de tension

(variation lente) qui provoque la flexion des actionneurs. La seconde correspond à une variation brusque de la tension qui produit un glissement de l'extrémité des actionneurs. La vitesse de déplacement dépend à la fois de l'amplitude et de la fréquence de la tension électrique appliquée. Ce principe a été utilisé dans de nombreux systèmes micromécatroniques (voir Fig. 18).

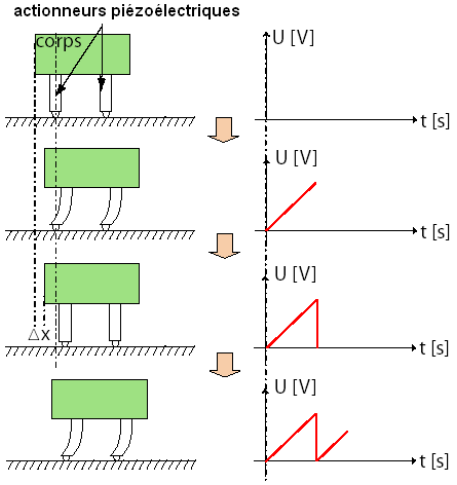


Fig. 17. Principe de fonctionnement d'actionneurs en mode stick-slip.

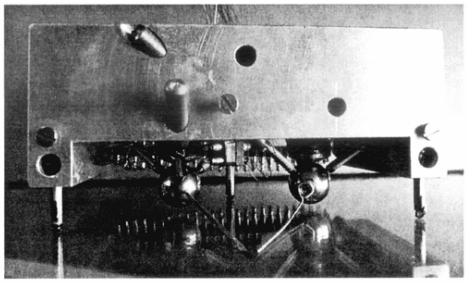


Fig. 18. Exemples de systèmes exploitant le principe stick-slip : robot MINIMAN [83] et micromanipulateur MM3A-EM (© Kleindiek Nanotechnik).

Le système de micromanipulation conçu utilise comme élément de base un module de déplacement, appelé « TRING-module », développé pour ce projet (voir Fig. 19). Il consiste en un anneau de forme triangulaire équipé de trois paires d'actionneurs piézoélectriques. Chaque actionneur comporte une pastille piézoélectrique, cinq électrodes et un pied en saphir assurant le contact avec le tube en verre servant de guide. Ces actionneurs développés à l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) [56], et aimablement mis à notre disposition, permettent des déplacements suivant deux directions en fonction des électrodes excitées. Dans notre cas, ils permettent la translation du module le long du tube (direction x) ainsi que sa rotation autour de ce même tube (direction θ). L'emploi de deux TRING-modules équipés chacun d'une poutre piézoélectrique actionnée servant d'effecteur permet de constituer une station de micromanipulation complète. Cette dernière, grâce à ses six degrés de liberté permet non seulement de lever la limitation sur la taille des objets manipulés (de quelques dizaines de μm à 1 cm), mais également l'exécution de tâches de micromanipulation complètes (voir Fig. 20).

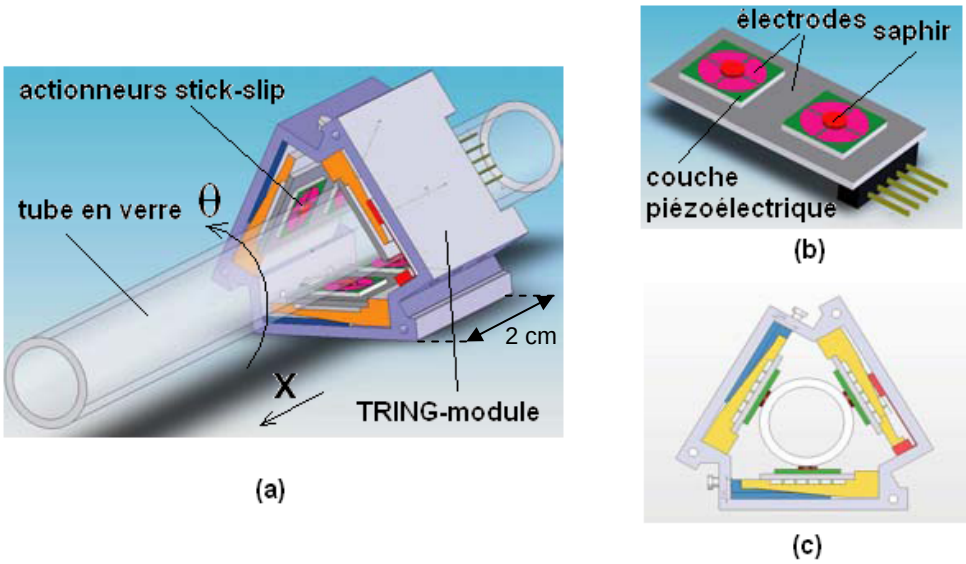


Fig. 19. Structure du TRING-module : (a) vue générale, (b) actionneurs utilisés et (c) vue du module en appui sur un tube en verre.

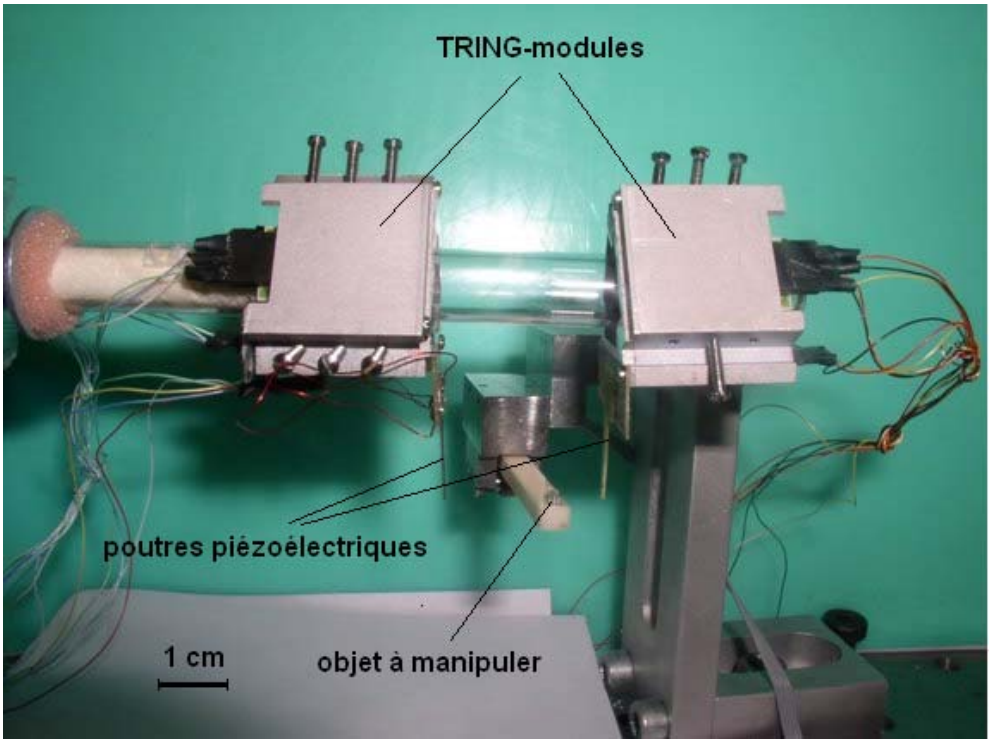


Fig. 20. Station de micromanipulation à 6 ddl comportant deux TRING-modules et deux poutres piézoélectriques.

L'analyse du comportement des TRING-modules a permis de déterminer ses caractéristiques de déplacement en mode stick-slip. Celles-ci sont résumées dans le Tableau 6.

Translation (x)	
Pas max. (à U=150 V)	200 nm
Vitesse max.	2 mm/s
Force de blocage	150 mN
Rotation (θ)	
Pas max. (à U=150 V)	0,0025°
Vitesse max.	1 tour en 18 secondes

Tableau 6. Caractéristiques principales d'un TRING-module.

La commande du déplacement d'un TRING-module pour exécuter une tâche de manipulation peut se faire en agissant sur l'amplitude et/ou la fréquence de la tension de commande *U*. Une loi de commande originale, dénommée « commande U/F », exploitant l'action combinée des deux grandeurs de command (amplitude *U* et fréquence *F*) pour améliorer les performances en boucle à été conçue (voir Fig. 21 dans laquelle *Ku* et *Kf* sont des gains). La synthèse de cette loi de commande, ainsi que les résultats obtenus, sont présentés dans [10].

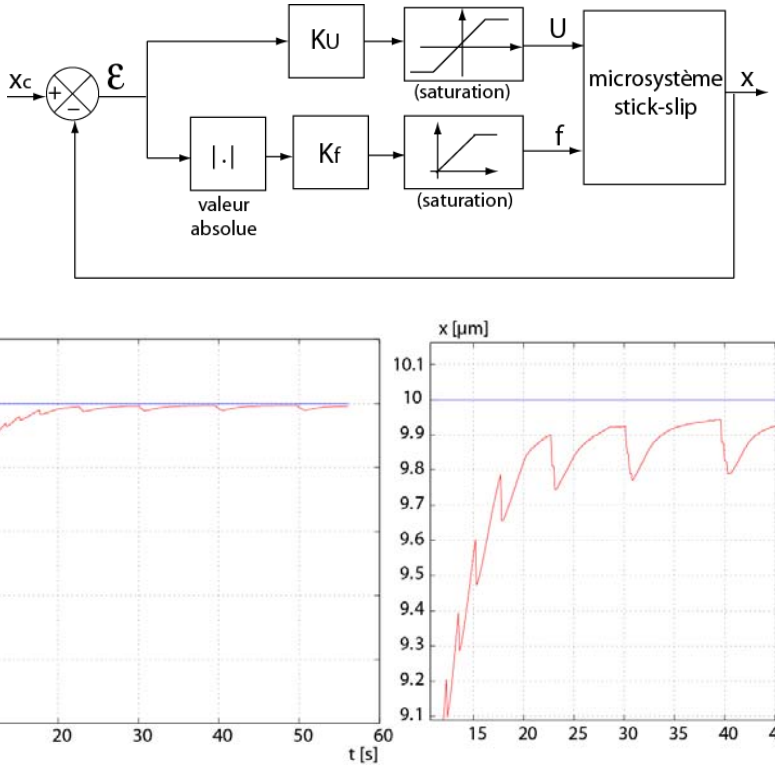


Fig. 21. Schéma de la commande U/F développée et performances obtenues pour une consigne de 10 µm.

L'obtention de pas de déplacements inférieurs à 200 nm en translation et inférieurs à 0,0025° en rotation, est possible en abaissant l'amplitude de la tension électrique *U* appliquée. Cependant, à ces échelles, la régularité des pas est mal maîtrisée car elle dépend de nombreux paramètres tels que les défauts de forme du tube, l'état de surface, ou encore la variation de la charge transportée. C'est pourquoi, une stratégie de déplacement en sous-pas a été mise en œuvre. Elle consiste à exploiter la très haute résolution des actionneurs piézoélectriques en mode proportionnel. Ainsi, les déplacements à longue distance sont effectués à l'aide du mode stick-slip permet de se positionner à proximité de la position de consigne, puis le mode proportionnel est exploité pour le positionnement final. Un modèle d'état a été élaboré à partir des équations de la piézoélectricité et d'un modèle de frottement élasto-plastique [81] pour lier le déplacement en sous-pas en

translation et en rotation à la tension de commande U [12]. Les équations d'état et de sortie décrivant le comportement en translation son données par :

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\begin{pmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = A_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + B_1.U \\ \begin{pmatrix} T \\ x \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + D_1.U \end{cases}$$

x représente le déplacement et T, la force de frottement dans la direction de déplacement. x_1 et x_2 sont des variables internes. Les matrices A_1, B_1, C_1 et D_1 dépendent des caractéristiques mécaniques et des propriétés piézoélectriques de l'actionneur.

Un modèle similaire a été établi pour les mouvements de rotation :

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\begin{pmatrix} x_3 \\ \dot{x}_3 \\ x_4 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = A_2 \begin{pmatrix} x_3 \\ \dot{x}_3 \\ x_4 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} + B_2.U \\ \begin{pmatrix} T \\ \theta \end{pmatrix} = C_2 \begin{pmatrix} x_3 \\ \dot{x}_3 \\ x_4 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} + D_2.U \end{cases}$$

θ représente le déplacement en rotation et T, la force de frottement dans la direction de déplacement. x_3 et x_4 sont des variables internes. Les matrices A_2, B_2, C_2 et D_2 dépendent des caractéristiques mécaniques et des propriétés piézoélectriques de l'actionneur.

Le résultat d'un asservissement de la position x en translation à l'aide d'un correcteur PI en utilisant un interféromètre laser de résolution 1,24 nm pour la mesure est présenté sur la Fig. 22. Il apparait que les performances sont limitées uniquement par le bruit.

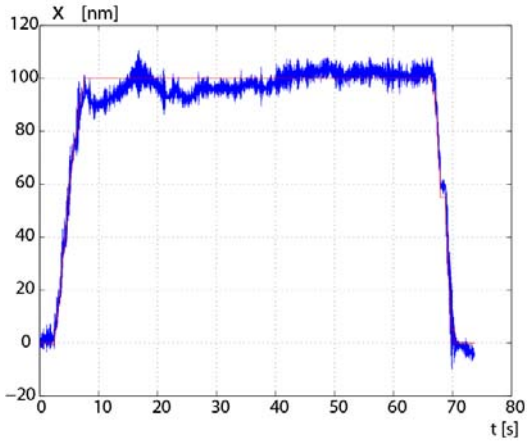


Fig. 22. Résultat expérimental de l'asservissement de la position x du TRING-module en mode sous-pas.

La combinaison des modes de fonctionnement stick-slip et proportionnel en sous-pas permet d'une part des déplacements rapides à longue distance et une précision de positionnement nanométrique tout en offrant une grande souplesse d'utilisation.

4.3.2.2 Système de micro-convoyage et analyse des interactions composant/surface

Les travaux menés au sein de l'équipe micro-usine, nous ont amenés à analyser les différentes fonctions nécessaires à la construction d'une micro-usine complète. Il est apparu que la fonction « convoyage de microcomposants », pourtant essentielle dans un processus d'assemblage, était très peu développée. Le convoyage consiste à déplacer les composants entre les différents postes de la micro-usine. Les solutions technologiques proposées étaient, soit issues de procédés conçus pour l'assemblage traditionnel, mal adaptés à la miniaturisation, soit dédiées à un type de micro-objet bien spécifique. Ce constat a été le point de départ d'une activité de recherche durant laquelle a été conçu un système de convoyage dédié aux microcomposants. Un état de l'art complet sur les systèmes de convoyage utilisés pour véhiculer des composants de taille millimétrique et sub-millimétrique a été effectué, et est présenté dans [127].

Dans un but de généricité, concept fort des micro-usines, le système réalisé devait être capable de véhiculer des micro-composants de tailles et de formes différentes pour permettre un emploi aussi large que possible. Ce travail a fait l'objet d'une thèse de doctorat (thèse de Mickaël Paris). Notre choix s'est porté sur l'emploi de forces inertielles, utilisables quelque soit la nature du micro-objet considéré car elles mettent en œuvre sa masse, offrant ainsi une grande indépendance quant aux formes et aux matériaux dont sont fabriqués les micro-objets. Cette approche représente toutefois un challenge important car les objets étant de très faible taille, leur masse est également très faible. Il convient donc d'analyser précisément ces interactions à l'échelle sub-millimétrique.

Le système de convoyage conçu et réalisé est représenté sur la Fig. 23. Sa structure mécanique est constituée d'une pièce unique en aluminium. Ce dispositif est constitué d'une partie fixe et d'une partie mobile. Cette dernière est liée à la partie fixe par des biellettes et des charnières élastiques. L'emploi de charnières élastiques est ici fondamental, car il permet d'éviter tout phénomène de frottement ou de jeu qui dégraderait la précision de positionnement. La structure monolithique employée est peu sensible aux problèmes de roulis, de tangage et de lacet car elle est très rigide. L'optimisation mécanique de la structure a été effectuée à l'aide d'un logiciel d'analyse par éléments finis (ANSYS). Un actionneur piézoélectrique de type « stack » (ou empilement) de référence P-249.20 fabriqué par la société PI (Physik Instrumente) permet d'imposer un

déplacement à la partie mobile sur laquelle est posé le composant à déplacer. Ce système permet de déplacer les micro-objets selon un axe en utilisant un principe de stick-slip (voir Fig. 17). Pour cela, une tension en dent de scie est appliquée sur l'actionneur piézoélectrique. Si l'on souhaite déplacer pas-à-pas un composant sur la surface de la partie mobile, il est nécessaire de lui fournir une accélération suffisante pour vaincre la force de friction de décrochement (voir Fig. 24).

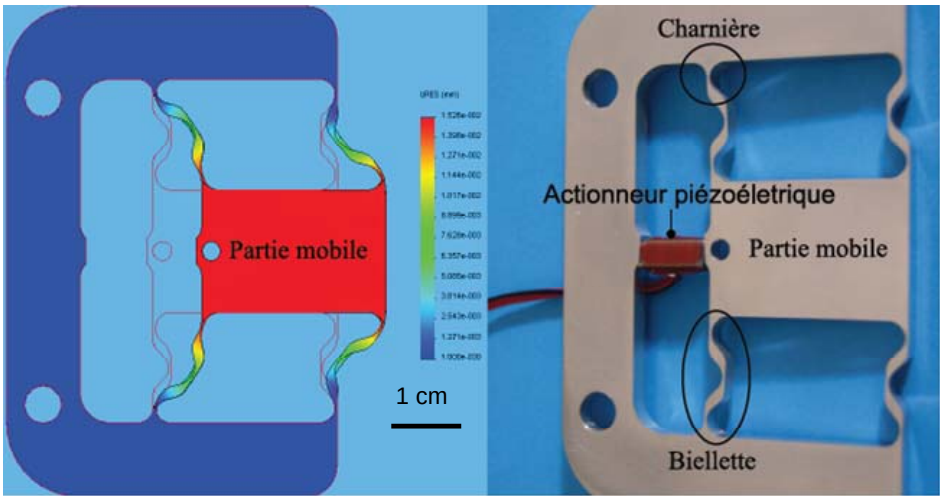


Fig. 23. Structure du système de convoyage réalisé.

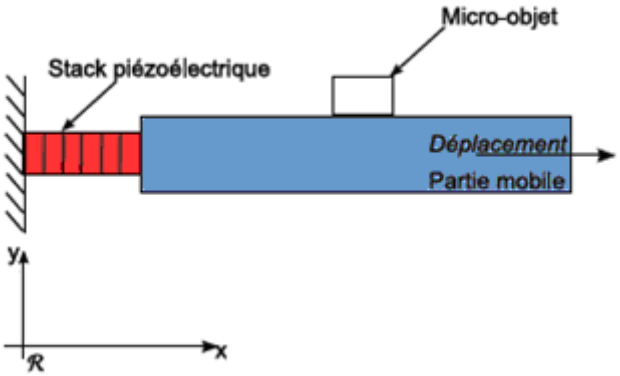


Fig. 24. Représentation d'un micro-objet posé sur la partie mobile déplacée par un stack piézoélectrique.

Lorsque l'accélération $\ddot{x}$ de la partie mobile est faible, le micro-objet reste collé en raison de la présence de forces de friction. Le micro-objet se déplace d'un pas si et seulement si :

$$m\ddot{x} > F_f$$

Dans cette expression, m est la masse du micro-objet et F_f la force de friction de décrochement (force minimale permettant la séparation entre le micro-objet et la surface de la partie mobile du convoyeur).

Le succès d'un tel procédé de convoyage est assujetti à la réussite de deux tâches :

- être en mesure de générer et de contrôler des accélérations unidirectionnelles d'amplitude suffisante pour décrocher les micro-objets,

- analyser les forces de friction à l'échelle micrométrique pour prédire, en fonction des caractéristiques du micro-objet, la force de décrochement et, par conséquent, l'accélération nécessaire.

4.3.2.2.1 Analyse du comportement dynamique du système de convoyage

La première étape fut l'étude du comportement dynamique de la partie mobile sous l'effet de l'actionnement piézoélectrique. La Fig. 25 présente la position de la partie mobile en réponse à l'application sur l'actionneur piézoélectrique d'une tension électrique de 100 V. Cette réponse montre que le faible amortissement du système dans la direction de déplacement, pose des problèmes d'utilisation car ces oscillations provoquent des accélérations dans les deux sens (et donc le déplacement de l'objet par avance-recul), et ce, y compris lorsqu'un signal en dent de scie est appliqué sur l'actionneur. L'obtention d'un fonctionnement stick-slip correct requiert un comportement bien amorti du système de convoyage. Il est naturellement possible d'obtenir une réponse amortie par l'ajout d'un correcteur et d'un capteur. Cependant, cette solution s'avère coûteuse dans la mesure où le niveau très faible des amplitudes à mesurer (nanométrique) requiert l'emploi d'un capteur performant. Une solution beaucoup moins coûteuse sans utilisation de capteur a été privilégiée. Elle consiste à exploiter une technique d' « input shaping » ou modelage de l'entrée. Cette technique a été, en premier, décrite dans un brevet du MIT (Massachussetts Institute of Technology) [125], puis améliorée par divers travaux.[140] la mise en œuvre pratique de cette technique est présentée de manière détaillée. L'avantage majeur de cette méthode est sa simplicité de synthèse et de mise en œuvre pratique. Son principe de fonctionnement est le suivant : considérons un système faiblement amorti et possédant un comportement modélisé par une fonction de transfert du second ordre :

$$G(p) = \frac{k}{1 + \frac{2h}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^{\,2}}}$$

k représente le gain statique, ω_n est la pulsation naturelle et h le facteur d'amortissement.

Lorsqu'une impulsion $A_1.\delta(t)$ d'amplitude A_1 est appliquée à l'entrée du système, ce dernier oscille avec une pseudo-période T :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-h^2}}$$

Si une seconde impulsion $A_2.\delta(t - \frac{T}{2})$ est appliquée à l'instant $\frac{T}{2}$, par un choix approprié de l'amplitude A_2, il est possible de compenser les oscillations. Dans le cas de l'application d'un signal arbitraire à l'entrée du système, le modeleur réalise une convolution de ce signal avec les impulsions (voir Fig. 26). L'emploi d'un nombre d'impulsions pondérées supérieur à 2 permet un meilleur amortissement du système.

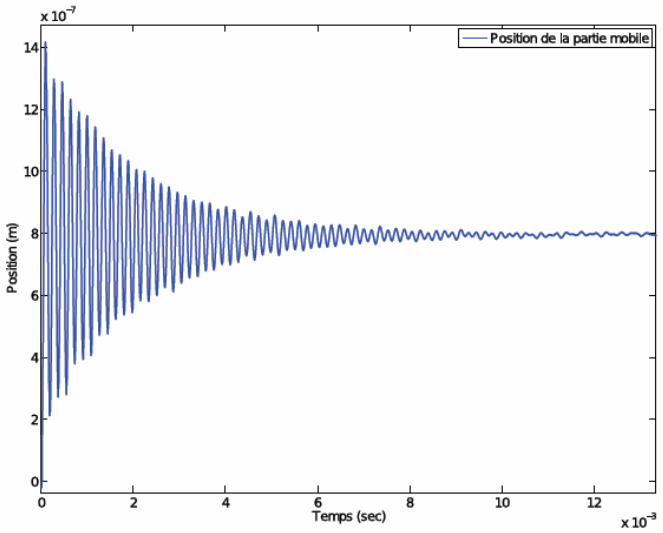


Fig. 25. Réponse du système de convoyage lorsque l'actionneur piézoélectrique est soumis à un échelon de tension électrique de 100V.

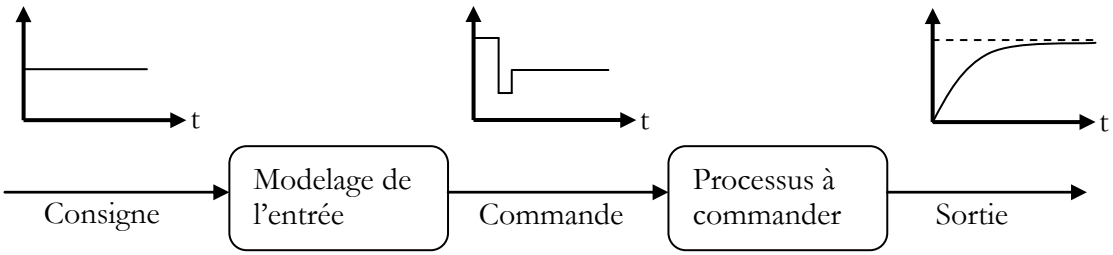


Fig. 26. Principe de la commande en boucle ouverte par modelage de l'entrée (input shaping).

Ce principe de commande a été mis en œuvre en pratique à l'aide d'un module de calcul temps réel dSPACE. Il a permis d'obtenir le résultat décrit dans la Fig. 27. L'emploi de cette méthode de commande en boucle ouverte permet donc un bon suivi des variations du signal en dent de scie appliqué à l'entrée du système, facilitant ainsi la génération des accélérations nécessaires au déplacement des micro-objets..

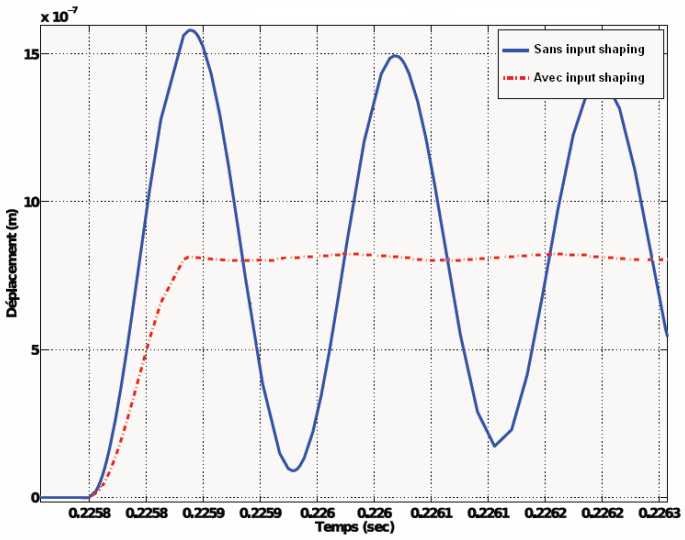


Fig. 27. Comparaison des réponses expérimentales en position de la partie mobile sans et avec utilisation du modelage de l'entrée.

La technique « input shaping », au-delà de l'application présentée ici, est une approche intéressante pour la commande des microsystèmes sans capteur [59][130], même si elle ne peut rivaliser en termes de performances avec les méthodes par bouclage dans la mesure où aucune information sur le succès de la tâche réalisée n'est disponible. Cependant, dans certains cas, sa simplicité de calcul et de mise en œuvre peut être un atout pour des microsystèmes relativement robustes mécaniquement ou pour des MEMS « jetables » ou à faible coût.

4.3.2.2.2 Etude des forces de friction à l'échelle micrométrique

Lorsque deux corps sont en contact et qu'ils sont animés d'un mouvement relatif, la force qui s'oppose à ce mouvement est appelée « force de friction ». Dans le micromonde, l'influence de cette force est importante car les effets volumiques sont très faibles. L'analyse de la friction est complexe car elle fait intervenir les propriétés géométriques, mécaniques et physico-chimiques des surfaces. De nombreux modèles de friction on vu le jour [73][58][66][80] mais ces derniers sont difficilement exploitables en pratique pour prédire la force de frottement entre un micro-objet et une surface plane. Pourtant, l'estimation de cette force est nécessaire pour la génération de la loi de commande appropriée.

Dans ce cadre, nous avons développé une méthode pour l'estimation de la force de friction fondée sur le modèle de Bowden et Tabor [61] qui stipule que la force de friction F_f est proportionnelle à l'aire réelle de contact A_r entre les deux surfaces, par la relation suivante :

$$F_f = \tau . A_r$$

La constante τ, définie comme étant une force de cisaillement par unité d'aire, est connue sous le terme de contrainte ou effort de cisaillement interfacial. Elle dépend des matériaux en contact.

L'aire réelle de contact entre un micro-objet et une surface ne peut être calculée par les surfaces en regard (aire apparente). En effet, si à l'échelle macroscopique une surface peut paraitre plane, l'analyse microscopique laisse apparaitre une certaine rugosité (voir Fig. 28). Seule une fraction de l'aire apparente est réellement en contact.

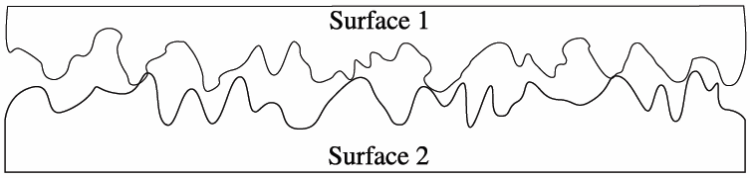


Fig. 28. Contact entre deux surfaces à l'échelle microscopique.

L'estimation de cette aire, nécessaire à la détermination de la force de friction, requiert l'analyse des aspérités en contact. Une démarche statistique fondée sur le modèle multi-aspérités de Greenwood-Williamson [91] a été réalisée. Ce modèle représente deux surfaces rugueuses en contact, par un plan rigide et parfaitement lisse et une surface rugueuse équivalente séparés par une distance d appelée distance de séparation (voir Fig. 29).

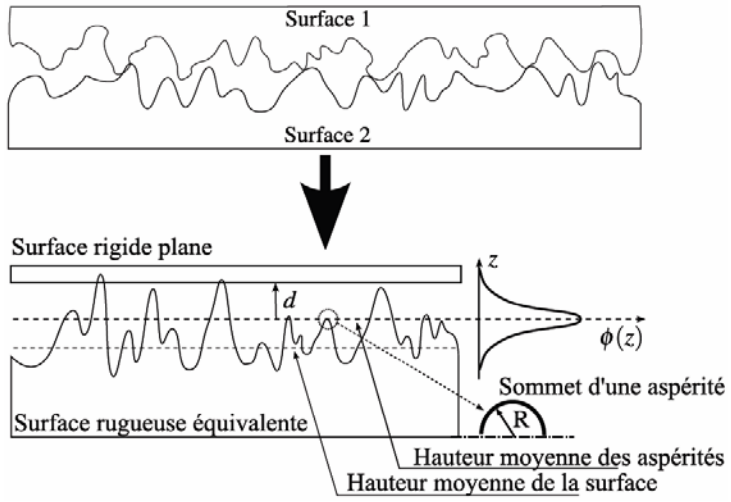


Fig. 29. Représentation de deux surfaces rugueuses en contact selon Greenwood-Williamson.

Si les surfaces sont orientées selon l'axe z (voir Fig. 29) l'aire réelle de contact est alors calculée par l'expression suivante :

$$A_r = N\pi R\int_d^{\infty}(z-d)\Phi(z)dz$$

Avec :
N : le nombre total des aspérités,
R : le rayon de courbure moyen des aspérités,
$\Phi(z)$: la densité de probabilité gaussienne décrivant la hauteur des aspérités.

Le calcul de l'aire réelle de contact nécessite donc la connaissance des caractéristiques des surfaces en regard.

Les études expérimentales ont été menées sur des composants en silicium, car ce matériau est très utilisé dans les MEMS ainsi que dans de nombreux microsystèmes. Sur un wafer de silicium de 50 µm d'épaisseur, deux types d'objets ont été fabriqués. Des parallélépipèdes (micro-objets) dont les deux autres dimensions vont de 80×80 µm^2 à 300×300 µm^2 et des supports de contact de dimensions plus grandes. Deux types de supports ont été fabriqués : des supports pleins et des supports usinés (striés) afin de réduire la surface de contact de 50%. Les supports sont fixés sur la partie mobile du système de convoyage afin de déplacer les micro-objets. Nous sommes donc dans une situation de contact entre un micro-objet et une surface, tous deux en silicium (voir Fig. 30).

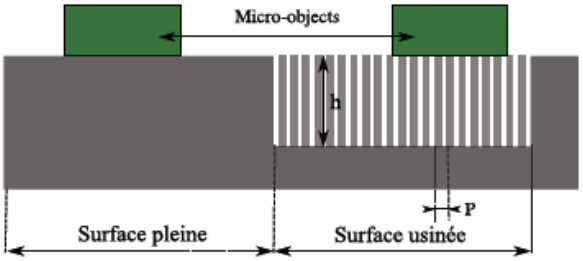


Fig. 30. Représentation des supports utilisés.

La distribution des aspérités ainsi que leur rayon de courbure moyen ont été calculés à partir d'une analyse topographique des échantillons fabriqués, réalisée sur des images obtenues à l'aide d'un microscope à force atomique (modèle SMENA de la société NT-MDT) (voir Fig. 31). Les méthodes de calcul employées sont détaillées dans [127].

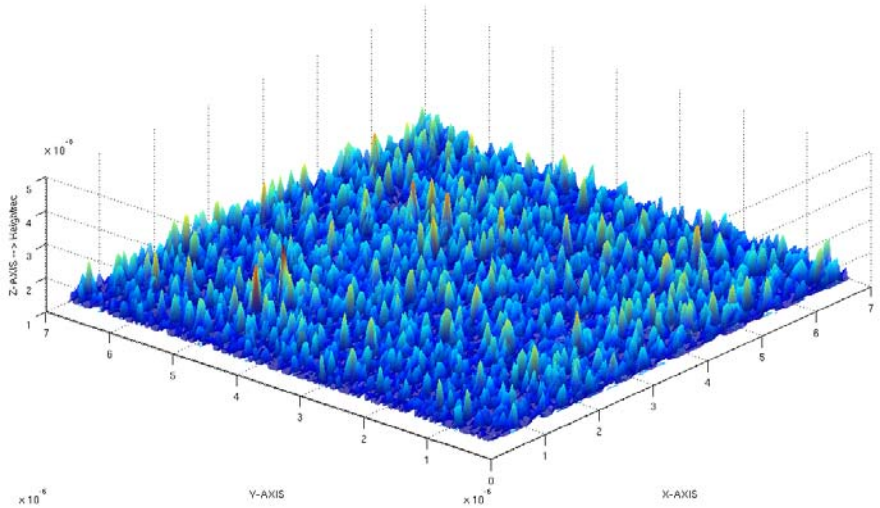


Fig. 31. Topographie d'une surface de silicium obtenue par AFM (Atomic Force Microscope).

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 7. Nous pouvons notamment constater que pour une diminution de la surface apparente de 50%, le rapport entre les surfaces réelles de contact est de 76%. L'écrasement des aspérités est différent dans les deux cas.

Micro-objet (µm²)	*Aire réelle (10^{-7} m²) Sur surface pleine*	*Aire réelle (10^{-7} m²) Sur surface usinée*	*Rapport des surfaces*
300×300	4,9734	3,7833	0,76
200×200	2,2104	1,6815	0,76
100×100	0,55259	0,42037	0,76
80×80	0,35366	0,26904	0,76

Tableau 7. Evaluation de l'aire réelle de contact entre les micro-objets et les surfaces pleines et usinées.

La détermination de la contrainte de cisaillement interfacial τ a été effectuée en utilisant l'AFM dans une position non conventionnelle. En effet, le levier de ce dernier à été monté en position verticale afin de pouvoir mesurer des efforts de friction. Ce principe est illustré sur la Fig. 32 et la station de mesure est présentée sur la Fig. 33.

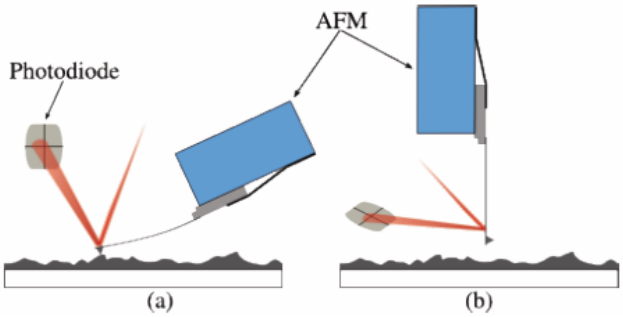


Fig. 32. (a) - position standard d'une tête d'AFM, (b) - position verticale utilisée pour la mesure des forces de friction.

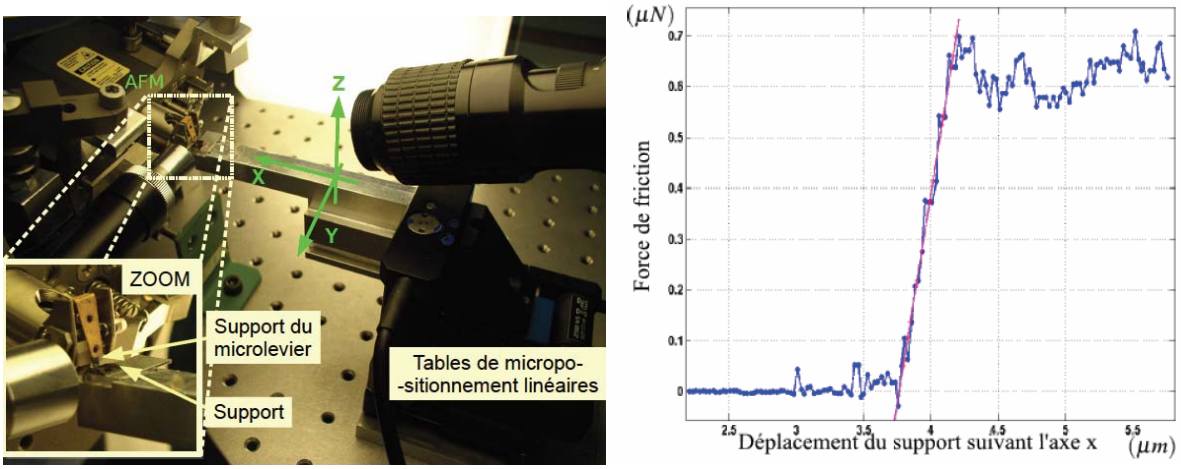


Fig. 33. Station de mesure des forces de friction à l'aide d'un AFM (à gauche) et relevé de la force mesurée sur un micro-objet de 300×300 µm² (à droite).

Ces mesures ont notamment permis d'estimer τ dans le cas du contact silicium-silicium :

$$16,81 < \tau < 25,33 \quad (GPa)$$

Compte-tenu des incertitudes à ces échelles (état des surfaces, présence de poussière, taux d'humidité, etc.) cet intervalle est relativement étroit et permet une approximation suffisante dans de nombreux cas.

La connaissance de la contrainte de cisaillement interfacial τ pour des matériaux donnés et l'estimation de l'aire réelle de contact permettent d'étendre l'évaluation de la force de friction à des micro-objets ayant des dimensions différentes sans devoir utiliser un AFM.

4.3.2.2.3 Convoyage de micro-composants par asservissement visuel

Le système décrit précédemment a été utilisé pour convoyer les micro-objets fabriqués à l'aide d'un algorithme de commande de type « look and move ». La Fig. 34 décrit la station réalisée et la Fig. 35 montre un exemple d'asservissement sur un axe.

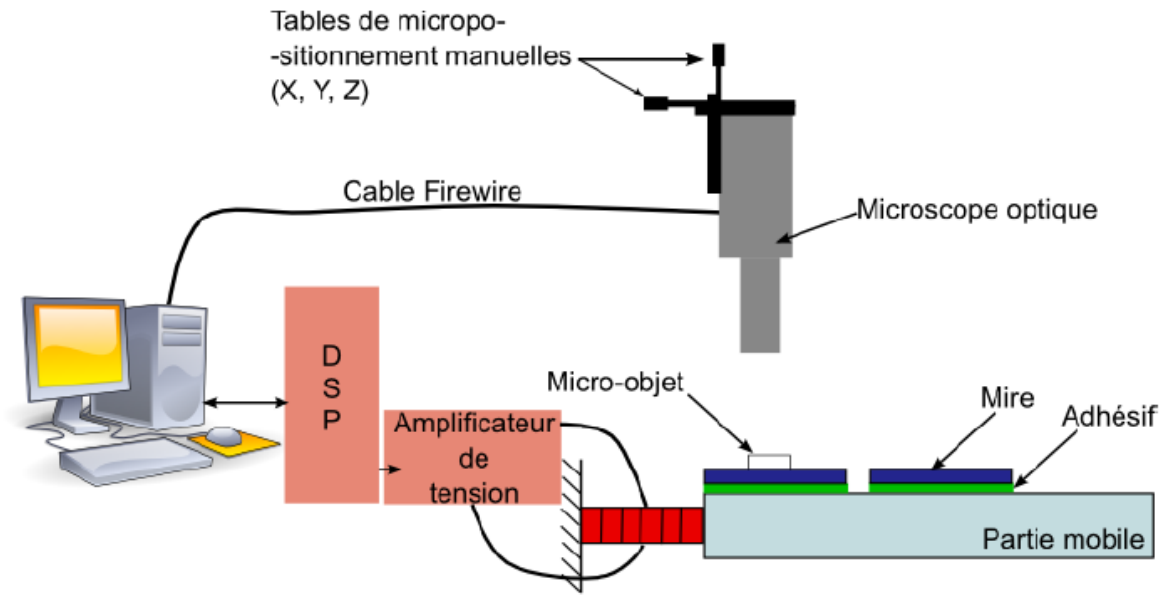


Fig. 34. Station réalisée pour le convoyage de micro-composants par sservissement visuel.

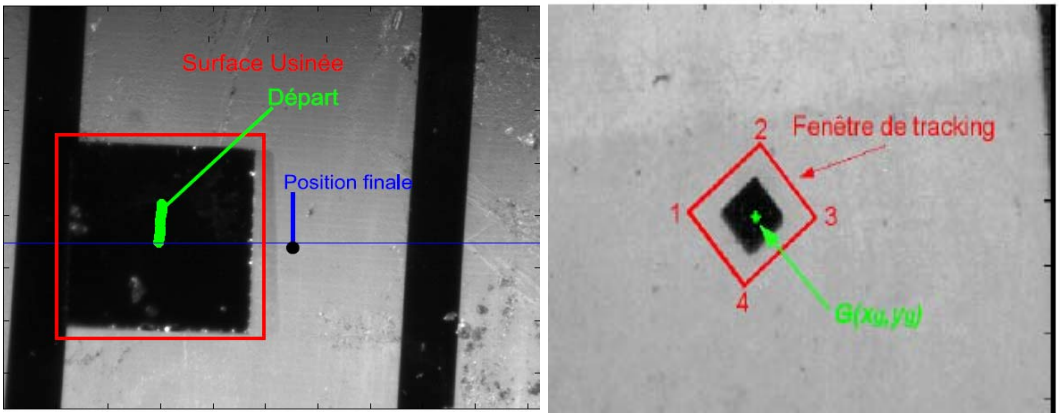


Fig. 35. Convoyage d'un micro-composant de 300×300 µm² par effet inertiel et asservissement visuel.

4.3.2.3 La microrobotique numérique : un nouveau paradigme pour la conception d'architectures de microrobots

Le développement de la microrobotique numérique vise à concevoir, réaliser et commander des architectures de microrobots nouvelles bien adaptées au micromonde. Fondée sur l'emploi de modules mécaniques bistables, cette approche introduit un paradigme nouveau pour la microrobotique offrant de larges perspectives. La robustesse mécanique des structures réalisées permet d'atteindre une répétabilité en position de 90 nm sans l'usage de capteurs. Le chapitre 5 est dédié intégralement à la présentation de la microrobotique numérique.

4.3.3 Travaux en commande

4.3.3.1 Approche « famille de modèles » pour la prise en compte des incertitudes et des non-linéarités – synthèse multi-objectif H_∞

La recherche de performances ultimes dans les microsystèmes passe nécessairement par la prise en compte des incertitudes décrites dans le paragraphe 4.2.2. Les outils de la commande robuste, en particulier les approches fondées sur la norme H_∞ [77][152][78][52][79], sont particulièrement bien adaptées à cette problématique. Dans cette partie, les contraintes liées à la commande d'un bilame piézoélectrique (garantie de stabilité, protection de l'actionneur par la limitation de la tension de commande et performances) malgré les incertitudes sont transcrites en paramètres de synthèse du correcteur. Par la suite, la synthèse robuste est étendue au cas des systèmes hystérétiques.

4.3.3.1.1 Prise en compte des incertitudes

Les bilames piézoélectriques font partie des actionneurs les plus utilisés dans les microsystèmes. La Fig. 36 présente la structure d'un bilame constitué d'une couche de matériau piézoélectrique (PZT) équipée d'électrodes et d'une couche de cuivre (matériau passif). Cet actionneur est utilisé pour produire un déplacement d à son extrémité sous l'effet d'une tension électrique V appliquée sur les électrodes. L'une des applications de ces actionneurs est l'ouverture et la fermeture de micropinces pour la manipulation d'objets de très faibles dimensions [95][74].

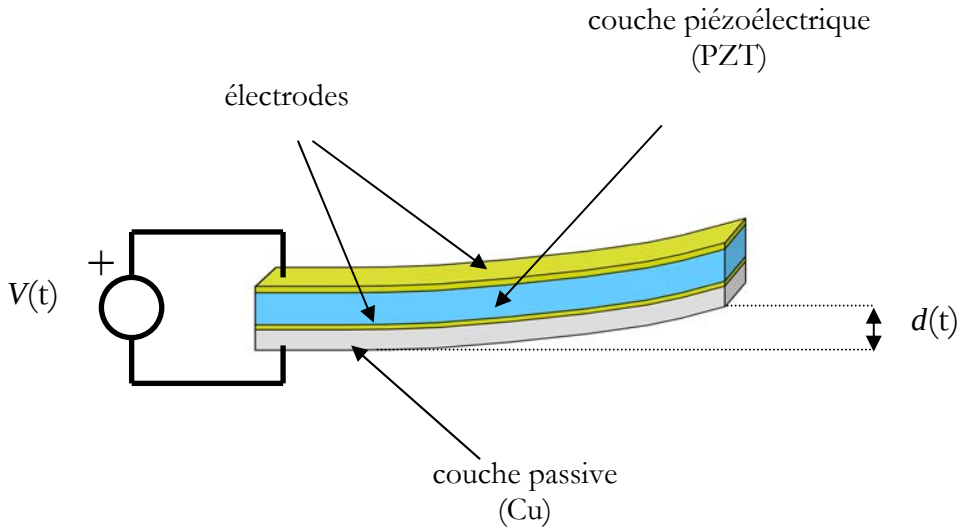


Fig. 36. Structure et fonctionnement d'un bilame piézoélectrique.

En raison des contraintes liées au micromonde, les comportements statique et dynamique de cet actionneur sont fortement influencés par les conditions environnementales (température, taux d'humidité, etc.).

Le bilame utilisé possède une longueur de 16 mm, une largeur de 1 mm et une épaisseur de 350 µm (250 µm de PZT et 100 µm de cuivre, l'épaisseur des électrodes est négligeable).

Pour de faibles déplacements de l'extrémité de la poutre, le comportement du système d'entrée V(t) et de sortie d(t) peut être approximé par un modèle du second ordre, dont un essai indiciel a permis de déterminer les paramètres de la fonction de transfert à température ambiante (25 °C) :

$$G(p) = \frac{D(p)}{V(p)} = \frac{0,8425}{5,699.10^{-8}\,p^2 + 4,774.10^{-6}\,p + 1}$$

D(p) et V(p) représentent respectivement les transformées de Laplace de d(t) et V(t) pour des conditions initiales nulles.
Dans ce modèle, la tension V est exprimée en volts et le déplacement d est exprimé en micromètres.

La Fig. 37 montre la réponse indicielle de cet actionneur. Il possède un gain de 0,8425 µm/V et est très faiblement amorti. Ce comportement est inadapté à la manipulation de micro-objets dans la mesure où le dépassement produit peut endommager, voire détruire l'objet manipulé. Bien entendu, ce comportement peut être modifié par le bouclage et la mise en œuvre d'un simple régulateur PID suffit à obtenir un fonctionnement correct. Cependant, compte-tenu des faibles amplitudes des signaux mis en œuvre à ces échelles dimensionnelles, l'effet des variations des conditions environnementales ne peut être négligé dans la mesure où des variations des paramètres du modèle peuvent apparaître [47]. Le correcteur ainsi synthétisé pour le modèle initial, peut s'avérer inefficace voire engendrer une boucle de rétroaction instable.

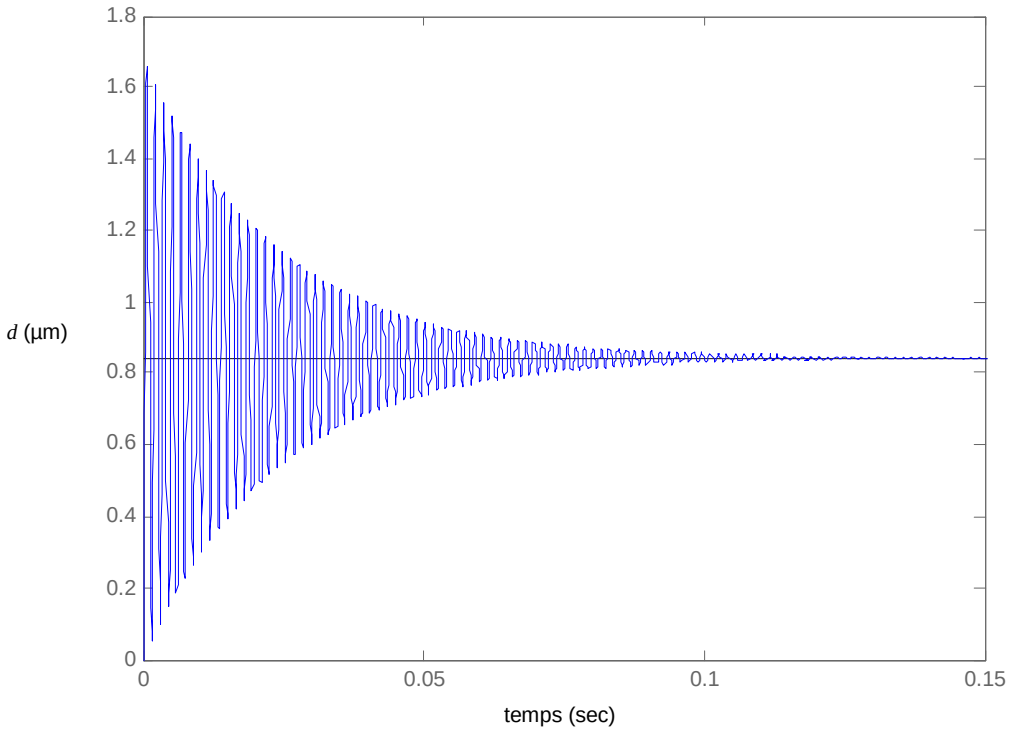


Fig. 37. Réponse indicielle de l'actionneur piézoélectrique.

Il convient donc de prendre en compte ces incertitudes lors de la synthèse d'un correcteur. Les outils de la commande robuste s'avèrent bien adaptés dans ces cas. Ils constituent même la base de l'automatique pour les microsystèmes. La méthode de synthèse H_∞ fondée sur la norme éponyme est bien adaptée à ces situations et permet en sus de considérer le filtrage du bruit grâce à l'analyse des fonctions de sensibilité et de protéger le microsystème en limitant l'amplitude des signaux de commande.

Dans l'exemple du bilame mentionné ci-dessus, l'identification des paramètres du modèle en fonction des conditions environnementales conduit à l'établissement d'une famille de modèles décrivant le fonctionnement dans différentes situations. Si l'analyse a été effectuée en considérant l'ensemble des conditions environnementales dans lequel le système est susceptible d'évoluer, on obtient ainsi une famille de modèles représentative de l'état du système en toute situation. La Fig. 38 représente les réponses indicielles du modèle moyen (appelé modèle nominal et noté $G_n(p)$) ainsi que des modèles extrêmes (notés $G_1(p)$ et $G_2(p)$) représentant les plus grandes variations par rapport au modèle nominal. L'expression de ces modèles sous forme de transmittances est donnée par :

$$G_n(p) = \frac{0{,}8425}{5{,}699.10^{-8}\,p^2 + 4{,}774.10^{-6}\,p + 1}$$

$$G_1(p) = \frac{0{,}80}{5{,}55.10^{-8}\,p^2 + 3{,}53.10^{-6}\,p + 1}$$

$$G_2(p) = \frac{0{,}9133}{5{,}82.10^{-8}\,p^2 + 4{,}01.10^{-6}\,p + 1}$$

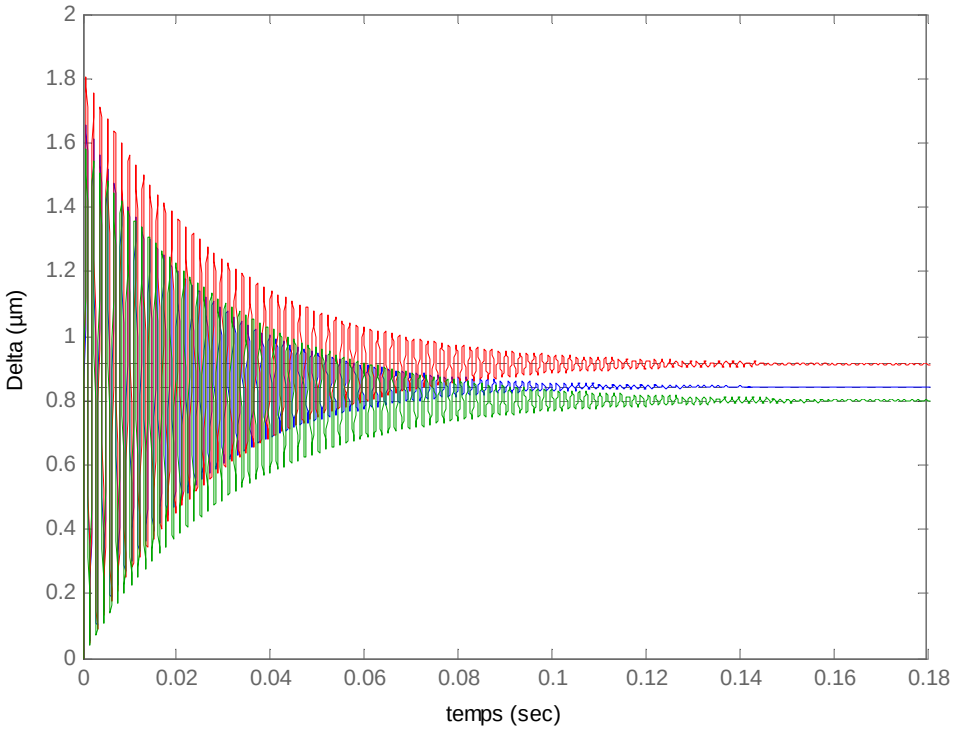


Fig. 38. Réponses indicielles des modèles G_n, G_1 et G_2.

L'analyse des transmittances $G_n(p)$, $G_1(p)$ et $G_2(p)$ montre des variations aussi bien sur le comportement statique que dynamique. Ces variations sont clairement visibles par comparaison des diagrammes de Bode (voir Fig. 39).

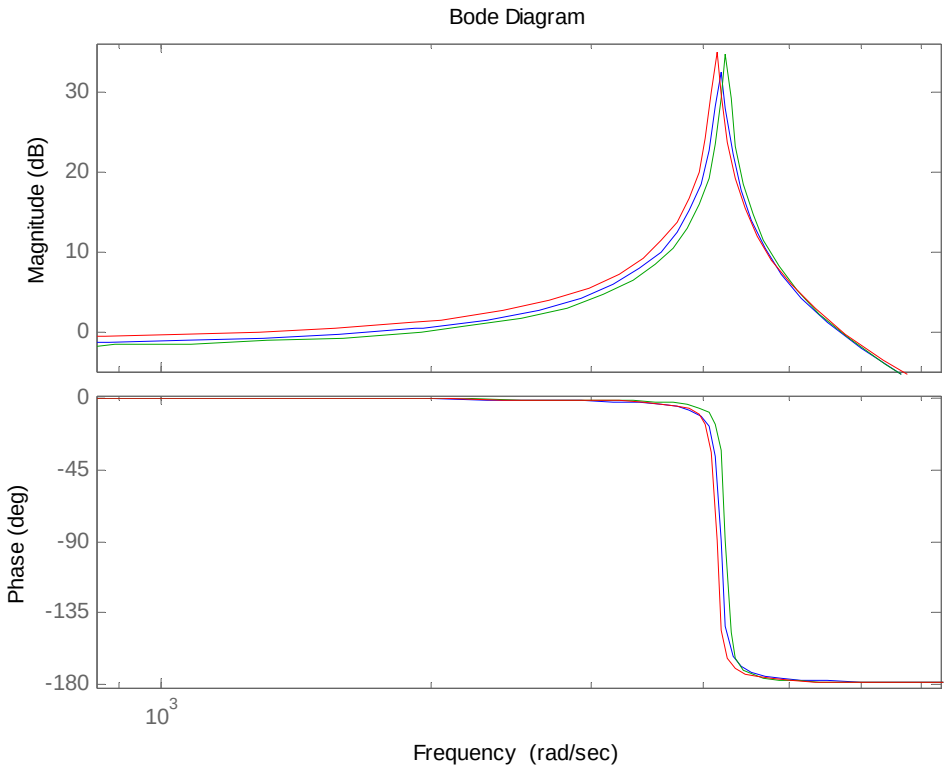


Fig. 39. Diagrammes de Bode des modèles G_n, G_1 et G_2.

Commander de manière efficace cet actionneur dans le cadre d'applications réelles requiert, d'une part la prise en compte de ces incertitudes dans la synthèse du correcteur et, d'autre part une garantie de propriétés importantes telles que la stabilité robuste et la limitation de la commande pour protéger l'actionneur malgré les incertitudes. Une telle synthèse multi-objectifs peut être réalisée par exploitation de la norme H_∞. Le correcteur $K(p)$ recherché est indiqué sur la Fig. 40.

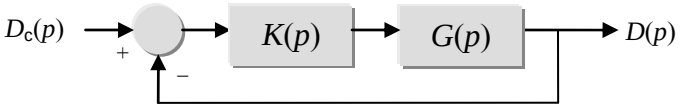


Fig. 40. Schéma d'asservissement utilisé.

Compte-tenu des objectifs définis (utilisation de cet actionneur comme doigt d'une micropince) et des données fournies par le fabricant du PZT, le cahier des charges fixé est le suivant :

- le système bouclé doit être stable pour tous les modèles considérés,
- le système bouclé doit avoir un comportement comparable à un système du 2e ordre dont le facteur d'amortissement vaut 0,7 et la pulsation naturelle 30 rad/s avec une erreur statique limitée à 0,5%,

- afin d'éviter de détruire l'actionneur, la tension de commande devra être limitée à 1,3 V pour une consigne de 1 µm. Cette limite est fixée à partir des caractéristiques indiquées par le fabriquant.

La structure de synthèse utilisée emploie trois fonctions de pondération placées comme indiqué sur la Fig. 41.

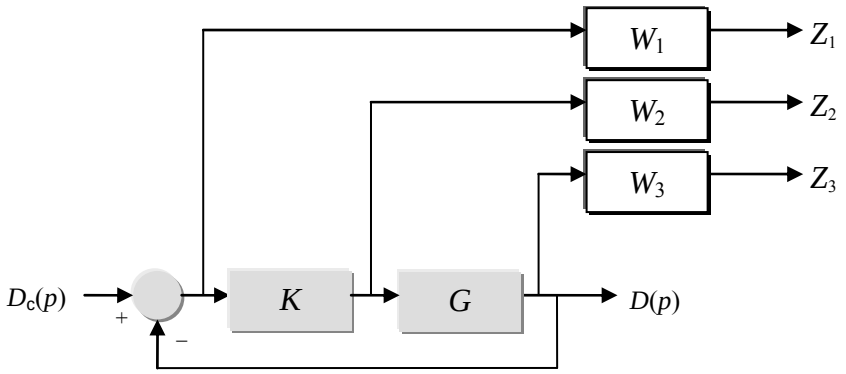


Fig. 41. Structure de synthèse multi-objectif employée.

En effet, le système bouclé augmenté des fonctions de pondération $W_1(p)$, $W_2(p)$ et $W_3(p)$ peut être mis sous la forme standard représentée sur la Fig. 42 dans laquelle $P(p)$ contient la transmittance $G(p)$ ainsi que l'ensemble des fonctions de pondération, Y et U sont respectivement l'entrée et la sortie du correcteur. R et Z sont respectivement les entrées et les sorties de ce système. Le problème H_∞ standard consiste alors à minimiser l'effet des entrées R sur les sorties Z (ce qui équivaut en pratique à faire en sorte que le comportement du système bouclé corresponde le mieux possible aux performances souhaitées).

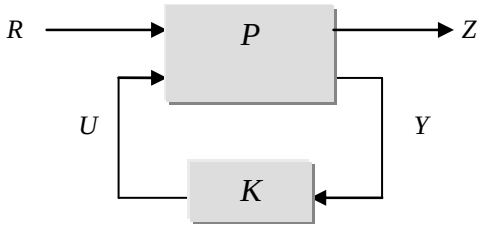


Fig. 42. Forme standard du système bouclé augmenté des fonctions de pondération.

P peut être représenté sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} Z \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ U \end{pmatrix}$$

Les éléments P_{ij} représentent les différents transferts entre chaque entrée et chaque sortie. A partir des schémas précédents, nous pouvons écrire l'expression de chaque transfert :

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -W_1.G \\ W_2 \\ W_3.G \end{pmatrix} \\ I & -G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ U \end{pmatrix}$$

Le transfert entre $R(p)$ et $Z(p)$ appelé « Transformée Linéaire Fractionnaire » ou LFT s'exprime par :

$$F(P,K)=\frac{Z}{R}=P_{11}+P_{12}K(I-P_{22}K)^{-1}P_{21}$$

Soit en remplaçant les transferts P_{ij} par leurs expressions respectives :

$$F(P,K)=\frac{Z}{R}=\begin{pmatrix} W_1S \\ W_2KS \\ W_3T \end{pmatrix} \qquad avec \quad Z=\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix}$$

Dans cette expression, S représente la fonction de sensibilité et T la fonction de sensibilité complémentaire. Leurs expressions respectives sont données par :

$$S=(I+G.K)^{-1}$$

$$T=(I+G.K)^{-1}.G.K=S.G.K$$

Le problème H_∞ standard consiste à trouver un correcteur K qui assure la stabilité interne de la boucle et qui satisfasse :

$$\|F(P,K)\|_\infty=\left\|\begin{matrix} W_1S \\ W_2KS \\ W_3T \end{matrix}\right\|_\infty<1$$

Si cette propriété est vérifiée, grâce aux propriétés de la norme, nous pouvons en déduire que :

$$\begin{aligned} &\|W_1S\|_\infty<1 \\ &\|W_2KS\|_\infty<1 \\ &\|W_3T\|_\infty<1 \end{aligned}$$

D'où :

$$\forall\omega\in\mathbb{R},$$

$$\begin{aligned} &|S(j\omega)|<\frac{1}{|W_1(j\omega)|} \\ &|K(j\omega)S(j\omega)|<\frac{1}{|W_2(j\omega)|} \\ &|T(j\omega)|<\frac{1}{|W_3(j\omega)|} \end{aligned}$$

La recherche de la solution optimale peut être effectuée de différentes manières. La plus connue étant l'utilisation de l'algorithme DGKF (du nom de ses inventeurs, Doyle, Glover, Khargonekar, Francis) [77]. Cet algorithme utilise des équations de Riccati et des itérations pour rechercher par dichotomie un contrôleur K et un scalaire γ_{opt} le plus petit possible vérifiant :

$$\| F(P,K) \|_\infty = \left\| \begin{matrix} W_1 S \\ W_2 KS \\ W_3 T \end{matrix} \right\|_\infty < \gamma_{opt}$$

Si γ_{opt} =1, toutes les exigences sont respectées.
Si γ_{opt} <1, on pourra être encore plus exigeant.
Si γ_{opt} >1, au moins une des exigences n'est pas satisfaite.

L'algorithme DGKF est implanté sous MATLAB dans la Toolbox « Robust Control Toolbox »

Une autre manière de résoudre le problème d'optimisation consiste à utiliser des inégalités linéaires matricielles (LMI). Cet algorithme est également implanté dans la Toolbox précédente.

Par un choix approprié des fonctions de pondération, il est possible de garantir les performances désirées en liant ces propriétés mathématiques aux considérations physiques de l'actionneur. La Fig. 43 indique les transferts concernés.

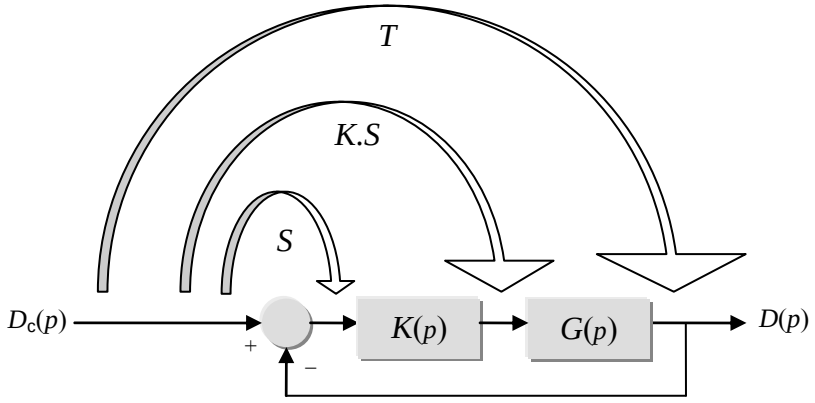


Fig. 43. Les différents transferts utilisés.

Ainsi, W_1 peut être utilisée pour assurer les performances désirées dans la mesure où elle pondère la fonction de sensibilité S. S et liée à la fonction de sensibilité complémentaire T par la relation :

$$S + T = 1$$

T représente la fonction de transfert en boucle fermée et décrit donc le comportement global du système asservi.

La fonction W_2 permet de limiter le signal de commande (ici la tension électrique appliquée sur l'actionneur). En effet, elle pondère le transfert $K(j\omega).S(j\omega)$ entre le signal de consigne et le signal de commande.

La fonction W_3 peut notamment être exploitée pour garantir la stabilité robuste. Si on considère les incertitudes du modèle G dues au travail dans différentes conditions, le système peut être représenté par le modèle incertain de la Fig. 44.

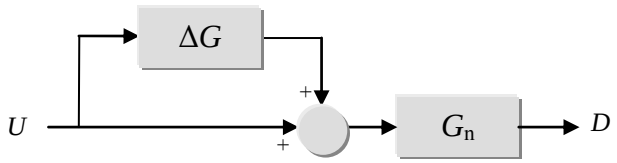


Fig. 44. Représentation des incertitudes du modèle.

A chaque instant, le modèle réel $G_{réel}$ est lié au modèle nominal par la relation :

$$G_{réel}(p) = G_n(p)(1 + \Delta G(p))$$

$\Delta G(p)$ représente alors l'écart entre le modèle réel $G_{réel}$ et le modèle nominal G_n.

Le critère de stabilité de la boucle fermée en présence des incertitudes peut être déduit de l'application du théorème des petits gains au schéma structurel de l'asservissement (voir Fig. 45) dans lequel Δ représente la borne maximale des incertitudes.

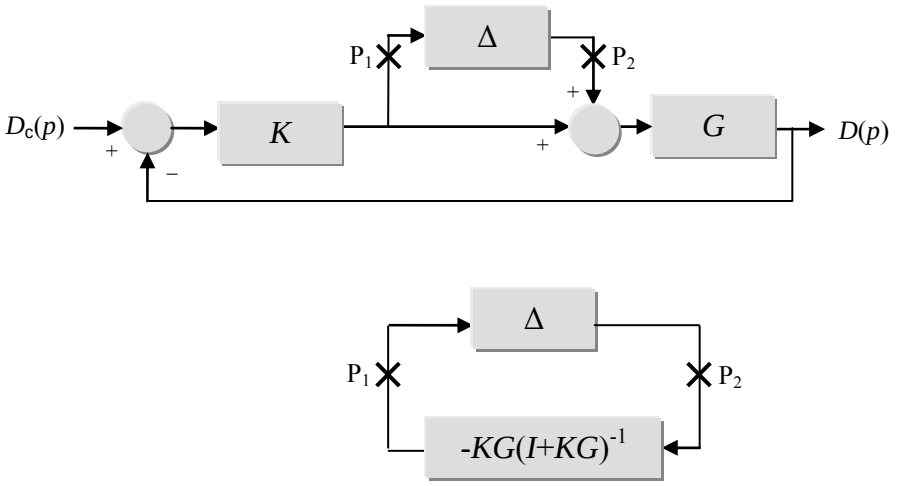


Fig. 45. (a) - asservissement d'un système avec incertitudes, (b) - schéma équivalent.

La condition de stabilité robuste peut alors s'exprimer par :

$$\| \Delta.KG(I + KG)^{-1} \|_\infty < 1$$

ou encore en introduisant l'expression de la fonction de sensibilité complémentaire :

$$\| \Delta.T \|_\infty < 1$$

Il apparaît donc clairement qu'un choix judicieux de la fonction de pondération W_3 permet de garantir la stabilité robuste du système bouclé. Ce critère fort est essentiel pour la mise en œuvre de lois de commande pour les microsystèmes qui subissent continuellement des fluctuations de modèles et qui évoluent dans des environnements incertains.

Outre les critères de synthèses introduits, d'autres aspects peuvent être pris en compte pour obtenir des correcteurs encore plus efficaces. Il s'agit notamment des différents bruits qui peuvent être atténués en modifiant les fonctions de pondération. La synthèse H_∞ apparaît comme une méthode de commande puissante permettant la prise en compte de manière explicite des principaux critères de la commande des microsystèmes.

La Fig. 46 montre le tracé de la fonction W_1 définissant les performances désirées et la Fig. 47, celui de la fonction W_3 pour garantir la stabilité robuste. W_2 est choisie constante limitant ainsi la tension de commande quelque soit la fréquence du signal d'entrée.

$$W_2(p) = \frac{1}{1,2}$$

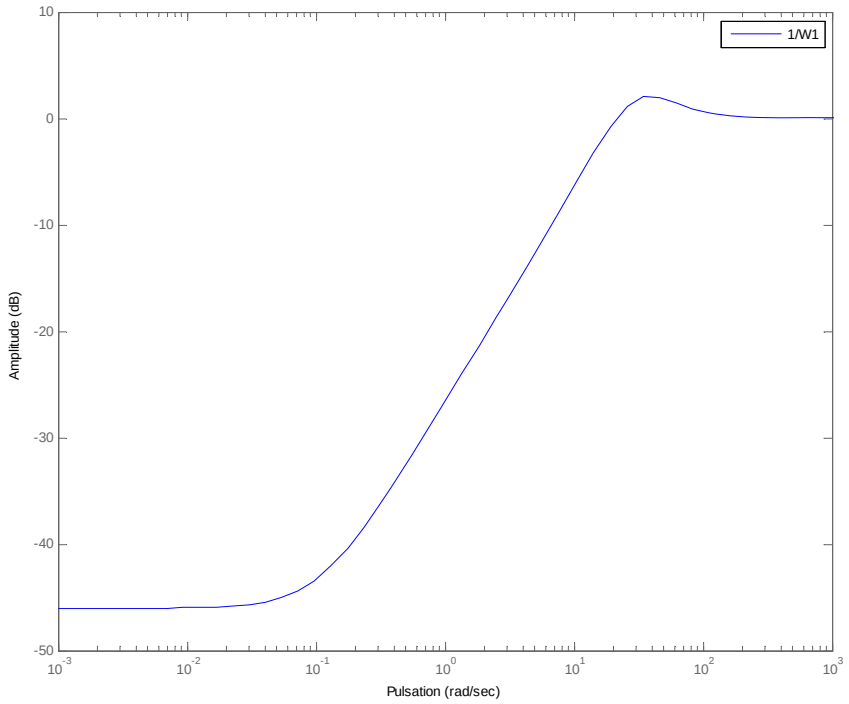


Fig. 46. Choix de la fonction de pondération W_1 définissant les performances du système.

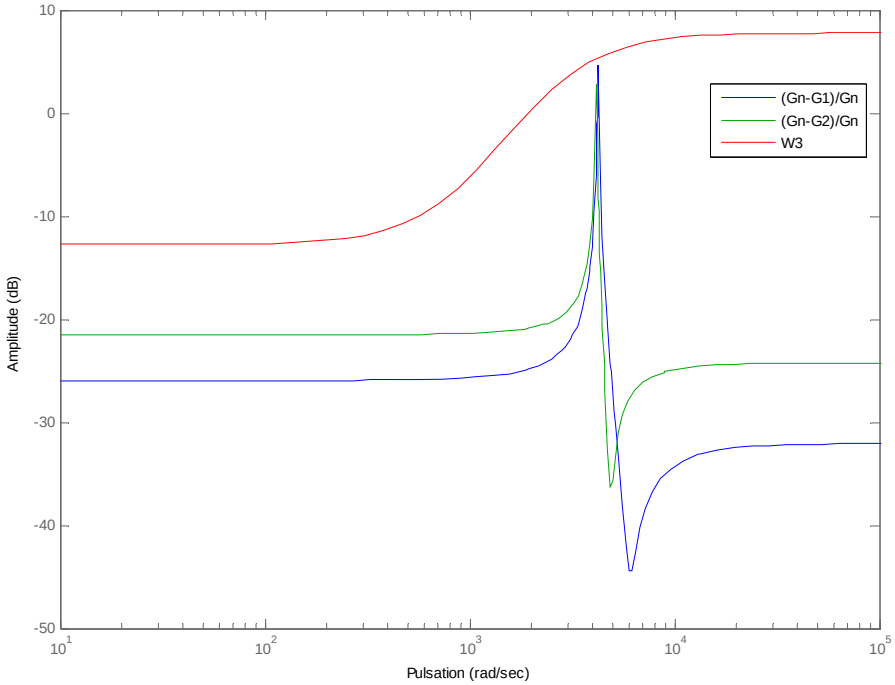


Fig. 47. Choix de la fonction de pondération W_3 permettant de garantir la stabilité robuste et comparaison avec les écarts des modèles extrêmes par rapport au modèle nominal.

La Fig. 48 présente les réponses indicielles et la Fig. 49, les signaux de commande des systèmes bouclés à l'aide du correcteur unique K pour les trois modèles G_n, G_1 et G_2. Le correcteur a été calculé à l'aide de l'algorithme DGKF implanté dans la toolbox « Robust Control » de Matlab.

$$\gamma_{opt} = 1,0271$$

$$K(p) = \frac{920,5p^6 + 6,2.10^6 p^5 + 3,034.10^{10} p^4 + 1,19.10^{14} p^3 + 2,413.10^{17} p^2 + 1,84.10^{20} p + 8,74.10^{21}}{p^7 + 2,165.10^4 p^6 + 2,34.10^8 p^5 + 1,06.10^{12} p^4 + 2.10^{15} p^3 + 1,384.10^{18} p^2 + 5,47.10^{19} p + 5,86.10^{18}}$$

Cette approche de commande a également été mise en œuvre pour le pilotage d'une micropince nanotweezers fournie par le LIMMS et l'Université de Tokyo. Elle a permis d'améliorer considérablement ses caractéristiques en boucle fermée malgré les incertitudes [47].

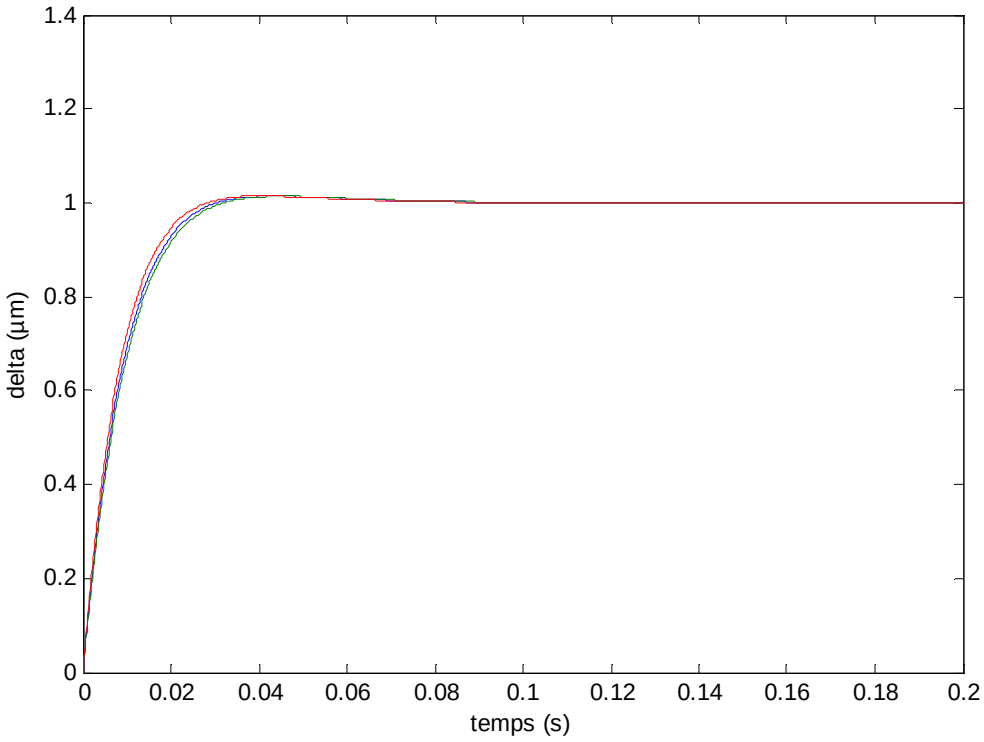


Fig. 48. Réponses indicielles des trois systèmes bouclés.

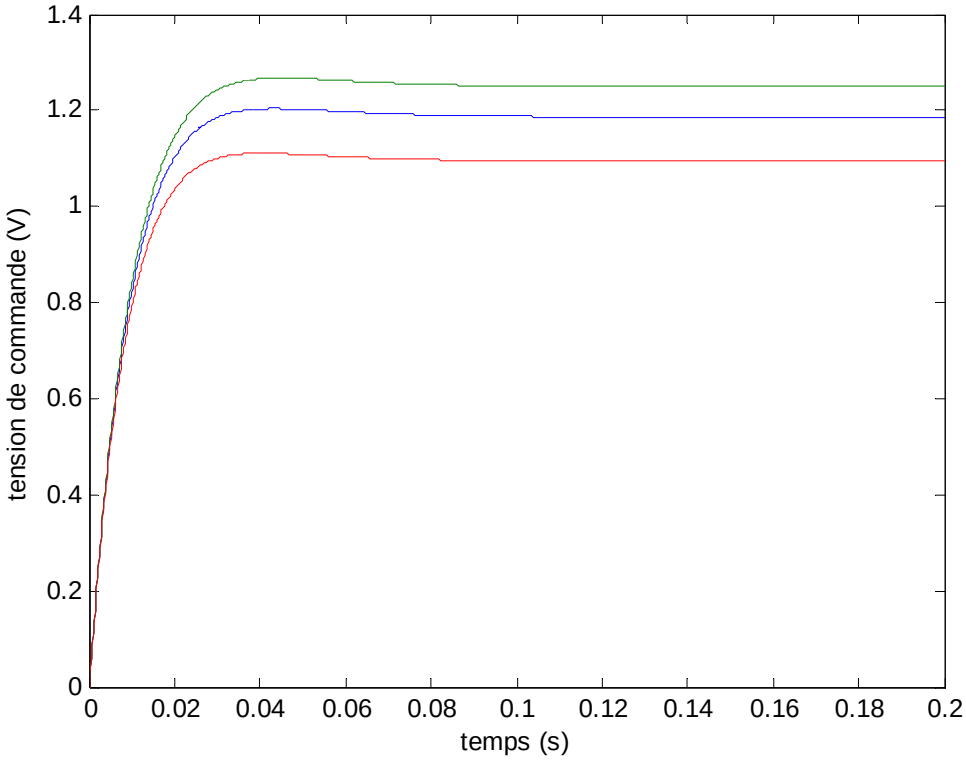


Fig. 49 Signaux de commande des trois systèmes bouclés.

4.3.3.1.2 Prise en compte de non-linéarités

Dans les applications décrites précédemment, l'approche de synthèse H_∞ a permis de considérer les incertitudes dues aux variations de l'environnement très présentes dans les microsystèmes. Ces variations ont été prises en compte en définissant une famille de modèles linéaires représentatifs. Une telle approche est également exploitable pour prendre en compte les non linéarités réputées difficiles à intégrer dans les lois de commande. C'est notamment le cas pour l'hystérésis. Le comportement hystérétique est très présent dans plusieurs micro-actionneurs dont ceux utilisant l'effet piézoélectrique. Ces derniers étant privilégiés dans de nombreux microsystèmes, la maîtrise de leur commande revêt une grande importance.

Une manière simple et efficace, pour l'emploi de la synthèse de lois de commande par l'approche H_∞ dans le cas de systèmes non-linéaires, consiste à transformer le problème de commande non-linéaire en un problème de commande d'un système linéaire avec incertitudes afin d'éviter d'utiliser une inversion de modèle hystérétique. L'approche « famille de modèles » décrite précédemment pourra dès lors être mise en œuvre. Cette méthode a été exploitée pour la commande de poutres piézoélectriques en considérant l'effet hystérétique. La Fig. 50 montre le principe employé. L'hystérésis est approximée plus ou moins finement par un ensemble de segments de droites. Les modèles linéaires passants par ces segments seront considérés lors de la synthèse. Une synthèse de correcteur robuste, sur la famille de modèles ainsi obtenue, garantira un bon fonctionnement pour tout comportement inclus dans les limites définies. Les détails liés à la mise en œuvre de cette méthode ainsi que les résultats obtenus sont décrits dans [11].

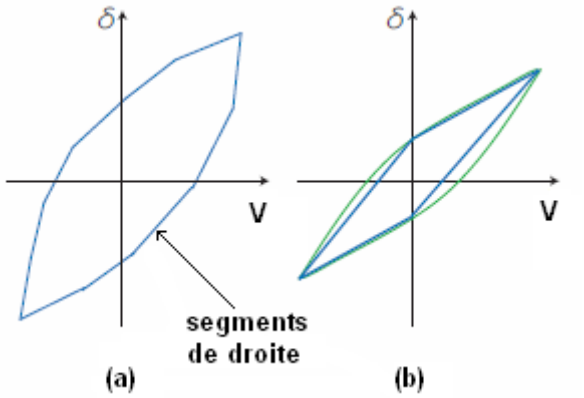


Fig. 50. Approximation de l'hystérésis par un ensemble de segments de droites en vue de la synthèse d'un correcteur robuste. (a) - approximation pluri-linéaire, (b) - approximation quadrilatérale.

4.3.3.2 Analyse et modélisation des bruits dans les microsystèmes

Lors de l'exécution de tâches microrobotiques, les performances désirées en précision de positionnement (inférieures à 1 μm) font que les effets des différents bruits présents ne peuvent être négligés. Ces bruits constituent l'un des verrous majeurs qu'il convient de lever pour permettre de repousser les limites de la précision. Les travaux menés pour la détermination des origines des bruits les plus influents en fonction de la taille des microsystèmes considérés sont présentés dans le chapitre 6. Cette étude, fondée sur de nombreuses mesures dans différentes situations expérimentales ont permis une estimation de l'effet de chaque bruit et peut servir de base pour la prise en compte des bruits lors de la conception et la commande.

4.3.3.3 Filtrage de Kalman appliqué à l'amélioration des performances des systèmes embarqués

La mesure de force est très importante et parfois indispensable pour l'exécution de tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Les microcomposants manipulés sont souvent fragiles et ils peuvent être endommagés ou détruits s'ils sont manipulés sans contrôle de la force de serrage. Habituellement, les microforces sont évaluées à partir de la mesure de déformation de petites structures mécaniques simples (poutres, membranes, etc.) dont la raideur est connue.
Pour la mesure des forces mises en jeu dans le micromonde, de nombreux microsystèmes ont recours à l'emploi de capteurs extéroceptifs. Ces derniers sont mis au point par des fabricants professionnels d'instruments de mesure et sont souvent volumineux et très coûteux. Ils comportent généralement une tête de mesure disposée à proximité du lieu de la mesure et un conditionneur de signaux déporté. Ce dernier contient les circuits électroniques de conditionnement de signaux ainsi que des processeurs pour le traitement des signaux et la gestion des protocoles de communication. Ces instruments, qui exploitent divers principes physiques (comptage de franges d'interférences optiques, triangulation par laser, effets magnétiques ou capacitifs, etc.) et qui utilisent des circuits électroniques sophistiqués, offrent souvent des performances très élevées et bien adaptées au micromonde. Cependant, ces appareils présentent un inconvénient majeur : l'impossibilité de les utiliser pour des microsystèmes nomades ou devant agir dans des environnements confinés. Pour de telles applications, il est nécessaire d'embarquer le capteur dans le microsystème. En fonction de la résolution souhaitée, plusieurs principes peuvent être employés [117]. Pour mesurer des forces d'amplitude inférieure à 0,1 μN, les matériaux piézoélectriques, en particulier le PVDF (Polyvinylidene Fluoride), sont souvent utilisés [88]. Ces matériaux permettent d'atteindre des résolutions élevées mais souffrent de la difficulté d'effectuer des mesures statiques en raison de la décharge électrique. Les capteurs électrostatiques microfabriqués sont caractérisés par une bonne linéarité et permettent de mesurer des forces aussi grandes que 25 μN avec une résolution aussi élevées que 10 nN. Pour des résolutions encore meilleures, des capteurs optiques peuvent être employés. Dans [53], une station combinant un FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) et un nanotube de carbone dont la raideur a été calibrée au préalable a permis de détecter des forces aussi petites que 3 pN.

Les jauges d'extensométrie (métalliques ou piézorésistives) sont une autre alternative pour la mesure de déformation et l'évaluation de micro-forces. Elles présentent l'avantage de pouvoir être collées sur le système utilisé et leurs performances dépendent des caractéristiques de l'élément déformable. Par ailleurs, elles autorisent aussi bien les mesures statiques que dynamiques, ce qui en fait des capteurs appropriés pour la mise en œuvre de boucles d'asservissement. L'intégration de jauges dans des microsystèmes à fait l'objet de nombreux travaux annonçant des résolutions allant de 1 μN à 2 mN [105][124][149][106] . Une description détaillée des principes de mise en œuvre de capteurs de force pour la nanomanipulation est donnée dans [84]. La Fig. 51 montre le dispositif réalisé pour la mesure de la force exercée à l'extrémité libre d'une poutre (bilame piézoélectrique) encastrée-libre dont les dimensions sont : 16 mm × 2 mm × 0,5 mm. Cette poutre constitue un doigt d'une micropince de serrage. Deux jauges d'extensométrie fabriquées par la société ENTRAN© sont collées près de l'encastrement. Leurs dimensions sont : 1,27 mm × 0,38 mm.
La poutre peut fléchir sous l'effet de deux actions : l'application d'une tension électrique sur les électrodes équipant la couche piézoélectrique et l'application d'une force à l'extrémité libre. Ce dispositif peut ainsi être considéré comme un système à deux entrées (tension électrique V et force F) et à une sortie (déflexion δ) à l'extrémité de la poutre (voir Fig. 52).

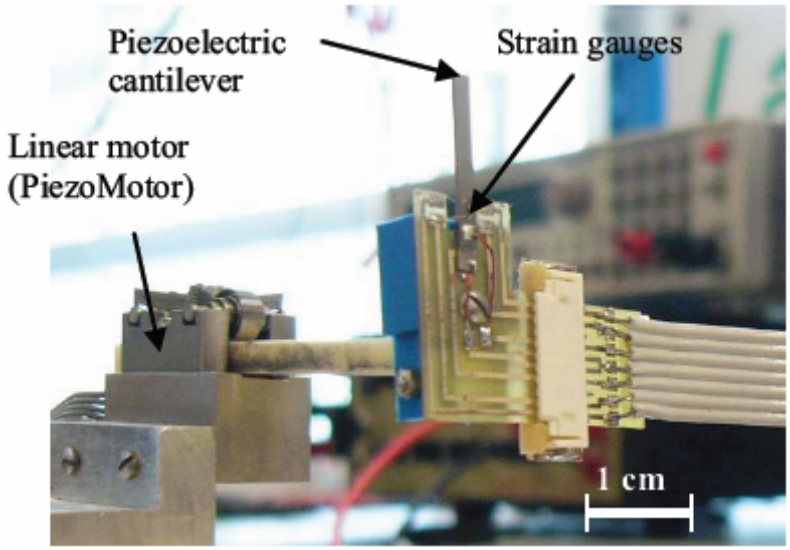


Fig. 51. Emploi d'une jauge d'extensométrie pour la mesure de la force appliquée sur une poutre.

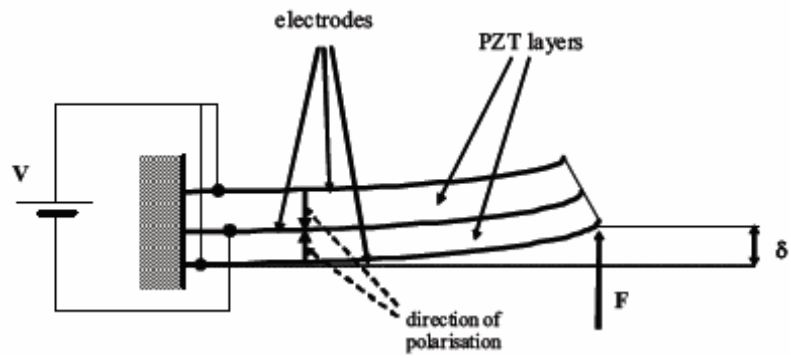


Fig. 52. Signaux d'entrée/sortie associés à la poutre

Pour de faibles déplacements, le comportement du système est linéaire et les dynamiques des transferts entre F et δ et entre V et δ sont similaires [95]. La Fig. 53 montre la réponse du système à l'application d'un échelon de tension de 15 V enregistrée à l'aide d'un capteur optique par triangulation fabriqué par la société KEYENCE©. Cette mesure est faiblement bruitée et parfaitement exploitable pour la mesure du déplacement ou de la force.

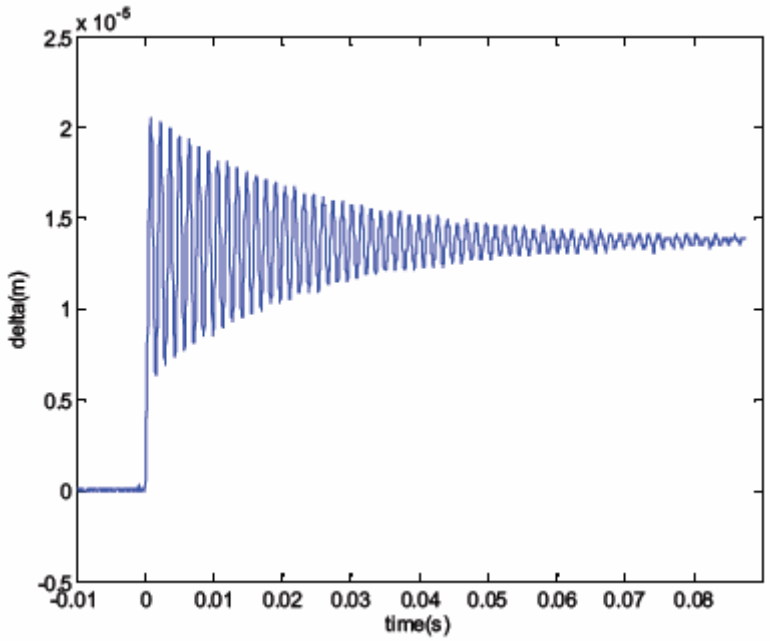


Fig. 53. Réponse du système à l'application d'un échelon de tension de 15 V mesurée à l'aide d'un capteur optique par triangulation.

Afin de permettre une utilisation nomade ou en milieu confiné, les jauges intégrées sont utilisées pour effectuer la même mesure. Un pont de Wheatstone est constitué et un filtre passe-bas permet d'éliminer les signaux de bruit au-delà de la bande passante utile du système (voir Fig. 54). Ce filtre a une fréquence de coupure de 3,1 kHz, plus de quatre fois supérieure à la fréquence de résonance de la poutre.

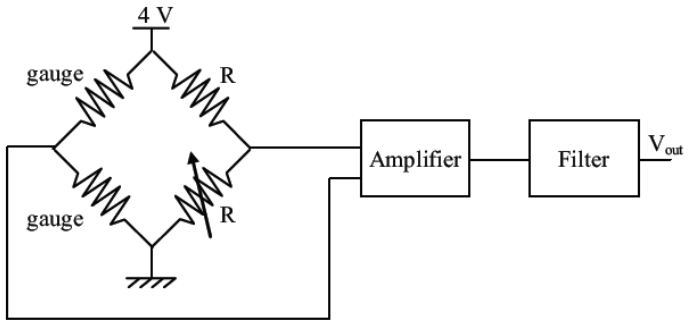


Fig. 54. Chaîne utilisée pour la mesure à l'aide de jauges.

La Fig. 55 montre la réponse mesurée à l'aide de ce dispositif pour une entrée similaire au cas précédent. Il est aisé de constater que ce signal de mesure est entaché d'un niveau de bruit important limitant fortement la pertinence de cette chaîne de mesure pour une évaluation précise de la position de la poutre en dynamique. Réduire la fréquence de coupure du filtre passe-bas utilisé limiterait le niveau de bruit, mais pénaliserait la dynamique du système. Pour lever cette difficulté et obtenir des résultats proches de ceux obtenus avec un capteur optique externe, nous avons mis en œuvre un filtre de Kalman [104] permettant l'estimation en temps réel de l'état du système. Le résultat obtenu est représenté sur la Fig. 56.

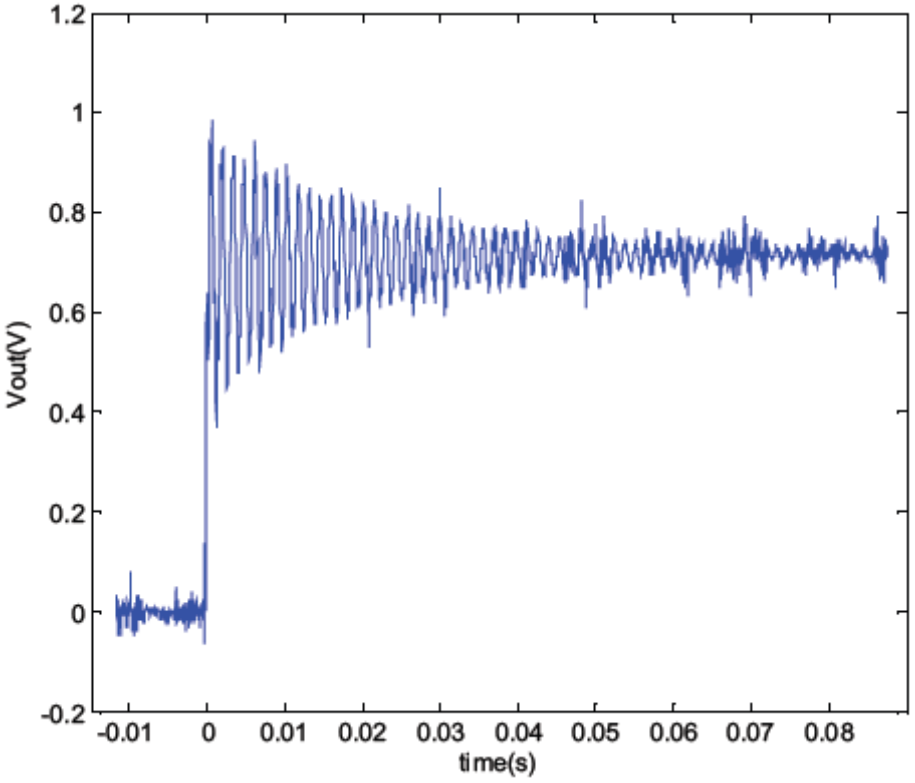


Fig. 55. Tension fournie par le capteur à jauges embarquées en réponse à l'application d'un échelon de tension de 15 V.

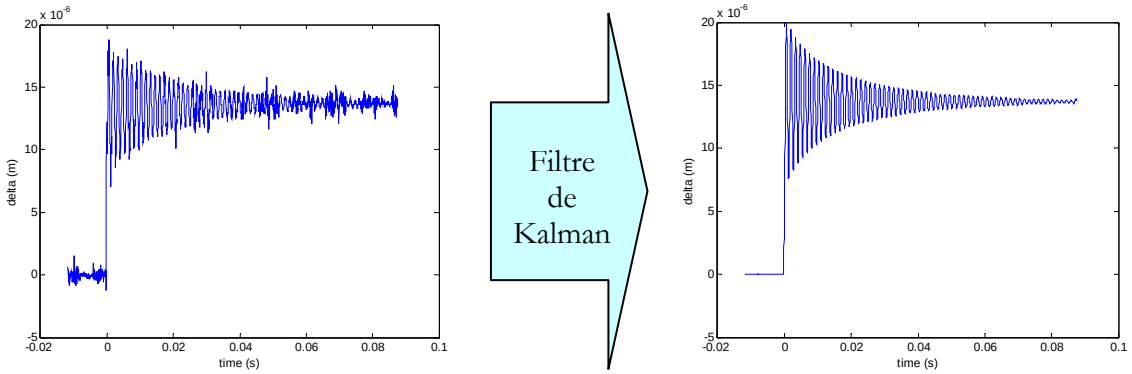


Fig. 56. Filtrage temps réel du signal issu du capteur à jauges à l'aide d'un algorithme de Kalman.

Ainsi, l'emploi d'un filtre de Kalman a permis d'améliorer considérablement la qualité de la mesure. Le niveau de bruit a été réduit avec un rapport de 40 sans perte de dynamique [8]. De plus, la mise en œuvre d'un filtre de Kalman peut être effectuée à faible coût grâce à la disponibilité large de microcontrôleur peu coûteux. La mise en œuvre de ce filtre est détaillée dans le chapitre 6.

4.3.3.4 Amélioration par le bouclage de la sensibilité paramétrique pour la caractérisation d'expériences biologiques sur des molécules d'ADN

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le LIMMS et l'IIS de l'Université de Tokyo. Il avait pour but de réunir les compétences du LIMMS dans le domaine de la manipulation de molécules d'ADN et celles du département AS2M en commande des microsystèmes pour développer un système de manipulation d'ADN à hautes performances. Ce projet s'est concrétisé, d'une part par

le co-encadrement d'une thèse de doctorat (Nicolas Lafitte), thèse co-encadrée avec Y. Le Gorrec (FEMTO-ST) et D. Collard (LIMMS), et d'autre part par un programme PHC SAKURA d'échanges avec le Japon. Dans ce cadre, j'ai effectué deux séjours à l'université de Tokyo.

La caractérisation mécanique et électrique de molécules d'ADN représente aujourd'hui un enjeu important pour la biologie ainsi que les débouchés économiques associés. L'une des difficultés majeures de la manipulation de l'ADN réside dans son facteur de forme (voir Fig. 57). Il s'agit d'un filin dont le diamètre est de l'ordre de 2 nm et dont la longueur peut être très importante relativement à son diamètre. Cette forme est admise depuis 1953 [147].

Fig. 57. Représentation de l'ADN par James Watson et Francis Crick en 1953.

Le développement des technologies permet aujourd'hui de manipuler des molécules d'ADN de manière individuelle, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives de recherche. Les principaux outils utilisés sont : les tweezers magnétiques [142], les tweezers optiques [101] et les AFM [144]. Ces approches ont notamment permis d'analyser les performances mécaniques (raideurs, contraintes) et le comportement des molécules d'ADN lors de réactions biochimiques. Bien que ces principes permettent d'atteindre de très bonnes performances, ils présentent de nombreux inconvénients parmi lesquels nous pouvons citer le coût très élevé et la complexité de mise en œuvre.

Dans ce contexte, les travaux réalisés en collaboration avec le LIMMS ont consisté en un développement d'une approche de manipulation de l'ADN en exploitant à la fois les possibilités offertes par les technologies de microfabrication actuelles et les techniques de l'automatique pour obtenir de bonnes performances et permettre la réalisation d'un système à faible coût et facile d'emploi. Le point de départ de ce travail fut l'existant au LIMMS et à l'IIS dans le domaine de la caractérisation de l'évolution de la raideur mécanique de bundles (agglomérats) d'ADN sous l'effet d'enzymes [110]. Le procédé utilisé tire profit d'une micropince à actionnement électrostatique appelée « nanotweezers » réalisée à l'Université de Tokyo sur un substrat de silicium. La Fig. 58 montre la structure d'un nanotweezers.

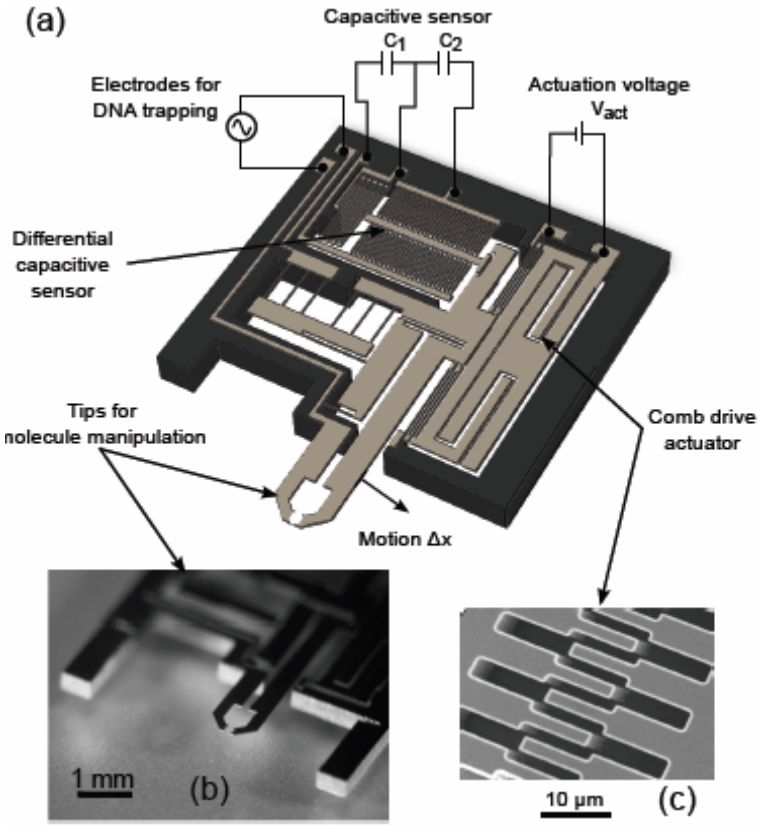


Fig. 58. Nanotweezers réalisé à l'Université de Tokyo. (a) structure générale et constitution, (b) photographie d'un prototype microfabriqué et (c) structure des actionneurs électrostatiques à peignes inter-digités utilisés (comb-drives).

Le nanotweezers est une pince à doigts de serrage réalisée de manière monolithique sur un wafer de silicium. La saisie des objets est effectuée grâce à deux doigts espacés au repos de 10 µm. L'un des deux doigts est fixé au bâti alors que le second est actionné par un comb-drive (ou peigne inter-digité) exploitant la force électrostatique (actionneur très utilisé dans les MEMS). Lors de son mouvement, le doigt mobile entraîne une armature d'un capteur capacitif différentiel utilisé pour la mesure de la position du doigt. Cette pince permet par ailleurs l'application d'une différence de potentiel électrique entre les deux doigts. Cette fonctionnalité est utilisée pour la saisie et le maintien de l'ADN par diélectrophorèse.

Lors d'une expérimentation biologique, le bundle d'ADN est maintenu entre les doigts de la pince (voir Fig. 59) modifiant ainsi les caractéristiques mécaniques (en particulier la raideur) de l'ensemble pince-bundle.

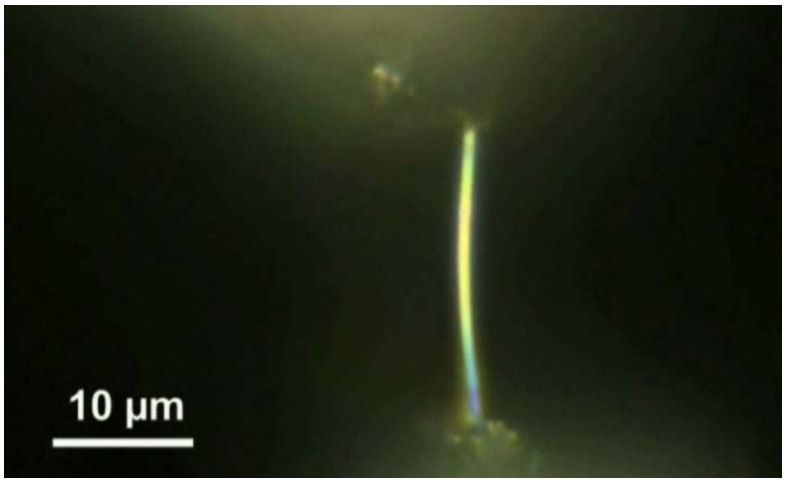


Fig. 59. Photographie d'un bundle d'ADN maintenu entre les deux doigts du nanotweezers.

Le principe de la mesure de la variation de raideur est fondé sur la détection de la variation de la fréquence du premier mode de résonance dans le plan (sens de la saisie du bundle d'ADN). Cette détection est obtenue grâce à la mise en œuvre d'une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) qui permet d'exciter le doigt mobile à la fréquence de résonance. Ce principe est illustré sur la Fig. 60.

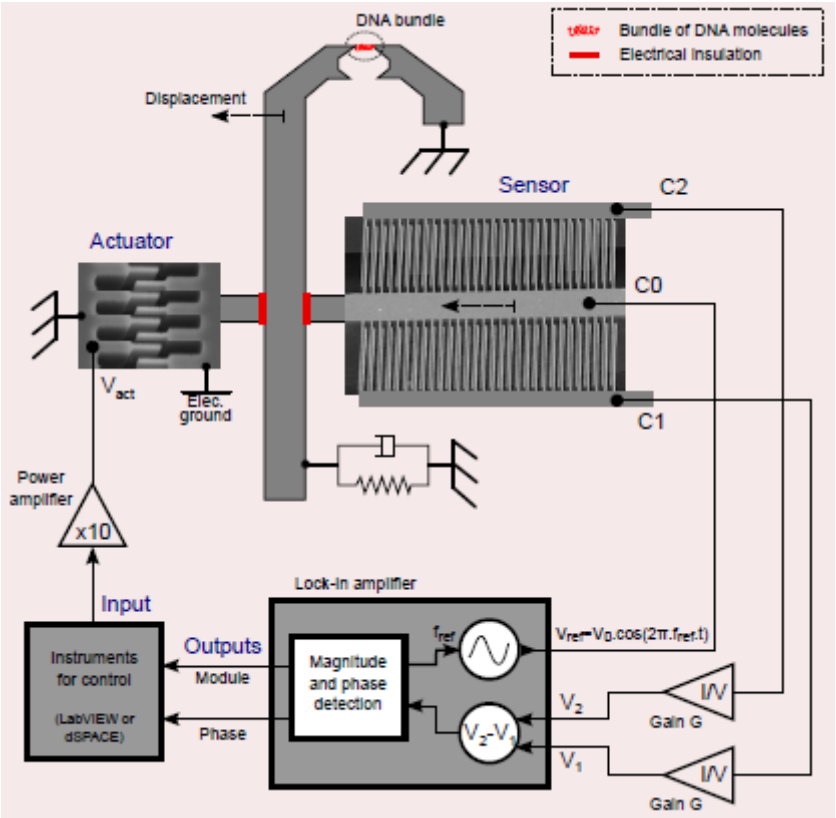


Fig. 60. Détection de la variation de la fréquence de résonance à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

En l'absence de tout objet entre les doigts de la pince, le comportement dynamique peut être approximé autour du mode de résonance considéré par un modèle du second ordre sous la forme :

$$M\ddot{x} + v\dot{x} + kx = F_{es}$$

Dans cette expression, M représente la masse de la partie mobile, k est la raideur mécanique et v l'amortissement visqueux. F_{es} est la force exercée par l'actionneur électrostatique. Elle est proportionnelle au carré de la tension électrique appliquée. Les valeurs numériques de ces paramètres sont : $M = 250.10^{-9}$ Kg, k = 43,5 N/m et $v = 60.10^{-6}$ N.s/m.

La présence du bundle d'ADN entre les doigts de la pince modifie ces valeurs. Si la masse de l'ADN est négligeable comparativement à celle de la partie mobile de la pince, la raideur et l'amortissement s'en trouvent modifiés. La Fig. 61 représente le modèle de l'ensemble pince-bundle.

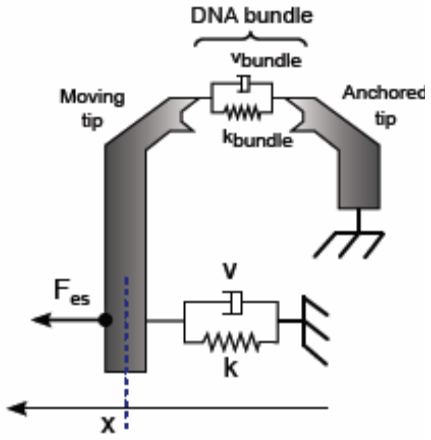


Fig. 61. Modèle de l'ensemble pince-bundle d'ADN.

La fréquence de résonance du nouveau système est donnée par l'expression :

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k'}{M} - \frac{1}{2}\frac{v'^2}{M^2}}$$

Dans cette expression, k' et v' représentent respectivement la raideur mécanique et l'amortissement visqueux résultants.

$$k' = k + k_{bundle}$$
$$v' = v + v_{bundle}$$

k_{bundle} et v_{bundle} sont les caractéristiques mécaniques de bundle d'ADN.

L'effet d'une variation de la raideur k' sur la fréquence de résonance f_r est obtenu par l'expression :

$$\frac{\partial f_r}{\partial k'} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2.M\sqrt{\frac{k'}{M} - \frac{1}{2}\frac{v'^2}{M^2}}}$$

Lorsque le bundle est placé dans une solution enzymatique, la digestion des molécules d'ADN produit une diminution de la raideur k_{bundle}. La sensibilité de la mesure est limitée par deux facteurs : la résolution en fréquence du matériel utilisé (±0,01 Hz) et la différence de raideur entre la pince et le bundle. La raideur de la pince est de 43,5 N/m alors que celle d'une molécule d'ADN est estimée à 30 µN/m. Dans ces conditions, il est possible de détecter la rupture de 30 molécules d'ADN. L'une des voies d'amélioration des performances consiste à concevoir une pince ayant une raideur bien moins élevée. Cependant, cette approche conduirait à une structure mécanique trop fragile, difficile à manipuler et à utiliser.

Afin de conserver une structure suffisamment robuste et d'améliorer les performances en mesure de raideur, un asservissement par retour d'état a été mis en œuvre. L'objectif a été d'obtenir un système bouclé dont la fréquence de résonance est inférieure à celle en boucle ouverte. Sous cette condition, une variation de raideur produit un décalage en fréquence plus important en boucle fermée qu'en boucle ouverte [112].

La Fig. 62 représente le schéma d'asservissement mis en œuvre. L'emploi d'un observateur d'état est ici nécessaire dans la mesure où seule une variable d'état (vitesse ou déplacement) est mesurable à la fois.

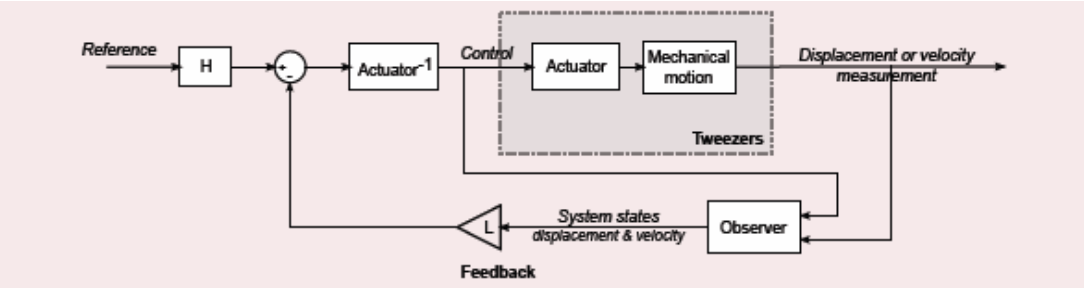


Fig. 62. Diminution de la fréquence de résonance grâce à un retour d'état avec observateur.

Le système bouclé peut alors être représenté par le modèle d'état suivant dans lequel X est le vecteur d'état :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k'+l_1}{M} & -\frac{v'+l_2}{M} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} ref$$

Dans ce système ainsi bouclé, l'influence d'une variation de raideur sur le décalage en fréquence est donnée par :

$$\frac{\partial f_r}{\partial k'} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2.M\sqrt{\frac{k'+l_1}{M} - \frac{1}{2}\frac{(v'+l_2)^2}{M^2}}}$$

Par un choix approprié des gains du retour d'état et des pôles de l'observateur, il est possible d'augmenter de manière significative la sensibilité de la mesure à la variation de la raideur. La Fig. 63 illustre la variation de la fréquence de résonance en boucle ouverte et en boucle fermée pour une même variation de raideur.

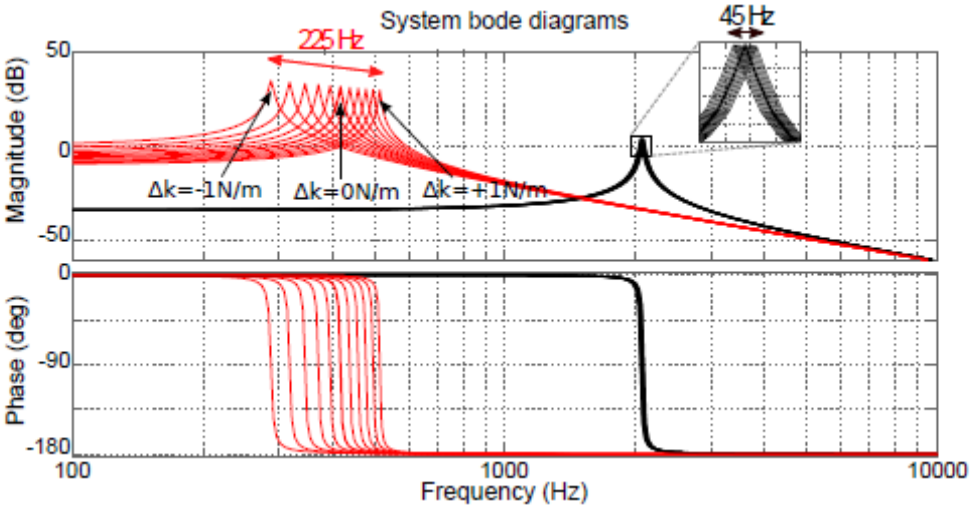


Fig. 63. Variation de la fréquence de résonance en boucle ouverte et en boucle fermée pour une même variation de raideur.

Ce principe a été mis en œuvre sur un nanotweezers. Le retour d'état et l'observateur ont été implémentés dans un module dSPACE et l'ensemble a été inséré dans la boucle PLL. Les résultats obtenus ont permis une amélioration d'un facteur 2 de la résolution (détection de la rupture de 15 molécules d'ADN au lieu de 30) pour une même résolution en fréquence. Par ailleurs, certains phénomènes limitant l'emploi de cette méthode ont été détectés sur la pince d'origine. Il s'agit de la présence de modes de résonance hors-plan et de torsion à des fréquences plus basses que le premier mode dans le plan considéré dans l'étude. Ce résultat a conduit à la conception d'une nouvelle pince dans laquelle le premier mode correspond à la fréquence de vibration la plus basse. Cette dernière version de pince est donc plus appropriée pour la mise en œuvre de cette approche [112].

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré l'apport de la mise en œuvre de méthodes de l'automatique pour améliorer les caractéristiques intrinsèques des instruments de mesure. Ce principe est parfois nécessaire compte-tenu des exigences en résolution dans le micromonde.

Cette approche représente une bonne illustration de retour sur conception pour des considérations de performance.

4.3.3.5 Au-delà des limites de l'instrumentation

Les deux travaux présentés dans les parties précédentes illustrent d'une manière claire sur deux problématiques totalement différentes l'apport des méthodes de l'automatique et du traitement du signal pour accroître les performances des microsystèmes. Les précisions requises étant souvent à la limite des possibilités des instruments de mesure utilisés, l'intérêt d'une telle démarche est évident. Elle permet, soit d'obtenir des précisions ou des résolutions de mesure inégalées par l'utilisation directe de ces instruments (c'est le cas de l'amélioration de la sensibilité

de la mesure de la variation de raideur de bundles d'ADN), soit de réduire le coût de la mesure par l'introduction de la connaissance à-priori du bruit de mesure présent (c'est le cas de la mesure à l'aide de jauges embarquées) et par la mise en place de capteurs adaptés à chaque situation.

Au-delà des exemples mentionnés, ce principe offre des perspectives prometteuses pour la réalisation de produits miniaturisés, intelligents et compétitifs.

4.3.3.6 Autres travaux en commande

Dans le cadre de collaborations avec d'autres groupes de recherche au sein du département AS2M, j'ai contribué à la synthèse de lois de commande robustes pour des systèmes de petite taille. La Fig. 64 montre un dispositif miniaturisé de transport d'objets à l'aide d'une surface active (smart surface). Une matrice d'orifices permet de créer des jets d'air qui servent, d'une part à la création d'un coussin d'air afin d'éviter les frottements mécaniques entre les objets transportés et la surface active et, d'autre part à la génération d'impulsions d'air pour déplacer les objets. Ce projet a été mené en préparation à la commande d'une surface active micro-usinée (en cours de réalisation) sur un wafer de silicium. Un correcteur H_∞ a été mis en œuvre pour permettre le transport d'objets de formes et de poids différents à l'aide d'un contrôleur unique. La synthèse du correcteur ainsi que les résultats obtenus sont décrits dans [16].

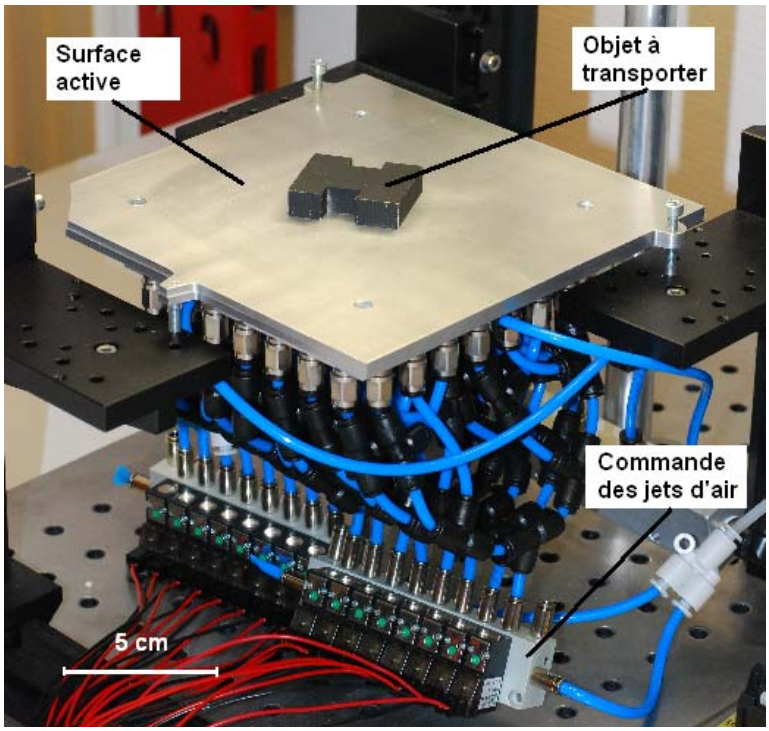


Fig. 64. Station à surface active pour le transport d'objets.

5 La microrobotique numérique

5.1 Introduction

De nombreux travaux de recherche ont été menés dans le domaine de la microrobotique afin de permettre l'exécution de tâches de micromanipulation et de micro-assemblage. Les microrobots développés sont destinés à exécuter diverses tâches dans le micromonde, en particulier la manipulation d'objets individuels (biologiques ou artificiels) pour un positionnement précis, la caractérisation ou le tri ainsi que pour le micro-assemblage. Lorsque les dimensions des micro-objets à manipuler deviennent faibles (submillimétriques), leurs interactions avec l'environnement sont fortement influencés par les forces surfaciques. Par ailleurs, les niveaux de résolution et de précision souhaités (de l'ordre du micromètre) requièrent une refonte des concepts de base communément usités en robotique traditionnelle. En effet, les actionneurs et les architectures habituellement utilisés en robotique présentent des phénomènes de jeux et de frottements, qui limitent leur précision et qui empêchent leur utilisation dans le micromonde. C'est pourquoi il s'agit, en microrobotique, d'établir de nouvelles règles de conception et de fabrication de robots.

De manière générale, la conception de microrobots peut être divisée en deux grandes parties possédant chacune des problématiques propres auxquelles il convient d'apporter des solutions efficaces :

- la conception d'organes terminaux et l'étude de leurs interactions avec les micro-objets manipulés,
- la conception de microrobots porteurs ou bras robotisés destinés à transporter l'organe terminal.

Des efforts de recherche importants ont été consentis pour le développement d'organes terminaux compatibles avec le micromonde. Diverses stratégies ont été proposées pour la manipulation de microcomposants. Certaines sont fondées sur l'utilisation de micropinces dont les extrémités sont adaptées aux formes des objets manipulés [96][71], d'autres exploitent les forces d'adhésion (interactions surfaciques) pour saisir le micro-objet [137][138][132][133].

Alors que le développement d'organes terminaux a connu des avancées significatives, il n'existe que peu de travaux relatifs à la conception de structures robotiques adaptées au micromonde. La plupart des microrobots existants sont relativement volumineux et fondés sur la miniaturisation de structures robotiques conventionnelles. Leurs dimensions limitent fortement leur utilisation dans des environnements confinés ou fortement encombrés (par exemple à l'intérieur d'instruments scientifiques tels que des TEM ou des MEB). Cependant, certains microrobots bien qu'utilisant des architectures traditionnelles, mais bénéficiant de l'emploi de technologies avancées, atteignent des niveaux de miniaturisation tels qu'ils rendent de grands services en microrobotique. La Fig. 65 montre deux microrobots parmi les plus aboutis [54][108].

PocketDelta (© Asyril)

Micromanipulateur MM3A-EM
(© Kleindiek Nanotechnik)

Fig. 65. Exemples d'architectures de microrobots.

Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle approche pour la conception d'architectures de microrobots fondée sur l'emploi de modules mécaniques bistables. Cette approche « bottom-up » appelée « microrobotique numérique » tire profit des possibilités offertes par les technologies MEMS de microfabrication en salle blanche et de la commande numérique sans capteur pour offrir une nouvelle manière de concevoir des architectures robotiques variées adaptées au micromonde. Il s'agit d'une manière radicalement différente des approches existantes permettant de concevoir et de réaliser des architectures variées répondant aux besoins issus du micromonde.

A l'échelle macroscopique, plusieurs robots ont été réalisés à partir de modules bistables. Nous pouvons citer le « Variable Geometry Truss (VGT) manipulator » qui consiste en plusieurs modules contenant chacun 3 actionneurs binaires, soit 2^8 états différents [136][123][98]. G.S. Chirikjian a introduit le concept de robot binaire dans [69]. Par la suite, de nombreuses améliorations ont été apportées pour lesquelles des modèles directes et inverses ont été développés [114][115][116][145]. Un autre robot appelé BRAID (Robotic Articulated Intelligent Device) est décrit dans [143]. Cependant, de telles architectures sont inadaptées pour la réalisation de microrobots en raison des jeux mécaniques et de la complexité des modèles hyper-redondants obtenus. L'obtention de précisions compatibles avec les contraintes du micromonde requiert l'emploi de structures compliantes [90][97].

Dans les paragraphes suivants, le concept de microrobotique numérique est tout d'abord exposé. Par la suite, une application complète de conception d'une architecture de microrobot nommé « DiMiBot » pour Digital MicroRobot est décrite et des modèles géométriques direct et inverse sont établis. Enfin des résultats expérimentaux de poussée de microcomposants sont présentés. Ces travaux ont été soutenus par deux thèses de doctorat dont l'une a été soutenue en mars 2010 (thèse de Qiao Chen) et la seconde est en cours de finalisation (thèse de Vincent Chalvet).

5.2 Fondements de la microrobotique numérique

La microrobotique numérique consiste à concevoir et réaliser des microrobots à l'aide de modules mécaniques bistables microfabriqués. Elle est partiellement inspirée de l'électronique numérique. Cette dernière a révolutionné la manière de concevoir des circuits électroniques. Le développement de la première bascule électronique en 1918 par W. Eccles et F.W. Jordan et les différentes améliorations, qui s'en suivirent, ont ouvert une nouvelle voie pour le stockage et le

traitement des données. Une bascule peut être utilisée pour stocker un chiffre binaire « bit » ou « binary digit ». Les deux états ainsi obtenus sont communément notés « 0 » et « 1 ». Trois propriétés ont été décisives pour le succès de cette approche. La première est la reproductibilité du circuit. La deuxième est la robustesse électrique du circuit. En effet, le bruit et les fluctuations de la tension d'alimentation dans des proportions raisonnables, ne provoquent pas le basculement d'un état à l'autre et n'altèrent pas l'information mémorisée contrairement aux systèmes analogiques de traitement de l'information. Enfin, la troisième propriété est la modularité qui a permis, à partir de bascules uniques, de réaliser des registres, des fonctions logiques et par la suite des microprocesseurs complexes et puissants. La microrobotique numérique utilise des bascules mécaniques bistables pour réaliser des axes robotisés, puis des microrobots complets, de manière analogue à l'électronique numérique.

5.2.1 Module mécanique bistable

De nombreux dispositifs d'usage courant utilisent des modules bistables mécaniques. Le plus utilisé d'entre eux est sans doute l'interrupteur électrique mural. La Fig. 66 montre le principe de fonctionnement d'un module bistable mécanique. Il possède deux états stables. A l'état « 0 », le module a une longueur l et à l'état « 1 », il possède une longueur $l+d$. Le module peut être basculé d'un état stable à l'autre par un signal extérieur. La longueur du module dans chacun des deux états doit être parfaitement connue et répétable.

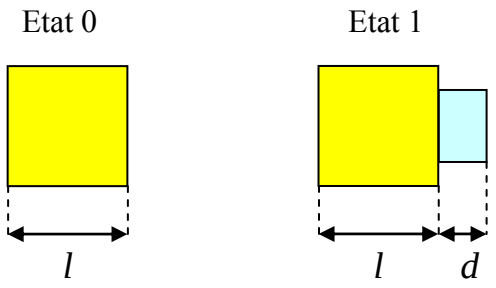


Fig. 66. Principe d'un module mécanique bistable.

L'exploitation de ce principe simple, pour la réalisation de structures mécaniques bistables utilisables en microrobotique, pose cependant de nombreux verrous technologiques qu'il convient de lever.

5.2.2 Axe de robot utilisant des modules mécaniques bistables

Un module n'offrant que deux états, l'utilisation de plusieurs modules bistables permet d'augmenter le nombre d'états et de réaliser ainsi un axe de robot. La position de l'extrémité de cet axe est obtenue par accumulation des déplacements discrets de chaque module. Les caractéristiques des modules utilisés et la manière avec laquelle ils sont liés entre eux définissent les caractéristiques de l'espace atteignable. Bien que cet espace soit discret, le nombre de points atteignables évolue de manière exponentielle en fonction du nombre de modules utilisés. Pour un axe contenant n modules bistables, le nombre d'états logiques obtenus est 2^n. Une conception mécanique robuste est cependant nécessaire pour l'obtention de bonnes performances (répétabilité et précision). La Fig. 67 montre une structure sérielle utilisant 5 modules. 32 états logiques sont ainsi obtenus. Si les déplacements des 5 modules sont d, $2d$, $4d$, $8d$ et $16d$, où d est

le déplacement le plus faible désiré (qui représente la résolution de l'axe), la course de l'axe est donnée par [1] :

$$D = d.\begin{pmatrix}1 & 2 & 4 & 8 & 16\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}1\\1\\1\\1\\1\end{pmatrix} = d.\sum_{i=1}^{5} 2^{i-1} = 31.d$$

De plus, les points atteignables sont tous distincts. La position de l'extrémité de l'axe est représentée par un mot binaire pouvant être utilisé comme instruction de commande.

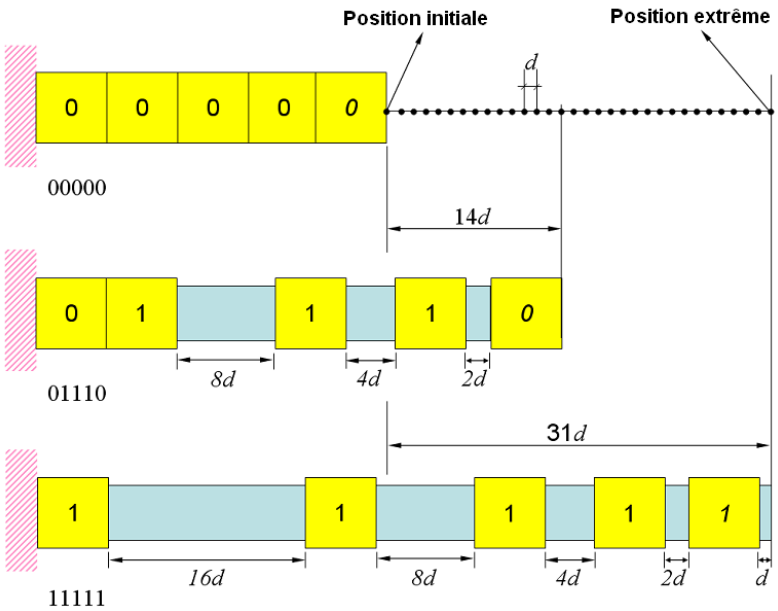


Fig. 67. Axe de robot sériel utilisant 5 modules bistables.

5.2.3 Microrobots numériques

La combinaison de plusieurs axes permet de construire diverses architectures de microrobots. La Fig. 68 présente quelques exemples [68].

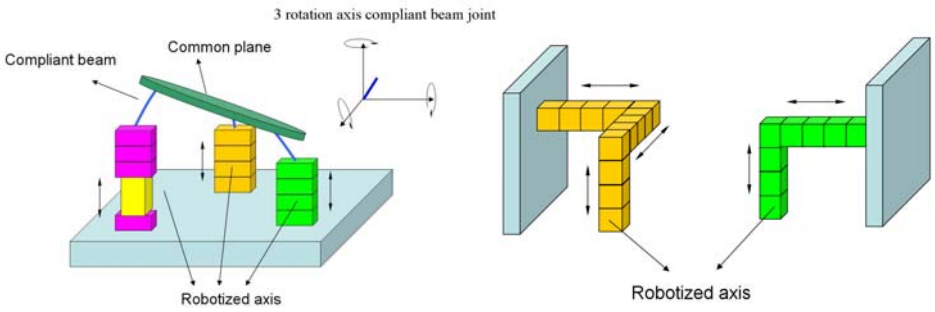


Fig. 68. Exemples d'architectures de microrobots numériques.

5.3 Positionnement de la microrobotique numérique par rapport aux microrobots actuels

La microrobotique numérique représente un nouveau paradigme dans le monde de la microrobotique. Cette nouvelle approche présente de nombreux avantages et permet l'exploration d'architectures robotiques diverses. Elle présente également quelques inconvénients et difficultés de réalisation. Il convient de définir, de manière claire, le positionnement de la microrobotique numérique par rapport aux architectures existantes, dans le but de mettre en évidence son potentiel, mais également ses limites.

L'une des difficultés majeures de la conception et de la commande de microrobots réside dans le fait que les performances attendues (résolutions et précisions sub-micrométriques) requièrent l'emploi de capteurs performants et de boucles d'asservissement. Ainsi, la commande de tels robots nécessite, de nos jours, l'utilisation d'instruments encombrants et coûteux pour la mesure, le traitement des signaux et la commande temps-réel. Dans certains cas, l'intégration de capteurs dans le robot est très difficile, voire impossible en raison des faibles dimensions et des effets dynamiques non négligeables qu'induit la présence de ces capteurs. Le microroboticien a souvent recours à des capteurs extéroceptifs (exploitant souvent des principes optiques), qui limitent la mobilité du microrobot et son usage en environnement confiné. La microrobotique numérique apporte des solutions originales à ces difficultés, dans la mesure où elle s'affranchit de l'emploi de capteurs et de boucles de rétroaction. Les performances (répétabilité et précision) sont obtenues grâce à la conception mécanique. On aboutit alors à des microrobots nomades pouvant intervenir dans des environnements fortement encombrés ou restreints. Si, de plus, l'énergie d'actionnement n'est nécessaire qu'aux instants de transition (basculement des modules), la consommation énergétique du microrobot peut être réduite. Par ailleurs, les déplacements du microrobot étant obtenus par basculement des modules bistables, un actionnement en parallèle permet d'accroître la rapidité du microrobot. La réalisation de microrobots numériques requiert cependant la fabrication de modules bistables robustes et répétables, ainsi que des structures mécaniques performantes. Par ailleurs, l'emploi de microrobots numériques entraîne nécessairement une discrétisation de l'espace atteignable. Cet inconvénient peut être levé si la résolution spatiale est inférieure au niveau du bruit de mesure ou des fluctuations de la position dues au bruit environnant. Le Tableau 8 présente une comparaison entre les microrobots actuels et les microrobots numériques proposés, fondée sur les informations recueillies dans[90],[135],[128],[103] et [76].

Caractéristiques	***Microrobots actuels***	***Microrobots numériques***
Actionnement	Proportionnel ou incrémental	Discret
Dimensions	Moyennes	Petites (microfabrication)
Coût (incluant la commande)	Moyen à élevé	Faible
Commande	Boucle fermée, non-linéarités…	Boucle ouverte

Consommation énergétique	Elevée à moyenne	Faible
Sensibilité au bruit	Elevée à moyenne	Faible
Utilisation de capteurs	Oui	Non
Déplacement	Continu ou discret	Discret

Tableau 8. Comparaison entre les microrobots numériques et les microrobots actuels.

5.4 Conception et caractérisation de modules mécaniques bistables

Le concept de bistabilité a été largement utilisé dans des réalisations MEMS. De nombreuses structures sont rapportées dans la littérature pour la réalisation notamment de micro-relais [129] ou de micro-interrupteurs [100][85][111][109]. Cependant, l'emploi de structures bistables pour la réalisation de microrobots numériques requiert des propriétés particulières liées aux forces à appliquer et à la précision de positionnement pour une commande en boucle ouverte.

5.4.1 Conception d'un module bistable pour la microrobotique

Pour être utilisable en microrobotique, un module bistable doit offrir deux états dont les positions sont répétables. Cette propriété conditionne les performances du microrobot en termes de précision. Les structures bistables, habituellement réalisées en technologie MEMS, n'offrent qu'un seul état répétable. De plus, un tel module doit posséder les propriétés suivantes :

- la structure doit être facilement reproductible,
- le module bistable doit être réalisable de manière monolithique afin d'éviter tout assemblage, difficile à réaliser dans le micromonde,
- le module doit être réalisable en technologie MEMS car cette dernière constitue l'une des méthodes les plus efficaces pour la fabrication de structures de faible taille,
- le module doit fournir une force suffisamment grande pour déplacer des micro-objets,
- l'association de plusieurs modules pour réaliser des microrobots et des fonctions complexes doit être possible,
- afin de réduire la consommation énergétique, l'énergie n'est nécessaire qu'aux instants de basculement (aucune énergie n'est requise pour maintenir le module dans l'un de ses deux états stables). Cette propriété n'est pas indispensable mais fortement souhaitée.

Ces différentes exigences ont été analysées et on fait l'objet d'une étude complète incluant l'élaboration du principe, le dimensionnement, la simulation et le développement d'un process de microfabrication en salle blanche, mis en œuvre dans la centrale MIMENTO. La Fig. 69 montre le module bistable conçu. Il est réalisé sur un wafer SOI et contient un mécanisme bistable, des actionneurs thermiques et deux « stop-blocks » ou blocs d'arrêt. Le module est conçu de sorte à

ce qu'aucune énergie extérieure ne soit nécessaire pour demeurer dans l'un de ses états stables. Le basculement d'un état à l'autre est obtenu par les forces exercées par deux paires d'actionneurs thermiques (une paire pour chaque basculement). Les actionneurs thermiques sont parmi les plus utilisés dans les MEMS. Notre choix s'est porté sur ce type d'actionnement car, d'une part ils sont très faciles à fabriquer et, d'autre part ils permettent des déplacements importants ainsi que l'application de forces d'amplitude élevée.

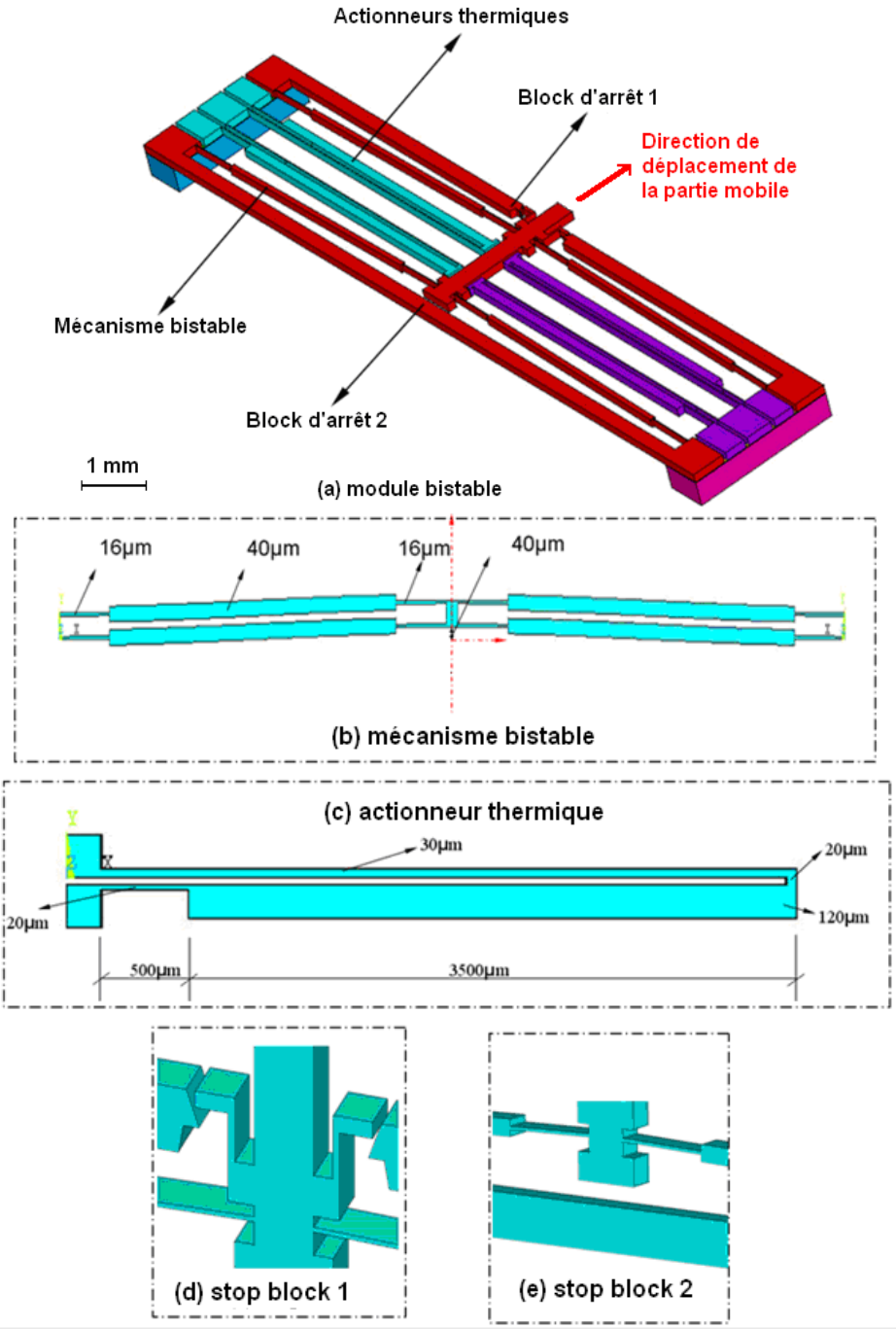


Fig. 69. Vue générale d'un module bistable développé pour la microrobotique. (a) - module bistable, (b) - mécanisme bistable, (c) - actionneur thermique, (d) - stop block 1 et (e) - stop block 2.

L'une des difficultés majeures pour la conception de ce module a été d'obtenir un effet bistable avec deux états répétables dans une structure monolithique. Des méthodes de retrait thermique

sont possibles mais les forces de blocage obtenues sont trop faibles pour être exploitables en microrobotique.

Afin de lever ce verrou technologique et d'obtenir une bistabilité dans une structure monolithique avec des forces de blocage élevées, nous avons développé un principe original : lors de la fabrication, le shuttle (mécanisme bistable) est partiellement à l'extérieur du cadre du module (en dehors de la butée du bloc d'arrêt 1. Immédiatement après fabrication, le module est activé (une fois pour toute). La Fig. 70 montre un exemple de module microfabriqué avant et après activation et la figure Fig. 71 présente une vue rapprochée du bloc d'arrêt 2 après activation. Une force extérieure est appliquée sur la partie mobile centrale (shuttle) pour l'insérer entre les deux blocs d'arrêt. Par la suite, le module peut être basculé d'un état à l'autre grâce aux actionneurs thermiques. Ce principe permet de créer sur le shuttle des contraintes mécaniques offrant ainsi des forces de blocage importantes.

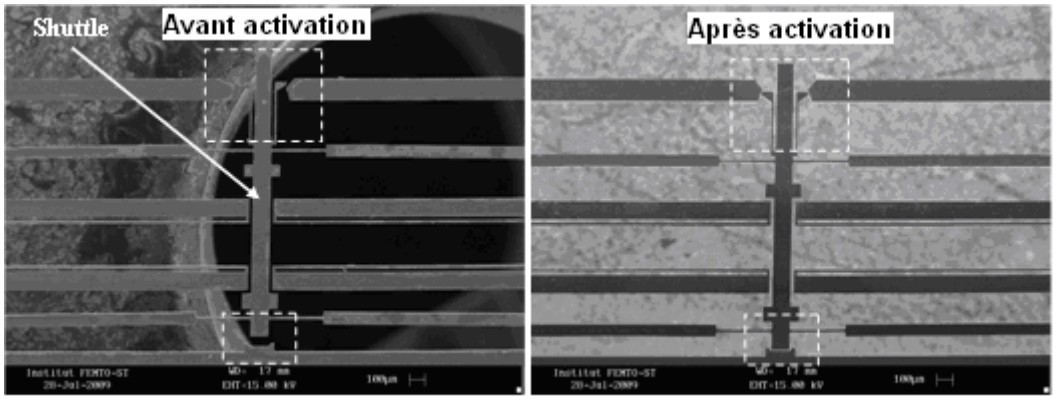


Fig. 70. Image MEB d'un module bistable avant activation et après activation.

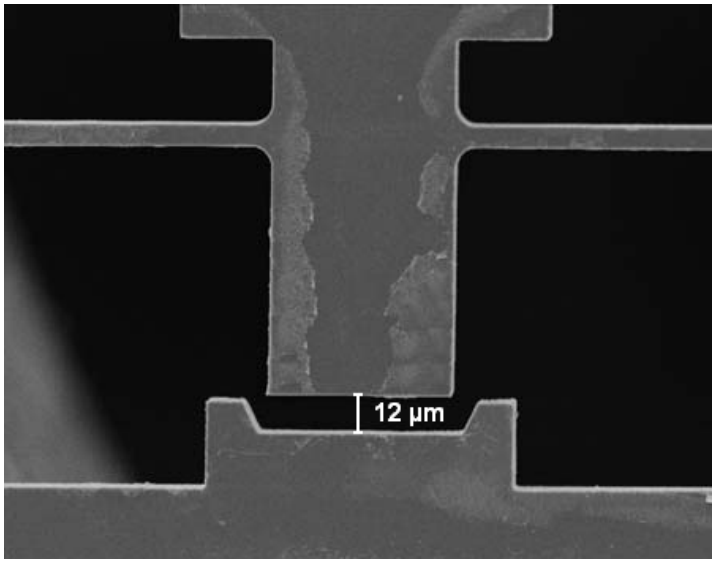


Fig. 71. Détail du bloc d'arrêt 2 après activation. Le module est dans sa position stable 1.

Le dimensionnement du module bistable nécessite la prise en compte de deux facteurs : les limites de la microfabrication qui définissent les largeurs minimales des poutres constituant le module (typiquement 10 µm avec les moyens disponibles dans la centrale MIMENTO) et les dimensions des actionneurs thermiques requis pour faire basculer le mécanisme bistable. En

considérant un comportement pseudo-rigide [97][100], un modèle numérique a été mis au point [9]. Pour des dimensions voisines de celles montrées sur la Fig. 69, des déplacements compris entre 5 et 25 µm et des forces de blocage comprises entre 200 µN et 2,2 mN ont été obtenues. La Fig. 72 montre la caractéristique force-position de l'un des modules conçus et microfabriqués dans le cadre de la thèse de Qiao Chen.

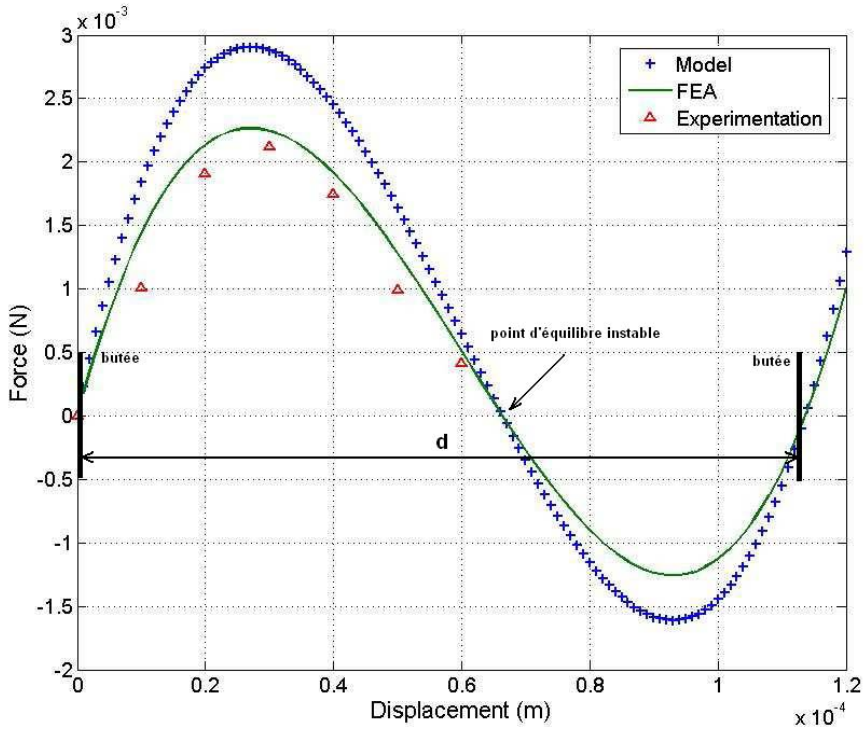


Fig. 72. Caractéristique force-position de l'un des modules bistables réalisés.

5.4.2 Caractéristiques dynamiques des modules bistables

Les caractéristiques statiques (déplacement et force de blocage) des modules bistables, leur répétabilité et leur robustesse sont définies par la conception mécanique. Cependant, l'utilisation de ces modules pour exécuter des tâches microrobotiques requiert l'analyse du comportement dynamique. En effet, le principe de fonctionnement des microrobots numériques étant fondé sur des basculements mécaniques, les vibrations induites peuvent être potentiellement gênantes pour les performances dynamiques. A titre d'exemple, des effets dynamiques non maîtrisés peuvent provoquer l'écrasement d'un micro-objet en cours de manipulation.
Dans le but d'analyser le comportement dynamique des bascules bistables conçues, un banc de caractérisation dont le principe est présenté sur la Fig. 73 a été mis au point. Un système de mesure de position par interférométrie laser à résolution subnanométrique et à très large bande passante est utilisé pour enregistrer la position du shuttle lors du basculement.

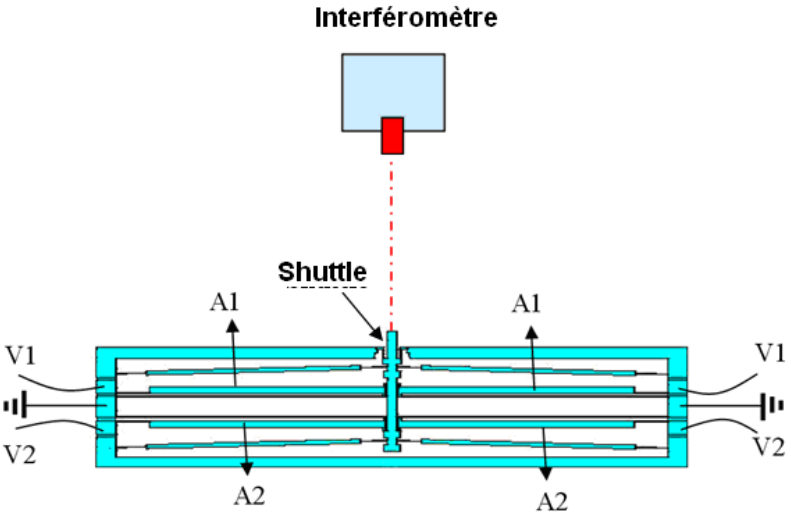


Fig. 73. Principe de mesure pour l'analyse du comportement dynamique des modules bistables.

Lorsqu'une tension électrique V2 est appliquée, le module bascule de la position 1 à la position 2 et l'interféromètre enregistre le déplacement du shuttle présenté sur la Fig. 74.

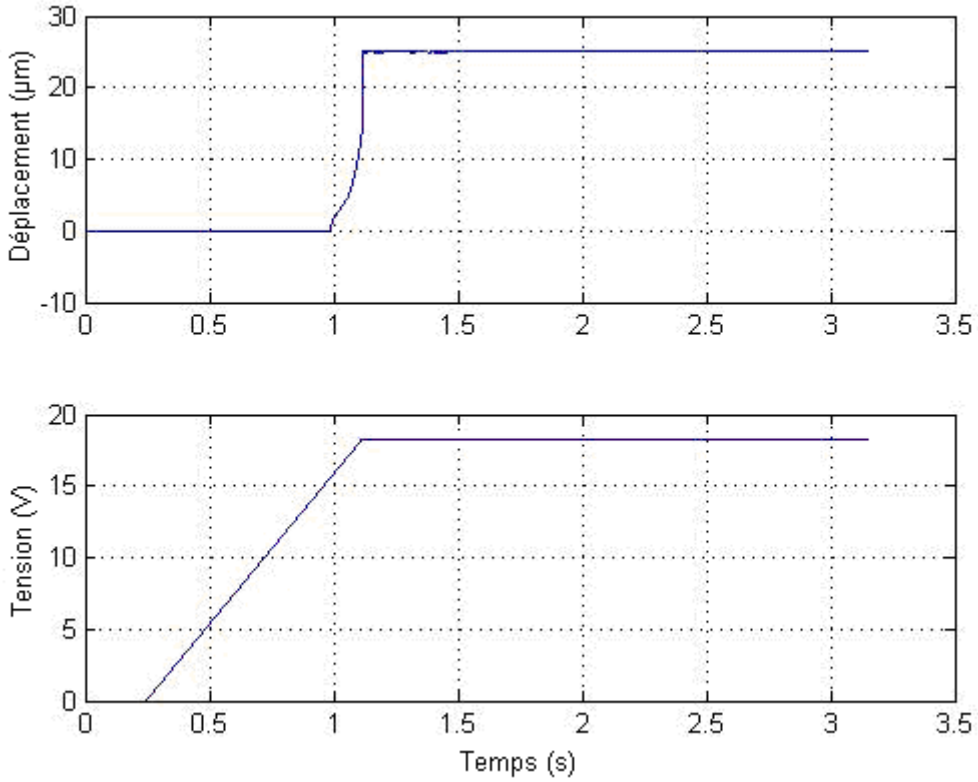


Fig. 74. Transition de la position stable 1 à la position stable 2.

De manière analogue, l'application d'une tension V1 provoque le basculement de la position 2 à la position 1. Le résultat de la mesure est présenté sur la Fig. 75. Dans ce cas, et contrairement au basculement précédent, il apparaît un comportement faiblement amorti générant un dépassement important ainsi que des vibrations. Il convient donc d'élaborer une commande à même d'éliminer ces inconvénients.

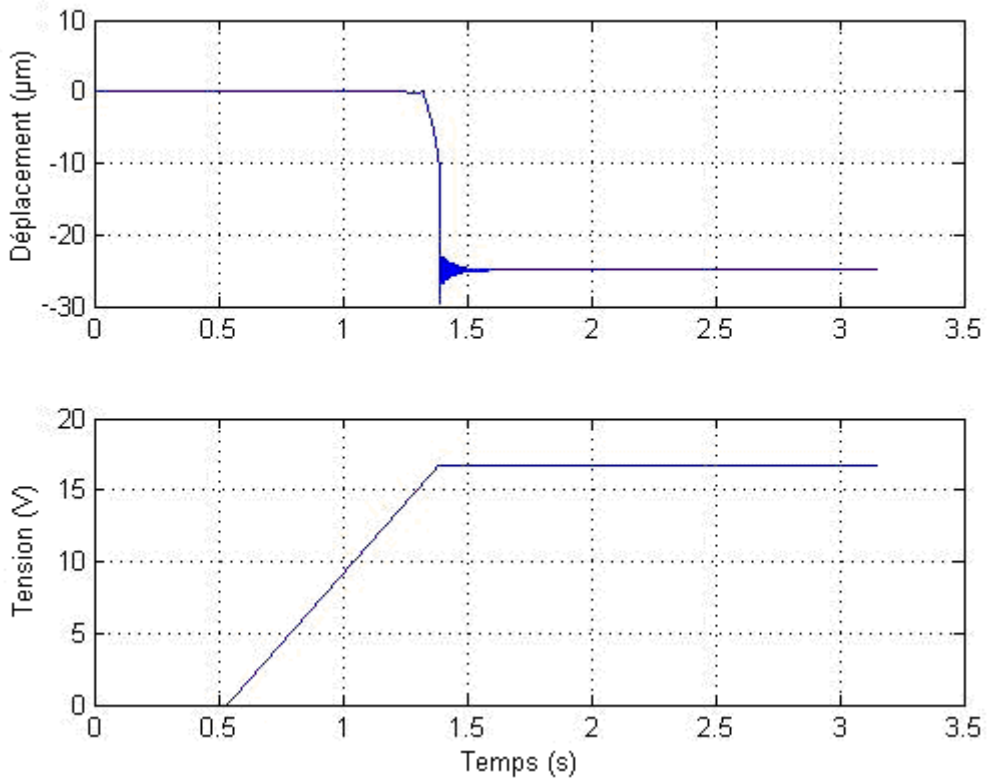


Fig. 75. Transition de la position stable 2 à la position stable 1.

5.4.3 Elaboration d'une stratégie de commande

L'analyse du comportement dynamique a permis de constater que le basculement de la position stable 1 à la position stable 2 ne pose pas de difficulté particulière. En effet, aucune vibration significative n'a été relevée. En revanche, le basculement de la position 2 à la position 1 produit des oscillations de grandes amplitudes. Ces différences importantes de comportement sont dues au fait que, dans le premier cas, le shuttle est bloqué par une masse importante de matière (cadre du module bistable) alors que, dans le second cas, le blocage est dû au contact entre les éléments fins du stop-block 1 beaucoup plus souples.

Compte-tenu du choix de commande qui est fait, à savoir commander les modules en boucle ouverte, l'amélioration du comportement dynamique ne peut se faire par introduction d'un correcteur dans une boucle de rétroaction. Deux approches sont alors exploitables pour l'amélioration des performances. La première consiste à modifier la structure mécanique du stop-block 1 afin de la rendre plus robuste. Cette approche a cependant deux inconvénients majeurs. Le renforcement de ce stop-block induit une force plus importante pour l'activation initiale du shuttle rendant cette procédure plus difficile à réaliser compte-tenu de la fragilité des structures. Par ailleurs, de telles modifications entraînent de nouveaux essais à effectuer et une campagne de microfabrication en salle blanche générant des coûts financiers et en temps supplémentaires. Pour toutes ces raisons, notre choix s'est porté sur la deuxième voie d'amélioration possible qui consiste à utiliser la seconde paire d'actionneurs pour accroître l'amortissement du shuttle. Ainsi, la seconde paire d'actionneurs est utilisée pour intercepter le shuttle pendant son déplacement,

puis de l'amener en contact avec la butée. Le chronogramme des tensions de commande est représenté sur la Fig. 76 et le résultat obtenu est illustré sur la Fig. 77.

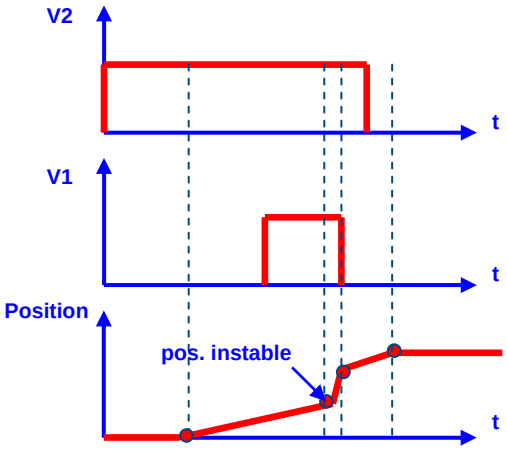


Fig. 76. Chronogramme des tensions appliquées pour la stratégie de commande en boucle ouverte.

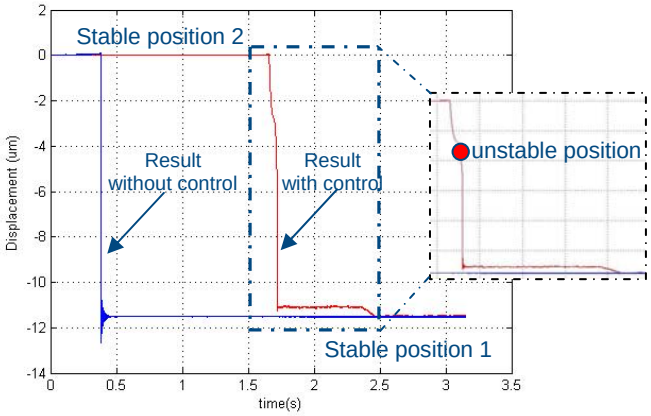


Fig. 77. Comparaison des résultats obtenus sans et avec stratégie de commande.

Il apparaît clairement que cette approche permet d'obtenir un comportement sans dépassement et sans oscillation tout en conservant les propriétés de commande sans capteur. Les signaux de commande peuvent être simplement générés par tout calculateur numérique.

5.5 Microrobots numériques pour le micropositionnement précis

Les travaux décrits précédemment ont permis d'aboutir à une architecture de module bistable microfabriqué possédant des propriétés compatibles avec la réalisation de microrobots. Cependant, la réalisation de microrobots requiert la conception d'architectures microrobotiques adaptées au micromonde. Ainsi, les possibilités d'association de modules bistables et de structures articulées offrent des combinaisons quasi-illimitées. Une première structure évidente consiste à utiliser une approche sérielle telle que celle détaillée sur la Fig. 67. Celle-ci, simple et élégante, qui permet de réaliser des axes linéaires discrets, pose de nombreuses difficultés technologiques. Outre les problèmes de connectique (dont les fils peuvent présenter une rigidité non négligeable compte-tenu des dimensions de certaines poutres de la structure), le premier module doit

supporter le poids de tous les suivants. Les effets inertiels et le poids en fonction de l'orientation de la structure rendent l'utilisation d'un tel robot difficile. Pour ces raisons, nous nous sommes orientés vers des architectures parallèles beaucoup plus rigides et autorisant un accès aisé aux connections électriques des différents modules.

Dans le but d'explorer certaines possibilités d'architectures de microrobots, nous nous sommes fixés comme objectif le challenge de concevoir un microrobot dont les dimensions permettent la manipulation de composants à l'intérieur d'un TEM (Transmission Electron Microscope). Il n'existe, à ce jour, aucun microrobot en mesure d'effectuer des tâches de micromanipulation dans un environnement aussi confiné. L'espace autorisé à l'intérieur d'un TEM est une fente, dont la dimension la plus contraignante : l'épaisseur, est de l'ordre de quelques millimètres à un ou deux centimètres selon le modèle. Nous avons donc fait le choix de réaliser un microrobot planaire (fabriqué sur un wafer de silicium) dont l'épaisseur hors connections n'excède pas 500 µm. Les spécifications de ce microrobot sont principalement dictées par les exigences du micromonde. Ces caractéristiques doivent, cependant, être compatibles avec les limites des procédés de microfabrication utilisés. La structure du robot doit être compacte et dépourvue de tout assemblage afin d'éviter les jeux mécaniques et les frottements. Nous nous sommes donc naturellement orientés vers une structure monolithique. Afin de permettre l'exécution de diverses tâches dans le micromonde, la résolution de positionnement visée est sub-micrométrique et les forces générées doivent atteindre plusieurs millinewtons. Par ailleurs, pour cette première architecture, nous souhaitons obtenir un espace atteignable discret planaire constitué d'un ensemble de points accessibles uniformément répartis. Le paragraphe suivant décrit l'architecture du microrobot numérique conçu.

5.5.1 Structure du microrobot DiMiBot

La structure conçue, appelée DiMiBot pour « Digital MicroRobot » a été développée dans le cadre de la thèse de Vincent Chalvet. Elle est réalisée sur un wafer SOI (Silicon On Insulator) d'une épaisseur de 400 µm. L'un des prototypes réalisés est représenté sur la Fig. 78. Il est constitué d'un ensemble de 4 modules bistables solidaires d'une base et d'une structure mécanique déformable les reliant et permettant la transmission des déplacements générés à l'organe terminal. Tous les modules bistables utilisés sont identiques. Un connecteur électrique permet le passage des courants dans les actionneurs thermiques.

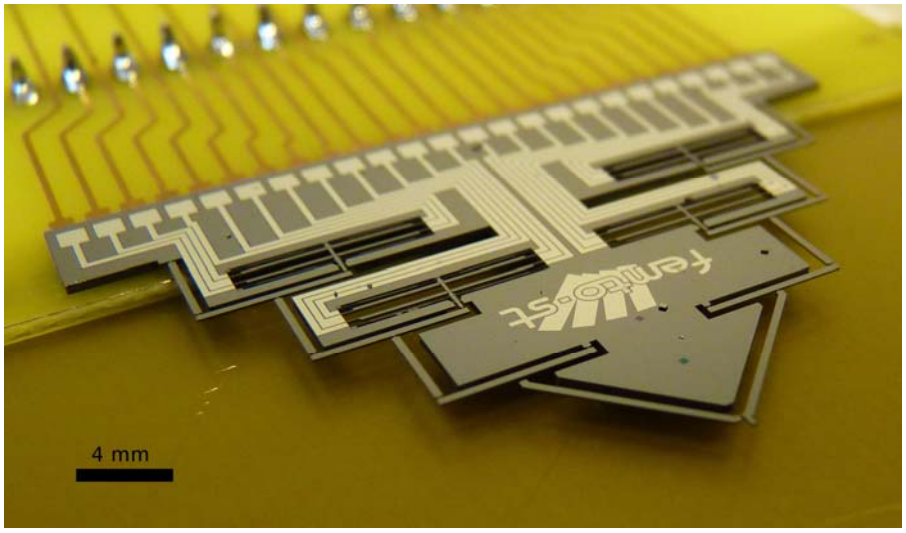


Fig. 78. Un microrobot DiMiBot à 4 modules bistables.

5.5.2 Modélisation du microrobot DiMiBot

Le calcul des modèles géométriques directes et inverses est réputé difficile pour les robots binaires en raison de l'accroissement combinatoire qui en résulte et des redondances. Plusieurs études ont été menées concernant des manipulateurs hyper-redondants et utilisent des notions de densité d'espace atteignable [115],[82]. Dans le cas du DiMiBot, la modélisation est simplifiée grâce à la cinématique particulière employée ainsi que l'absence de redondance. Toutefois, l'espace non-redondant pénalise les possibilités de génération de trajectoires.

5.5.2.1 Modèle géométrique direct

La structure cinématique du microrobot est présentée sur la Fig. 79. Elle peut être décomposée en plusieurs structures élémentaires constituées d'un module bistable ainsi que de deux poutres (voir Fig. 80). Chaque structure élémentaire transmet le déplacement d'un module bistable aux structures situées en aval. A l'extrémité du robot, une liaison mécanique est établie avec le bâti et deux poutres permettent de maintenir un organe terminal.

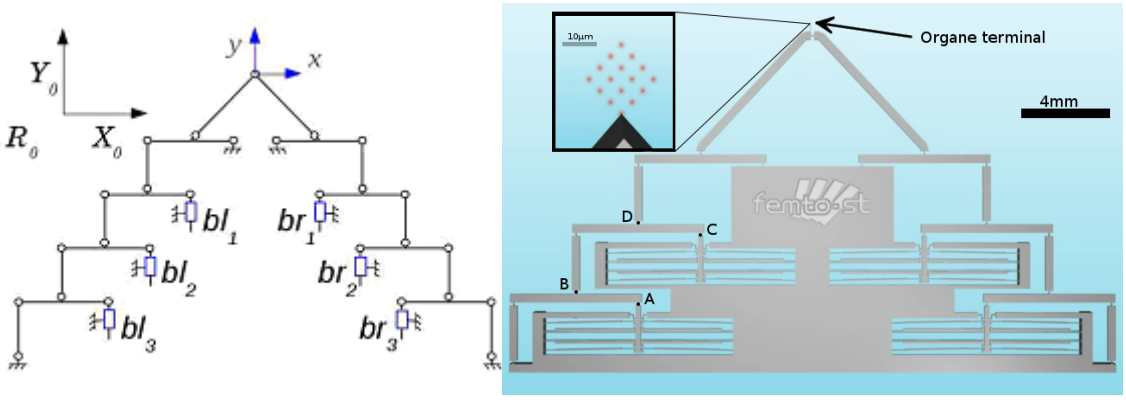


Fig. 79. Architecture du microrobot : modèle cinématique (à gauche) et représentation CAO (à droite).

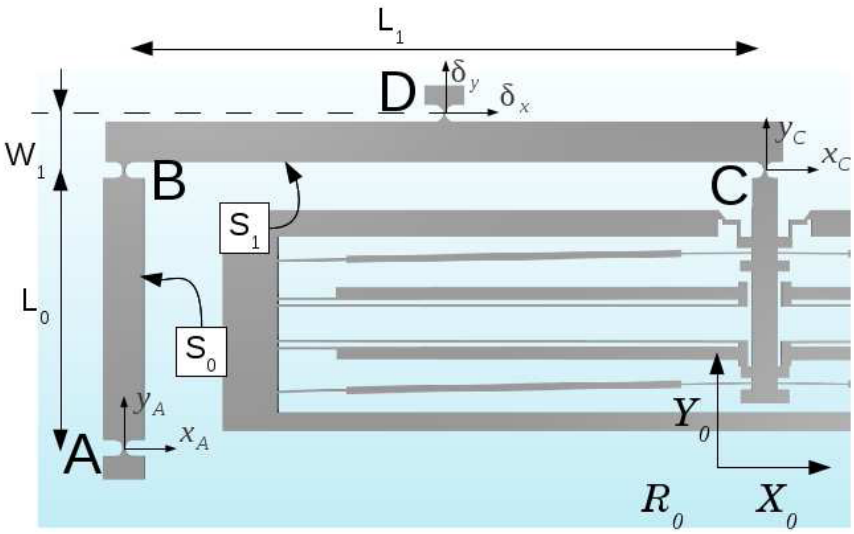


Fig. 80. Structure élémentaire composée d'un module bistable et de deux poutres (AB et BC).

Le modèle géométrique direct donnant les coordonnées opérationnelles (coordonnées de l'organe terminal) en fonction des coordonnées articulaires (ici l'état des modules bistables) peut être exprimé comme suit [22] :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = K.\begin{bmatrix} 1 & \cdots & \frac{1}{2^{N_1}-1} & -1 & \cdots & \frac{-1}{2^{N_2}-1} \\ 1 & \cdots & \frac{1}{2^{N_1}-1} & 1 & \cdots & \frac{1}{2^{N_2}-1} \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} bl_1 \\ \vdots \\ bl_{N_1} \\ br_1 \\ \vdots \\ br_{N_2} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$K = \frac{1}{4}(\frac{1}{2} + \frac{W_1}{L_1}) \text{ est un terme constant.}$$

N_1 et N_2 sont respectivement le nombre de modules bistables présents dans la moitié gauche de la structure et le nombre de ceux présents dans la moitié droite.
bl_i et br_i représentent l'état (0 ou 1) des modules bistables correspondants (voir Fig. 79).
W_1 et L_1 sont des longueurs indiquées sur la Fig. 80.

5.5.2.2 Espace atteignable

Dans un but de généricité, la structure mécanique du DiMiBot a été conçue pour offrir un espace atteignable plan dans lequel les points atteignables sont équidistants. La Fig. 81 présente l'espace atteignable théorique d'un DiMiBot à 4 modules bistables. Les 16 points accessibles de l'espace sont non redondants. La résolution de positionnement peut être améliorée en augmentant le nombre de modules bistables. La structure du DiMiBot a été conçue de telle manière que l'ajout de 2 modules à la base du microrobot double la résolution (voir Fig. 81).

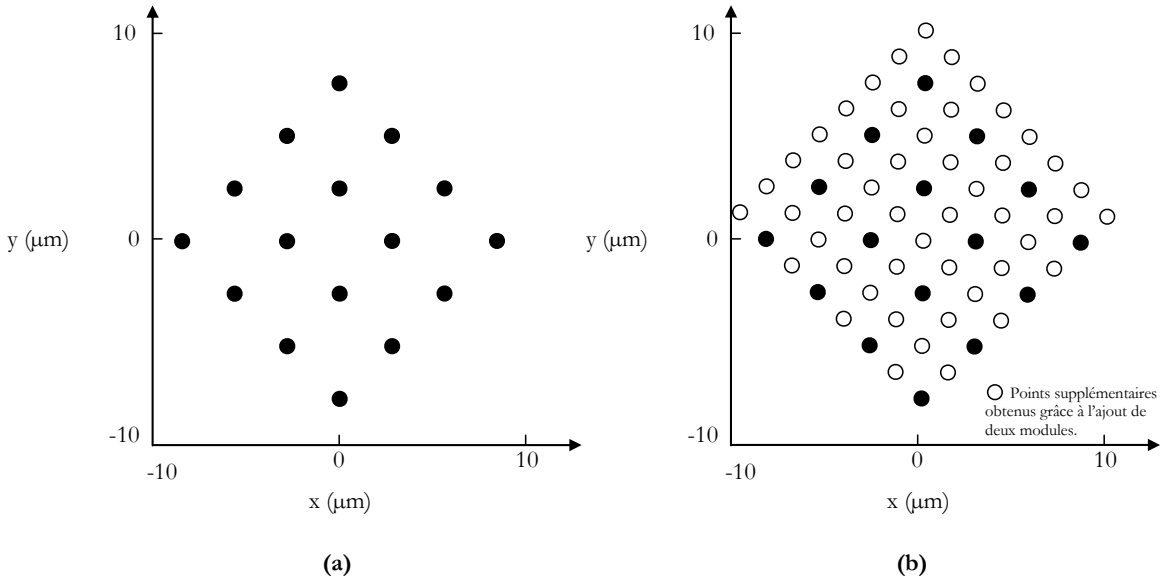


Fig. 81. Espace atteignable théorique d'un DiMiBot (a) - à 4 modules bistables et (b) - à 6 modules bistables.

5.5.2.3 Modèle géométrique inverse

L'obtention d'un modèle géométrique inverse pour un robot numérique est généralement complexe. Cependant, dans notre cas, l'absence de redondance et la simplicité de la structure permettent d'écrire un tel modèle simplement [1].

$$\begin{cases} bl_i = \overline{((round(\frac{x_d}{r_x}) \,\&\, 2^{N_1-i}) == 0)} \\ br_j = \overline{((round(\frac{y_d}{r_y}) \,\&\, 2^{N_2-j}) == 0)} \end{cases}$$

Dans cette expression :
x_d et y_d sont les coordonnées désirées de l'organe terminal,
N_1 et N_2 sont les nombres de modules respectivement dans la moitié gauche et la moitié droite du DiMiBot,
bl_i et br_j représentent l'état des bascules numérotées de haut en bas,
r_x et r_y sont les résolutions dans les deux directions du plan,
& désigne l'opérateur booléen ET.

5.5.2.4 Analyse des performances et application

L'analyse des performances du DiMiBot, en particulier sa répétabilité submicrométrique, requiert l'emploi d'instruments de mesure très performants. Cette étude a été menée sur un MEMS Analyzer (analyseur de MEMS). Les MEMS Analyzers sont des instruments de caractérisation très précis permettant d'analyser le comportement des MEMS. Ils peuvent notamment effectuer des mesures de déplacement dans le plan avec une résolution nanométrique. L'institut FEMTO-ST s'est doté d'un MEMS Analyzer de référence MSA-500 fabriqué par la société POLYTEC. Cet instrument a été utilisé pour caractériser la répétabilité du « DiMiBot ». La Fig. 82 montre le résultat de cette analyse, qui présente l'espace atteignable par l'extrémité du microrobot, ainsi que sa répétabilité obtenue en déplaçant le microrobot à de nombreuses reprises entre les différents points atteignables. Avec ce « DiMiBot » à 4 modules bistables, le pas de déplacement est de 3,5 µm avec une répétabilité meilleure que 90 nm. Ces performances sont donc obtenues en boucle ouverte grâce à la robustesse mécanique de la structure.

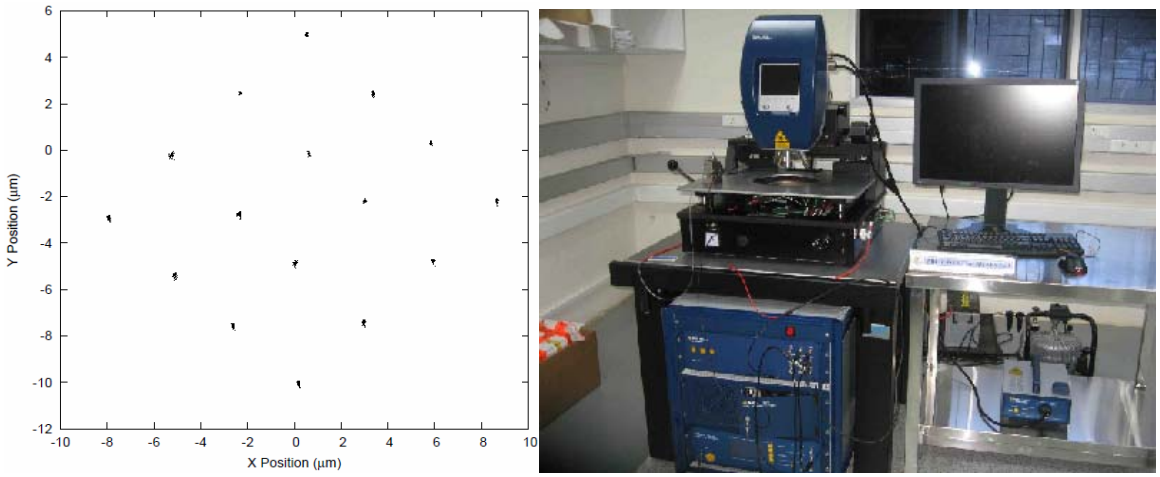


Fig. 82. Analyse de la répétabilité du DiMiBot à 4 modules bistables à l'aide d'un MEMS Analyzer. Espace atteignable (à gauche) et MSA-500 (à droite).

Les caractéristiques principales d'un module bistable et du DiMiBot analysés sont résumées ci-après :

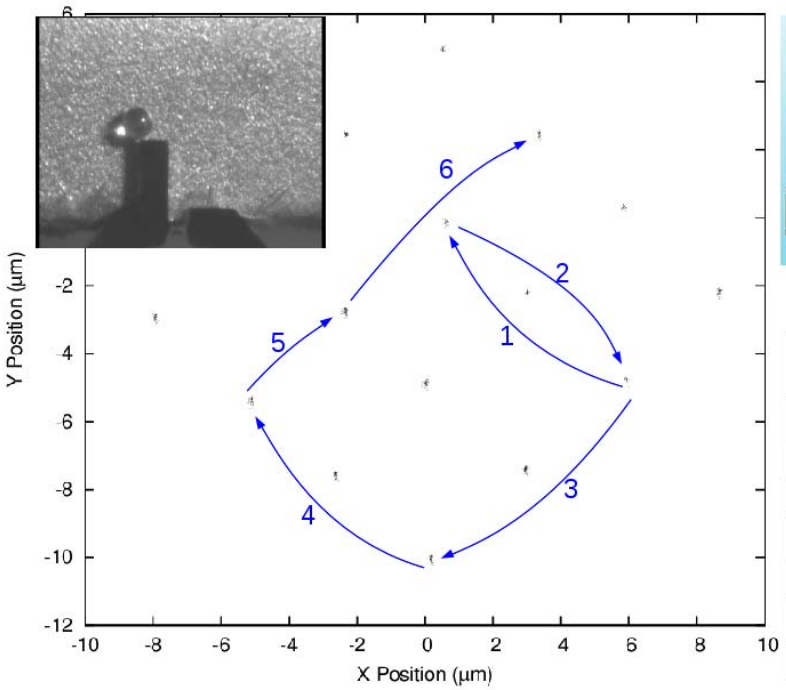
<u>Caractéristiques des modules bistables</u>

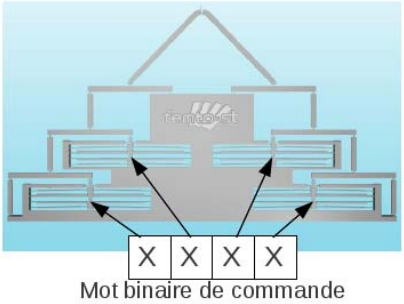
- Hauteur : 9 mm
- Largeur : 2 mm
- Déplacement d entre les deux positions stables : 35 µm
- Force admissible sur la partie mobile : 1,5 mN
- Energie de basculement : 30 mJ

<u>Caractéristiques du DiMiBot à 4 modules</u>

- Hauteur : 24 mm
- Largeur : 36 mm
- Epaisseur : 400 µm
- Course : 14 µm
- Résolution : 3,5 µm
- Répétabilité : <90 nm
- Force admissible sur l'organe terminal : 5 mN

Dans le but de démontrer la pertinence de l'utilisation du microrobot « DiMiBot » pour l'exécution de tâches de micromanipulation réelles et de vérifier son aptitude à produire une force suffisante pour déplacer des micro-objets, nous avons effectué des essais de manipulation de billes en verre de 150 µm de diamètre. L'expérimentation consiste à déplacer une bille dans un plan et selon deux directions perpendiculaires. Pour cela, la succession de mots binaires représentant l'état de chaque bascule a été générée et appliquée sur le « DiMiBot ». La trajectoire du « DiMiBot » et les déplacements de la bille sont décrits sur la Fig. 83. Ces expérimentations ont montré, de manière claire, que l'approche « microrobotique numérique » permet d'effectuer des manipulations par poussée très précises sans l'utilisation de capteurs, de conditionneurs de signaux et de calculateurs temps-réel. Il s'agit donc d'une solution de manipulation à faible coût et à haute performance.





	Mot binaire de commande
Position initiale	0100
	0110
	0100
	0000
	0010
	1010
Position finale	1110

Fig. 83. Manipulation par poussée d'une bille de 150 µm de diamètre à l'aide d'un DiMiBot. Trajectoire de l'organe terminal (à gauche) et séquence de mots binaires de commande (à droite).

5.6 Conclusion

La microrobotique numérique constitue une approche totalement différente des méthodes actuellement utilisées pour la conception de microrobots. Cette nouvelle approche autorise une grande liberté dans la conception de structures cinématiques. Les performances atteintes, de nos jours, par les technologies de microfabrication MEMS permettent une bonne reproductibilité des structures fabriquées. La nature binaire intrinsèque aux microrobots numériques et à la commande en boucle ouverte permet une grande facilité de pilotage brisant ainsi les barrières entre logiciel et matériel. De nouvelles voies de recherche, en suivi optimal de trajectoires par exemple, peuvent être explorées.

Bien que la pertinence de la microrobotique numérique ait été prouvée par des réalisations et des expérimentations, de nombreuses perspectives peuvent être envisagées telles que la conception de structures robotiques dédiées à des tâches particulières, la réalisation de microrobots numériques 3D ou encore le développement d'algorithmes pour la commande optimale et le suivi de trajectoires. Certaines de ces voies d'amélioration sont en cours de développement en collaboration avec Vincent Chalvet dans le cadre de ses travaux de thèse.

6 Analyse des bruits dans les microsystèmes

6.1 Introduction

Dans le contexte de la microrobotique et plus généralement du micropositionnement, les performances peuvent être évaluées notamment par la précision et la répétabilité en position et/ou en force d'organes terminaux de microrobots ou de toute partie en mouvement. L'évolution des technologies de microfabrication en salle blanche, l'introduction de lois de commande raffinées et la disponibilité large de calculateurs très performants ont permis d'atteindre ces dernières années des performances tellement élevées qu'elles se trouvent confrontées aux phénomènes de bruit. Le filtrage du bruit constitue, en effet, un verrou à lever si l'on souhaite accroître d'avantage les performances des microsystèmes. Par ailleurs, il convient de différencier la recherche de performances statiques et celle de performances dynamiques (suivi de trajectoire, par exemple).

Considérons la situation représentée sur la Fig. 84, dans laquelle, un instrument de mesure constitué d'un capteur et d'un conditionneur de signal est employé pour mesurer l'évolution dans le temps de la position d'un doigt de micropince, au cours d'une tâche de micromanipulation. La mesure, fournie sous la forme d'un signal électrique, laisse apparaître un signal bruité de valeur moyenne V_{moy} et variant entre deux valeurs extrêmes V_{min} et V_{max}. Il est important de déterminer l'origine de ce bruit. En effet, si celui-ci est dû à l'instrument de mesure (bruit de mesure), le doigt considéré est alors immobile. En revanche, si le bruit agit sur la micropince (bruit affectant l'état de la micropince), alors le doigt est soumis à des fluctuations qui, dans le contexte de la micromanipulation, peuvent être dangereuses car l'objet manipulé peut être endommagé, voire détruit. En réalité, compte-tenu des faibles amplitudes des grandeurs mesurées dans le micromonde, le plus souvent, le bruit apparent résulte des contributions du bruit de mesure et du bruit intrinsèque au système mesuré. Cette situation n'est pas propre aux microsystèmes, mais elle apparaît de manière forte dans le micromonde, en raison d'un rapport signal/bruit très faible et des performances visées à la limite des possibilités des instruments de mesure actuels. Quelque soit l'origine du bruit apparent, l'exploitation des signaux mesurés dans des boucles de rétroaction doit faire l'objet d'une attention particulière.

Les travaux menés sur le bruit dans les microsystèmes, ont pour objectif la caractérisation de ces bruits de manière exploitable pratiquement, afin de mieux appréhender ces phénomènes et d'accroître ainsi les performances des microsystèmes. Cette démarche exploratoire et fondée sur une approche expérimentale, vise à déterminer, dans des conditions de fonctionnement courantes des microsystèmes, l'effet du bruit afin d'offrir au concepteur des microsystèmes ou à l'automaticien du micromonde des données utilisables.

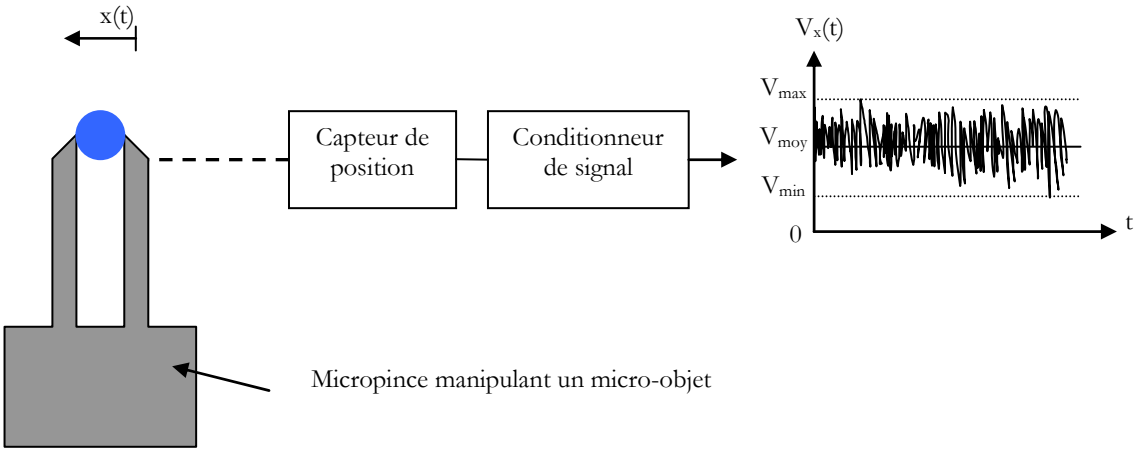


Fig. 84. Mesure de la position d'un doigt de micropince enserrant un micro-objet.

Dans les paragraphes suivants, deux approches sont présentées. La première consiste à prendre en compte le bruit de manière globale sans s'intéresser à ses origines. L'objectif étant de montrer que, par une caractérisation statistique simple et l'exécution en temps-réel d'algorithmes de commande optimale, il est possible d'améliorer, dans une large mesure, les performances d'un microsystème que ce soit pour la mesure ou pour l'actionnement. Cette approche présente l'avantage d'une mise en œuvre simple et d'une bonne adaptation aux changements des conditions environnementales. La seconde approche vise à identifier les sources de bruits, ayant une influence majeure sur le comportement des microsystèmes, afin de réduire leurs effets à la source ou d'en tenir compte lors de la synthèse des lois de commande.

6.2 Prise en compte des bruits par une approche globale

Une première approche pour la prise en compte des bruits à l'échelle microscopique consiste à les considérer d'une manière globale sans discerner leurs origines. On ne s'intéressera pas ici à l'analyse de la contribution de chacun des bruits mais plutôt à l'effet de ceux-ci sur les performances générales du microsystème étudié. Cette approche, si elle ne permet pas la réduction des bruits en agissant sur leurs origines, offre à l'utilisateur une manière relativement simple à mettre en œuvre pour réduire l'impact du bruit sur les performances. La modélisation du bruit étant dans ce cas impossible, une approche statistique sera privilégiée. Comme souvent dans l'étude des phénomènes de bruit dans les systèmes, le bruit global résultant de la sommation de nombreuses contributions conduit à un bruit pouvant être considéré comme gaussien et blanc dans la bande passante utile du système. C'est pourquoi les approches de filtrage optimal telles que les algorithmes introduits par Rudolf Emil Kalman [104] et leurs nombreuses améliorations représentent des outils puissants pour le filtrage des bruits dans les microsystèmes. Dans le cas où les bruits ne respectent pas les hypothèses citées (bruits blancs et gaussiens), il sera souvent possible de s'y rapporter grâce à l'emploi de filtres formeurs.

L'absence de modélisation des différents bruits rend essentielle la notion de mesure. Des instruments de grande qualité devront être utilisés dans des conditions strictes. Compte-tenu des ordres de grandeur des déplacements générés et des forces produites dans les microsystèmes, les principes de mesure à privilégier sont l'interférométrie, la triangulation laser ou les capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Ces principes de mesure offrent des résolutions pouvant atteindre 0,01 nm.

Le filtrage du bruit peut être introduit dans les microsystèmes à plusieurs fins. Il peut, par exemple, servir à éliminer le bruit de mesure lors de la réalisation de capteurs embarqués ou

permettre un positionnement précis. Dans la suite seront décrites deux applications, dans lesquelles l'apport du filtrage est mis en évidence. La première, déjà évoquée dans le paragraphe 4.3.3.3, consiste à améliorer considérablement les performances d'un capteur de force embarqué et la seconde montre l'amélioration des performances en précision de positionnement et en commande en force.

6.2.1 Mesure de micro-forces par jauges d'extensométrie embarquées

L'intérêt de substituer aux capteurs extéroceptifs précis, mais coûteux des capteurs embarqués dans les microsystèmes, apparaît avec force dans les applications nomades ou nécessitant de travailler dans des environnements confinés. Que ce soit dans le domaine médical ou dans les microsystèmes, les stations de manipulation sont souvent encombrées car elles nécessitent la présence de nombreux instruments (caméras, robots manipulateurs, systèmes de positionnement, etc.). La Fig. 85 montre un exemple de capteur de force fondé sur un principe simple : une force appliquée à l'extrémité de la poutre entraîne la flexion de cette dernière. Si l'on connaît le comportement de cette poutre et que l'on est capable de mesurer précisément le déplacement de son extrémité, on obtient alors un capteur de micro-forces. Il s'agit d'un principe très utilisé notamment en microscopie à force atomique. Par ailleurs, on s'intéressera, non seulement, à la mesure statique de cette force mais également à la mesure dynamique, décrivant l'évolution de cette dernière au cours du temps.

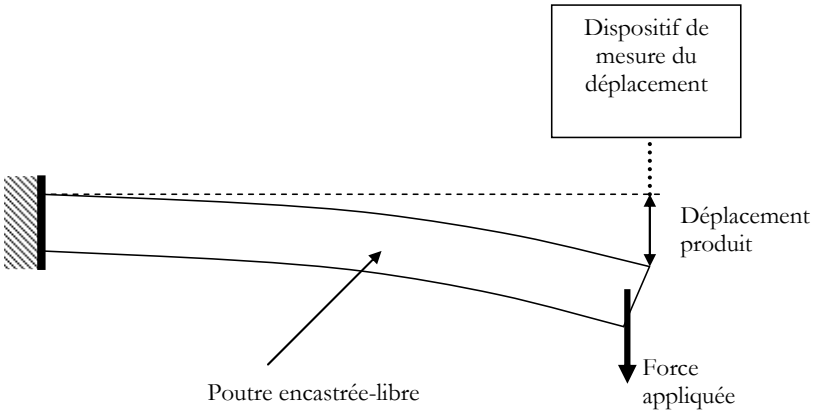


Fig. 85. Principe de la mesure de force par mesure d'un déplacement.

Reprenons le système décrit sur la Fig. 51 et la Fig. 52 du paragraphe 4.3.3.3. Ce système est équipé de deux jauges d'extensométrie pour permettre la mesure de la force appliquée à son extrémité, en remplacement de la mesure externe effectuée à l'aide d'un capteur optique à triangulation laser. La Fig. 86 rappelle les performances des deux capteurs pourvus de leurs conditionneurs respectifs.

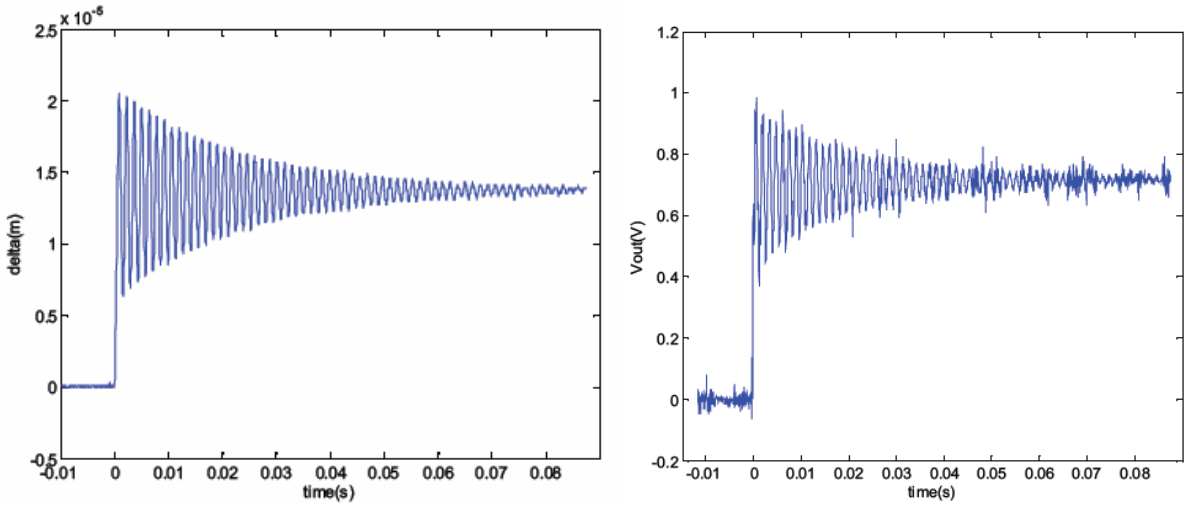


Fig. 86. Comparaison entre la réponse du système à l'application d'un échelon de tension de 15 V mesurée à l'aide d'un capteur optique par triangulation (à gauche) et la tension fournie par le dispositif de mesure à jauges intégrées pour un même signal d'excitation.

L'emploi du capteur externe offre de bonnes performances de mesure, mais nécessite un positionnement spatial particulier empêchant tout déplacement de la poutre. En revanche, la mesure à l'aide des jauges est bien adaptée à une utilisation nomade mais laisse apparaître un bruit important pénalisant la précision. Le filtrage de ce bruit par, l'insertion d'un filtre passe-bas à fréquence de coupure très basse, est possible uniquement pour des mesures statiques. Cette dernière peut également être obtenue par moyennage d'un grand nombre de mesures.

L'analyse du bruit présent en sortie du système de mesure à jauges, lorsqu'un signal nul est appliqué à son entrée, a montré que son spectre s'étend sur toute la bande passante de la poutre (inférieure à 3 kHz) jusqu'à des fréquences bien supérieures (voir Fig. 87). L'étendue de la bande passante du système, du spectre du bruit et le gabarit du filtre passe-bas en sortie sont représentés symboliquement sur la Fig. 88. Il en résulte un dilemme mesure dynamique/filtrage du bruit. En effet, abaisser la fréquence de coupure du filtre passe-bas utilisé en sortie revient à filtrer davantage le bruit, mais entraîne une réduction de la dynamique de mesure de la force. Ainsi, les oscillations, effectivement présentes dans la réponse du système (déplacement), apparaîtraient avec des amplitudes plus faibles et pourraient devenir indétectables par la mesure. Si le bruit de mesure, présent au-delà de la bande passante du système, peut être aisément filtré à l'aide d'un filtre électronique passe-bas analogique ou numérique, la portion de spectre qui chevauche la bande passante de la poutre nécessite, alors, l'emploi de techniques de filtrage optimal pour conserver la dynamique de la mesure. Un filtre de Kalman, particulièrement bien adapté au calcul temps-réel, a été employé dans ce but.

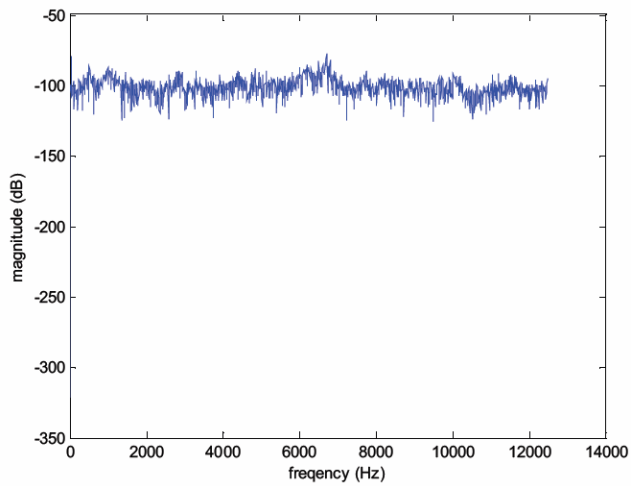


Fig. 87. Spectre du bruit de mesure.

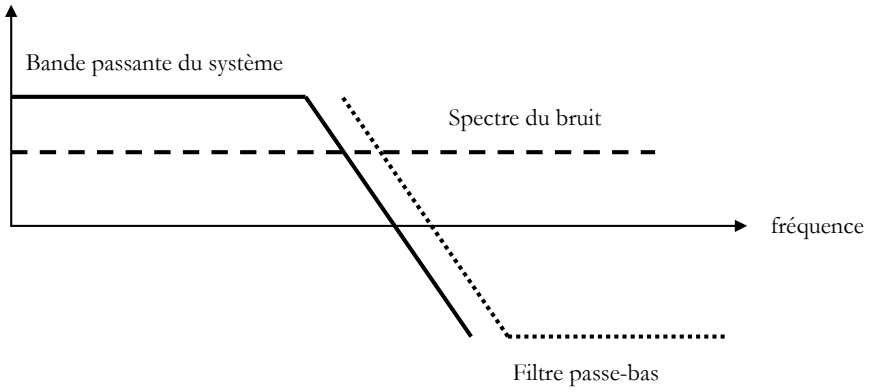


Fig. 88. Dilemme mesure dynamique/filtrage du bruit.

La prise en compte des bruits dans la modélisation du système est effectuée en introduisant dans le modèle d'état discret, des termes supplémentaires correspondants à ces bruits [104].

$$X_k = AX_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}$$
$$y_k = CX_k + v_k$$

où :
X représente le vecteur d'état du système,
u et y sont respectivement l'entrée et la sortie du système,
A, B et C sont respectivement les matrices d'évolution, de commande et de sortie du modèle d'état,
w et v représentent respectivement les bruits d'état et de mesure supposés indépendants, blancs et gaussiens, suivant une loi de probabilité normale :

$$P(w) = N(0, Q)$$
$$P(v) = N(0, R)$$

Q et R représentent respectivement la covariance des bruits d'état et de mesure.

L'algorithme récursif de Kalman produit une estimation de l'état X du système, notée $\hat{X}$ conformément au schéma de la Fig. 89 à partir de la connaissance du modèle du système et des caractéristiques du bruit.

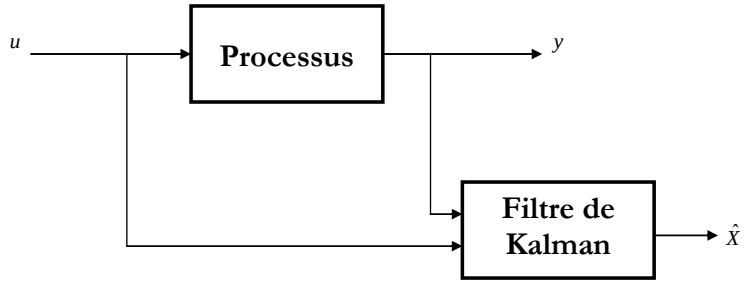


Fig. 89. Principe du filtre de Kalman.

Les fondements et le calcul du filtre de Kalman sont présentés dans [148] et ne seront pas repris ici. L'intégration de l'algorithme dans un calculateur numérique temps-réel ne pose aucun problème particulier. Dans le micromonde, le problème majeur consiste à estimer les bruits de mesure et d'état nécessaires au calcul. De plus, Kalman a démontré que son algorithme est optimal si les bruits sont blancs et gaussiens[6].

La mesure des différents bruits a montré la validité de l'hypothèse de bruits blancs et gaussiens. A titre d'exemple, la Fig. 87 montre le spectre du bruit de mesure et la Fig. 90 sa distribution. Ce bruit est mesuré lorsqu'une entrée nulle est appliquée à l'entrée du système. L'estimation du bruit d'état est, quand-à-elle plus délicate en raison du faible niveau de ce bruit. Lorsque le bruit provenant de l'entrée possède un niveau élevé, le bruit de mesure peut être estimé par la méthode employée dans [8]. Une autre approche possible consiste à déduire ses caractéristiques en comparant la sortie estimée par le filtre et celle mesurée par le capteur externe.

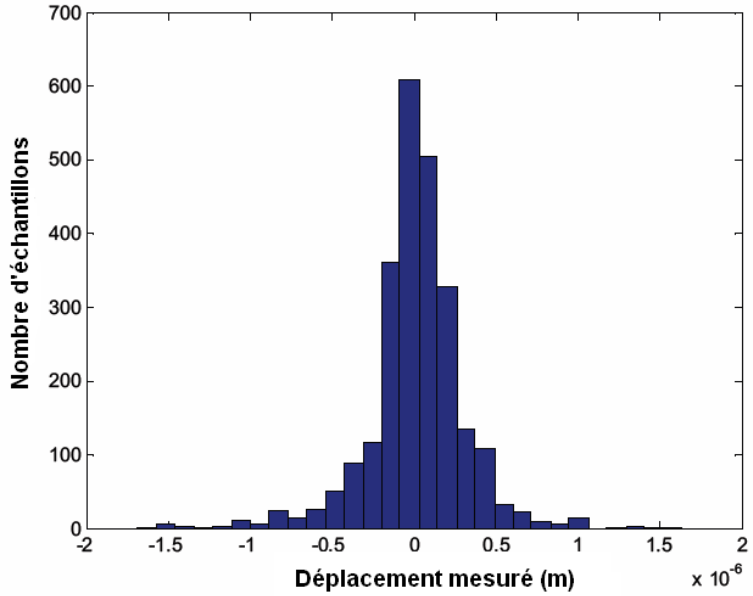


Fig. 90. Distribution du bruit de mesure.

[6] En pratique, le filtre de Kalman fonctionnera même si cette hypothèse n'est pas respectée. Le filtre sera alors sous-optimal et la qualité de l'estimation de l'état du système dépendra du degré de ressemblance entre les bruits réels avec des bruits blancs es gaussiens.

L'exécution du filtre de Kalman en temps-réel, après introduction des caractéristiques des bruits mesurés in-situ, a permis d'améliorer considérablement la qualité de la mesure. L'amélioration des performances est visible sur la Fig. 56. Plus précisément, une amélioration d'un rapport de 40 (par rapport à l'utilisation du capteur sans filtrage) est obtenue (voir Fig. 91) sans dégrader la dynamique (voir Fig. 92). Cette mesure de position, rapportée à la force, permet d'effectuer des mesures avec une erreur maximale de 50 μN. Une démarche analogue peut être effectuée sur des poutres plus petites pour obtenir une résolution meilleure.

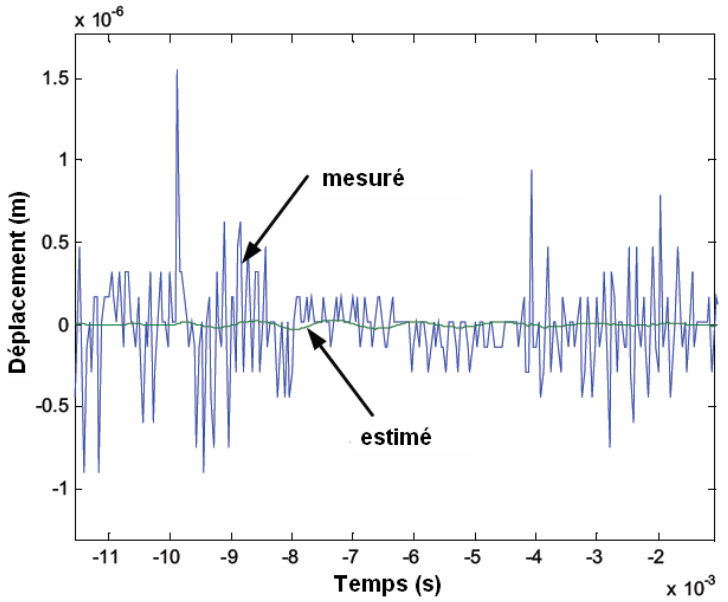


Fig. 91. Comparaison entre les déplacements mesuré et estimé en régime statique.

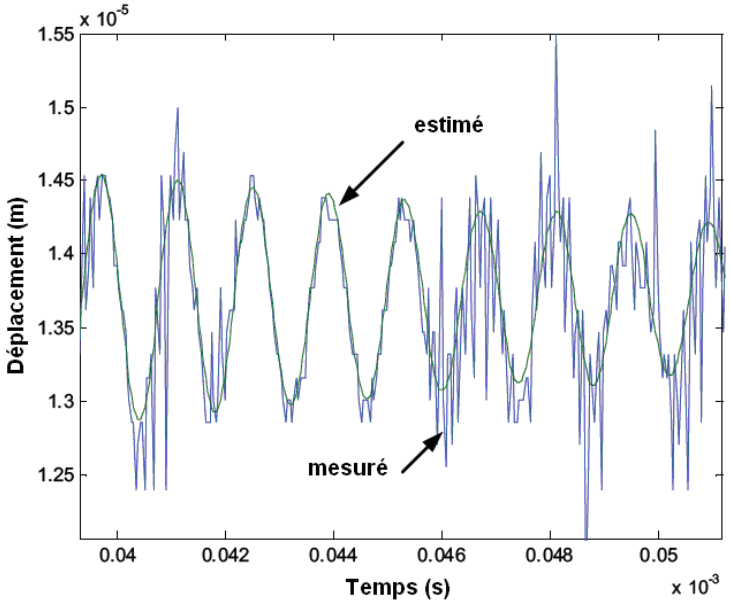


Fig. 92. Comparaison entre les déplacements mesuré et estimé en régime dynamique.

Les résultats obtenus prouvent l'intérêt du filtrage optimal dans les microsystèmes. La conception de microsystèmes intelligents requiert souvent l'intégration de capteurs spécifiques et à des emplacements (sur ces microsystèmes) parfois difficiles d'accès. Il n'existe pas de solution prête à l'emploi répondant à ce besoin. La disponibilité très large et à faible coût de calculateurs de petite

taille (microcontrôleurs, FPGA, etc.) facilite l'exécution en temps-réel d'algorithmes de filtrage. De plus, bien que dans l'application présentée précédemment le bruit ait été considéré comme stationnaire, la prise en compte de niveaux de bruit différents (cas du travail dans différents environnements, par exemple) est possible par la mise à jour périodique des caractéristiques du bruit, qui peut être automatisée par la programmation du calculateur.

La disponibilité de capteurs externes performants reste importante. Outre leur utilité comme référence durant la phase de conception, ces capteurs constituent un bon moyen de vérification des performances du filtre de Kalman mis en œuvre. En effet, un réglage incorrect des paramètres du filtre induit, soit une dégradation des résultats, soit une perte en dynamique de fonctionnement.

6.2.2 Amélioration des performances de commande en position et en force

Le filtrage optimal de Kalman a également été mis en œuvre pour la commande d'une micropince à actionnement électrostatique FTG-100 fabriquée par la société FemtoTools [57] (voir Fig. 93) [60]. Outre l'actionnement électrostatique, cette micropince contient un capteur de force intégré dont le principe de mesure est fondé sur une variation de capacité. Seul l'un des deux doigts est actionné (le doigt de gauche sur la photographie). Le second est lié au capteur de force. Ainsi, ce dispositif est capable de mesurer la force de serrage d'un micro-objet maintenu entre les deux doigts. L'écartement initial (et maximal) entre les deux doigts est de 100 µm et la pince est entièrement fermée sous une tension de 200 V appliquée sur l'actionneur électrostatique de type « comb-drive » (ou peigne interdigité).

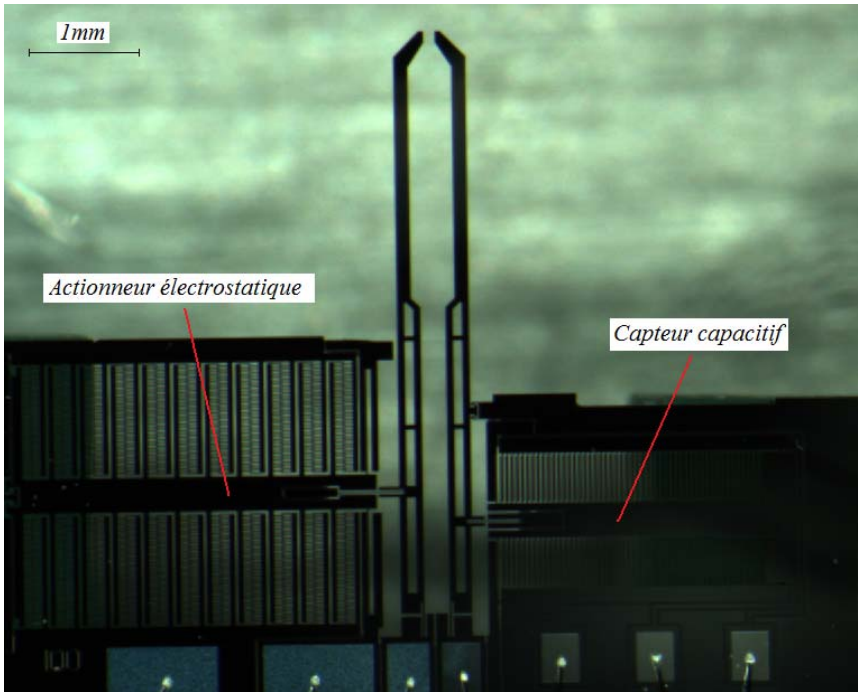


Fig. 93. Micropince FTG-100 de la société FemtoTools [57].

La présence d'un capteur intégré facilite grandement l'emploi de cette pince dans des environnements confinés. Cependant un problème similaire à celui décrit dans le cas précédent apparaît : la présence d'un bruit de mesure important en raison de l'utilisation d'une circuiterie électronique simple construite autour du conditionneur MS3110 de la société Irvine Sensors. Sa

petite taille est idéale pour son intégration à proximité de la micropince, mais ses performances sont loin d'égaler celles d'instruments plus complexes et plus coûteux.

La micropince FTG-100 a été utilisée pour la manipulation de billes en verre de 80 µm de diamètre. L'objectif est de contrôler précisément la force de serrage afin d'éviter d'endommager ou de détruire le micro-objet manipulé. Pour cela, une commande de type LQG (Linéaire Quadratique Gaussienne) qui lie un contrôleur de type linéaire quadratique (LQ) et un estimateur de Kalman a été mise en œuvre, alors que la bille est enserrée entre les doigts de la pince (voir Fig. 94). L'un des avantages de cette loi de commande réside dans le principe de séparation, qui permet un réglage indépendant du filtre de Kalman et du retour d'état. Cependant l'introduction d'un filtre de Kalman dans un régulateur LQ dégrade sa robustesse [52]. Si cette situation devient gênante, il conviendra d'opter, par exemple, pour une méthode LQG-LTR (Linear Quadratic Gaussian with Loop Transfer Recovery) [52] pour améliorer la robustesse. Dans la suite, un correcteur LQG simple est utilisé.

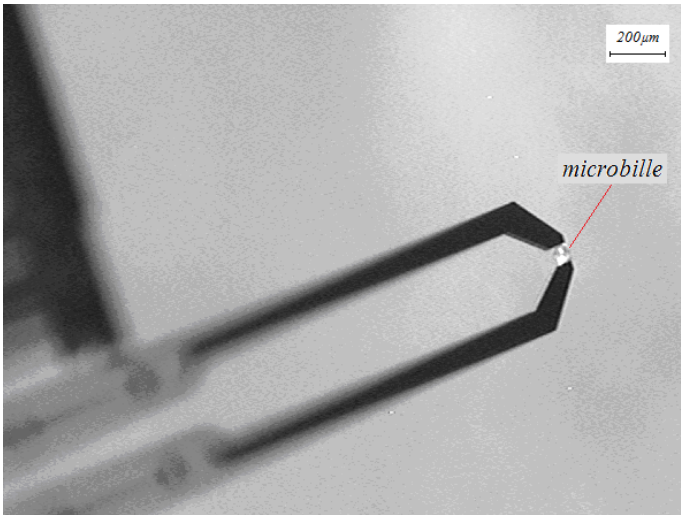


Fig. 94. Commande en force du serrage d'une bille en verre de 80 µm de diamètre.

La Fig. 95 montre les performances obtenues à l'aide de cette commande implantée dans un module dSPACE. On peut constater que grâce à la commande LQG mise en œuvre, nous obtenons une réponse sans dépassement et faiblement bruitée. Ce résultat a été vérifié par comparaison avec une mesure externe par interférométrie.

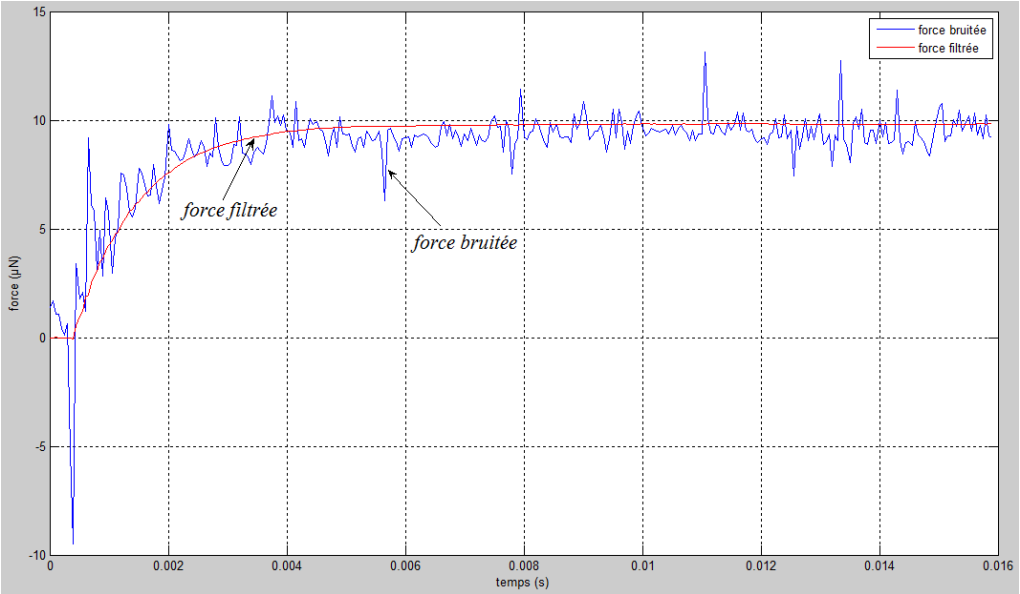


Fig. 95. Comparaison entre la force mesurée par le système de mesure intégré à la micropince et la force filtrée pour une consigne de 10 µN.

Les conclusions sont analogues à l'application présentée précédemment : une amélioration importante des performances par le calcul en temps réel d'un filtrage optimal à faible coût.

6.3 Analyse des bruits prépondérants dans le micromonde

L'approche globale permet déjà, nous l'avons vu, d'améliorer les performances des microsystèmes à l'aide d'outils simples à mettre en œuvre. Pour certaines applications, cette approche peut s'avérer suffisante. Cependant, si on souhaite obtenir des systèmes encore plus précis, il convient de s'intéresser aux origines des bruits, dans le but, soit d'en tenir compte plus finement lors de la synthèse des lois de commande, soit de réduire leurs effets en agissant à leur source.

La problématique du filtrage du bruit dans les systèmes n'est pas nouvelle. Elle a, en effet, fait l'objet de nombreux travaux et études dans la communauté scientifique, en particulier par les spécialistes du traitement et de la transmission des signaux. Les concepts de filtrage du bruit font aujourd'hui, partie des outils de bases de l'ingénieur quelque soit sa discipline. Cependant, ces outils ne sont applicables que si l'on possède une bonne connaissance des caractéristiques du bruit. Les microsystèmes, de par leurs dimensions (centimétriques ou millimétriques) et les faibles amplitudes des signaux qu'ils véhiculent (déplacements de l'ordre du µm ou du nm et forces allant du mN au nN) ont la particularité d'être à la frontière de deux types de systèmes : les systèmes macroscopiques de petite taille dans lesquels l'effet des bruits est, soit négligeable, soit filtré par des moyens simples et les nano-systèmes dans lesquels les bruits sont considérés à l'échelle atomique (bruit brownien, agitation thermique, etc.). Les microsystèmes de manipulation étant destinés à travailler dans divers environnements tels que des laboratoires, des cellules d'assemblage (micro-usines ou unités de production) ou le milieu médical, il est non seulement nécessaire d'analyser les différents bruits présents, mais il convient également de représenter ces bruits d'une manière exploitable pour l'estimation de leurs effets et l'élaboration de lois de commande pour les microsystèmes. Dans ce but, nous avons entrepris une étude, qui consiste à déterminer les bruits les plus significatifs dans un environnement de travail tel qu'un laboratoire. Cette étude est soutenue par une thèse de doctorat (Thèse de Mokrane Boudaoud).

L'effet des bruits et des vibrations sur un système dépend fortement de la structure de ce dernier. Afin de tenter une estimation des bruits les plus influents, nous avons considéré des structures de type poutre encastrée-libre, car ces dernières sont très utilisées dans les microsystèmes (leviers d'AFM, doigts de micropinces, etc). Par ailleurs, l'observation de la constitution des microsystèmes et des microrobots les plus courants, nous a poussés à analyser deux types de poutres : les poutres de taille centimétrique et les poutres de taille submillimétrique. Les premières possèdent une taille comparable aux porteurs robotiques et leurs liaisons et les secondes sont représentatives des organes terminaux de préhension et d'analyse.

6.3.1 Principales sources de bruit affectant les microsystèmes

De nombreuses sources de bruit peuvent influer sur le comportement des microsystèmes. Notre analyse a porté sur les principales d'entre-elles qui sont décrites dans les paragraphes suivants.

6.3.1.1 Mouvements du sol

Les mouvements du sol résultent principalement des mouvements générés par la terre, ainsi que des mouvements transmis par le sol et ayant pour origine l'activité humaine. Ces bruits se transmettent généralement par le lieu de l'encastrement de la poutre (voir Fig. 96). En effet, les poutres considérées sont souvent fixées sur un bâti, lui même solidaire d'une table anti-vibration posée sur le sol.

Plus précisément, les mouvements du sol ont deux origines : le mouvement résultant de l'activité naturelle de la terre (activités géologiques et sismiques, marées, etc.) et les vibrations transmises par le sol qui trouvent leurs origines dans les nombreuses machines et véhicules en fonctionnement (moteurs, transformateurs, systèmes de ventilation...). Les mouvements de la terre produisent des vibrations très lentes, dont les fréquences sont inférieures à quelques Hz ainsi que des vibrations à des fréquences plus élevées pouvant atteindre 350 Hz, alors que les vibrations dues à l'activité humaine occupent un spectre allant de quelques Hz à quelques centaines de Hz. La limite haute de ce spectre, communément admise dans la littérature, se situe entre 350 Hz et 400 Hz [131]. On y trouve notamment l'effet des appareils et transformateurs d'alimentation électrique fonctionnant à des fréquences de 50 Hz ou 60 Hz selon les normes en vigueur, ainsi que les multiples de ces fréquences (redressement simple ou double alternance, distorsion harmonique, etc.).

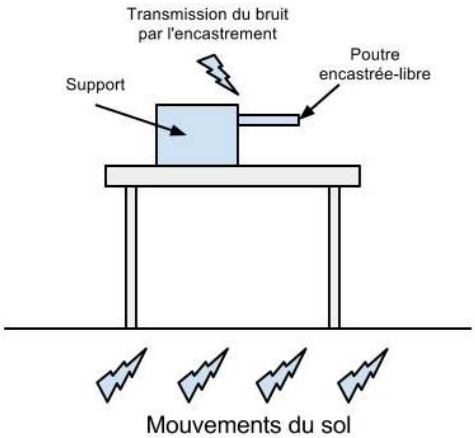


Fig. 96. Transmission des mouvements du sol.

6.3.1.2 Bruit acoustique

Sans doute l'un des bruits les moins bien pris en compte dans les microsystèmes, le bruit acoustique peut avoir une influence considérable. Dans une salle d'expérimentation pour microsystèmes, ce bruit est généré par les appareils en fonctionnement et par les opérateurs humains. Il peut atteindre 70 dB. Le bruit acoustique est transmis par les variations de pression dans l'air ambiant jusqu'à atteindre le microsystème. Dans un environnement sous vide d'air, les bruits acoustiques ne sont pas transmis. Cependant, il est nécessaire de considérer l'effet de ce bruit sur l'enceinte sous vide et sa transmission au microsystème par vibration mécanique.

Le niveau de bruit acoustique peut être mesuré en tout point de la salle d'expérimentation. L'unité de niveau de bruit est le décibel (dB). Il se calcule à partir de la mesure de pression acoustique par la formule :

$$N_{db} = 20 \log \frac{P}{PA}$$

N_{db} : niveau de bruit (en dB),
P : pression acoustique mesurée,
PA : pression acoustique de référence = 2.10^{-5} Pascals (niveau de bruit de référence 0 dB) cette référence correspond au seuil d'audibilité.

La Fig. 97 dessous indique le niveau exprimé en dB pour des bruits courants.

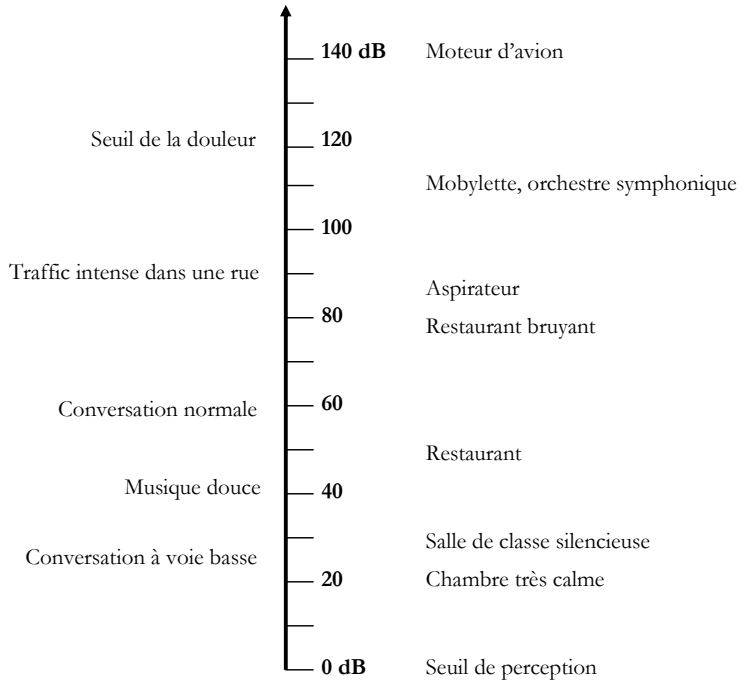


Fig. 97. Niveau en dB de bruits courants.

6.3.1.3 Bruit thermique

Il est produit par l'agitation thermique des électrons ou des atomes. Il peut produire, soit des vibrations mécaniques, soit des variations de tensions électriques. Dans les circuits électriques ou électroniques, le bruit thermique se manifeste par la présence d'un signal électrique, qui se superpose aux signaux porteurs d'information. A titre d'exemple, à l'aide d'un oscilloscope à large bande passante, il est possible de mesurer aux bornes d'une résistance non alimentée, l'effet du bruit thermique (voir Fig. 98).

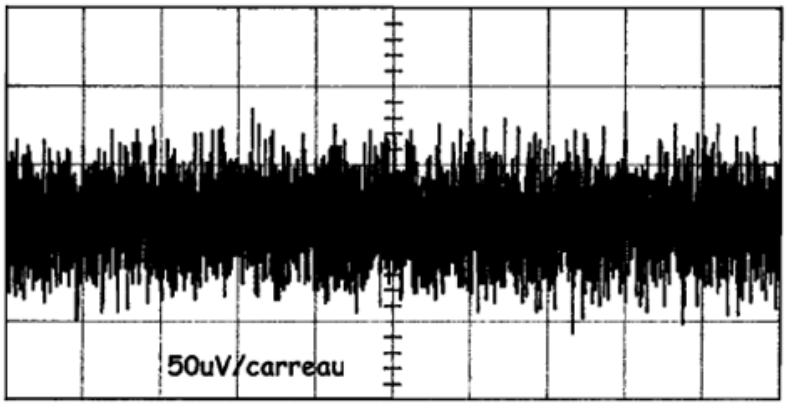


Fig. 98. Exemple de bruit thermique mesuré aux bornes d'une résistance.

La valeur efficace de ce signal (bruit blanc et gaussien) peut être évaluée à l'aide de la formule suivante :

$$B_{eff} = \sqrt{4.k.T.R.\Delta f}$$

Dans cette expression, k est la constante de Boltzman ($1{,}4.10^{-23}$), T la température en °Kelvin, R la valeur de la résistance en Ω et Δf la bande passante utile en Hz.

Mécaniquement, le bruit thermique peut agir, soit par les mouvements des particules constituant le matériau, soit par l'agitation des molécules d'air entourant le système considéré. Dans ce dernier cas, l'impact des molécules sur le système produit des vibrations mécaniques. Dans tous les cas, le bruit thermique d'origine mécanique agira de manière prononcée au voisinage des modes propres de vibration du système. Cette approche est couramment employée pour identifier les modes propres de leviers d'AFM [120][99][64][89], donnée importante pour évaluer la raideur de ces leviers.

6.3.2 Analyse des bruits sur des poutres centimétriques

Cette étude a été menée sur des poutres en aluminium dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 9. Dans le but d'éliminer les problèmes liés à la qualité de la liaison à l'encastrement, les poutres sont usinées dans un bloc unique d'aluminium par électroérosion à fil (voir Fig. 99).

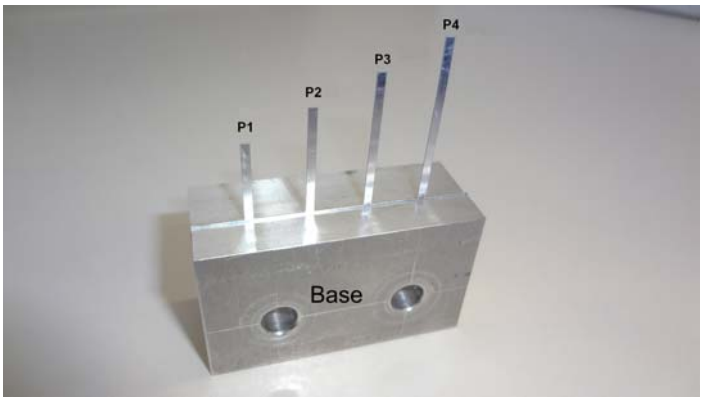


Fig. 99. Poutres en aluminium fabriquées par électroérosion à fil.

Poutre	***P1***	***P2***	***P3***	***P4***
Longueur (mm)	15	20	25	30
Largeur (mm)	1,5	1,5	1,5	1,5
Epaisseur (mm)	0,22	0,22	0,22	0,22
Raideur (N/m)	82,81	34,93	17,88	10,35
Fréq. de résonance (Hz)	642,8	374,5	243,8	173,1

Tableau 9 : Caractéristiques des poutres en aluminium utilisées pour la caractérisation des bruits.

Dans le but de mesurer les vibrations mécaniques apparaissant à l'extrémité de ces poutres, un interféromètre laser de la société SIOS (référence : SP-120 SIOS Messtechnik GmbH) a été utilisé. Cet instrument, compensé en température et en pression atmosphérique, est caractérisé par une résolution de 0,01 nm et une bande passante de 1 MHz. De nombreuses mesures ont été effectuées dans différentes conditions environnementales représentatives des situations habituellement rencontrées en laboratoire ou en milieu industriel. Ces situations sont décrites ci-dessous :

- utilisation ou non d'une table anti-vibration souvent employée dans les laboratoires ou les cellules de micro-assemblage (la table utilisée a pour référence : Kinetic Systems, Vibraplane, model no. 9101-21-46),
- présence d'une faible ou d'une forte activité humaine (le terme « faible activité humaine » désigne ici la présence dans la salle de mesures de l'opérateur uniquement, alors que le terme « forte activité humaine » fait référence à la situation dans laquelle une douzaine de personnes converse dans la salle correspondant, par exemple, à une visite),
- présence de bruits acoustiques produits artificiellement à l'aide d'un générateur et d'un haut-parleur,
- mesures dans une chambre anéchoïque afin d'analyser l'effet du bruit acoustique (voir Fig. 100).

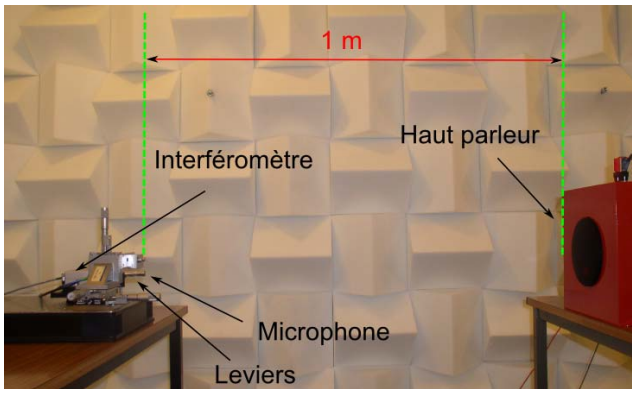


Fig. 100. Station d'analyse du bruit acoustique à l'intérieur de la chambre anéchoïque de l'institut FEMTO-ST.

Mis à part les mesures dans la chambre anéchoïque, toutes les autres mesures ont été effectuées en présence des bruits généralement présents en laboratoire (ordinateurs en fonctionnement, amplificateurs électroniques, conditionneur d'air, éclairage, etc.).

Le Tableau 10 présente les amplitudes des déplacements mesurés à l'extrémité des poutres dans diverses conditions. Ces valeurs donnent une indication sur les performances atteignables en positionnement dans la mesure où elles correspondent à des déplacements réels en l'absence de tout actionnement. La figure Fig. 101 montre les densités spectrales de puissance (DSP) des vibrations mesurées à l'extrémité des poutres, sur table anti-vibration avec une faible activité humaine (30 dB). Les résultats détaillés de cette étude (notamment la distribution fréquentielle du bruit et le comportement des poutres autour de leurs fréquences de résonance) sont présentés dans [13].

Poutre	***P1***	***P2***	***P3***	***P4***
Sur table anti-vibration avec une faible activité humaine (30 dB)	0,1 nm	0,45 nm	0,9 nm	7,2 nm
Sur table anti-vibration avec une forte activité humaine (45 dB)	0,5 nm	6 nm	20 nm	123,8 nm
Sur table anti-vibration avec bruit acoustique de 70 dB généré par un haut-parleur	85 nm	200 nm	820 nm	1800 nm
Sans table anti-vibration avec une faible activité humaine	0,4 nm	5 nm	19,1 nm	112,8 nm

Tableau 10. Effet des bruits environnementaux sur le déplacement à l'extrémité libre des poutres (valeurs efficaces RMS).

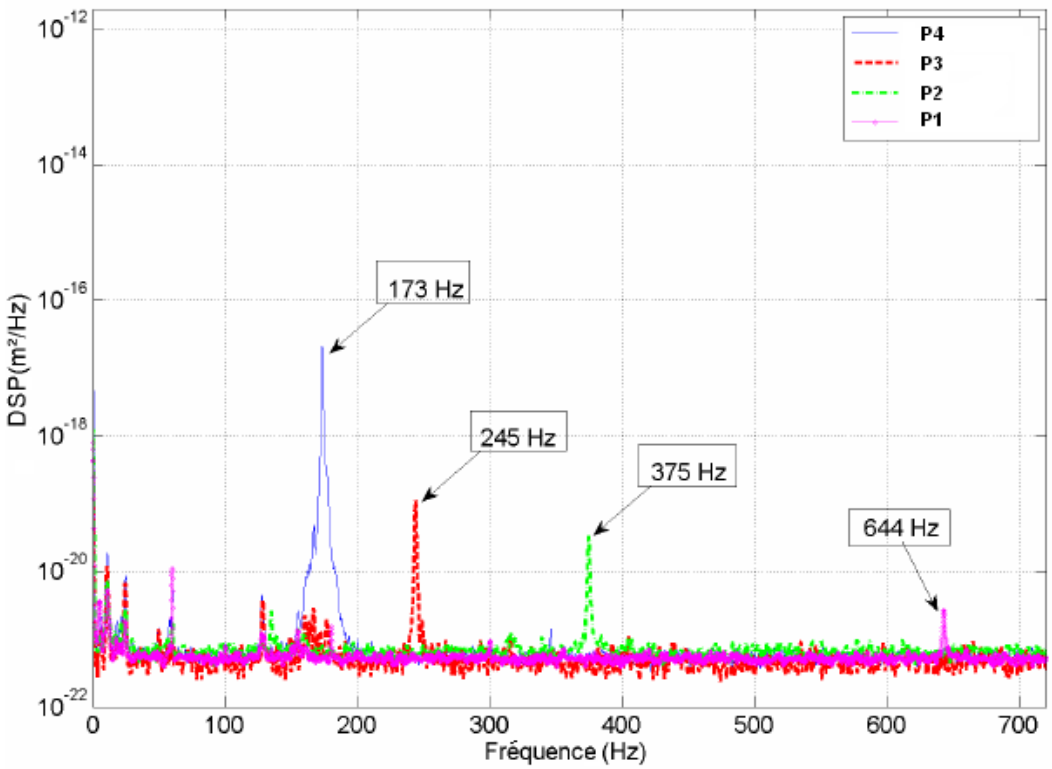


Fig. 101. Densités spectrales de puissance des vibrations mesurées à l'extrémité des poutres, sur table anti-vibration avec une faible activité humaine (30 dB).

A partir de ces résultats, plusieurs conclusions peuvent être déduites.

- L'intérêt de la table anti-vibration apparaît de manière claire sur la valeur efficace des vibrations mécaniques provenant du sol. La réduction du niveau du bruit dépend de la longueur des poutres. Ainsi, Le bruit est réduit d'un rapport de plus de 15 pour une poutre de 30 mm de long, à un rapport de 4 pour une poutre de 15 mm de long. Il convient cependant de noter, que l'effet de la table sera moindre, si des structures possédant des fréquences de résonances supérieures à quelques centaines de Hz sont utilisées. En effet, les vibrations du sol apparaissent dans une bande passante allant de 0 à 400 Hz environ. Lors de la conception de microsystèmes, il faudra donc favoriser l'emploi de structures ayant des modes de résonance supérieurs à 1 kHz afin de réduire l'impact des vibrations du sol.
- L'activité humaine dans la salle de mesure à une influence très importante dans la mesure où l'amplitude du bruit augmente de manière significative (dans un rapport de 5 à 20). Le bruit généré est transmis mécaniquement par le sol et de manière acoustique.
- L'effet du bruit acoustique est extrêmement important sur des poutres de longueurs centimétriques et peut même devenir la principale source de bruit pour des poutres suffisamment longues. Un soin particulier devra être apporté à l'isolation acoustique du lieu de travail. Cet effet est cependant très faible, voire inexistant, dans des structures possédant des fréquences de résonance au-delà du spectre audible (>20 kHz).
- L'influence du bruit thermique à ces échelles, de l'ordre du picomètre [65] est négligeable (non détectable avec la résolution de l'instrument de mesure utilisé) devant l'effet vibratoire du sol et le bruit acoustique : c'est pourquoi, cet effet n'est pas représenté dans le tableau précédent.

6.3.3 Analyse des bruits sur des poutres submillimétriques

Afin d'analyser l'effet des différents bruits sur des systèmes de dimensions encore plus petites (submillimétriques), nous avons utilisé des leviers d'AFM (Atomic Force Microscope). Ce sont des structures en silicium, de type poutre encastrée-libre largement disponibles et très utilisées aussi bien en microscopie (qui est leur application première), qu'en micro/nano-manipulation [141][150]. Les niveaux de bruit étant dans ce cas plus faibles, nous utilisons un système de mesure différent. Il s'agit d'un MEMS Analyzer MSA 500-fabriqué par la société POLYTEC. Cet instrument permet l'analyse des déplacements d'un microsystème (également par interférométrie) avec une résolution picométrique et une très large bande passante. La Fig. 102 montre une photographie des leviers utilisés dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 11.

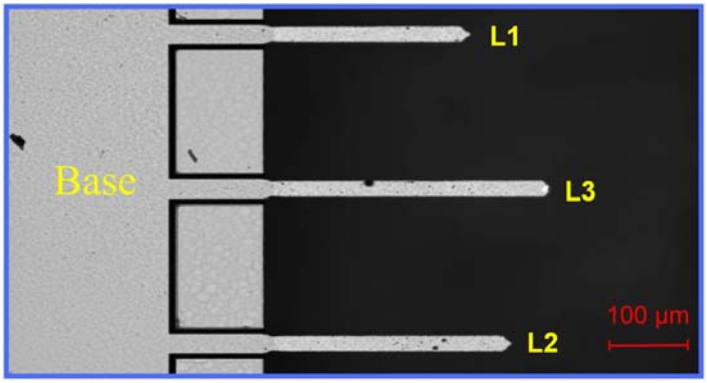


Fig. 102. Leviers utilisés pour l'analyse des bruits à l'échelle submicrométrique (réf. CSC12 de MikroMasch Inc.).

Levier	*L1*	*L2*	*L3*
Longueur (µm)±5µm	250	300	350
Largeur (µm) ±3µm	35	35	35
Epaisseur (µm)	1	1	1
Raideur (N/m)	0,08	0,05	0,03
Fréq. de résonance (kHz)	20	14	10

Tableau 11. Caractéristiques des leviers en silicium utilisées pour la caractérisation des bruits.

Bien que le premier mode de résonance des leviers d'AFM couramment employés soit supérieure à 25 kHz, nous avons choisi une série de leviers dont les fréquences de résonances (ici 10, 14 et 20 MHz) soit dans le spectre acoustique afin d'étudier l'effet du bruit acoustique. Compte-tenu de ces fréquences et des dimensions des leviers, l'effet des vibrations du sol peut être négligé. Les essais effectués ont concerné la mesure des vibrations produites par les bruits thermique et acoustique. Un module à effet Peltier a été utilisé pour élever la température des leviers et un microphone a permis de produire un bruit acoustique de différents niveaux. Les résultats de cette analyse sont présentés dans [14] desquels nous pouvons extraire les données présentées dans le Tableau 12.

Levier	*L1*	*L2*	*L3*
Effet du bruit thermique à 22° C (pm)	365	595	675
Effet du bruit acoustique 12 dB (pm)	215	296	331
Effet du bruit acoustique 24 dB (pm)	856	1170	1310
Effet du bruit acoustique 60 dB (pm)	54050	74430	83000

Tableau 12. Effets des bruits thermique et acoustique sur le déplacement à l'extrémité libre de leviers d'AFM (valeurs efficaces RMS).

D'après cette analyse, il apparaît que :

- le bruit thermique produit, à température ambiante, un déplacement de l'extrémité des leviers compris entre 365 et 675 pm en l'absence de tout actionnement, ce qui permet d'évaluer la limite de précision de positionnement possible,
- le bruit acoustique a une influence considérable si le premier mode de résonance est dans le spectre audible. Il conviendra donc de prendre en compte cet effet lors de la conception et de l'utilisation de structures à dimensions millimétriques ou submillimétriques,
- il est probable que, pour des leviers possédant des premiers modes résonant à des fréquences bien supérieures à la limite haute de la bande de fréquence acoustique, le bruit thermique soit le seul effet significatif.

6.4 Essai de représentation des niveaux de bruit en fonction des dimensions des microsystèmes

Les résultats des essais menés sur les poutres centimétriques et les leviers submillimétriques, ainsi que l'étude de l'évolution des bruits en fonction de la longueur de ces structures, permettent d'extrapoler l'influence de ces bruits. Sans prétendre donner une information précise sur l'amplitude du bruit qui dépend de nombreux paramètres, les courbes représentées sur la Fig. 103 peuvent être considérées, comme une indication des niveaux de bruit influents en fonction de la taille du système considéré. Ces indications doivent être prises en compte pour la conception et la fabrication de microsystèmes ainsi que dans la synthèse des lois de commande.

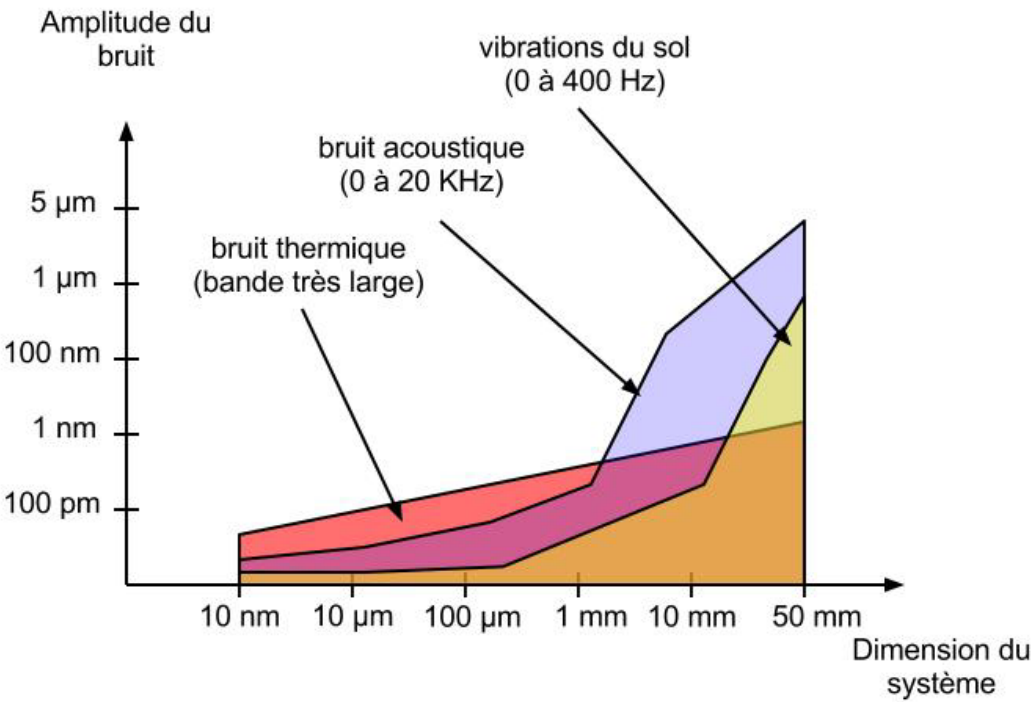


Fig. 103. Tendances des effets des différents bruits dans les microsystèmes de type poutre.

6.5 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent l'importance de la notion de bruit dans les performances des microsystèmes. Ainsi, indiquer la précision théorique de positionnement d'un microsystème sur la base de l'actionnement est insuffisant sous peine d'aboutir à un système ayant des performances bien en dessous des attentes. Il convient, compte-tenu des dimensions et de la géométrie du système, d'estimer l'effet du bruit. Ce dernier peut même, dans de nombreux cas, devenir l'élément limitant qui définira la précision du système. Les données chiffrées listées pour des poutres peuvent servir de point de départ pour une telle estimation dans des environnements comparables.

Si, pour atteindre des précisions statiques données, le filtrage passe-bas classique à base de circuits électroniques ou d'algorithmes exécutés en temps réel est bien adapté, l'obtention d'une bonne précision dynamique, nécessaire aux systèmes microrobotiques durant les phases de suivi de trajectoire ou de contrôle d'effort de serrage, sans perte de bande passante, requiert l'emploi de techniques de filtrage optimal. Le filtrage de Kalman est bien adapté pour une intégration sur un calculateur temps-réel.

L'étude du bruit dans le micromonde reste un domaine ouvert et représente l'une des clés du succès des micro/nano-systèmes de demain.

7 Perspectives

La jeune histoire de la microrobotique a été jalonnée par des faits marquants, qui ont représenté des avancées majeures. La première évolution a incontestablement été le remplacement des actionneurs utilisés dans les robots conventionnels par des matériaux actifs et l'emploi d'effets physiques bien adaptés au micromonde. Par la suite, les structures déformables ont pris la place des mécanismes, caractérisés par des jeux mécaniques incompatibles avec les résolutions submicrométriques souhaitées. La paire « microactionneur - structure déformable » est devenue le fondement même de toute conception microrobotique, voire micromécatronique [57][1][93].

Par la suite, l'accès aux technologies de microfabrication en salle blanche (précédemment réservées à la microélectronique), a permis de fabriquer des microstructures avec des parties aussi fines que 10 µm ou moins et une répétabilité très grande, et d'imaginer des architectures jusque-là inconcevables à ces dimensions. Les logiciels de simulation par éléments finis ont également joué un rôle majeur dans l'optimisation mécanique des structures réalisées. La paire « logiciels de simulation – microfabrication en salle blanche » a permis un accroissement significatif des performances et de la compacité des systèmes conçus. Le microrobot numérique réalisé représente un exemple de structure dotée d'une répétabilité de positionnement de 90 nm obtenue grâce à l'optimisation mécanique.

Les effets des bruits et des conditions environnementales sur les microsystèmes font qu'aujourd'hui, la limite des performances obtenues uniquement par l'optimisation des structures mécaniques est atteinte au « sens de la microrobotique ». Pour expliquer ce que nous entendons par « performances pour la microrobotique », nous pouvons considérer le micro-actionneur piézoélectrique à empilement (stack) de référence P-249.20 commercialisé par la société PI (Physik Instrumente) présenté sur la Fig. 104. Cet actionneur est conçu pour s'allonger de 10 µm pour une tension électrique de 1000 V. Un déplacement de 1 nm peut donc être obtenu par l'application d'une tension de 0,1 V ! La résolution d'un tel actionneur, théoriquement infinie, n'est donc limitée que par la résolution du générateur de tension employé. Cependant, dans la pratique, le bruit pourra provoquer des déplacements d'amplitude bien supérieure (voir chapitre 6).

Fig. 104. Microactionneur piézoélectrique par empilement P-249.20 (à droite) commercialisé par la société PI (Physik Instrumente).

La recherche de précisions sub-micrométriques exploitables en microrobotique passe nécessairement par le traitement des bruits et la prise en compte des incertitudes de modélisation. C'est pourquoi la paire « commande robuste – traitement du bruit » constitue l'une des clés de la

micro-nanorobotique de demain. Elle représente l'un des éléments essentiels que je souhaite développer dans le futur en vue de la réalisation de tâches nanorobotiques. Les autres perspectives de recherche concernent la poursuite du développement de la microrobotique numérique et la recherche de principes nouveaux pour la réalisation de microsystèmes nomades. Les paragraphes suivants décrivent les principales pistes pour ces travaux futurs.

7.1 Approche microrobotique pluridisciplinaire pour la nanomanipulation

L'un des verrous majeurs du développement des nanomatériaux et des nanocomposants réside dans la difficulté de caractériser leurs propriétés physiques à l'échelle nanométrique. Pour effectuer des mesures physiques à ces échelles (mesure de raideurs, de conductivités électriques, etc.) il convient de manipuler (saisir, maintenir, transporter, positionner et lâcher) ces nanocomposants et de disposer des sondes à leur surface ou de les observer à l'aide d'instruments de microscopie. Ces opérations sont généralement effectuées dans un MEB ou dans un TEM. La Fig. 105 montre deux exemples de nanocomposants.

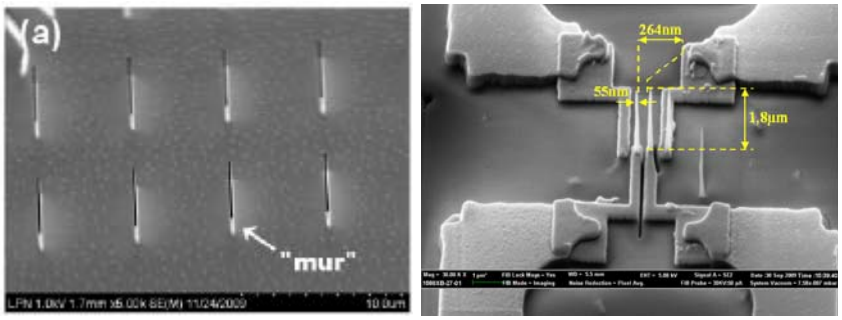


Fig. 105. Exemples de nanocomposants : murs (échantillons) de 150 nm d'épaisseur (à gauche) et commutateur de courant continu à nanotubes de carbone (à droite). Source : LPN (Laboratoire de Photonique et de Nanostructures).

Depuis 1995, plusieurs projets de manipulation de composants en environnement MEB ont été développés. Ils sont généralement fondés sur l'emploi de systèmes de micropositionnement commerciaux [139][86][121][108]. Les stations réalisées ont permis de démontrer la faisabilité de tâches de nanomanipulation en environnement MEB. Cependant, les travaux rapportés ne font pas mention des performances en termes de répétabilité, ou de taux de succès des tâches effectuées.

Dans ce cadre, j'envisage le développement d'une approche de manipulation de nanocomposants en environnement MEB et d'interrogation de la matière, fondée sur une démarche pluridisciplinaire : l'emploi de structures microrobotiques microfabriquées et l'introduction d'algorithmes de commande robuste et de filtrage du bruit. Ce projet, qui vise des précisions de positionnement de quelques nanomètres, nécessite toutefois la caractérisation des bruits dans l'environnement MEB. Celui-ci diffère de l'environnement ambiant analysé précédemment, notamment par le vide d'air qui exclut toute transmission de bruit par voie acoustique, et l'apparition de nouveaux bruits intrinsèques au balayage électronique. Ce travail sera réalisé en collaboration avec l'ISIR (Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique) de l'UPMC (l'Université Pierre et Marie Curie) dans le cadre du projet ANR NANOROBUST. Dans ce projet, je suis en charge de la tâche 3 intitulée : commande robuste pour la manipulation très précise et pour la caractérisation. Une thèse, que je co-encadre, financée par ce projet est

intégralement dédiée à la caractérisation du bruit dans le MEB et à la commande robuste. Elle a débuté le 1er octobre 2012.

7.2 Développements futurs pour la microrobotique numérique

Les modules bistables développés et les performances atteintes par le DiMiBot réalisé ont prouvé la pertinence de l'approche « microrobotique numérique » pour la réalisation d'architectures nouvelles de microrobots. Bien que des tâches de micromanipulation et de micropositionnement aient été réalisées, de nombreuses améliorations peuvent être apportées aussi bien sur le principe d'actionnement des modules bistables que sur les architectures de robots.

Les améliorations sur les modules bistables concernent, d'une part la miniaturisation dont le but est d'augmenter leur nombre et, d'autre part la mise en place de principes d'actionnement différents afin d'augmenter la vitesse du basculement. Des actionneurs fondés sur des dépôts de matériaux piézoélectriques en couches minces pourraient être envisagées. Par ailleurs, afin d'éliminer les difficultés liées à la connectique dans le cas de l'usage d'un grand nombre de modules, un déclenchement par apport d'énergie sans fil par laser est en cours d'étude. A ce sujet, des discussions sont en cours avec le laboratoire ARRI (Automation & Robotics Research Institute) de l'université du Texas à Arlington pour le développement d'un démonstrateur.

Le développement d'architectures microrobotiques offre de très larges perspectives. La nature binaire de cette approche laisse entrevoir des développements comparables à ceux qu'a connus l'électronique numérique. A court ou moyen terme, une réflexion sera menée sur la réalisation de cinématiques dédiées aux tâches à réaliser. Les procédés de microfabrication et les outils de simulation permettent, en effet, la réalisation rapide de tels microrobots. On pourra, par exemple, obtenir des espaces atteignables à densité non uniforme afin de favoriser la résolution dans certaines régions de l'espace. Sur cette thématique, une thèse de doctorat, que je co-encadre, financée par le LABEX ACTION (systèmes intelligents intégrés dans la matière) a débuté le 1er octobre 2012. D'autres travaux, en cours d'étude dans le cadre de la thèse de Vincent Chalvet, concernent l'optimisation de trajectoires avec évitement d'obstacles.

A plus long terme, des structures à grande dextérité pour la micro/nanomanipulation peuvent être envisagées grâce à un maillage constitué d'actionneurs bistables élémentaires. De telles structures offriraient une robustesse (grâce à la redondance) et des possibilités aujourd'hui inaccessibles. De plus, une telle démarche facilite l'interfaçage entre logiciel et matériel.

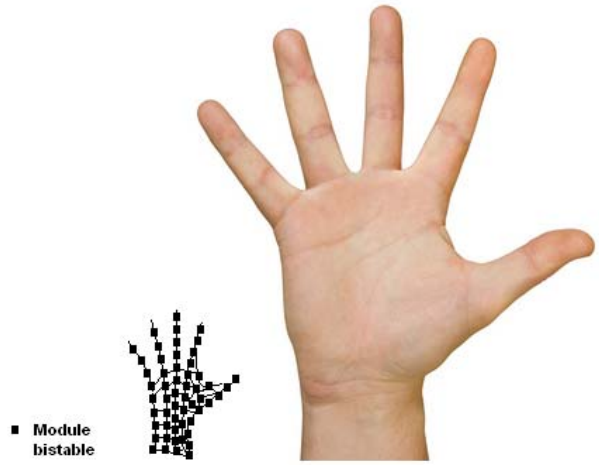


Fig. 106. Exemple de perspective à long terme de la microrobotique numérique.

7.3 Concepts nouveaux pour les microsystèmes nomades

Malgré les nombreuses avancées réalisées dans le développement des systèmes micromécatroniques intelligents, ces derniers n'ont que peu pénétré le marché grand public. Le coût engendré par de tels systèmes est un frein à leur généralisation. La réalisation de microsystèmes nomades requiert un haut niveau d'intégration. Ainsi, outre la structure mécanique et les micro-actionneurs, il convient d'intégrer les capteurs utilisés ainsi que les processeurs pour le filtrage et le calcul temps-réel des lois de commande. Une telle réalisation pose de nombreux problèmes de connectique et d'assemblage. L'emploi d'algorithmes de commande en boucle ouverte permet, nous l'avons vu, dans certains cas d'obtenir des performances suffisantes. L'inconvénient majeur de ces méthodes est évident : l'absence totale d'information sur le fonctionnement du système commandé. Pour pallier cet inconvénient, j'ai initié une réflexion sur la faisabilité de l'intégration du microsystème à commander et de sa commande sur un même substrat. Une telle approche unifiée est, aujourd'hui, envisageable grâce aux procédés de microfabrication actuels, qui permettent la réalisation de structures micromécaniques complexes. L'idée fondatrice consiste à réaliser le système de commande de manière mécanique et au plus près du processus à commander. Outre la simplification de la commande, on éviterait ainsi les conversions entre signaux mécaniques et électriques, l'intégration de processeurs et de capteurs et on limiterait les niveaux de bruits. Cette approche ne peut être mise en œuvre que si les opérateurs élémentaires nécessaires à la rétroaction (comparateur, amplificateur, intégrateur, etc.) aujourd'hui presque exclusivement réalisés de manière électrique, trouvent des équivalents en mécanique. Une première étude de faisabilité a été menée pour la réalisation de l'asservissement de position d'une poutre pouvant servir de doigt actionné pour une micropince. La Fig. 107 montre le concept développé, qui a fait l'objet d'un stage de Master. Suite aux résultats obtenus en simulation, j'envisage la réalisation de prototypes microfabriqués. Cette étude mérite probablement d'être étendue aux systèmes microfluidiques en vue de la réalisation de dispositifs nomades d'analyses biologiques.

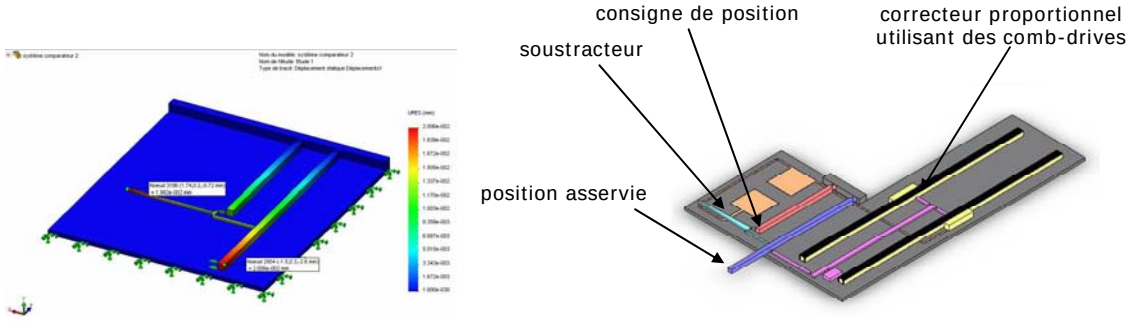


Fig. 107. Principe d'un asservissement de position de l'extrémité d'une poutre à l'aide d'un correcteur mécanique microfabriqué : analyse du comparateur sous ANSYS (à gauche) et structure générale (à droite).

7.4 Autres perspectives

Dans les paragraphes précédents, j'ai présenté les perspectives directes de mes travaux de recherche. La majorité d'entre-elles est planifiée dans le cadre de projets nationaux ou internes au laboratoire. Dans cette partie, je souhaite lister des voies qui me semblent potentiellement intéressantes pour des développements à moyen ou à long terme. Il s'agit de :

- l'analyse de la durée de vie des microsystèmes : thématique peu développée à travers le monde et qui pourrait faire l'objet d'une collaboration avec l'équipe PHM (Pronostic et Décision) du département AS2M, spécialisée dans le pronostic de défaillances,
- la prise en compte dans les lois de commande des bruits générés par une commande embarquée (bruits dus aux erreurs d'arrondis dans les calculateurs numériques et bruits de quantification générés par les convertisseurs CNA et CAN),
- le développement de nouvelles techniques de modélisation et de commande spécifiques aux microsystèmes.

8 Conclusion

La réalisation de systèmes micromécatroniques, voire nanomécatroniques, performants ne peut être fondée sur une science unique. Les niveaux d'exigences sont, aujourd'hui, tels que la conception de ces systèmes passe nécessairement par une approche pluridisciplinaire mettant en œuvre des sciences et des techniques diverses, parfois éloignées du domaine habituel des compétences du mécatronicien. Une acquisition permanente de nouvelles théories et de nouveaux outils empruntés à des disciplines, telles que le traitement du signal, la physique, les sciences des matériaux, l'automatique ou encore l'informatique, est nécessaire. Cependant, l'application des concepts théoriques issus de ces sciences et techniques dans le micromonde n'est pas toujours facile. Le « micromécatronicien » a en permanence le souci de l'applicabilité de ces approches sur des démonstrateurs réels et doit amener ces concepts, parfois très théoriques, vers des méthodes pratiquement applicables dont l'apport peut être évalué. Cependant les interactions de toutes ces sciences ouvrent des combinaisons infinies et il convient de trouver un équilibre et d'éviter de se disperser.

Dans mes travaux, les différentes contributions sont réunies autour d'un objectif commun : l'accroissement des performances. La microrobotique numérique constitue un bon exemple de microrobot exploitant à la fois les possibilités offertes par les technologies de microfabrication, l'optimisation des structures flexibles et la commande numérique en boucle ouverte afin d'obtenir des microrobots de petite taille, capables d'intervenir dans des environnements confinés et caractérisés par un faible coût et par une répétabilité meilleure que 90 nm. D'autres systèmes conçus pour les micro-usines permettent, grâce à des idées de conception originales et à l'automatique, la manipulation de micro-objets dans une large gamme de dimensions et de formes, développant ainsi la notion de généricité.

La commande robuste et le traitement du signal (en particulier le filtrage du bruit) offrent des outils très puissants pour augmenter la robustesse et la fiabilité des microsystèmes. Les résultats de la mise en œuvre de lois de commande robustes, ainsi que l'analyse et la prise en compte du bruit dans la commande ont, non seulement montré l'apport de ces méthodes, mais suggèrent une généralisation à d'autres microsystèmes. Les systèmes micromécatroniques constituent, de plus, un champ applicatif très vaste pour des recherches en commande robuste.

Par mes travaux, j'espère avoir contribué à lever certaines barrières physiques et technologiques et avoir suggéré de nouvelles voies de recherche utiles pour l'exploration du nanomonde fondées sur une approche micro-nanorobotique. Un domaine complexe mais passionnant !

9 Bibliographie personnelle

Chapitres de livres :

[1] Y. Haddab, V. Chalvet, Q. Chen and P. Lutz, Digital Microrobotics Using MEMS Technology, in Advanced Mechatronics and MEMS Devices, Springer, ISBN 978-1-4419-9984-9, available in April 2012.

[2] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Modeling and control of stick-slip micropositioning devices', in 'Micro nanosystems & systems on chips: modeling, control and estimation' edited by Alina Voda, Wiley - ISTE, ISBN: 978-1-84821-190-2, January 2010.

[3] Kanty Rabenorosoa, Yassine Haddab, Philippe Lutz, A Low Cost Coarse/Fine Piezoelectrically Actuated Microgripper with Force Measurement Adapted to Eupass Control Structure. In Micro-Assembly Technologies and Applications. IFIP International Federation for Information Processing. Springer Boston. ISBN : 978-0-387-77402-2. Pages : 235-242. 2008.

[4] M. Boudaoud, Y. Haddab and Y. Le Gorrec, Kalman filtering applied to weak force measurement and control at the microscale, in "Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology" Springer, ISBN 978-1-4419-9945-0, available in August 2011.

[5] Nicolas Lafitte, Yassine Haddab, Yann Le Gorrec, Momoko Kumemura, Laurent Jalabert, Christophe Yamahata, Nicolas Chaillet, Dominique Collard and Hiroyuki Fujita, DNA Manipulation Based on Nanotweezers. in Encyclopedia of Nanotechnology, Springer. ISBN 978-90-481-9750-7. 2012.

Coédition de numéro special de revue :

[6] Coédition d'un numéro spécial de la revue JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés) sur la « commande dans le micromonde », Volume 44 - n°6/2010, Hermes - Lavoisier.

Brevets d'invention :

[7] Y. Haddab, V. Chalvet, P. Lutz et A. Zarzycki, Micro-robot, procédé de commande, procédé de simulation et programmes d'ordinateur associés. CNRS / Université de Franche-Comté / ENSMM. Déposé auprès de l'INPI le 3 février 2011. Numéro d'enregistrement : 11 50883. Ce brevet à été étendu à l'international le 31 janvier 2012 : PCT n° FR20121050209.

Articles en revue à comité de lecture :

[8] Yassine Haddab, Qiao Chen, Philippe Lutz, Improvement of strain gauges micro-forces measurement using Kalman optimal filtering, International Journal of IFAC Mechatronics. Volume 19, June 2009, Issue 4, 8 pp. 457-462. DOI :10.1016/j.mechatronics.2008.11.012. 2009.

[9] Qiao Chen, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Microfabricated bistable module for digital microrobotics. Journal of Micro Nano Mechatronics, JMNM. Springer. (2011) 6:1-12. DOI 10.1007/s12213-010-0025-2.

[10] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Voltage/frequency proportional control of stick-slip Microsystems, IEEE - Transactions on Control Systems Technology (T-CST), Vol.16, Issue 6, pp:1316-1322, November 2008.

[11] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Quadrilateral modelling and robust control of a nonlinear piezoelectric cantilever, IEEE - Transactions on Control Systems Technology (T-CST) DOI : 10.1109/TCST.2008.2001151. IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol.17, Issue 3, pp:528-539, May 2009.

[12] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab, Philippe Lutz, Development, Modeling, and Control of a Micro-/Nanopositioning 2-DOF Stick–Slip Device, IEEE - Transactions on Mechatronics (T-mech) DOI : 10.1109/TMECH.2009.2011134. Vol.14, Issue 6, pp:733-745, December 2009.

[13] M. Boudaoud, Y. Haddab, Y. Le Gorrec and P. Lutz, "Noise characterization in millimeter sized micromanipulation systems". International journal of Mechatronics, IFAC vol 21, pp. 1087-1097, 2011.

[14] M. Boudaoud, Y. Haddab, Y. Le Gorrec and P. Lutz, "Study of thermal and acoustic noise interferences in low stiffness AFM cantilevers and characterization of their dynamic properties". Review of Scientific Instruments, 83, 013704. 2012.

[15] M. Boudaoud, Y. Haddab, and Y. Le Gorrec, "Modeling and optimal force control of a nonlinear electrostatic microgripper". IEEE/ASME Transactions on mechatronics (to be published).

[16] Anne Delettre, Guillaume J. Laurent, Yassine Haddab, and Nadine Le Fort-Piat, Robust control of a planar manipulator for flexible and contactless handling, International journal of Mechatronics, IFAC Mechatronics 22 (2012), pp. 852-861. DOI : 10.1016/j.mechatronics.2012.05.003. 2012.

[17] J. Agnus, N. Chaillet, C. Clévy, S. Dembélé, M. Gauthier, Y. Haddab, G. Laurent, P. Lutz_, N. Piat and M. Rakotondrabe, Robotic Microassembly and micromanipulation at FEMTO-ST. JMNM, Springer (2012) (accepted – to be published).

[18] Y. Haddab, Y. Le Gorrec, Une étude sur les spécificités de la commande dans le micromonde, Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), VOL 44/6 - 2010 - pp.577-601. DOI:10.3166/jesa.44.577-601. 2010.

[19] Y. Haddab, N. Chaillet, G. Cabodevila, Systèmes de micromanipulation en vue d'applications industrielles. Revue des Systèmes, Série "Nano et Micro Technologies", vol. 3, n° 1-2, pp. 155-182, Hermès Sciences, 2003.

Conférences internationales :

[20] M. Boudaoud, Y. Haddab, Y. Le Gorrec and P. Lutz, Effects of Environmental Noise on the Accuracy of Millimeter Sized Grippers in Cantilever Configuration and Active Stabilisation, IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), Shanghai, China, May 2011.

[21] M. Boudaoud, Y. Le Gorrec, Y. Haddab and P. Lutz. Robust gain scheduled control of a nonlinear electrostatic microgripper: Design and real time implementation. 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Maui, Hawaii, USA 10-13, 2012.

[22] V. Chalvet, A. Zarzycki, Y. Haddab and P. Lutz, Digital Microrobotics Based on Bistable Modules : Design of a Non-Redundant Digital Micropositioning Robot, IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), Shanghai, China, May 2011.

[23] Gendreau D., Haddab Y., Lutz P., Perrard C. Nouvelle approche dans l'analyse pour la conception des systèmes de production appliquée aux microcomposants. Cinquième Congrès International de Génie Industriel, GI'03., Canada (2003).

[24] P. Lutz, D. Gendreau, Y. Haddab, C. Perrard, Microfactories : a new kind of production systems for micromechatronic products, Proc. of the 1st European Advanced Technology Workshop on Mechatronics, iMAPS'2005, CD ROM, 24 pages, 17-18-19 janvier 2005, Poitiers, France.

[25] M. Paris, Y. Haddab, P. Lutz, Microparts feeding systems: a survey. 1st Topical Meeting on Microfactories "Desktop MEMS and Nano Factories", TMMF'2005, 17-19 octobre 2005, Tsukuba, Japan.

[26] M. Paris, Y. Haddab, P. Lutz, Practical Characterisation of the friction force for the positioning and orientation of micro-components, Proc of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent RObots and Systems, IROS 2008, Nice, France.

[27] M. Paris, Y. Haddab, P. Lutz, A new approach for a microparts feeding system based on inertial force, 6th International Workshop on Microfactories, IWMF'08. USA (2008).

[28] Boudaoud M., Haddab Y., Le Gorrec Y. Modelling of a MEMS-based microgripper : application to dexterous micromanipulation. Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'10, Taïwan (2010).

[29] Chen Q., Haddab Y., Lutz P. Characterization and control of a monolithically fabricated bistable module for microrobotic applications. Proc. Of IROS'10. - IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taïwan, (2010).

[30] Chen Q., Haddab Y., Lutz P. Digital microrobotics based on bistable modules : Design of compliant bistable structures. Proc. of IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA'08. China (2008).

[31] Haddab Y., Chen Q., Lutz P., Munz G. A low cost coarse/fine piezoelectrically actuated microgripper with force measurement. Proc. of the 7th International Conference and 9th Annual General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN'2007, Germany (2007).

[32] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Modelling and H-inf force control of a nonlinear piezoelectric cantilever', IEEE/RSJ - IROS, (International Conference on Intelligent Robots and Systems), pp:3131-3136, San Diego CA USA, Oct-Nov 2007.

[33] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'High-stroke motion modelling and voltage/frequency proportional control of a stick-slip microsystem', IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), pp:4490-4496, Roma Italy, April 2007.

[34] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Plurilinear modeling and discrete μ-synthesis control of a hysteretic and creeped unimorph piezoelectric cantilever', IEEE - ICARCV, (International Conference on Automation, Robotics, Control and Vision), pp:57-64, Singapour, December 2006. Finalist for the best paper award.

[35] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Nonlinear modelling and estimation of force in a piezoelectric cantilever', IEEE/ASME - AIM, (International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics), Zurich Switzerland, Sept 2007.

[36] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Design, development and experiments of a high stroke-precision 2DoF (linear-angular) microsystem', IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), pp:669-674, Orlando FL USA, May 2006.

[37] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Step modelling of a high precision 2DoF (linear-angular) microsystem', IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), pp:151-157, Barcelona Spain, April 2005.

[38] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Results on the closed-loop control of the TRING-module dedicated to a modular micromanipulation station', IWMF, (International Workshop on MicroFactory), Besançon, October 2006.

[39] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'TRING-module : a high-range and high-precision 2DoF microsystem dedicated to a modular micromanipulation station', IWMF, (International Workshop on MicroFactory), Besançon, October 2006.

[40] Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab and Philippe Lutz, 'Modelling and control of a highly modular microassembly system', IWMF, (International Workshop on MicroFactory), pp:140-145, Shanghai China, October 2004.

[41] Y. Haddab, N. Chaillet, A. Bourjault. A Microgripper Using Smart Piezoelectric Actuators. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'2000, 30 octobre-5 novembre 2000, Kagawa University, Takamatsu, Japon.

[42] Y. Haddab, N. Chaillet, G. Cabodevila, A. Bourjault. Devices for a Micromanipulation System. International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE'2000, Symposium on Microrobotics, 5-10 novembre 2000, Orlando, Floride, Etats-Unis.

[43] Y. Haddab, M. Arous, M. Hoummady, N, Chaillet, A. Bourjault. Survey on Micromanipulation : Comparison between Physical Principles and Considerations on Future Micromanipulation Systems. Proc. of the 4th Japan-France, 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, 6-8 octobre 1998, Kitakyushu, Japon.

[44] Y. Haddab, J.C. Ravassard, S. Dembélé, P. Le Moal, A. Bourjault. HAMRO : a Holonomic Autonomous Mobile Robot for Precise Positioning. Proc. of the 4th Japan-France, 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, 6-8 octobre 1998, Kitakyushu, Japon.

[45] J. Agnus, A. Bonvilain, N. Chaillet, Y. Haddab, P. Rougeot. Study and development of a station for micromanipulation tasks in the microworld. Proc. of SPIE Microrobotics and Microassembly Symposium, 21-22 septembre 1999, Boston, Etats-Unis.

[46] N. Chaillet, J. Agnus, Y. Haddab, P. Rougeot, A. Bourjault. Components for the development of a station for manipulation tasks in the microworld. Proc of the 3rd International Workshop on Microrobotics and Systems, IARP, Moscou, Russie.

Conférences nationales :

[47] Y. Haddab, B. Uccheddu, Commande robuste d'une pince microfabriquée à actionnement électrostatique, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'08, Bucarest, Roumanie (2008).

Publications pédagogiques :

[48] Y. Haddab, B. Lang et G. Laurent, Matlab/Simulink pour l'analyse et la commande de systèmes, collection des Techniques de l'Ingénieur, date de publication : mars 2010.

Tutoriels dans des conférences internationales :

[49] Y. Haddab and Stéphane Régnier, Issues and specificities at the micro/nano world, in Dynamics, characterization and control at the micro/nano scale tutorial, IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), Shanghai, China, May 2011.

[50] Y. Haddab and M. Boudaoud, Noise characterization, modeling and reduction in micromanipulation systems, in Dynamics, characterization and control at the micro/nano scale tutorial, IEEE - ICRA, (International Conference on Robotics and Automation), Shanghai, China, May 2011.

Rapports d'expertise scientifique :

[51] A. Ferreira, Y. Haddab, P. Lutz and C. Prelle, rapport sur la recherche et le développement de micro-usines au Japon. Août 2003. Rapport de l'expertise disponible à l'ADIT et à l'adresse suivante : http://www.bulletins-electroniques.com/japon/rapports/SMM03_056.

10 Bibliographie générale

[52] D. Alazard, C. Cumer, P. Apkarian, M. Gauvrit, G. Ferreres. Robustesse et commande optimale. Cépaduès Editions. ISBN : 2854285166. 1999.

[53] F. Arai, M. Nakajima, L. Dong and T. Fukuda. The pico-Newton Order Force Measurement with a Calibrated Carbon Nanotube Probe. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 691-696, Kobe, Japan. 2003.

[54] Asyril, http://www.asyril.ch.

[55] H. Benzaoui. Modélisation thermomécanique et commande d'actionneurs en alliage à mémoire de forme pour la microrobotique. Thèse de l'Université de Franche-Comté. 1998.

[56] A. Bergander, W. Driesen, T. Varidel and J.M. Breguet, "Monolithic piezoelectric push-pull actuators for inertial drives," IEEE International Symposium Micromechatronics and Human Science, pp.309-316, 2003.

[57] F. Beyeler, A. P. Neild, S. Oberti, D. J. Bell, Y. Sun, J. Dual, B. J. Nelson, Monolithically Fabricated Micro-Gripper with Integrated Force Sensor for Manipulating Micro-Objects and Biological Cells Aligned in an Ultrasonic Field. IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems (JMEMS), vol. 16, number. 1, pp. 7 - 15, 2006.

[58] P.-A. Bliman et M. Sorine : A system-theoretic approach of systems with hysteresis. application to friction modelling and compensation. In Proceedings of the second European Control Conference, page 1844–1849, Groningen, The Netherlands, 1993.

[59] B. Borovic, C. Hong, X. M. Zhang, A. Q. Liu, F. L. Lewis. Open vs. Closed-Loop Control of the MEMS Electrostatic Comb Drive. Proc. Of the 13th Mediterranean Conference On Control and Automation, Limassol, Cyprus, 2005.

[60] M. Boudaoud. Commande en effort d'une micropince à actionnement électrostatique. Master : Sciences, Santé, Technologie. Université de Franche-Comté, Besançon. 2009.

[61] F. P. Bowden et D. Tabor : The friction and lubrification of solids. In the physical sciences. Oxford university press, 1950.

[62] J.-M. Breguet. Actionneurs "Stick and Slip" pour micro-manipulateurs. Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne. 1998.

[63] J. Bryzek, E. Abbott. Control Issues for MEMS. Proc. Of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Maui, Hawaii, USA. 2003.

[64] N. A. Burnham, X. Chen, C. S. Hodges, G. A. Matei, E. J. Thoreson, C. J. Roberts, M. C. Davies, S. J. B. Tendler. Comparison of calibration methods for atomic-force microscopy cantilevers. Nanotechnology, vol. 14, pp.1-, 2003.

[65] H. J. Butt, M. Jaschke. Calculation of thermal noise in atomic force microscopy, Nanotechnology, vol. 6, number. 1, 1995.

[66] C. Canudas, H. Olsson, K. J. Aström et P. Lischinsky. : A new model for controls of systems with friction. IEEE Transactions on Automatic controls, 40(3), March 1995.

[67] M.C. Carrozza and al. Manipulating Biological and Mechanical Micro-Objects Using LIGA Microfabricated End-Effectors. Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgique, 1998, pp.1811-1816.

[68] Q. Chen. Microrobotique numérique fondée sur l'utilisation de modules bistables : conception, fabrication et commande de modules monolithiques. Thèse de l'Université de Franche-Comté. 2010.

[69] G. S. Chirikjian, "A binary paradigm for robotic manipulators" in Proc. 1994 IEEE Conf. Robot. Autom pp. 3063-3070.

[70] P.B. Chu and K.S.J. Pister. Analysis of Closed-loop Control of Parallel-Plate Electrostatic MicroGrippers. IEEE, 1994, pp. 820-825.

[71] C. Clévy, Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté (Besançon, France), décembre 2005.

[72] C. Clévy, A ; Hubert ; N. Chaillet, Flexible Micro-Assembly System Equiped with an Automated Tool Changer, Journal of Micro-Nano Mechatronics, 4(1), pp59-72, 2008.

[73] P. Dahl : A solid friction model. Rapport technique Technical Report TOR-0158(3107–18)-1, The Aerospace Corporation, 1968.

[74] P. De Lit, J. Agnus, C. Clévy, N. Chaillet. A four-degree-of-freedom microprehensile microrobot on chip. Assembly Automation. Vol. 24, N° 1. pp. 33-42. Emerald Group Publishing Limited. 2004.

[75] S. Devasia, E. Eleftheriou, S. O. Moheimani. A Survey of Control Issues in Nanopositioning. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 15, N° 5, 2007.

[76] Y. Dong, "Mechanical Design and Modeling of MEMS Thermal Actuators for RF Applications", in M.S.thesis, University of Waterloo, 2002.

[77] J. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar, B. Francis. State-Space Solutions to Standard H_2 and H_∞ Control Problems. IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 34, N° 8. 1989.

[78] J. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum. Feedback control theory. Dover publications. ISBN: 0486469336. 2008.

[79] G. Duc, S. Font. Commande H_∞ et μ-analyse. Hermès Sciences Publications. ISBN : 2746200414. 2000.

[80] P. Dupont, B. Armstrong et V. Hayward : Elasto-plastic friction model : contact compliance and stiction. Proceedings of the American Control Conference, 2000.

[81] P. Dupont, V. Hayward, B. Armstrong and F. Altpeter, "Single state elastoplastic models" IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.47, No5, May 2002.

[82] I. Ebert-Uphoff and G.S. Chirikjian, "Inverse Kinematics of Discretely Actuated Hyper-Redundant Manipulators Using Workspace Densities", in IEEE international conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, vol. 1, pp. 139-145, 1996.

[83] S. Fatikow, U. Rembold. Microsystem Technology and Microrobotics. Editions Springer-Verlag, 1997.

[84] S. Fatikow. Automated Nanohandling by Microrobots. ISBN: 978-1-84628-977-4. Springer. 2008.

[85] M. Freudenreich, U. Mescheder, G. Somogyi, Simulation and realization of a novel micro-mechanical bistable switch, Sens. Actuators A 114, 451–459. 2004.

[86] T. Fukuda, M. Nakajima, P. Liu, H. ElShimy, « Nanofabrication, Nanoinstrumentation and nanoassembly by nanorobotic manipulation", The International Journal of Robotics Research, April 2009 vol. 28 no. 4 537-547 2009.

[87] Y. Fukuta, Y.-A. Chapuis, Y. Mita, H. Fujita. Design, fabrication, and control of MEMS-based actuator arrays for air-flow distributed micromanipulation. IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems. Volume: 15 , Issue: 4. pp. 912 – 926. 2006.

[88] 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. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1489-1494, Washington, DC, USA. 2002.

[89] C. T. Gibson, B. L. Weeks, J. R. I. Lee, C. Abell, T. Rayment. A nondestructive technique for determining the spring constant of atomic force microscope cantilevers. Rev Sci Instrum, vol. 72, pp.2340-2344, 2001.

[90] T. Gomm, "Development of in-plane compliant bistable microrelays," in M.S. Thesis, Brigham Young University, Provo, Utah.

[91] J. A. Greenwood et J. B. P. Williamson : Contact of nomally flat surfaces. In Proceedings of the Royal Society of London, volume 295 de A, Mathematical and Physical Sciences, pages 300–319, December 1966.

[92] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet. Gramian-based optimal design of a dynamic stroke amplifier compliant micro-mechanism. Proc. of IEEE/RSJ IROS 2007. pp 4007-4012. 2007.

[93] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet, M. Boukallel. Mechanical and Control-Oriented Design of a Monolithic Piezoelectric Microgripper Using a New Topological Optimization Method. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Volume: 14 , Issue: 1. pp. 32-45. 2009.

[94] M. Grossard, M. Boukallel, N. Chaillet, C. Rotinat-Libersa. Modeling and Robust Control Strategy for a Control-Optimized Piezoelectric Microgripper. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Volume: 16 , Issue: 4. pp. 674 – 683. 2011.

[95] 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 l'Université de Franche-Comté. Besançon. 2000.

[96] D. Heriban, J. Agnus, J.-R. Coudevylle, M. Gauthier, and N. Chaillet. Design of silicon finger tips for a moc (microrobot on chip) microgripper. In Proc. of the Int. Workshop on Topical Meeting on Microfactories (TMMF05), Tsukuba, Japan, October 2005.

[97] L. L. Howell, book, "Compliant mechanisms". John Wiley & Sons Limited, 2001. ISBN: 0-471-38478-X.

[98] P. Hughes, P. Sincarsin and K. Carroll, "Truss arm a variable-geometry Trusses." in J. Intell. Mat. Syst. and Stru.. 1991, l.2: pp.148-160.

[99] J. L. Hutter, J. Bechhoefer. Calibration of atomic-force microscope tips. Rev Sci Instrum, vol. 64, pp.1868-1874, 1993.

[100] I.-H. Hwang, Y.-S. Shim, J.-H. Lee, modeling and experimental characterization of the chevron-type bistable microactuator, J. Micromech. Microeng. 13. 948–954. 2003.

[101] A Ishijima, H Kojima, T Funatsu, M Tokunaga, H Higuchi, H Tanaka and T Yanagida. Simultaneous observation of individual ATPase and mechanical events by a single myosin molecule during interaction with actin. Cell, vol. 92, no. 2, pages 161–171, 1998.

[102] J. Israelachvili. Intermolecular and surface forces. Academic Press. 1991.

[103] T. Jinni, "Design and experiments of fully compliant bistable micromechanisms" in Mechanism and Machine Theory, 40 (2005), pp. 17–31.

[104] R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): 35-45. 1960.

[105] M. Kemper. Development of a Tactile Low-Cost Microgripper with integrated Force Sensor. Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1461-1466, Taipei, Taiwan. 2004.

[106] D. Kim, B. Kim and J. Park. Implementation of a Piezoresistive MEMS Cantilever for Nanoscale Force Measurement in Micro/Nano Robotic Applications. KSME International Journal, Vol. 18, N°. 5, pp. 789-797. 2004.

[107] T. Kitahara, K. Ashida, M.Tanaka, Y. Ishikawa, N. Nakazawa, "Microfactory and Microlathe", International Workshop on Microfactories, Tsukuba, Japan, p. 1-8, 7-9 November 1998.

[108] Kleindiek Nanotechnik, http://www.nanotechnik.com, Germany.

[109] S. Krylov, B.R. Ilic, D. Schreiber, S. Seretensky, H. Craighead, The pull-in behavior of electrostatically actuated bistable microstructures, J. Micromech. Microeng. 18. 055026. 2008.

[110] M. Kumemura, D. Collard, S. Yoshizawa, D. Fourmy, N. Lafitte, L. Jalabert, S. Takeuchi, T. Fujii and H. Fujita. Direct bio-mechanical sensing of enzymatic reaction On DNA by silicon nanotweezers. In IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010, pages 915–918, 2010.

[111] H.N. Kwon, I.-H.Hwang, J.-H. Lee, A pulse-operating electrostatic microactuator for bistable latching, J. Micromech. Microeng. 15. 1511–1516. 2005.

[112] N. Lafitte. Modeling and control of MEMS tweezers for the characterizations of enzymatic reactions on DNA molecules. Thèse de l'Université de Franche-Comté. 2012.

[113] P. Lambert. Capillary Forces in Microassembly: Modeling, Simulation, Experiments, and Case Study. Microtechnology and MEMS. Springer. 2007.

[114] D. Lees and G. S. Chirikjian, "A combinatorial approach to trajectory planning for binary manipulators." in Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. pp. 2749-2754.

[115] D. Lees and G. S. Chirikjian, "An efficient method for computing the forward kinematics of binary manipulators." in Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 1012-1017.

[116] D. Lees and G. S. Chirikjian, "Inverse kinematics of binary manipulators with applications to service robotics." in Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. pp. 2749-2754.

[117] Z. Lu, P. C. Y. Chen and W. Lin. Force Sensing and Control in Micromanipulation. IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Part C, vol. 36, Issue 6, pp. 713–724. 2006.

[118] M. MacKenzie, N. An, M. Giere, J. Stori and P. Wright. Experiences with shape memory alloy : robot grippers for sub-millimeter hard disc drive components. Proc. SPIE Vol. 2906, pp. 25-36, Microrobotics: Components and Applications, Armin Sulzmann Ed., décembre 1996.

[119] MANCEF International Micro-Nano Roadmap. 2nd edition. ISBN: 0-9727333-0-2. 2004.

[120] G. A. Matei, E. J. Thoreson, J. R. Pratt, D. B. Newell, N. A. Burnham. Precision and accuracy of thermal calibration of atomic force microscopy cantilevers. Rev Sci Instrum, vol. 77, pp.083703-083709, 2006.

[121] U. Mick, V. Eichhorn, T. Wortmann, C. Diederichs, S. Fatikow. "Combined Nanorobotic AFM/SEM System as Novel Toolbox for automated Hybrid Analysis and Manipulation of Nanoscale Objects", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010), Anchorage, Alaska, USA.

[122] Micro and Nanotechnology Commercialization Education Foundation. http://www.mancef.org.

[123] K. Miura and H. Furaya, "Variable geometry truss and its applications to deployable truss and space crane arm." Acta Astro. 1985, 12(7): pp. 599-607.

[124] M. Nasir, M. Dickinson, and D. Liepmann. Measurement of Insect Flight Forces Using a MEMS Based Physical Sensor. Proceedings of Hilton Head 2006, Solid State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop. Hilton Head Island. 2006.

[125] N. C. Singer et *al.* Massachusetts Institute of Technology. Shaping Command Inputs to Minimize Unwanted Dynamics. United States Patent. Number: 4,916,635. 1990.

[126] Z. Ni, A. Bolopion, J. Agnus, R. Benosman, S. Regnier. Asynchronous Event-Based Visual Shape Tracking for Stable Haptic Feedback in Microrobotics. IEEE Transactions on Robotics. Volume: 28 , Issue: 5. pp. 1081-1089. 2012.

[127] Mickaël Paris, Conception et commande de systèmes d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté. 2008.

[128] J.Qiu, "A Curved-Beam Bistable Mechanism," in Journal of MicroElectroMechanical Systems, April 2004.vol. 13- 2, pp. 137-146.

[129] J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, A bulk-micromachined bistable relay with Ushaped thermal actuators, J. Microelectromech. Syst. 14. 2005.

[130] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, "Hysteresis and vibration compensation in a nonlinear unimorph piezocantilever", IEEE IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems), Nice France, 2008.

[131] S. Redaelli. Stabilization of Nanometer-size Particle Beams in the Final Focus System of the Compact Linear Collider (CLIC). PhD Thesis, Université de Lausanne,CERN-AB- 2004-025, 2003.

[132] S. Régnier, P. Rougeot, N. Chaillet. Forces analysis for micro-manipulation. Proc. Of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. June 2005.

[133] S. Régnier, La manipulation aux échelles microscopiques. Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6, France), juin 2006.

[134] S. Régnier, N. Chaillet. La microrobotique, applications à la micromanipulation. ISBN : 978-2-7462-1885-7. Hermes, Lavoisier. 2008.

[135] R.Y. Robert, "Mechanical digital-to-analog converters", in Proc. of the int. conf. on solid-state sensors and actuators. Transducers'99, June 1999, sendai, japan, pp.998-1001.

[136] H. Robertshaw and C. Reinholtz, "Variable geometry tresses." in Smart Mate. Struc. Math. Issues.1988, pp.105-120.

[137] Y. Rollot. Micromanipulations par adhésion : modélisations dynamiques et expérimentations. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2000.

[138] Y. Rollot, S. Régnier. Micromanipulation par adhésion. Nano et micro technologies. Vol. 1, N° 2, p.213-241, 2000.

[139] T. Sato, H. Kameya, Y. Miyazaki, Y. Hamatura. "Hand-eye system in nanomanipulation world", IEEE ICRA 1995.

[140] T. Singh andW. Singhose, "Tutorial on input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures", American Control Conference, pp.1717-1731, 2002.

[141] M. Sitti, H. Hashimoto. Controlled pushing of nanoparticles : Modeling and experiments. IEEE/ASME transactions on mechatronics, vol. 5, pp. 199211, 2000.

[142] T. R. Strick, J. F. Allemand, D. Bensimon, A. Bensimon, and V. Croquette. The elasticity of a single supercoiled DNA molecule. Science. 276:1835–1837. 1996.

[143] V. A. Sujan, "Design of a lightweight hyper-redundant deployable binary manipulator", in J. Mech. Design, 2004, Vol. 126(1), pp.29-39.

[144] M Ueda, Y Baba, H Iwasaki, O Kurosawa and M Washizu. Direct measurement of DNA by means of AFM. Nucleic acids symposium series, no. 42, pages 245–246, 1999.

[145] I. E. Uphoff and G. S Chirikjian, "Inverse kinematics of discretely actuated hyper-redundant manipulators using workspace densities." in 1996 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. pp. 1: 139 – 145.

[146] A. Voda. Micro, Nanosystems and Systems on Chip. Modeling, Control and Estimation. ISBN: 978-1-84821-190-2. Wiley. 2010.

[147] J. D. Watson and F.H. Crick. Molecular structure of nucleic acids; a structure for deoxyribose nucleic acid. Nature, vol. 171, no. 4356, pages 737–738, April 1953.

[148] G. Welsh and G. Bishop. An Introduction to the Kalman Filter. (Available online at : http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf).

[149] R. J. Woods and R. S. Fearing. Flight Force Measurements for a Micromechanical Flying Insect. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 355-362 vol. 1, Hawaii, USA. 2001.

[150] H. Xie, S. Regnier. In situ peeling of one-dimensional nanostructures using a dualprobe nanotweezer. Rev Sci Instrum, vol. 81, pp. 035112-035116, 2010.

[151] C. Yamahata, D. Collard, B. Legrand, T. Takekawa, M. Kumemura, G. Hashiguchi, and H. Fujita. "Silicon Nanotweezers With Subnanometer Resolution for the Micromanipulation of Biomolecules," Journal of Microelectromechanical Systems. vol. 17, no. 3, pp. 623–631. 2008.

[152] K. Zhou, K. Glover, J. Doyle. Robust and optimal control. Prentice Hall. ISBN: 0134565673. 1996.