



HAL
open science

Contribution à la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques.

Arnaud Hubert

► **To cite this version:**

Arnaud Hubert. Contribution à la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques..
Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2010. Français. NNT: . tel-00573375

HAL Id: tel-00573375

<https://theses.hal.science/tel-00573375>

Submitted on 3 Mar 2011

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

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

Contribution à la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques

**Mémoire de synthèse des activités de recherche et
d'encadrement**

pour obtenir le grade de

**Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Université de Franche-Comté**

présenté par

Arnaud Hubert

Maître de conférences à l'Université de Franche-Comté

Institut Femto-ST - Département AS2M, UMR CNRS 6174

24 rue Alain Savary, 25000 Besançon

Tél. : +33 (0)3 81 40 27 92, Fax : +33 (0)3 81 40 28 09

E-mail : arnaud.hubert@femto-st.fr

Soutenu le 02 décembre 2010 devant la commission d'examen :

Président :

- B. Maschke, Professeur, Université de Lyon

Rapporteurs :

- H. Bleuler, Professeur, EPFL Lausanne
- M. Collet, CR HDR CNRS, Institut Femto-ST Besançon
- O. Cugat, DR CNRS, G2ELAB Grenoble
- T. Redarce, Professeur, INSA Lyon

Examineurs :

- N. Chaillet, Professeur, Université de Franche-Comté
- G. Friedrich, Professeur, UTC Compiègne
- C. LExcellent, Professeur, ENSMM Besançon

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier Nicolas Chaillet, Professeur à l'Université de Franche-Comté, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour m'avoir fait découvrir la micro-robotique et pour m'avoir fait confiance tout au long de ces années de recherche commune. Pour ton aide, ton soutien constant et ta disponibilité, je souhaite t'exprimer toute ma reconnaissance.

Je souhaite également remercier Christian LExcellent, Professeur à l'ENSM de Besançon, non seulement pour avoir accepté d'examiner ce travail mais également pour toutes ces années de collaborations et de discussions scientifiques autour de la modélisation du comportement des matériaux actifs.

Je remercie sincèrement Monsieur B. Maschke d'avoir accepté de présider ce jury et pour l'intérêt qu'il a pu porter à mon travail de recherche. J'espère que nous pourrions développer très prochainement une collaboration riche et fructueuse autour de la modélisation hamiltonienne à ports pour les systèmes micro-mécatroniques.

Je souhaite également remercier les personnes qui ont eu la lourde tâche de rapporter mes travaux d'HDR, Messieurs H. Bleuler, Professeur à l'EPFL de Lausanne, M. Collet, CR HDR CNRS à l'Institut Femto-ST de Besançon, O. Cugat, DR CNRS au G2ELAB de Grenoble et T. Redarce, Professeur à l'INSA de Lyon. Je vous remercie pour vos remarques constructives et les discussions que nous avons pu avoir ensemble, notamment au cours de la soutenance.

Je tiens également à remercier chaleureusement Guy Friedrich, professeur à l'Université de Technologie de Compiègne avec qui j'ai découvert le monde et la passion de la recherche durant ma thèse de doctorat et qui a bien voulu s'intéresser à nouveau à mes travaux de recherche en participant à ce jury d'HDR. Merci Guy pour ta confiance et le soutien que tu m'as toujours apporté.

Bien sûr, une HDR est une aventure à plusieurs et je tiens donc à remercier tous les collègues avec qui j'ai travaillé au cours de ces années. En particulier, rien n'aurait pu se faire sans le travail passionné des étudiants, thésards et stagiaires, qui sont le *cœur* de la recherche académique. Je tiens donc à les remercier en premier lieu pour toutes ces années de collaborations passionnantes et pour tout ce qu'ils m'ont apporté scientifiquement et humainement : merci Cédric, Yuji, Jean-Yves, Guillaume, Mathieu, Yoann, Roba et Nandish.

Je souhaite de même remercier tous les membres du laboratoire pour leur accueil et les conditions de travail agréables qu'ils m'ont apportées. Je tiens également à remercier toutes les personnes cotoyées au cours de ses différentes années à l'Université et particulièrement mes collègues du GAP. Parmi ces personnes, je tiens tout spécialement à saluer mes *complices* de tous les jours au laboratoire : Lolo, Dada, Mehdi, Juju, Micka, Ben, Che, Brahim, Laetitia, Anne, Kanty et Jérôme. Merci à vous pour votre amitié et pour toutes ces années de vie commune.

Enfin, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mes parents et aux différent(e)s ami(e)s qui m'ont épaulé(e)s tout au long de ces années. Je sais que je ne peux pas vous citer tous sans en oublier. Je ne le ferai donc pas mais chacun se reconnaîtra¹. Merci à tous.

Arnaud Hubert,
Besançon,
Décembre 2010.

¹Je ferais une exception pour la personne qui a acceptée de relire plusieurs de mes manuscrits, notamment mon livre et mon mémoire d'HDR, merci beaucoup Mathilde.

Table des matières

Introduction	1
1 CV et résumé général	3
1.1 Curriculum vitæ	3
1.2 Activités de recherche	5
1.3 Activités annexes liées à la recherche	6
1.4 Activités d'enseignement	12
1.5 Publications	15
2 Microsystèmes pour la robotique	23
2.1 Contexte du travail	23
2.2 Modélisation des structures mécaniques	26
2.3 Conception et modélisation de l'actionnement	39
2.4 Conclusion sur la période de recherche	47
3 Micro-robotique et micro-manipulation	51
3.1 Contexte du travail	52
3.2 Micro-pinces et intégration	55
3.3 Changeur d'outils	60
3.4 Conclusion sur la période de recherche	68
4 Matériaux actifs et micro-actionneurs	71
4.1 Contexte du travail	71
4.2 Alliages à mémoire de forme magnétique	72
4.3 Matériaux piézoélectriques	90
4.4 Conclusion sur la période de recherche	102
Conclusion et perspectives	105

Introduction

Pour atteindre le point que tu ne
connais point, tu dois prendre le
chemin que tu ne connais point.
San Juan de la Cruz

Dix ans ont passé depuis l'obtention de ma thèse de doctorat. Durant cette période, j'ai eu la chance de séjourner dans plusieurs grandes institutions de recherche, tout d'abord en Allemagne, à l'Institut des MicroTechniques de l'Université Technique de Braunschweig puis à Besançon, d'abord au Laboratoire d'Automatique de Besançon puis à l'institut FEMTO-ST. Ces années m'ont donné l'opportunité de travailler avec de nombreux collègues, professeurs, maîtres de conférences, doctorants, ingénieurs ou stagiaires auxquels je souhaite dédier ce document. Ils m'ont, en partie, permis d'explorer de nouvelles thématiques de recherche et de proposer un certain nombre de résultats originaux. Il est à présent temps pour moi de franchir une étape supplémentaire et de présenter ces travaux à mes pairs pour solliciter une Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).

Cette présentation pour une HDR est l'objet de ce mémoire. Celui-ci comporte un premier chapitre de présentation générale. S'y trouveront regroupés mon CV, une présentation générale de mes activités de recherche et des activités annexes s'y rapportant ainsi que quelques éléments concernant mes activités d'enseignement. Mes publications scientifiques seront également citées à la fin de ce chapitre. Les trois chapitres suivants constituent le cœur de ce document. Ils regroupent une description des thématiques de recherche présentées pour cette HDR. Le premier de ces chapitres intitulé « *Microsystèmes pour la robotique* » détaille mes activités de post-doctorant en Allemagne. Dans le cadre de ces travaux, il s'agissait de concevoir des *microrobots marcheurs* en utilisant les technologies microsystèmes mises au point à l'IMT de Braunschweig. Le second de ces trois chapitres décrit les premières thématiques de recherche conduites à Besançon à propos de « *Microrobotique et micromanipulation* ». Cette période a été ma première véritable expérience d'encadrement de recherche puisque c'est à cette occasion que j'ai eu la chance de pouvoir encadrer deux étudiants en master et de co-encadrer un doctorant avec le Prof. Nicolas Chaillet. Enfin, le troisième chapitre de cette partie exposera mes derniers travaux réalisés à Besançon que j'ai regroupés sous le titre « *Matériaux actifs et micro-actionneurs* ». Ces derniers thèmes représentent la part la plus importante de mes travaux de recherche aussi bien en terme de temps de travail qu'en terme d'encadrement de

recherche. J'ai ainsi eu l'opportunité d'encadrer deux masters, de co-encadrer deux thésards et de travailler très activement avec un troisième durant cette période. Dans le cadre de cette activité, un nouveau sujet de thèse vient d'ailleurs d'être accepté pour un financement BDI/CNRS. Cette thèse devrait commencer à l'automne 2010 et je la co-encadrerais avec le Prof. Yann Legorrec de l'institut Femto-ST. Le dernier chapitre de ce mémoire est une conclusion que j'ai choisi de présenter sous la forme d'une relativement longue synthèse de mes résultats scientifiques et sur les points que je considère essentiels sur le travail effectué au cours de ces années. Ce chapitre me permettra non seulement de présenter les perspectives qui s'ouvrent à ces différents travaux mais également d'explorer les thématiques sur lesquelles j'aimerais me pencher dans les prochaines années.

L'activité d'enseignant-chercheur est passionnante mais très prenante. Elle m'a tellement absorbé au cours de cette période qu'il me semble que ces dix années ont passé en un clin d'œil. J'espère, pour finir cette introduction, que ce mémoire de synthèse permettra de faire ressortir ces différents points et de montrer toute l'importance que ces activités ont revêtu pour moi au cours de ces années passées dans une très bonne ambiance à Braunschweig puis à Besançon.

Chapitre 1

Curriculum vitæ et résumé des activités générales

1.1 Curriculum vitæ

Situation civile

État civil 37 ans, célibataire, nationalité française
Adresse 16 rue Suard, 25000 Besançon. Tél. : +33 (0)6 76 03 58 99

Situation professionnelle actuelle

Enseignant Maître de conférences de classe normale en 61^{ème} section
à l'Université de Franche-Comté (UFC), UFR Sciences et
Techniques à Besançon.
Activités d'enseignement : *automatique, électrotechnique, modéli-
sation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques.*

Chercheur Membre de l'Institut Femto-ST, unité mixte de recherche
CNRS/UFC/ENSMM/UTBM (UMR CNRS 6174), départe-
ment « Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques »,
équipe « *Systèmes Automatisés de Micro-manipulation et
Micro-assemblage* » (AS2M - SAMMI).
Activités de recherche : *conception de systèmes micro-robotiques
et micro-mécatroniques. Modélisation et contrôle d'actionneurs
à base de matériaux actifs.*

Titres universitaires

- Doctorat (2000)** Diplôme de docteur de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) obtenu avec la mention *Très honorable avec les félicitations du jury* le 13 décembre 2000.
Spécialité : *Contrôle des Systèmes*.
Intitulé du mémoire : *Contribution à la réduction des nuisances acoustiques générées lors de l'association machine électrique asynchrone-convertisseur statique de puissance*.
- DEA (1997)** Diplôme d'Études Approfondies de l'UTC obtenu avec la mention *Bien* en septembre 1997.
Spécialité : *Contrôle des Systèmes*.
Intitulé du mémoire : *Étude et caractérisation des différents types de vibrations et de nuisances acoustiques générées par les machines électriques*.
- Ingénieur (1996)** Diplôme d'ingénieur de l'UTC obtenu en septembre 1996.
Spécialité : *Génie Mécanique (GM) option Robotisation et Entraînements Électromécaniques (REE)*.

Parcours professionnel

- Depuis 2002** Maître de conférences à l'UFC, Besançon et chercheur au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB), UMR CNRS 6596, devenu depuis le 01/01/2008 le département AS2M de l'Institut Femto-ST, UMR CNRS 6174.
- 2001-2002** Post-doctorat à l'institut des microtechniques (IMT) de l'Université Technique de Braunschweig (T.U. Braunschweig, Allemagne) sous la direction du Prof. S. Büttgenbach.
Activités de recherche : *Conception et modélisation de micro-robots marcheurs*.
- 2000-2001** Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) au département de mécanique de l'UTC (poste à temps complet).
- 1997-2000** Allocataire de recherche au sein du laboratoire d'électrotechnique de Compiègne (LEC) à l'UTC.

1.2 Présentation générale des activités de recherche

Mes activités de recherche ont démarré en 1997 lors de mon stage de DEA au sein du laboratoire d'électromécanique de Compiègne (LEC) puis elles se sont poursuivies sans interruption jusqu'à aujourd'hui au sein de plusieurs institutions. Pour la rédaction de ce mémoire d'HDR, je ne décrirai pas les activités de recherche conduites durant mes années à Compiègne (DEA, thèse et ATER) et ne développerai que les activités post-doctorales (post-doctorat à Braunschweig puis maître de conférences à Besançon) que j'ai choisi de scinder en trois parties. La première correspond aux travaux réalisés pendant mon séjour de post-doctorat en Allemagne à l'institut des microtechniques de l'université de Braunschweig. Les deuxième et troisième thématiques ont été abordées à Besançon au sein du Laboratoire d'Automatique de Besançon puis du département AS2M de l'institut Femto-ST :

1. Les recherches conduites en Allemagne s'intéressaient aux microtechniques et à la modélisation des micro-systèmes afin de développer des *micro-robots marcheurs* conçus sur une base de micro-systèmes réalisés en salle blanche. Ces travaux seront décrits en détail dans le chapitre 2 de ce mémoire et ils ont donné lieu à la rédaction d'un rapport technique de plus de 130 pages [Hub02].
2. La première partie des recherches conduites à Besançon concernait la micro-robotique et la micro-manipulation. Cette thématique sera décrite dans le chapitre 3 de ce mémoire. Au cours de cette période, j'ai eu l'occasion d'encadrer deux stages de master/DEA [Uru03] [Mil05] et de co-encadrer un doctorant [Cle05]. Ce travail a donné lieu à la publication de trois revues internationales à comité de lecture et à sept conférences internationales à comité de lecture plus quelques communications nationales et internationales.
3. La seconde partie des recherches conduites à Besançon sera décrite dans le chapitre 4 et elle concernait les matériaux actifs et la conception de micro-actionneurs. Au cours de cette période, j'ai eu l'occasion d'encadrer deux master/ingénieur [Gau04] [Loi08], de co-encadrer deux thèses de doctorat [Gau07] dont une est encore en cours et de travailler activement avec un troisième thésard [Gro08]. Ces travaux ont donné lieu à la publication de deux revues internationales à comité de lecture (plus une acceptée mais non encore publiée et deux en cours d'évaluation), à quatre conférences internationales à comité de lecture et à plus d'une dizaine d'autres communications nationales et internationales.

Les périodes concernant ces trois parties ne sont pas toutes de même longueur, loin s'en faut, en particulier la première est bien plus courte que la dernière. Mais la durée *brute* de ces périodes n'est pas nécessairement la plus significative de ces travaux de recherche car le type d'activité mené a nécessairement évolué au cours des années. En particulier, mes activités comprennent de plus en plus de charges d'encadrement, d'enseignement et de diffusion des connaissances et ces activités complémentaires se substituent peu à peu aux activités de chercheur telles que je les avais pratiquées dans mes premières années de recherche. C'est en effet une évolution naturelle dans le métier d'enseignant-chercheur que de s'orienter graduellement vers des activités d'encadrement et de direction de recherche

de plus en plus marquées et qui sont l'indication de la capacité à présenter une HDR.

Il existe de nombreux points communs entre les différents travaux présentés dans ce mémoire tout simplement parce qu'ils concernent tous les systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques, leur conception, leur modélisation et leur contrôle. Ce thème est cependant suffisamment vaste pour ne pas en avoir fait le tour bien que j'y ai passé mes dix dernières années de recherche. Les perspectives présentées à la fin de ce mémoire montreront que ce sujet peut sans aucun problème m'occuper encore quelques années puisque les problématiques scientifiques de ce domaine sont encore loin d'être épuisées. Avec peu de risque de me tromper, je peux même affirmer que nos prochains travaux mettront encore à jour des problématiques scientifiques intéressantes qui méritent toute notre attention. Je tenterais de montrer également dans ce mémoire que la différence principale dans l'évolution de mes travaux de recherche ne provient pas seulement des phénomènes physiques mis en jeu (mécanique, acoustique, électricité, magnétisme, thermique et leurs différentes possibilités de couplage) mais surtout de l'adoption d'un point de vue de plus en plus global et généralisé. Les échelles des dispositifs étudiés ont également joué un rôle important car les dimensions micro ou macro d'un système impliquent des contraintes de conception différentes dues aux facteurs d'échelle ainsi que des limites ou des impératifs concernant les outils de modélisation et de contrôle à utiliser.

La chronologie des recherches que j'ai entreprises depuis mes débuts de chercheur est résumée sur le graphique de gauche de la FIG. 1.1. Les thématiques et les résultats obtenus au cours de mes années de recherche en tant que post-doctorant et maître de conférences seront explicités dans les trois chapitres suivants. Le dernier chapitre sera consacré à une synthèse de ces différents travaux et présentera les perspectives de ces travaux et de mes activités de recherche en général. Dans ces différentes parties, j'essayerais de faire ressortir aussi bien les points clé que les points de blocage, comment ils ont été abordés, résolus ou bien les orientations futures qui me permettront d'y faire face. En effet, l'évolution dans mes problématiques de recherche a souvent résulté d'opportunités et/ou de verrous scientifiques identifiés au cours de l'avancement de ces travaux. Ces obstacles et verrous ont pu être – ou seront – levés en ré-orientant une partie de mes activités dans des directions nouvelles et complémentaires des recherches précédentes. Le graphique de droite de la FIG. 1.1 permet de représenter les évolutions dans ces thématiques. L'ensemble de mes publications de recherches sera de plus reporté à la fin de ce chapitre.

1.3 Activités annexes liées à la recherche

1.3.1 Responsabilités administratives et animations diverses

Responsable de la formation du personnel au sein du laboratoire

Responsable de la formation permanente du personnel du Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) de 2004 jusqu'à son intégration au 1er janvier

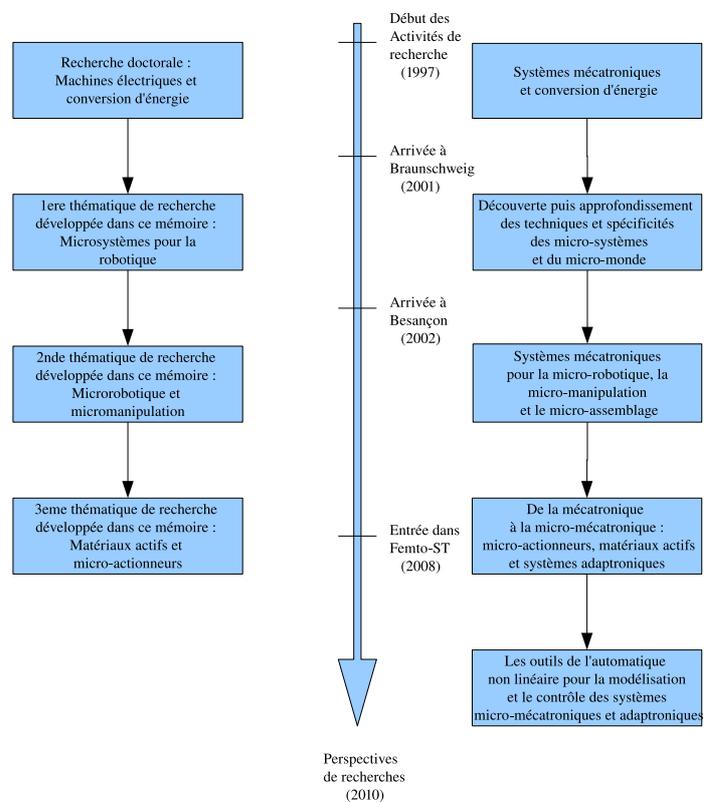


FIG. 1.1 – Graphique de gauche : chronologies des thématiques de recherche doctorales et post-doctorales, graphique de droite : évolution de ces thématiques en fonction des opportunités et/ou des verrous scientifiques identifiés au cours du temps.

2008 dans l'Institut Femto-ST :

- médiation entre le laboratoire et le centre de formation de la délégation nord-est du CNRS ;
- centralisation des besoins et des demandes de formation du personnel ;
- rédaction du plan de formation annuel du laboratoire.

Participation aux groupes de travail du CNRS

Participation au RTP microrobotique, au GDR MACS GT SYSME et au GDR Robotique GT manipulation multi-échelle.

Mandats électifs

CSE 61 : membre élu de la commission de spécialistes d'établissement section 61 à l'Université de Franche-Comté de 2006 à 2009.

Comité de gestion : membre élu du comité de gestion de l'Institut Supérieur d'Ingénieur de Franche-Comté depuis 2006 (deux mandats).

Expertises scientifiques

Revues internationales : Relecteur scientifique pour les revues *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *IOP Smart Materials and Structures* et *IOP Journal of Micromechanics and Micro-engineering* ;

Conférences internationales : Relecteur scientifique pour les conférences internationales IFAC INCOM 2006, IEEE IWMF 2006, IEEE IROS 2007, IEEE/ASME AIM 2010 ;

Comités de recrutement Rapporteur et membre des commissions de recrutement suivantes :

- UFC, ENSMM, Besançon : postes d'ATER et de maîtres de conférences (2006-2010) ;
- ENSIL, Limoges : poste de maître de conférences (2009) ;
- UTC, Compiègne : poste de maître de conférences (2010) ;

1.3.2 Collaborations internationales et invitations d'organismes

Projet européen Robosem (2002-2005)

Robosem est un projet européen du 5^{ème} PCRD auquel a participé le LAB. Dans ce cadre, j'ai travaillé activement avec des partenaires étrangers et plus particulièrement avec deux équipes suisses et une équipe allemande, (i) l'équipe du Dr J.M. Breguet de l'EPFL (Lausanne, Suisse) sur le développement d'actionneurs piézoélectriques et de stations de micromanipulation, (ii) l'équipe du Dr H. Michler de l'EMPA (Thun, Suisse) sur des applications de micromanipulation à l'intérieur d'un microscope électronique à balayage et (iii) l'équipe du Prof. S. Fatikow (Oldenburg, Allemagne) sur des problèmes de micro-manipulation et de micro-positionnement. Une publication conjointe a été rédigée avec nos partenaires de l'EMPA en Suisse.

Projet franco-allemand Procope (2005)

Procope est un programme d'échanges scientifiques franco-allemands financé par le Ministère Français des Affaires Étrangères. Dans ce cadre, le laboratoire a obtenu un financement pour développer et accentuer nos relations scientifiques avec l'équipe du Prof. S. Fatikow de l'Université d'Oldenburg en Allemagne. Ce financement m'a permis de passer quelques temps chez ces collègues allemands, et de les accueillir dans notre laboratoire. Les échanges résultant m'ont permis d'aborder le thème des matériaux semi-actifs, en particulier les ferrofluides, et ainsi de réaliser mes premières recherches sur l'utilisation des ferrofluides dans le cadre de la micro-robotique. Ces échanges sont à la base des travaux qui ont ensuite été développés au laboratoire sur une table de micro-positionnement utilisant des ferrofluides.

École d'été internationale MECMIC'06 (2006)

J'ai été associé à la création de l'école d'été *First Summer School in Mechatronics and Microsystems* organisée en août 2006 par l'Université Technique de Braunschweig en Allemagne. Dans le cadre de cette école, j'ai proposé un cours intitulé *Micro-robotics : design and integration* dont j'ai rédigé le programme, réalisé les supports et donné l'enseignement.

Projet Eurocores Mafesma (2007-2009)

Mafesma est un projet Eurocores S3T, financé par la *European Science foundation*, auquel participe le Département de Mécanique Appliquée de l'institut Femto-ST et avec qui nous collaborons sur la modélisation des alliages à mémoire de forme magnétique (AMFM). Ce projet est un programme d'échanges entre scientifiques qui se propose de combler le vide entre les travaux en sciences des matériaux sur les AMF et AMFM et les travaux en conception et modélisation de structures et systèmes utilisant ces matériaux actifs. Travaillant depuis plusieurs années sur ces matériaux, c'est tout naturellement que plusieurs collègues (J.Y. Gauthier, C. LExcellent et J. Abadie) et moi-même avons pu nous intégrer à ce projet et ainsi partager avec des collègues européens nos résultats en termes de modélisation et d'expérimentations sur les alliages en NiMnGa pour l'actionnement. Plus particulièrement, avec ces trois collègues, nous avons fait, dans le cadre de ce projet, plusieurs *workshops* et présentations, notamment à l'ENSAM Metz en France, à l'Université de Prague en république Tchèque ainsi qu'à l'Université d'Helsinki en Finlande.

Projet européen Hydromel (2006-2010)

Hydromel est un projet européen du 6^{ème} PCRD (24 partenaires académiques et industriels européens) auquel participe le département AS2M de Femto-ST (ex LAB). Dans ce cadre, je suis le responsable (*task leader*) de l'activité de recherche *Task 2.1.1 : High resolution actuators* concernant le développement des actionneurs à haute résolution. Cette activité de recherche s'intègre dans le groupe de travail *Work package 2.1 : High Precision Robot Systems*. Cette tâche implique quatre partenaires européens (institut Femto-ST France, entreprise Nascatec Allemagne, Université d'Oldenburg Allemagne et laboratoire BAS Bulgarie). Plus spécifiquement pour ce projet, je travaille sur la modélisation, la conception, la réalisation et le test d'un actionneur *push-pull* innovant utilisant les AMFM. Cet actionneur a été réalisé au cours de l'année 2008 et il possède actuellement une plage de déplacement de l'ordre du millimètre pour une précision de positionnement de l'ordre de quelques micrométriques avec des temps de réponse de quelques millisecondes. Ces performances sont actuellement dans l'ordre de grandeur des meilleurs performances mondiales relevées pour ce type d'actionneurs. Le sujet étant extrêmement novateur, il n'existe actuellement que quelques laboratoires à travers le monde qui travaillent sur le sujet des actionneurs utilisant des AMFM (essentiellement en Finlande, en Allemagne et aux États-Unis).

Bonus Qualité Recherche, Université de Franche-Comté (2010)

Titre : *Approche Hamiltonienne à ports pour la commande des systèmes à paramètres distribués : application à la commande des micro-systèmes*. L'objectif de ce BQR est de développer une collaboration entre l'Université de Franche-Comté, l'Université de Lyon et l'Université de Twente (Pays Bas). Il s'agit d'appliquer les résultats théoriques établis par nos deux partenaires dans le cadre des micro-systèmes mis en œuvre à l'Institut FEMTO-ST, département AS2M. Ce projet s'intéresse en particulier à la commande de Nanotweezers par le biais d'approches énergétiques. Ce sujet applicatif fait l'objet d'une collaboration active (co-encadrement de thèse+projet PHC Sakura) entre l'institut FEMTO-ST, le laboratoire LIMMS à Tokyo et l'Université de Tokyo dans le cadre de la caractérisation physico-chimique de brins d'ADN. La modélisation multiphysique doit permettre d'intégrer de manière cohérente les modèles d'interface liquide/solide issus de la manipulation en milieu liquide. Enfin de nombreuses applications transverses au laboratoire FEMTO-ST pourraient être traitées par ce type d'approche, par exemple les systèmes mécaniques à base d'alliage à mémoire de forme, l'atténuation d'ondes acoustiques par membrane active, la commande de *Smart Surfaces*. Ce projet permettra d'initier la formulation de ces différentes applications dans le cadre de l'approche Hamiltonienne à ports.

1.3.3 Encadrement d'étudiants

Je suis actuellement **titulaire de la prime d'encadrement doctorale et de recherche (PEDR)**, obtenue en octobre 2008.

Encadrement doctoral (taux $\geq 50\%$)

Thèse soutenue Co-encadrement de la thèse de Cédric Clévy, soutenue le 15 décembre 2005 (durée : 3 ans et 3 mois). Taux d'encadrement : 30% les deux premières années de thèse et 50% la troisième.

Thèse co-encadrée avec le Prof. N. Chaillet.

Intitulé du mémoire : *Contribution à la micro-manipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage*.

Devenir du doctorant : le candidat a été qualifié à la suite de sa soutenance dans *deux* sections CNU (60 et 61) et a obtenu un poste de maître de conférences l'année suivante (sept. 2006) à l'Université de Franche-Comté en 61^{ème} section. Il est actuellement rattaché au niveau recherche au département AS2M de l'institut Femto-ST.

Thèse soutenue Co-encadrement de la thèse de Jean-Yves Gauthier soutenue le 13 décembre 2007 (durée : 3 ans et 3 mois). Taux d'encadrement : 50% durant toute la durée de la thèse.

Thèse co-encadrée avec le Prof. N. Chaillet (20%) et le Prof. C. L'excellent (30%).

Intitulé du mémoire : *Modélisation des alliages à mémoire de*

forme magnétique pour la conversion d'énergie dans les actionneurs et leur commande

Devenir du doctorant : le candidat a été qualifié à la suite de sa soutenance dans *trois* sections CNU (60, 61 et 63) et a obtenu un poste de maître de conférences l'année suivante (sept. 2008) à l'INSA de Lyon en 63^{ème} section. Il est actuellement rattaché au niveau recherche au Laboratoire de Génie Électrique et FerroÉlectricité (LGEF) de l'INSA de Lyon.

Thèse à démarrer Co-encadrement d'une thèse à démarrer en octobre 2010. Le financement est déjà obtenu (BDI CNRS/région) et le(a) candidat(e) est en cours de recrutement. Thèse co-encadrée avec le Prof. Y. Le Gorrec. Intitulé du sujet : *Approche géométrique pour la commande d'actionneurs à base de matériaux actifs.*

Autres participations à des activités d'encadrement doctoral

Thèse soutenue Participation à l'encadrement de la troisième année de thèse de Mathieu Grossard, soutenu le 26 novembre 2008 (durée : 3 ans et 2 mois). Thèse encadrée par le Prof. N. Chaillet et par le Dr C. Rotinat-Libersa (CEA). Intitulé du mémoire : *Contribution à la conception optimale et la commande de systèmes mécatroniques flexibles à actionnement piézoélectrique intégré - Application en microrobotique.* Devenir du doctorant : le candidat a obtenu le prix de la meilleure thèse du GDR Macs du CNRS à la session 2009 et a été qualifié à la suite de sa soutenance dans la sections 61 du CNU. Il a obtenu un poste de chargé de recherche en décembre 2008 au CEA de Fontenay-aux-Roses où il travaille actuellement.

Thèse en cours Participation à l'encadrement de la thèse de Roba El Khoury Moussa (début de la thèse en octobre 2007 et fin prévue en 2011). Thèse co-encadrée avec le Prof. N. Chaillet et le Dr M. Grossard (CEA). Intitulé du sujet : *Micro-articulations à actionnement et mesure piézoélectrique intégrées pour le self-sensing en micro-robotique.*

Encadrements d'ingénieur, de Master et DEA

Ingénieur 2008 Encadrement du projet de fin d'étude en *Mécatronique* de l'école d'ingénieur Polytech'Orléans, de Yann Loirat soutenu en septembre 2008. Intitulé du mémoire : *Conception et réalisation d'actionneur à haute résolution utilisant des matériaux actifs de type alliage à mémoire de forme magnétique.*

Master 2005 Encadrement du projet de Master Recherche *Mécatronique* de l'Université de Franche-Comté, de Guillaume Millet soutenu en septembre 2005 (mention *Bien*).

- Intitulé du mémoire : *Étude des possibilités d'utilisation des ferrofluides en micro-robotique.*
- DEA 2004** Encadrement du projet de DEA *Informatique, Automatique et Productique* de l'Université de Franche-Comté, de Jean-Yves Gauthier soutenu en septembre 2004 (mention *Très Bien*).
Intitulé du mémoire : *Conception d'actionneurs à base d'alliage à mémoire de forme magnétique.*
- Master 2003** Encadrement du projet de Master *Mécatronique* de l'université Denki de Tokyo (*Tokyo Denki University*, Japon), de Yuji Urushima soutenu en juillet 2003.
Intitulé du mémoire : *Study and development of an interface for the LEMMOC Micro-gripper.*

1.4 Activités d'enseignement

1.4.1 Activités d'enseignement à l'UFC

Au cours de ces sept années à l'UFC (2002/2003 → 2009/2010), je me suis fortement impliqué dans les activités d'enseignement dispensées au sein du groupe automatique et productique (GAP) de l'UFR Sciences et Techniques de l'UFC. Cette implication concerne en particulier :

- la responsabilité de nombreux modules d'enseignement (plus de quinze modules différents depuis 2002) ;
- le montage de nouveaux cours/travaux dirigés (TD)/travaux pratiques (TP) (cf détails ci-après) ;
- la participation au montage de maquettes pédagogiques pour trois formations : licence EEA, ingénieur ISIFC, master MTMS ;
- la responsabilité des salles de TP du GAP depuis cinq ans (organisation des plannings, suivi et entretien du matériel).

Bien que j'aie participé à l'enseignement dans de nombreuses formations différentes de l'UFC (notamment dans des licences professionnelles et IUP, désormais fermés), mon implication actuelle concerne essentiellement trois formations, à trois niveaux différents et à répartition à peu près égale entre ces trois cursus :

- licence électrotechnique, électronique et automatique (EEA), 1^{er} cycle universitaire ;
- ingénieur de l'institut supérieur de Franche-Comté (ISIFC), 2nd cycle universitaire ;
- master mécatronique et microsystèmes (MTMS), 2nd cycle universitaire.

Je suis actuellement responsables de six modules répartis uniformément sur ces trois formations.

Licence EEA

En licence EEA, je suis intervenu au niveau des trois années de la formation.

Pour la première année (semestre 2), j'ai participé à la création d'un nouveau module optionnel *Introduction à l'EEA* pour la maquette de formation

du quadriennal 2004/2008 et qui a été ouvert pour la première fois en 2006. Ce module fonctionne depuis 2006 tous les ans sans interruption. J'ai développé les enseignements de la moitié de ce module (cours + 7 TD + 1 TP : signaux et systèmes ; traitement élémentaire du signal ; analyse spectrale élémentaire ; modulation ; signaux numériques et traitement du son ; introduction aux systèmes de commande ; capteurs). J'ai été responsable de ce module pendant trois ans jusqu'à l'année dernière.

Pour la deuxième année (semestre 4), j'ai proposé et créé un nouveau module de formation *Modélisation et dynamique des systèmes continus* pour la maquette de formation du quadriennal 2008/2012. J'ai entièrement développé les enseignements pour la totalité de ce module (cours + 6 TD : modélisation des systèmes à paramètres localisés ; propriétés et caractéristiques des systèmes linéaires ; modèles d'état et modèles entrée/sortie ; analyse temporelle (dans l'espace d'état) ; analyse fréquentielle (Fourier/Laplace)). Je suis responsable de ce module depuis son ouverture en 2008.

Pour la troisième année (semestre 6), j'ai proposé et créé un nouveau module de formation *Asservissements numérique* (quadriennal 2004/2008) puis *Contrôle numérique des systèmes dynamiques* (quadriennal 2008/2012). J'ai développé la totalité des enseignements de ce module (cours + 7 TD + 6 TP : introduction à la commande numérique, échantillonnage et reconstruction ; analyse temporelle, convolution et équations de récurrence ; analyse fréquentielle, transformées en z et fonction de transfert ; commande numérique en boucle ouverte et boucle fermée, régulateurs standards). Je suis responsable de ce module depuis son ouverture en 2004.

Ingénieur ISIFC

Je suis arrivé à l'UFC l'année suivant l'ouverture de cette école d'ingénieur. Celle-ci a été créée par l'UFC en collaboration entre l'UFR sciences et techniques et l'UFR sciences médicales et pharmaceutiques. Il s'agit d'une formation aux métiers liés aux sciences et dispositifs biomédicaux. Dès mon arrivée en 2002, j'ai été chargé par le GAP de développer les enseignements d'automatique liés à cette nouvelle formation de l'UFC. J'ai donc développé plusieurs modules en deuxième et troisième années qui ont évolué au cours des années et sont maintenant regroupés au sein d'un seul module enseigné en deuxième année de l'ISIFC (bac+4). Ce module traite des thématiques suivantes : principes et constitution des installations automatisés ; commande séquentielle et grafcet ; commande continue et régulateurs standards. Dans le cadre de cet enseignement, j'ai développé tous les cours, les TD (une dizaine) et les TP (6 différents). Un polycopié de ce cours a été rédigé et s'est étoffé au cours des années pour donner naissance à un ouvrage pédagogique qui a été publié en 2008 aux *Presses Universitaires de Franche-Comté* dans la collection *Didactique* (280 pages). Je suis responsable de tous les cours d'automatique de l'ISIFC et de leur évolution depuis sa création en 2002.

La rénovation de la maquette pédagogique de l'ISIFC pour le quadriennal démarrant en 2004 a conduit à la proposition d'un cours d'électrotechnique pour les élèves de première année. Je fus choisi comme responsable de ce cours

à sa création et c'est donc moi qui l'ai développé. Ce cours traite actuellement des thématiques suivantes : aspects énergétiques de l'électrotechnique ; calculs de circuits dans les réseaux continus, monophasés et triphasés ; notions de machines électriques et d'électronique de puissance. Dans le cadre de ce module, j'ai développé tous les cours (polycopié de 30 pages), les TD (5 différents) et un TP se proposant d'étudier la conception d'un fauteuil roulant électrique.

Master MTMS

J'interviens dans les formations de second cycle de l'UFC depuis mon arrivée au sein du GAP ; tout d'abord dans la maîtrise électrotechnique, électronique et automatique (EEA) et dans le DESS/DEA informatique, automatique et productique (IAP) puis, à la suite de la réforme des universités dite *LMD*, dans le master mécatronique (MT) et enfin dans le master mécatronique et micro-systèmes (MTMS) issu de la maquette proposée au dernier quadriennal (2008). Jusqu'à il y a quelques années, mon intervention dans ces différentes formations concernait essentiellement l'automatique pour les systèmes multivariables, l'identification paramétrique et les techniques d'IA pour la commande.

Depuis le début du master MTMS, je suis désormais responsable des modules de modélisation des systèmes mécatroniques en première et deuxième année (*modélisation des systèmes mécatroniques* et *modélisation des systèmes multiphysiques*). Dans ce cadre, je suis chargé de la création du programme et de l'enseignement de ces cours. Les thématiques abordées dans ces deux modules étant assez liées à mes activités de recherche, ces enseignements représentent une sorte de *transfert de connaissance* de mes activités de recherche vers le domaine de l'enseignement. Le dernier chapitre de ce mémoire étant consacré à une synthèse de mes travaux de recherche, celui-ci donne un aperçu du contenu des thèmes enseignés dans ces deux modules (modélisation des systèmes à paramètres localisés et modélisation des systèmes à paramètres distribués). En plus des cours, j'ai développé pour ces deux modules de nombreux TD (méthodes des réseaux, méthodes variationnelles, méthodes des différences finies et des éléments finis) et de nombreux TP (circuits électriques et mécaniques, machines électriques *classiques*, actionneurs linéaires et *voice-coil*, lévitation magnétique, pont roulant...). Ces modules sont très innovants et connexes à mes activités de recherche, le programme enseigné évolue donc d'années en années et n'est pas figé.

1.4.2 Autres activités pédagogiques

Écoles d'été internationales

MECMIC'06 Élaboration du programme et enseignement d'un cours intitulé *Micro-robotics : design and integration* pour l'école d'été *First Summer School in Mechatronics and Microsystems* organisée en août 2006 par l'Université Technique de Braunschweig en Allemagne.

HYDROMEL'10 Participation à l'organisation d'une école d'été *Summer school in microrobotics and Self-assembly for Hybrid MEMS*

dans le cadre du projet européen Hydromel sur le micro et le self-assemblage. Élaboration du programme et enseignement d'un cours intitulé *Actuators and Micro-Actuators for microrobotics applications*. Cette école a eu lieu à Besançon du 29 juin au 2 juillet 2010.

Ouvrage pédagogique

Publication d'un ouvrage pédagogique aux Presses Universitaires de Franche-Comté (PUFC) : A. Hubert. *Commande des systèmes dynamiques – Introduction à la modélisation et au contrôle des systèmes automatiques*, PUFC, collection didactique, 280 pages, dec. 2008.

Responsable de salles de TP

Responsable des salles d'enseignement de Travaux Pratiques d'automatique au sein de l'Université de Franche-Comté (UFR ST) :

- achats et entretiens des maquettes pédagogiques (avec un technicien à mi-temps) ;
- gestion du planning d'occupation des salles.

1.5 Publications

1.5.1 Publications doctorales

Publications internationales à comité de lecture

Reviews

[1] A. Hubert, G. Friedrich. Influence of power converter on induction motor acoustic noise : interaction between control strategy and mechanical structure. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 149, issue 2 :93–100, march 2002.

Revue francophone

[2] A. Hubert, G. Friedrich. Comportement vibratoire des machines électriques asynchrones alimenté par convertisseur statique PWM. *Revue internationale de génie Electrique (RIGE)*, 6 :225–254, 2003.

Conférences

[3] A. Hubert, G. Friedrich. Acoustic noise generated by the association of an induction machine and a natural sampling power converter. In *Proc. of First International Seminar on Vibration and Acoustic Noise of Electric Machinery*, Béthune, France, May 1998.

[4] R. Dib, J.C. Henrio, A. Hubert, G. Friedrich, P. Wagstaff. Analysis of the noise, vibration and transmission characteristics of induction motor. In *Proc. of INTER-NOISE 2000*, Nice, France, 2000.

[5] A. Hubert, G. Friedrich. Modelisation of rotating magnetic fields in polyphase alternative machines supplied by power converters : use of harmonic techniques and matrix computation. In *Proc. of Second International Seminar on Vibration and Acoustic Noise of Electric Machinery*, Łódź, Poland, 2000.

[6] A. Hubert, G. Friedrich. A method for choosing the power converter control strategy to reduce the acoustic noise by taking into account the mechanical structure response. In *European Power Electronics and drive conference (EPE 2001)*, Graz, Austria, August 2001.

[7] A. Hubert, G. Friedrich. Vibrations and acoustic noise reduction in AC electrical drives. Use of analytical and experimental modal techniques. In *ISMA - International Conference on Noise & Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, Sept. 2002.

[8] V. Lanfranchi, A. Hubert, G. Friedrich. Comparison of a natural sampling and a random PWM control strategy for reducing acoustic annoyances. In *European Power Electronics and drive conference (EPE 2003)*, Toulouse, France, Sept. 2003.

Communications (publications sans comité de lecture)

Conférences, colloques et workshops internationaux

[9] A. Hubert, G. Friedrich. A developpment of an analytical model to compute the pulsating torques of an induction motor supplied by power converter. In *4th International Conference : Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques*, Compiègne, France, Sept. 2001.

Conférences, colloques et workshops nationaux

[10] A. Hubert, G. Friedrich. Prise en compte de paramètre nuisance acoustique lors de la conception d'un ensemble machine électrique asynchrone - convertisseur statique de puissance. In *GEVIQ'2000*, Marseille, France, 2000.

1.5.2 Publications post-doctorales

Publications internationales à comité de lecture

Revues

[11] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Modelling, Fabrication and Validation of a High Performance 2 DOF Microgripper. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 10(2), April 2005.

[12] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus and N. Chaillet. A Micromanipulation Cell Including a Tool Changer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15 :292-301, Sept. 2005.

[13] J.Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie and N. Chaillet. Modeling Rearrangement Process of Martensite Platelets in a Magnetic Shape Memory Alloy Ni₂MnGa Single Crystal under Magnetic Field and (or) Stress Action. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18(3) :289-299, 2007.

[14] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Non-linear Hamiltonian modelling of magnetic shape memory alloy based actuators. *Sensors and Actuators A : Physical*, Vol. 141(2) :536-547, 2008.

[15] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Flexible micro-assembly system equipped with an automated tool changer. *Journal of Micro-Nano Mechatronics. Special Issue on Automation in Micro and Nanohandling*, Vol. 4(1) :59-72, 2008.

Revue francophone

[16] M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel, C. Rotinat-Libersa and A. Hubert. Synthèse et commande robuste d'une micropince piézoélectrique intégrée. *Journal européen des systèmes automatisés (RS-JESA), numéro spécial "commande dans le micro-monde"*, Vol. 44/2010(à paraître) :661-691, 2010.

Conférences

[16] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. 2 DOF piezoactuator for micromanipulation tasks. In *ACTUATOR'2004*, Bremen, Germany, June 2004.

[17] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. A new micro-tools exchange principle for micromanipulation. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2004)*, Sendai, Japan, Sept. 2004.

[18] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus and N. Chaillet. A micromanipulation cell including a microtools changer. In *International Workshop on Microfactories (IWMF'2004)*, Shanghai, China, Oct. 2004.

[19] C. Clévy, A. Hubert, S. Fahlbusch, N. Chaillet and J. Michler. Design, Fabrication and Characterization of a Flexible System based on Thermal Glue

for in air and in SEM Microassembly. In *IFAC Third International Precision Assembly Seminar (IPAS'2006)*, Bad Hofgastein, Austria, Feb. 2006.

[20] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Modeling, Identification and Control of a Thermal Glue Based Temporary Fixing System : Application to the Micro-robotic Field. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '2006)*, Orlando, USA, May 2006.

[21] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent and N. Chaillet. Multi-stable Actuator based on Magnetic Shape Memory Alloys. In *ACTUATOR'2006*, Bremen, Germany, June 2006.

[22] G. Millet and A. Hubert. Design of a 3 DOF Displacement Stage based on Ferrofluids. In *ACTUATOR'2006*, Bremen, Germany, June 2006.

[23] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Temporary fixing systems for applications in microrobotics. In *IFAC/IEEE/ASME Symposium on Mechatronic Systems (MECHATRONICS'2006)*, Heidelberg, Germany, Sept. 2006.

[24] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent and N. Chaillet. Magnetic Shape Memory Alloy and Actuator Design. In *Proc. of the 5th International Workshop on Microfactories (IWMF'06)*, Besançon, France, Oct. 2006.

[25] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent and N. Chaillet. Original hybrid control for robotic structures using Magnetic Shape Memory Alloys actuators. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2007)*, San Diego, USA, Oct. 2007.

[26] R. El Khoury Moussa, M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel and A. Hubert. Optimal Design and Control Simulation of a Monolithic Piezoelectric Microactuator with Integrated Sensor In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'2010)*, Montreal, Canada, July 2009.

Publications nationales à comité de lecture

Reviews

[27] A. Hubert. Microrobotique : micromanipulation et microrobots autonomes. *journal J3eA*, Vol. 2, Hors-Série 2 - 14, 2003.

[28] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Conversion d'énergie magnéto-thermo-mécanique dans les Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques. *La Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, Vol. 4, Avril 2008.

Conférence

[29] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Conversion d'énergie magnéto-thermo-mécanique dans les Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques. In *Conférence sur les Sciences et Applications des Matériaux Electroactifs (CSAME'07)*, Toulouse, France, Sept. 2007.

Ouvrages pédagogiques et publications non référencées

[30] A. Hubert. Modeling, simulation and design of legged micro-robot. *Post-Doctoral Interne Report*, TU Braunschweig, Germany, 135 pages, Sept. 2002.

[31] A. Hubert. Commande des systèmes dynamiques – Introduction à la modélisation et au contrôle des systèmes automatiques. *Presses Universitaires de Franche-Comté*. Collection didactique, 280 pages, Dec. 2008.

Communications (publications sans comité de lecture)

Conférences, colloques et workshops internationaux

[32] J. Agnus, C. Clévy, Y. Urushima, R. Perez, A. Hubert and N. Chaillet. A micromanipulation station based on a new integrated Micropreheensible Microrobot On Chip (MMOC). In *35th International Symposium on Robotics (ISR'2004)*, Paris, France, March 2004.

[33] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent and N. Chaillet. Multistable Actuator based on Magnetic Shape Memory Alloys. In *Workshop on Magnetic Shape Memory Alloys*, Ascona, Switzerland, Sept. 2005.

[34] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Micromanipulation and Micro-Assembly Systems. In *IEEE/RAS International Advanced Robotics Programm (IARP'06)*, Paris, France, 2006.

[35] J.Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie and N. Chaillet. Modelling thermo-magneto-mechanical behavior of a NiMnGa magnetic SMA single crystal. In *International Conference on Thermo-mechanical Modelling of Solids*, Ecole Polytechnique, Paris, France, 2007.

[36] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Modeling and control of micro-mechatronic devices : application of variational and energetic methods for micro-actuator design. In *7th France/Japon Congress and*

5th Europe/Asia Congress MECATRONICS'08, Le Grand Bornand, France, June 2008.

[37] N. Chaillet, C. LExcellent, J. Abadie, A. Hubert and H. Benzaoui. From SMAS to MSMS : Modeling and Control. In *Proceedings of International Conference on Smart Materials and Adaptive Structures : Mathematical Modeling and Computation*, Tanger, Maroc, 2008.

[38] R. El Khoury Moussa, M. Grossard, M. Boukallel, N. Chaillet and A. Hubert. Observation-Oriented Design of a Monolithic Piezoelectric Micro-actuator with Optimally Integrated Sensor. In *41st International Symposium on Robotics (ISR'2010)*, Munich, Germany, June 2010.

[39] J.Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie and N. Chaillet. Ni-Mn-Ga single crystal Shape Memory Alloy magneto-thermo-mechanical modeling. In *14th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM14)*, Poitiers, France, July 2010.

Conférences, colloques et workshops nationaux

[40] C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet. Changeur d'outils pour station de micromanipulation. In *RTP microrobotique du CNRS*, Lausanne, Suisse, Dec. 2004.

[41] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Perspectives des alliages à mémoire de forme magnétique pour la micro-robotique. In *RTP microrobotique du CNRS*, Lausanne, Suisse, Dec. 2004.

[42] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Les alliages à mémoire de forme magnétique (AMFM) : de la modélisation aux applications. In *Réunion du GDR Macs du CNRS GT Sysme*, Lyon, France, Avril 2005.

[43] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Modélisation hamiltonienne de systèmes non linéaires micro-mécatroniques. Application au développement et au contrôle d'actionneurs en AMFM. In *2èmes Journées Doctorales / Journées Nationales Macs du CNRS (JD-JN-MACS'07)*, Reims, France, July 2007.

[44] A. Hubert, J.Y. Gauthier, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent. Conversion d'énergie magnéto-thermo-mécanique dans les Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques. In *Réunion du GDR Robotique du CNRS GT manipulation multi-échelle*, Marseille, France, Sept. 2007.

[45] M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel, A. Hubert and C. Rotinat-Libersa. Towards the mechanical and control-oriented optimization of micromechatronic systems for robust control. In *Workshop Control issues in the micro/nano-world, (part of ICRA'2009)*, Kobe, Japan, May 2009.

[46] M. Grossard, M. Boukallel, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet and A. Hubert. Vers l'optimisation de l'intégration fonctionnelle des systèmes micromécatroniques pour la commande robuste. In *Réunion conjointe du GDR Macs GT Mosar, du GdR Micro et Nano Systèmes et du GdR Robotique GT Manipulation multi-échelle*, Besançon, France, May 2009.

[47] R. El Khoury Moussa, M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet and A. Hubert. Méthode des blocs sensitifs pour la synthèse optimale de mécanismes flexibles monolithiques à actionnement et mesure piézoélectriques intégrés. In *Congrès français de mécanique (CFM'09)*, Marseille, France, Août 2009.

Chapitre 2

Première thématique de recherche post-doctorale (2001 → 2002) : Microsystèmes pour la robotique

Mots-clés : *micro-robotique et micro-systèmes, technologies de salle blanche, modélisation analytique et numérique.*

Ces travaux de recherche ont été conduit à l'Université Technique de Braunschweig (TU Braunschweig, Allemagne) au sein de l'Institut des Microtechniques (IMT) dirigé par le Prof. S. Büttgenbach (<http://www.imt.tu-bs.de/>) et concernaient le développement de micro-robots. Ils s'insèrent parmi les thématiques de recherche de ce laboratoire tournant autour des microsystèmes et de leur fabrication :

- conception et modélisation de micro-systèmes, micro-actionneurs et micro-capteurs ;
- développement et optimisation de processus de microfabrication et techniques de salles blanches.

Au cours de cette période, mes principaux partenaires de recherche ont été :

- Prof. S. Büttgenbach, directeur de l'IMT ;
- S. Bütetfisch et M. Feldmann, *assistant-professors* et doctorants à l'IMT.

2.1 Contexte du travail

L'objectif de ce projet était d'étudier les possibilités d'utilisation des *micro-robots marcheurs* pour des applications de micro-positionnement. Ce projet émergeait d'une volonté de rapprochement au niveau recherche entre l'université de technologie de Compiègne (UTC) et l'université technique de Braunschweig (TUB). Alors qu'il existait des collaborations importantes au niveau

pédagogique entre les deux institutions (double diplôme d'ingénieur en conception mécanique/*Maschinenbau*), il n'existait pas de réels échanges au niveau de la recherche. Ce projet était une opportunité pour amorcer une collaboration internationale sur des sujets de recherche très porteurs entre les deux institutions. La conception de micro-robots était un sujet novateur autant pour l'UTC que le TUB et l'étude consistait à explorer les opportunités de conception et les avantages de cette nouvelle déclinaison de micro-manipulateur. La conception d'un tel dispositif nécessitait une double compétence, d'une part en terme de conception et de modélisation multiphysique que nous apportions via le LEC de l'UTC et d'autre part en terme de conception et production de micro-systèmes qu'apportait l'IMT du TUB.

Ce travail exploratoire nécessitait d'importantes compétences multidisciplinaires, tout d'abord en conversion d'énergie électromécanique, que je maîtrisais de par mon parcours à l'UTC, mais également en microtechnique dans lesquelles, je débutais. Certaines contraintes de conception – notamment technologiques – étaient déjà abordées dans le cahier des charges du projet¹ mais à part ces quelques suggestions, une très grande liberté m'a été laissée quant aux choix de conception tout au long de cette période de recherche.

Ce projet était novateur et très ambitieux puisqu'il nécessitait, à la fois une maîtrise des technologies de réalisation microtechnique (techniques dites *de salle blanche*) ainsi qu'une maîtrise des outils de conception et de modélisation des dispositifs d'actionnement pour le *micro* (actionneurs, capteurs, systèmes robotiques). Une vaste étude bibliographique fut d'abord entreprise pour disposer d'un état de l'art représentatif au niveau mondial des recherches similaires. Les résultats de cette étude ont souligné l'aspect particulièrement innovant de ce thème et ont plus particulièrement orienté mes travaux vers des micro-structures résonantes réalisées en silicium et actionnées par interaction de champs électromagnétiques. La structure micro-robotique proposée correspondait à une structure de robot parallèle plan utilisant des structures flexibles déformables comme articulation et un actionnement magnétique à l'aide de micro-bobines planes. Cette structure présentait l'avantage de pouvoir générer des déplacements assez importants à l'échelle micro et suffisamment rapides pour atteindre des vitesses acceptables, tout en conservant un bon rendement et en utilisant des technologies maîtrisées et réalisables à l'IMT. Les avantages des micro-systèmes pour le développement de dispositifs de micro-manipulation sont désormais bien connues et de nombreux dispositifs sont maintenant disponibles. Cependant, à l'époque, très peu de systèmes véritablement fonctionnel existaient et leur développement n'en était qu'à ses débuts. Un très bon article de W. Trimmer [Tri89] d'où nous avons extraits ces quelques lignes résume bien ces avantages :

Personal experiences have led me to an appreciation of using small mechanical systems to handle small parts. A system on which I collaborated used a meter-sized robot to handle millimetre-sized chips with an accuracy of about ten microns. this macro system had several disadvantages. The forces needed to move the robot's mass were

¹Comme par exemple le choix d'un actionnement électromagnétique qui permettait de profiter des technologies précédemment mises au point à l'IMT.

much larger than the forces that would destroy the chip, and the robot could easily crush the chip. A lot of time was spend building fixturing that was compliant yet still maintained the high accuracy needed. A one centimetre robot would have about one millionth the mass, and hence require force roughly a millionth of those needed to move the macro robot. Temperature change of the macro robot were also troublesome. A one degree change of temperature led to about 10 microns expansion, the total error budget of our task. The larger robot also spent most of the time moving the chip from one work station to another. Because of the size of the robot and associated equipment, these workstations had to be several feet apart. If a centimetre-size robot and associated equipment could have been used, the distance and transit times could have been dramatically reduced. Finally, finding space for this robot and its four by six foot table in a clean room was difficult. This thousand-to-one difference between the size of the macro robot and the chip is equivalent to using a bulldozer to move sugar cubes. The corresponding accuracy requirement is equivalent to positioning the sugar cube to within a hair's width. On the larger scale of the bulldozer, it is easier to see the advantages of using tooling commensurate with the part being handled.

Le cahier des charges de ce projet était de concevoir un micro-robot *insecte* avec un nombre important de pattes tel un *mille-pattes*. Ce projet voulait utiliser de vrai pattes et non une locomotion de type stick-slip comme nous en trouvons beaucoup en micropositionnement. Pour réaliser une vraie patte, nous devons utiliser au moins deux degrés de liberté (2 DDLs) par patte puisqu'une patte doit avoir un mouvement circulaire ou elliptique (cf FIG. 2.1 (a)) et cela ne peut être réalisé par moins de 2 DDLs. Utiliser plus que 2 DDLs est également possible² mais conduirait à un dispositif plus complexe que celui que nous avons retenu (cf FIG. 2.1 (b)).

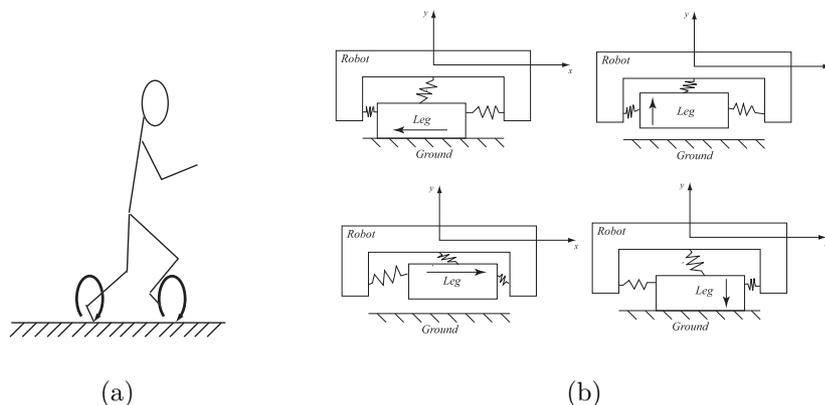


FIG. 2.1 – (a) Mouvement d'un pied au cours d'une étape de marche, (b) Marche discrète d'un robot à pattes.

L'utilisation d'un mouvement mécanique résonant comme en locomotion élasto-dynamique [LGF⁺98] [CGG98] est très intéressant d'un point de vue

²Les humains en utilisent au moins 4 : hanche, genoux, chevilles, orteils.

énergétique et c'est ce que nous avons tenté de faire. En un sens, nous avons essayé de développer une version discrète (à nombre de DDLs fini), d'un moteur ultrasonore qui est une sorte de robot multipattes avec une infinité – continuum – de pattes et qui utilise un principe de résonance mécanique (cf FIG. 2.2). Pour ce type de moteur, le stator est excité par des actionneurs – généralement piézoélectriques – distribué sur le stator annulaire qui excite une déformation propre – naturelle – qui se propage comme une onde progressive dans la direction positive à la vitesse $\frac{\omega}{k}$ avec ω la pulsation d'excitation et k le nombre d'onde de la vibration annulaire. Cette onde est utilisée pour déplacer un rotor qui est en contact avec le stator. La pièce rotorique n'est pas transportée par l'onde³ mais la particule en surface a un mouvement elliptique comme décrit dans la FIG. 2.2 (b) et ce mouvement déplace par frottement le rotor dans le sens inverse de l'onde.

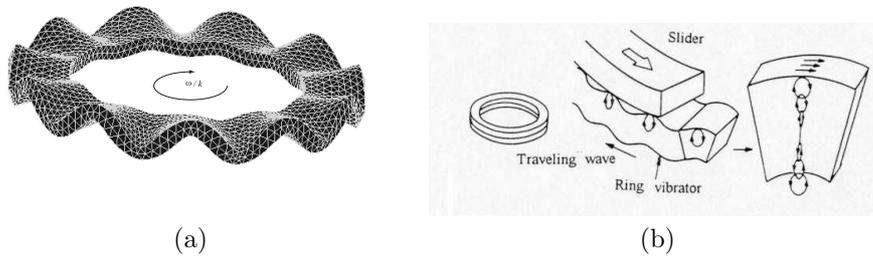


FIG. 2.2 – (a) Anneau utilisé comme stator d'un moteur à ultrasons (déformation de vibration très exagérée), (b) Principe du moteur à ultrasons [Uch97].

Le principe du moteur ultrasonore utilise donc le mouvement résonant d'une structure afin de déplacer un rotor en contact. La conception de notre micro-robot s'est inspirée de ce principe mais à la place d'un mouvement continu – une onde dans un solide continu –, nous en avons conçu une version discrète à l'aide d'un nombre important de pattes. Ainsi, si nous plaçons un nombre important de pattes régulièrement espacés et micro-fabriquées qui peuvent avoir un mouvement elliptique (cf FIG. 2.1 (b)), nous obtenons une version discrète de moteur à ultrasons. Le mouvement de chaque patte doit être déphasé des pattes suivantes afin d'obtenir une enveloppe sinusoïdale qui couvrira toutes les extrémités des pattes. Pour obtenir ce comportement, chaque patte doit être contrôlée à la même fréquence que les autres mais avec un déphasage adéquat [GFGG99] [CMGG99].

2.2 Conception et modélisation des structures mécaniques

La première chose à réaliser dans ce projet était de concevoir une structure mécanique vibrante dont un point en contact présentait un déplacement elliptique ou circulaire. De plus cette structure devait être miniaturisable et fabriquée avec des technologies de salle blanche disponible à l'IMT. L'utilisation

³De même que les particules d'eau d'une vague ne sont pas transportés par la vague.

de ces techniques permettant d'en fabriquer un grand nombre à faible coût et en batch dans l'esprit des micro-systèmes. La forme de la structure élémentaire retenu (1 patte) est représenté sur la FIG. 2.3. Les ressorts permettant la mise en résonance de cette structure sont inspirés de structure silicium précédemment réalisés à l'IMT (cf FIG. 2.4).

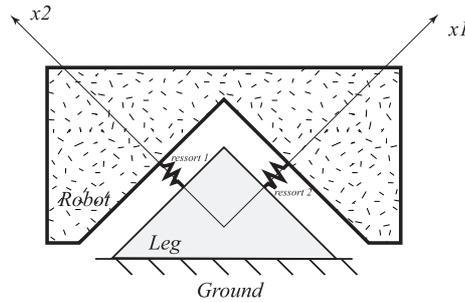


FIG. 2.3 – Structure élémentaire d'une patte du micro-robot.

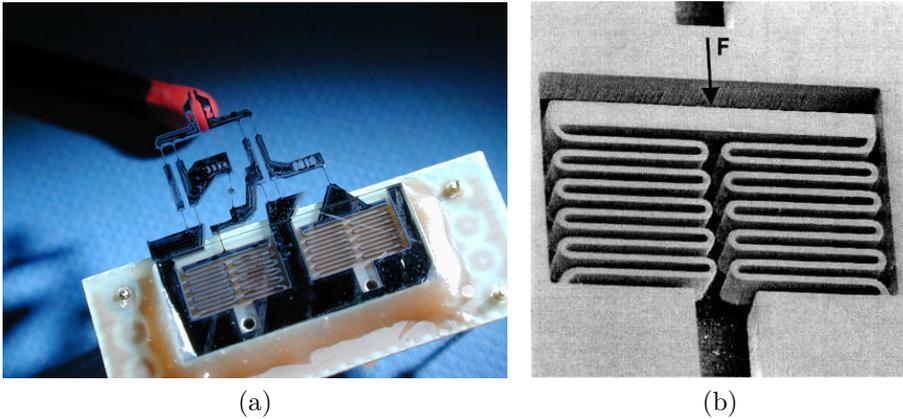


FIG. 2.4 – Exemples de micro-ressorts : (a) photographie d'un gripper en silicium incluant deux micro-ressorts, (b) détail d'un ressort (photographie MEB).

Afin de concevoir ce micro-robot, un modèle dynamique de la structure devait être proposé et ce modèle devait être comparé à des calculs numériques réalisés à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis ANSYS. Cette modélisation devait être capable de fournir les caractéristiques dynamiques principales de la structure. En effet, lorsque nous ne disposons pas d'un système automatisé qui permette l'extraction automatique de modèles d'ordre réduit à partir des structures 3D issues de la CAO, il est nécessaire de concevoir ces outils pour disposer de modèles utilisables pour la commande et la simulation du dispositif [MFRW00].

Selon le degré de précision recherché pour les résultats de simulation de la modélisation, un dispositif réel peut être modélisé par deux classes de modèles qui ont été alternativement utilisées dans tous nos travaux de recherche et sur lesquels nous reviendrons plus en détail dans la partie synthèse de ce mémoire :

- modélisation sous la forme de systèmes à paramètres localisés conduisant à des équations différentielles ordinaires ;
- modélisation sous la forme de systèmes à paramètres répartis conduisant à des équations aux dérivées partielles.

En première approximation, la modélisation d'une structure mécanique peut être obtenue en décomposant la structure réelle en un nombre fini de sous-systèmes interconnectés et correspondant chacun à un seul degré de liberté mécanique. Ainsi, les propriétés essentielles d'un système continu (comportant un nombre infini de degré de liberté) peuvent être obtenues avec une précision suffisante en le remplaçant par un système approchant n'ayant qu'un nombre fini de degrés de liberté.

La modélisation analytique des mouvement du pied dans le plan x_1x_2 (ou xy) a utilisé des modèles à paramètres localisés où chaque *poutre* de ressort a été considéré comme un corps rigide et chaque élément de flexion (*Flexible Hinges*, voir [HBC97] et [HABC99] pour des cas d'utilisation classique) a été considéré comme un ressort de torsion (cf FIG. 2.5). La rigidité de flexion des ressorts a été estimée à l'aide d'essais expérimentaux réalisés sur des structures en silicium réalisées à l'IMT grâce à une technologie RIE (*Reaction Ion Etching*) [BB01b]. Ces essais ont utilisé un nouveau capteur de force développé également à l'IMT [BWB01] et dédié à la mesure de force sur des MEMS. Pour les déformations angulaires envisagées, le comportement observé était pratiquement linéaire et une modélisation par raideurs de torsion discrètes était donc parfaitement pertinente.

Pour la modélisation à paramètres localisés, j'ai utilisé des méthodes de Lagrange en associant 3 DDLs à chaque corps rigide, deux déplacements linéaires x et y et une rotation θ autour de z . Ces DDLs ont été référencées par rapport à un système de coordonnées situé au centre de gravité de chaque corps rigide. Si nous avons n_c corps rigides, nous obtenons $3n_c = N$ coordonnées généralisées. En utilisant le principe de Hamilton et en définissant correctement des énergies potentielles \mathcal{V} , cinétiques \mathcal{T} et de dissipation \mathcal{D} [Gol80] [GR96] [Lan86], j'ai pu en déduire les équations dynamiques de Lagrange qui modélisent le comportement du système réel à l'aide d'un nombre fini de degrés de liberté. La variable q_i représente la coordonnée généralisée associées à un des degrés de liberté mécanique du système approximé et f_i la force extérieure qui lui est appliquée :

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{T}}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \mathcal{T}}{\partial q_i} - \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial q_i} - \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{q}_i} + f_i = 0 \quad (2.1)$$

Pour des systèmes sans amortissement, l'analyse du système discret correspondant peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[M] \cdot \ddot{\mathbf{q}}(t) + [K] \cdot \mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.2)$$

où $\mathbf{q}(t)$ et $\mathbf{F}(t)$ correspondent aux vecteurs des coordonnées et forces généralisées du système discrétisé en sous-systèmes à paramètres localisés.

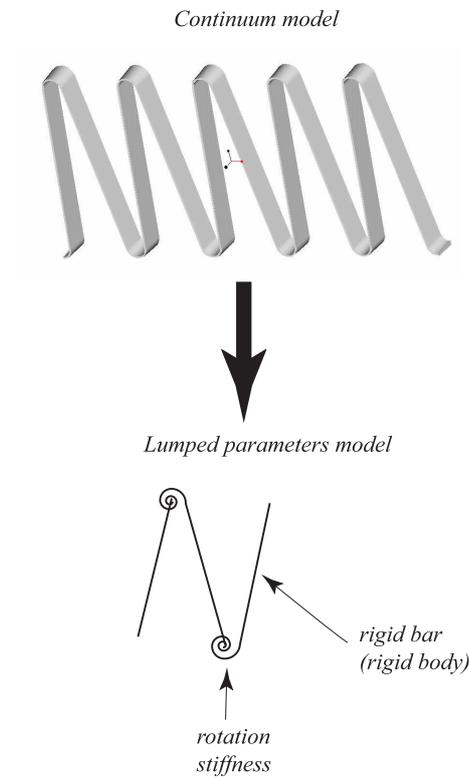


FIG. 2.5 – Décomposition d’une structure continue en une interconnexion de systèmes à paramètres localisés.

La modélisation précédente correspond à un système dynamique sans contrainte, cependant, les différents degrés de libertés associés aux barres rigides sont interconnectés par la présence des ressorts de torsion et ainsi ces N coordonnées généralisées ne sont pas toutes libres car elles sont en fait liées ensemble à chaque extrémité d’un corps rigide où un ressort de torsion ne permet qu’un mouvement de rotation. Cela conduit à des contraintes géométriques qui réduisent le nombre de *vrais* DDLs. Ces contraintes ont été prises en compte dans les équations à l’aide d’une méthode de multiplicateurs de Lagrange [Lan86]. Ces contraintes stipulent qu’au ressort d’indice k séparant le corps rigide k du corps rigide $k + 1$, les déplacements linéaires des extrémités sont les mêmes lorsqu’ils sont exprimés dans le repère lié à k ou dans le repère lié à $k + 1$. Pour notre projet, nous nous intéressons uniquement à de la locomotion élasto-dynamique et les mouvements sont alors considérés comme des petits mouvements autour d’un point d’équilibre (problème de vibration). Nous pouvons alors utiliser une linéarisation des fonctions cos et sin autour de zéros – position de repos – ce qui permet d’exprimer les équations de contraintes $c_{k,x} = 0$ et $c_{k,y} = 0$ comme des

fonctions linéaires des coordonnées $x_k, y_k, \theta_k, x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}$:

$$\begin{cases} c_{k,x} = x_k - v_{k,f} \cdot \theta_k - x_{k+1} + v_{k+1,i} \cdot \theta_{k+1} = 0 \\ c_{k,y} = y_k + u_{k,f} \cdot \theta_k - y_{k+1} - u_{k+1,i} \cdot \theta_{k+1} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Ces fonctions de contrainte étaient ensuite introduites dans les équations dynamiques à l'aide des multiplicateurs de Lagrange $\lambda_{k,x}$ et $\lambda_{k,y}$. En utilisant une écriture matricielle pour définir les différentes grandeurs, nous obtenions :

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \cdot \{\dot{q}\}^T \cdot [M] \cdot \{\dot{q}\} \quad (2.4)$$

$$\mathcal{V} = \frac{1}{2} \cdot \{q\}^T \cdot [K] \cdot \{q\} \quad (2.5)$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V} - \{\lambda\}^T \cdot \{c\} \quad (2.6)$$

Ce qui nous permettait d'obtenir les équations de Lagrange suivantes écrites sous forme matricielle et en notant les équations de contrainte à l'aide d'une matrice $[A]$:

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\lambda\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [A]^T \\ [A] & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{\lambda\} \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.7)$$

En utilisant la technique des multiplicateurs de Lagrange, nous ne réduisons pas, en fait, le nombre de degrés de liberté mais au contraire, nous l'augmentons du nombre de contraintes introduites. À première vue, cela peut sembler *contre-productif* mais il n'en est rien car les équations sont alors beaucoup plus faciles à obtenir de manière systématique et les multiplicateur de Lagrange ont une signification physique très utile au niveau de la conception puisqu'en fait ils sont directement liés aux forces généralisée nécessaires pour maintenir la contrainte active. Ils sont donc une image des efforts internes de contraintes au niveau des ressorts de torsion reliant deux barres supposée rigides. La technique des multiplicateurs de Lagrange est une technique particulièrement efficace au niveau de l'optimisation sous contrainte, cependant, au niveau de la modélisation dynamique, elle introduit des difficultés calculatoires puisqu'au lieu d'obtenir en fin de modélisation un jeu d'équations différentielles ordinaire du second ordre, nous obtenons un jeu d'équations algèbro-différentielles qui est en général beaucoup plus délicat à résoudre. Cependant pour notre modélisation, nous verrons que les contraintes étant des contraintes linéaires, il est possible de transformer ce problème pour le ramener à un problème d'équations différentielles ordinaires.

Pour transformer le système d'équations algèbro-différentielles en un système d'équations différentielles, nous avons utilisé une méthode assez similaire à celle développé par Hurty (*Component Mode synthesis*) [Hur60] [Hur65] et appliquée par Meirovitch [Mei97] en dynamique des structures pour l'assemblage de sous-structures. Dans la méthode originale, l'assemblage à l'aide de contraintes se fait entre des sous-structures flexibles (déformable et de type milieu continu) alors que dans notre version, elle se fait entre des sous-structures rigides (non déformable et de type systèmes discrets), cependant la méthode et l'utilisation est très similaire. Ces méthodes d'assemblage sont très utilisés pour faire de la réduction d'ordre de systèmes très complexes ou lorsque l'études des différents

sous-systèmes est confiée à des équipes différentes qui doivent ensuite mettre en commun leurs travaux de modélisation. Dans le principe, la matrice $[A]$ des contraintes définie précédemment doit être divisée en deux parties : $[A_i]$ une matrice liée aux coordonnées indépendantes $\{q_i\}$ (nombre de DDLs moins le nombre de contraintes); $[A_d]$ une matrice carré non singulière liée aux coordonnées dépendantes $\{q_d\}$ (nombre de contraintes) :

$$[A] \cdot \{q\} = \begin{bmatrix} [A_i] & [A_d] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

Comme $[A_d]$ est non singulière, nous pouvons exprimer $\{q_d\}$ comme une fonction de $\{q_i\}$:

$$\{q_d\} = -[A_d]^{-1} \cdot [A_i] \cdot \{q_i\} \quad (2.9)$$

et en sous divisant les matrices $[M]$ et $[K]$ en sous matrices :

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} = \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_i\} \\ \{\ddot{q}_d\} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[K] \cdot \{q\} = \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Nous obtenons le système suivant :

$$\begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_i\} \\ \{\ddot{q}_d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [A_i]^T \\ [A_d]^T \end{bmatrix} \cdot \{\lambda\} = 0 \quad (2.12)$$

Nous pouvons alors manipuler la seconde ligne du système pour obtenir les multiplicateurs de Lagrange :

$$\begin{aligned} \{\lambda\} = & -([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([M_{21}] \cdot \{\ddot{q}_i\} - [M_{22}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \cdot \{\ddot{q}_i\} \right. \\ & \left. + [K_{21}] \cdot \{q_i\} - [K_{22}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \cdot \{q_i\} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

et enfin la première ligne pour obtenir le système réduit ne dépendant que de $\{q_i\}$:

$$[M_{modif}] \cdot \{\ddot{q}_i\} + [K_{modif}] \cdot \{q_i\} = 0 \quad (2.14)$$

où nous avons défini $[M_{modif}]$ et $[K_{modif}]$ comme :

$$\begin{aligned} [M_{modif}] = & [M_{11}] - [M_{12}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([M_{21}] - [M_{22}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} [K_{modif}] = & [K_{11}] - [K_{12}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([K_{21}] - [K_{22}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Lorsque nous voulons simuler et analyser le comportement dynamique de ce système différentiel, une des principales difficultés vient du couplage entre les différentes coordonnées car les matrices $[M_{modif}]$ et $[K_{modif}]$ sont en général *plutôt pleines*, c'est-à-dire non diagonales. Si ce système d'équations différentielles pouvait être découplé, nous aurions des matrices diagonales pour la masse et la raideur et ainsi chaque équation (ligne du système d'équation)

deviendrait similaire à un système à un seul degré de liberté dont le comportement est indépendant de celui des autres degrés de liberté. Ce découplage est possible, sous certaines hypothèses à l'aide d'un changement de coordonnées vers la base *modale* ou *propre* du système. Cette technique est bien connue des mathématiciens et des automaticiens qui l'utilisent pour faire de l'analyse de systèmes dynamiques [Chi06] et de la commande par placement de pôles [Fri86]. Le processus consistant à transformer le système couplé en un jeu d'équations découplées est appelé l'*analyse modale* en mécanique vibratoire [Ewi00]. Il est intéressant de citer un paragraphe de l'ouvrage de C. Lesueur [Les88] qui fait une très bonne description de l'intérêt que peuvent apporter les techniques de décomposition et d'analyse modale en vibration :

Pourquoi passer dans la base propre, ce qui alourdit la démarche ? Au stade projet, cette méthodologie a l'avantage de faire apparaître les déplacements propres à chaque configuration et les pulsations propres ; il est donc possible d'éviter les résonances si l'excitation est connue ou de placer les forces excitatrices aux endroits où le vecteur propre est voisin de zéro (nœuds de vibrations). De sorte que sans faire de calculs de réponse, l'obtention du schéma modal (fréquences propres, vecteurs propres et caractéristiques généralisées M_{ii} , K_{ii} , C_{ii}), rend possible une action souvent décisive.

Cette projection modale nous permet au final de déterminer la réponse dynamique de la structure sur chacune des coordonnées modales sans avoir à inverser tout le système dynamique couplé comme c'est le cas pour le choix d'une base autre que la base propre. Pour expliquer le fonctionnement de ce changement de base, nous allons l'appliquer à l'équation (2.2) pour des simplifications de notations bien qu'en réalité nous avons dû l'appliquer sur le système modifié, c'est-à-dire sur celui qui tenait compte des contraintes géométriques d'interconnexion entre les différents sous-systèmes de la structure mécanique.

Pour résoudre le système différentiel pour des petites oscillations *libres* en passant dans la base modale, c'est-à-dire en partant de l'équation (2.2) sans excitation ($\mathbf{F}(t) = 0$), nous cherchons une solution particulière dans laquelle toutes les coordonnées généralisées suivent, à une constante près, la même loi temporelle :

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{Q} \cdot \phi(t) \quad (2.17)$$

\mathbf{Q} est un vecteur de constantes constituant ce que l'on appelle la *forme propre du mouvement*⁴. En remplaçant cette solution dans l'équation libre, nous obtenons :

$$\ddot{\phi}(t) \cdot [M] \cdot \mathbf{Q} + \phi(t) \cdot [K] \cdot \mathbf{Q} = 0 \quad (2.18)$$

Soit encore, l'égalité :

$$[K] \cdot \mathbf{Q} = -\frac{\ddot{\phi}(t)}{\phi(t)} \cdot [M] \cdot \mathbf{Q} \quad (2.19)$$

Comme $[M]$ et $[K]$ sont non-nulles et que cette équation doit être vérifiée quel que soit t , les seules solutions non-triviales conduisent à :

$$-\frac{\ddot{\phi}(t)}{\phi(t)} = \lambda_p \quad (2.20)$$

⁴Propre dans le sens que le rapport de deux coordonnées est indépendant du temps et toujours égal au rapport des éléments correspondants de \mathbf{Q} [GR96].

et

$$[K] \cdot \mathbf{Q} = \lambda_p \cdot [M] \cdot \mathbf{Q} \quad (2.21)$$

Pour des raisons de *stabilité* de la solution, λ_p est en pratique réelle et positive et nous pouvons poser $\lambda_p = \omega^2$.

1. l'analyse de $\ddot{\phi}(t) + \omega^2 \cdot \phi(t) = 0$ nécessite une dépendance *harmonique* de $\phi(t)$ par rapport à la variable t :

$$\phi(t) = A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t) \quad (2.22)$$

2. l'analyse de $[K] \cdot \mathbf{Q} = \omega^2 \cdot [M] \cdot \mathbf{Q}$ nous conduit à résoudre le problème $([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \mathbf{Q} = 0$ qui n'est autre qu'un problème de *valeurs propres* [CH89]. L'équation $\det([K] - \omega^2 \cdot [M]) = 0$ est appelée l'*équation aux valeurs propres* ω_i^2 . Les vecteurs \mathbf{Q}_i sont les *vecteurs propres* – ou *modes propres* – associés à chacune des valeurs propres ω_i^2 . Le nombre de valeurs propres est égal à la dimension N de $[\mathbf{Q}]$ donc au nombre de coordonnées généralisées.

La recherche des vecteurs propres revient simplement à trouver la *base* qui diagonalise⁵ le système (2.2) sans excitation. Les solutions de ce système avec excitation sont alors obtenues non pas en résolvant *en bloc* le système *couplé* d'ordre N mais en résolvant un système *équivalent* de N systèmes d'ordre un découplés. La base des N vecteurs propres \mathbf{Q}_i est une base complète dans laquelle, il est possible d'exprimer les solutions \mathbf{q} . En appelant η les coordonnées dans la *base modale* :

$$\mathbf{q}(t) = [\mathbf{Q}] \cdot \eta(t) \quad (2.23)$$

où $[\mathbf{Q}] = [\mathbf{Q}_1 \ \mathbf{Q}_2 \ \dots \ \mathbf{Q}_N]$ est la *matrice modale*, \mathbf{Q}_i est le vecteur des *déformées modales* – vecteur propre – et enfin $\eta(t)$ est le vecteur des *coordonnées modales*, en reportant dans (2.2), nous trouvons :

$$[M] \cdot [\mathbf{Q}] \cdot \ddot{\eta}(t) + [K] \cdot [\mathbf{Q}] \cdot \eta(t) = \mathbf{F}(t) \quad (2.24)$$

En pré-multipliant les deux cotés de l'équation (2.24) par la transposée de la matrice modale, $[\mathbf{Q}]^T$ et en utilisant les propriétés d'orthogonalité de la matrice modale qui se traduisent par les relations [TYW74] [Mei97] [GR96] :

$$\begin{aligned} [\mathbf{Q}]^T \cdot [M] \cdot [\mathbf{Q}] &= [M_i] \\ [\mathbf{Q}]^T \cdot [K] \cdot [\mathbf{Q}] &= [K_i] \end{aligned}$$

avec $[M_i]$ et $[K_i]$ matrices diagonales, nous obtenons le jeu d'équations indépendantes suivant :

$$[M_i] \cdot \ddot{\eta}(t) + [K_i] \cdot \eta(t) = [\mathbf{Q}]^T \cdot \mathbf{F}(t) = \Gamma(t) \quad (2.25)$$

Nous nous ramenons donc à un système composé de N équations différentielles indépendantes, chacune traduisant le mouvement d'un système mécanique à un degré de liberté (M_{ii}, K_{ii}) , excité par une force généralisée $\Gamma_i(t)$. Comme

⁵Le système n'est en fait diagonalisable que si et seulement si tous les blocs de Jordan après le changement de base sont de dimension un au maximum. Si ce n'est pas le cas, des valeurs propres multiples sont associées à des sous-espaces vectoriels de dimensions strictement supérieures à 1 et l'analyse est alors un peu plus complexe [Chi06]. Ce phénomène n'apparaît heureusement qu'assez rarement en mécanique vibratoire.

nous savons qu'un vecteur propre est défini à une constante près, en choisissant judicieusement cette constante, nous pouvons nous arranger pour obtenir $[M_i]$ égale à la matrice identité et les vecteurs propres sont normalisés par rapport à la masse [TYW74]. Nous obtenons dans ce cas le système suivant pour chaque indice i :

$$\ddot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \cdot \eta_i(t) = \Gamma_i(t) \quad (2.26)$$

La réponse de déplacement modal – sur chacun des modes – correspond à la fonction de réponse d'un système du second ordre. Sous excitation harmonique, la réponse d'un tel système est bien connue et facile à déterminer.

Cette approche permet de traiter les problèmes vibratoires en deux temps :

1. éviter les coïncidences fréquentielles entre la fréquence propre d'un mode et les forces projetées sur ce mode – forces modales – pour l'atténuation de vibrations ou au contraire les favoriser pour la locomotion élasto-dynamique comme nous voulions le faire dans ce projet. Une coïncidence conduit à une forte résonance, limitée seulement par l'amortissement de la structure⁶.
2. prédéterminer les sources de bruits résiduelles – hors résonances. Dans ce cas, l'amortissement joue un rôle faible dans la réponse puisque les coefficients de résonance étant assez faibles pour les structures mécaniques envisagées, leur influence est faible loin des résonances.

Pour connaître la réponse dans la base initiale, c'est-à-dire dans la base des coordonnées $\mathbf{q}(t)$, il suffit de ramener les coordonnées $\eta(t)$ calculées par résolution de (2.26) de la base modale vers la base initiale, c'est-à-dire en utilisant l'équation inverse de (2.23) :

$$\eta(t) = [\mathbf{Q}]^{-1} \cdot \mathbf{q}(t) \quad (2.27)$$

Lorsque le système comporte un amortissement, l'équation dynamique est de la forme :

$$[M] \cdot \ddot{\mathbf{q}} + [C] \cdot \dot{\mathbf{q}} + [K] \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (2.28)$$

Le comportement est alors plus complexe que le précédent et si nous notons ω_i , \mathbf{Q}_i et η_i les valeurs, vecteurs et coordonnées modales du problème sans amortissement et que nous reconstruisons l'équation modale à partir de ces paramètres, nous obtenons :

$$[M_i] \cdot \ddot{\eta}(t) + [\mathbf{Q}]^T \cdot [C] \cdot [\mathbf{Q}] \cdot \dot{\eta}(t) + [K_i] \cdot \eta(t) = \Gamma(t) \quad (2.29)$$

Puisque les amortissements peuvent être répartis d'une manière très différente des masses et des raideurs, les coefficients $\mathbf{Q}_i \cdot C_{ij} \cdot \mathbf{Q}_j$ sont en général non nuls, ce qui fait que l'approche modale perd beaucoup de son intérêt puisque les équations modales restent couplées par les termes d'amortissements. Les seules méthodes de résolution de l'équation (2.29) sont alors des méthodes d'intégrations directes. Lors de la prise en compte des amortissements, les méthodes modales ne gardent un intérêt que pour des amortissements faibles où l'hypothèse d'amortissement diagonal est valable. Cette hypothèse stipule que les forces de dissipation sont réparties comme les forces d'inertie ou les forces

⁶Notons que le calcul exact des réponses proches d'une résonance nécessite la détermination ou l'estimation expérimentale des coefficients d'amortissements.

élastiques, ce qui revient à négliger les termes $\mathbf{Q}_i \cdot C_{ij} \cdot \mathbf{Q}_j$ lorsque $i \neq j$. Nous obtenons alors une matrice d'amortissement diagonale. Cette hypothèse ne repose pas vraiment sur une justification physique solide mais il peut être montré qu'elle est souvent acceptable pour des structures faiblement dissipatives (cf. [GR96]). En notant $[C_i]$ la matrice ne contenant que les termes diagonaux de $[\mathbf{Q}]^T \cdot [C] \cdot [\mathbf{Q}]$, on se ramène au système dans la base modale :

$$[M_i] \cdot \ddot{\eta}(t) + [C_i] \cdot \dot{\eta}(t) + [K_i] \cdot \eta(t) = \Gamma(t) \quad (2.30)$$

qui correspond à N systèmes différentiels du second ordre à un seul degré de liberté découplé. La manière classique pour construire cette matrice d'amortissement diagonale dans la base des modes propres consiste à réaliser une somme pondérée des termes de masses et de raideurs appelé un *amortissement proportionnel*.

La méthode décrite précédemment a été appliquée pour des systèmes à paramètres localisés, c'est-à-dire pour des systèmes dynamiques de dimension finie. Cependant elle peut être également adaptée aux dimensions infinies en utilisant des outils de l'analyse fonctionnelle, les changement de bases en dimension finie (projection sur la base des vecteurs propres) étant remplacées par des projections sur une bases de dimension infinie. Lorsque les systèmes mécaniques sont suffisamment simples, ces calculs peuvent être conduits de manière analytique en appliquant des méthodes variationnelles. Lorsque les systèmes mécaniques sont plus compliqués, il est nécessaire de faire une projection sur une base tronquée – approximation numérique – comme pour la méthode des résidus pondérés. Les techniques de projection sur une nouvelle base sont également à l'origine de la méthode des éléments finis à la différence que les projections se font sur des bases nodales (noeuds du maillage) et non sur la base propre du système dynamique comme nous l'avons fait dans ces travaux⁷.

Dans notre modélisation, le problème de valeur propre devait bien évidemment être appliqué sur le problème modifié en résolvant alors le problème de valeurs propres $\{[K_{modif}] - \omega^2 \cdot [M_{modif}]\} \cdot \{Q_i\}$ pour obtenir les modes propres – déformées modales – $\{Q_{i,k}\}$ pour chaque fréquence propre ω_k . Les modes propres des variables dépendantes étaient alors obtenues en utilisant l'équation (2.9).

Ces résultats ont été programmés à l'aide du logiciel matlab et ont été comparés à des résultats issus d'une analyse par éléments finis (ANSYS) et à des résultats expérimentaux lorsque la structure réelle était disponible. Cette étude a été conduite pour les trois configurations géométriques représentées sur la FIG. 2.6.

Un exemple de résultats est reporté sur la FIG. 2.7 qui montre les très bon résultats de notre approximation par systèmes à paramètres localisés en comparaison d'une modélisation par éléments finis qui comporte un nombre de degrés de liberté bien supérieur.

⁷La méthode des éléments finis s'utilise cependant pour des systèmes à paramètres répartis et donc de dimension infinie (système continu) et non sur des systèmes de dimensions finis comme nous avons dans cette modélisation. La base nodale est alors une base tronquée – approximée – puisqu'elle est de dimension finie au contraire du système original, d'où le nom de cette méthode.

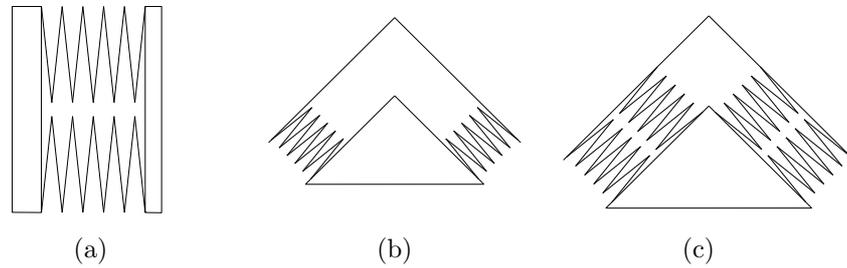


FIG. 2.6 – Description des différentes géométries étudiées.

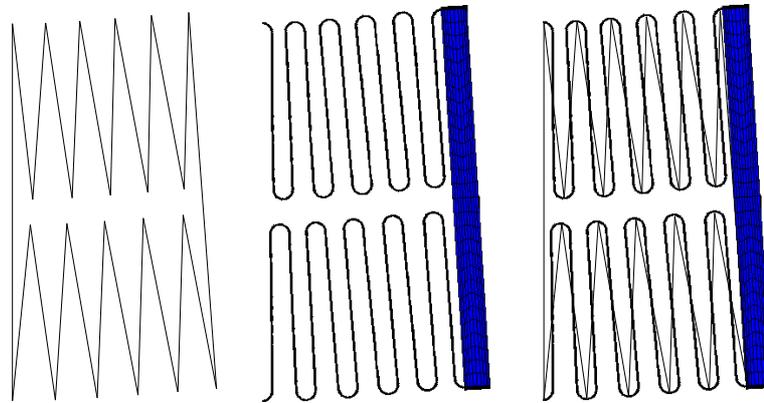


FIG. 2.7 – Comparaison d'une déformée modale pour : (a) méthode basée sur un système à paramètres localisés et programme matlab, (b) Méthode des éléments finis et logiciel ANSYS, (c) superposition des deux déformées.

Les trois premiers modes propres calculés à l'aide de Matlab sont reportés sur la FIG. 2.8. Ces modes correspondent à :

- Mode 1 : déplacement du pied dans la direction $\vec{e}_x + \vec{e}_y$, à la fréquence propre $f_1 = 62$ Hz (résultat ANSYS : 59,6 Hz) ;
- Mode 2 : déplacement du pied dans la direction $\vec{e}_x - \vec{e}_y$, à la fréquence propre $f_1 = 91$ Hz (résultat ANSYS : 67,5 Hz) ;
- Mode 3 : déplacement du pied dans la direction $\vec{\theta}$, à la fréquence propre $f_1 = 191$ Hz (résultat ANSYS : 120 Hz).

Notons que les résultats au niveau des fréquences sont moins concordants pour les modes d'ordre plus élevé où l'hypothèse de corps rigide n'est plus parfaitement exacte⁸ mais ce modèle à paramètres localisés pourrait être fortement amélioré en divisant chaque barre en deux corps rigides liés par un ressort. Les modes 3D (déplacement dans la direction z) ne sont pas calculables par le modèle à paramètres localisés puisque nous avons fait l'hypothèse d'un mouvement plan alors qu'ANSYS permet de les calculer puisqu'il s'agit d'un logiciel

⁸Mais les modes d'ordre élevé ont une influence moindre sur la dynamique forcée du système à base fréquence.

3D. Nous constatons bien qu'une combinaison des déformées modales suivant le premier et le second mode de vibration (direction $\vec{e}_x + \vec{e}_y$ et direction $\vec{e}_x - \vec{e}_y$) permet effectivement d'obtenir un déplacement circulaire ou elliptique du pied du micro-robot.

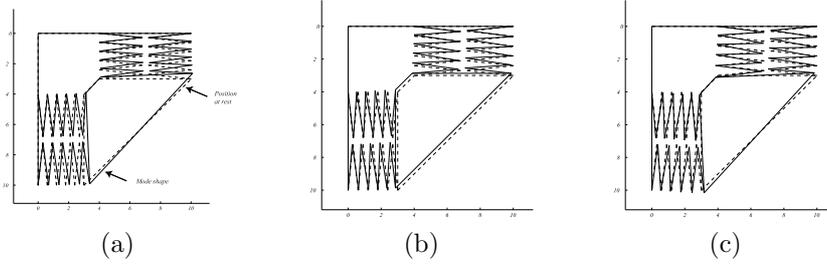


FIG. 2.8 – Description des trois premiers modes propres d'un pied du micro-robot.

Les calculs précédents ont été ensuite modifiés pour tenir compte d'efforts extérieurs appliqués sur la structure. Cela s'est fait en imposant deux types différents de conditions aux limites :

- imposition d'une coordonnée généralisée : nous imposons un déplacement spécifique ($q = q^0 \neq 0$) ou nous bloquons un déplacement ($q = 0$) sur certaines coordonnées. Il s'agit d'une condition aux limites de type Dirichlet ;
- imposition d'une force généralisée : nous imposons une force externe sur un corps rigide ($f = f^0 \neq 0$) ou nous avons un mouvement libre ($f = 0$).

Il s'agit d'une condition aux limite de type Neumann.

Les coordonnées généralisées sont alors non plus décomposées en deux (dépendantes q_d et indépendantes q_i) mais en trois groupes (dépendantes q_d , indépendantes q_i ou forcées), ce qui permet de modifier les équations dynamiques précédentes. La matrice des contraintes doit alors également être divisée en trois parties :

$$[A] \cdot \{q\} = \begin{bmatrix} [A_f] & [A_i] & [A_d] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q_f\} \\ \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

où $[A_d]$ est encore une matrice carré non singulière. Cela permet d'exprimer la relation liant $\{q_d\}$ aux deux autres types de coordonnées :

$$\{q_d\} = -[A_d]^{-1} \cdot \left([A_f] \cdot \{q_f\} + [A_i] \cdot \{q_i\} \right) \quad (2.32)$$

En sous-divisionnant les matrices $[M]$ et $[K]$ en 9 sous-matrices (3×3) et $\{f\}$ en 3 sous-vecteurs, cela donne les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] & [M_{13}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] & [M_{23}] \\ [M_{31}] & [M_{32}] & [M_{33}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_f\} \\ \{\ddot{q}_i\} \\ \{\ddot{q}_d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] & [K_{13}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] & [K_{23}] \\ [K_{31}] & [K_{32}] & [K_{33}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{q_f\} \\ \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [A_f]^T \\ [A_i]^T \\ [A_d]^T \end{bmatrix} \cdot \{\lambda\} = \begin{Bmatrix} \{f_f\} \\ \{f_i\} \\ \{f_d\} \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

En manipulant la troisième ligne du système, on peut exprimer $\{\lambda\}$ comme :

$$\begin{aligned} \{\lambda\} = & ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left(\{f_d\} - [M_{31}] \cdot \{\ddot{q}_f\} - [M_{32}] \cdot \{\ddot{q}_i\} - [K_{31}] \cdot \{q_f\} \right. \\ & - [K_{32}] \cdot \{q_i\} + [M_{33}] \cdot \left([A_d]^{-1} \cdot ([A_f] \cdot \{\ddot{q}_f\} + [A_i] \cdot \{\ddot{q}_i\}) \right) \\ & \left. + [K_{33}] \cdot \left([A_d]^{-1} \cdot ([A_f] \cdot \{q_f\} + [A_i] \cdot \{q_i\}) \right) \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

En manipulant la seconde ligne, nous obtenons le système d'équation réduit régissant les coordonnées indépendantes $\{q_i\}$ comme des fonctions des efforts connus $\{f_i\}$, $\{f_d\}$ et des coordonnées connues $\{q_f\}$:

$$[M_i] \cdot \{\ddot{q}_i\} + [K_i] \cdot \{q_i\} = \{f_{externe}\} - [M_f] \cdot \{\ddot{q}_f\} - [K_f] \cdot \{q_f\} \quad (2.35)$$

où $[M_i]$, $[K_i]$, $\{f_{externe}\}$, $[M_f]$ et $[K_f]$ sont définis comme :

$$\begin{aligned} [M_i] = & [M_{22}] - [M_{23}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([M_{32}] - [M_{33}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} [K_i] = & [K_{22}] - [K_{23}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([K_{32}] - [K_{33}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_i] \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\{f_{externe}\} = \{f_i\} - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \{f_d\} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} [M_f] = & [M_{21}] - [M_{23}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_f] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([M_{31}] - [M_{33}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_f] \right) \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} [K_f] = & [K_{21}] - [K_{23}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_f] \\ & - [A_i]^T \cdot ([A_d]^T)^{-1} \cdot \left([K_{31}] - [K_{33}] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [A_f] \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Les coordonnées dépendantes sont finalement obtenues en utilisant la relation (2.32). Les forces appliquées sur les coordonnées imposées (conditions aux limites de Dirichlet) sont obtenues directement en utilisant la première ligne du système (2.33) puisque toutes les autres quantités sont désormais connues :

$$\begin{aligned} & [[M_{11}] \quad [M_{12}] \quad [M_{13}]] \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}_f\} \\ \{\ddot{q}_i\} \\ \{\ddot{q}_d\} \end{Bmatrix} + [[K_{11}] \quad [K_{12}] \quad [K_{13}]] \cdot \begin{Bmatrix} \{q_f\} \\ \{q_i\} \\ \{q_d\} \end{Bmatrix} \\ & + [[A_f]^T] \cdot \{\lambda\} = \{f_f\} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Ces équations sont donc une généralisation de celles obtenues précédemment pour définir le problème de valeurs propres. Elles ont permis de simuler le comportement *statique* et *dynamique* du dispositif pour différentes conditions aux limites, soit des déplacements imposés, soit des efforts imposés. Les efforts à appliquer sur cette structure résultaient d'un actionnement électromagnétique obtenu par un dispositif qui va être décrit dans la section suivante.

2.3 Conception et modélisation de l'actionnement

Comme expliqué dans [Tri89] et [Cug02], les facteurs d'échelle pour la miniaturisation des actionneurs électromagnétiques utilisant l'interaction courant-courant ne sont pas très avantageux. Quand la densité de courant est gardée constante, la force suit un facteur d'échelle en s^4 avec s une dimension caractéristique de la structure. Ce régime de fonctionnement est très peu attractif pour des micro-systèmes. Un second régime de fonctionnement peut être défini à *flux de chaleur constant à travers la surface d'un fil*, cela conduit à une force dont le facteur d'échelle évolue en s^3 et finalement pour le régime où nous considérons une *élévation de température du fil constante*, nous pouvons obtenir un facteur d'échelle en s^2 . Ainsi, et par comparaison aux autres principes de génération d'effort (électrostatique, piézoélectrique...), la seule manière d'obtenir une efficacité et un rendement acceptable pour un micro-actionneur utilisant un principe d'interaction électromagnétique courant/courant est d'augmenter autant que possible le courant en accord avec les limites thermiques du système.

Dans les trois régimes de fonctionnement évoqués, la densité des champs magnétiques B est créée par des bobinages. Si nous remplaçons un des deux bobinages par un aimant permanent, le facteur d'échelle se modifie en s^3 pour une densité de courant constante, en $s^{2.5}$ pour un flux de chaleur constant et en s^2 pour une élévation de température constante (à la place de, respectivement, s^4 , s^3 , s^2 pour deux bobinages en interaction). Nous voyons donc l'avantage d'utiliser des aimants permanents pour les actionneurs de petite taille⁹. Certains travaux étaient à l'étude à l'IMT pour développer des micro-aimants permanents. Ceux-ci étaient réalisés à l'aide de poudre ferromagnétique (*hard ferromagnetic powders*) immergés dans des résines SU8 très utilisées dans les process des MEMS. Les avantages à utiliser des aimants permanents pour les petits moteurs était déjà bien connus pour les actionneurs standards [Mil89] et nous avons donc décidé de baser notre actionnement sur une interaction entre un micro aimant permanent utilisant les technologie en développement à l'IMT et une micro-bobine dont des prototypes avait déjà été développés à l'IMT (cf FIG. 2.9).

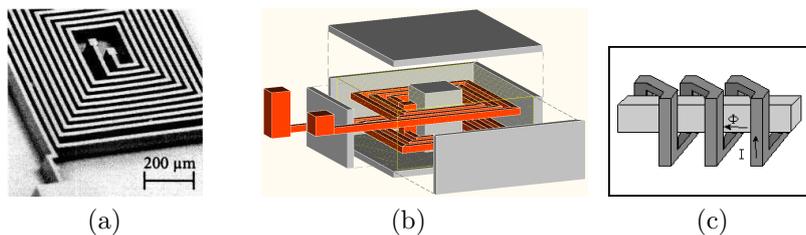


FIG. 2.9 – Exemple de micro-bobines réalisées à l'IMT : (a) bobine plane, (b) bobine plane multicouche, (c) bobine hélicoïdale.

Les bobinages hélicoïdaux n'étant pas encore parfaitement au point à l'IMT

⁹Le régime à élévation de température constante est cependant assez difficile à obtenir en pratique.

au démarrage de ce projet, nous avons décidé d'utiliser des bobines plates multicouches disposées face au pieds du micro-robots comme sur la FIG. 2.10. Seule la bobine *inductrice* a été étudiée dans ce projet, l'aimant permanent ou la bobine induite du pied n'ont pas pu être étudiés dans mon travail faute de temps.

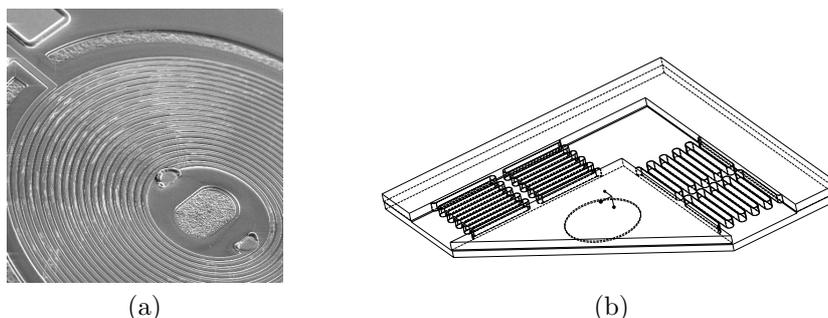


FIG. 2.10 – (a) Exemple de bobine plane multicouche utilisée dans le projet (photo SEM), (b) géométrie CAO du pied du microrobot et emplacements des bobinages inducteurs.

De même que pour la partie magnétique, une modélisation a été développée pour déterminer les champs magnétiques créés par cette bobine afin de pouvoir en déduire les forces d'origine électromagnétique appliquées sur le pied du micro-robot. Les champs magnétiques sont des quantités qu'il n'est en général possible de calculer analytiquement que pour des géométries assez simples. Pour la bobine plane multicouches, nous avons utilisé un modèle analytique permettant de calculer le champ créé par une spire et une méthode de superposition permettant de calculer numériquement la résultante pour une bobine plane multicouches. De manière parallèle, des simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis et le logiciel ANSYS ont permis de valider nos modèles. De même qu'un calcul par éléments finis magnétostatique, notre méthode analytique passe par la détermination du potentiel vecteur magnétique A . En effet, à partir des deux équations de Maxwell de la magnétostatique dans le vide :

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (2.42)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.43)$$

où B est la densité de champ magnétique, J la densité de courant et μ_0 la perméabilité du vide. Le potentiel vecteur magnétique A est défini à partir de B par :

$$B = \nabla \times A \quad (2.44)$$

et dans le vide et en utilisant une gauge de Coulomb ($\nabla \cdot A = 0$), la combinaison des deux équations de Maxwell, nous donne une *équation vectorielle de Poisson* pour A :

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (2.45)$$

C'est cette équation qui est en général résolue par les logiciels de calcul par éléments finis en magnétostatique. Par analogie avec la solution d'un *potentiel*

scalaire électrique aussi décrit par une équation de Poisson, la solution de ce champ est :

$$A(x) = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \int \frac{J(x')}{|x - x'|} d^3x' \quad (2.46)$$

où d^3x' est une intégrale sur le volume. Dans le cas de la boucle circulaire – une spire – représentée sur la FIG. 2.11, la densité de courant prend une forme assez simple en coordonnées sphériques (la fonction de Kronecker δ permet de restreindre la densité de courant à l'intérieur d'un anneau de rayon a) :

$$J_{\Phi} = I \sin \theta' \delta(\cos \theta') \cdot \frac{\delta(r' - a)}{a} \quad (2.47)$$

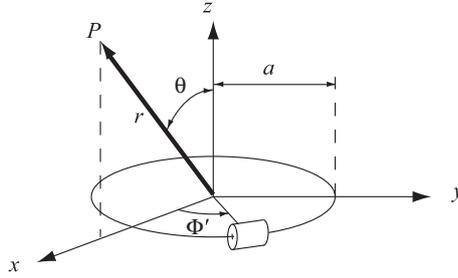


FIG. 2.11 – Description d'une spire de rayon a .

Pour cette géométrie particulièrement simple, l'équation (2.46) peut être résolue de manière exacte et le potentiel vecteur A vaut alors [Jac99] :

$$A_{\Phi}(r, \theta) = \frac{\mu_0 I a}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi' d\phi'}{(a^2 + r^2 - 2ar \sin \theta \cos \phi')^{\frac{1}{2}}} \quad (2.48)$$

Cette intégrale peut aussi être exprimée en utilisant les intégrales elliptiques complètes K et E [Jac99] :

$$A_{\Phi}(r, \theta) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{4Ia}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2ar \sin \theta}} \cdot \left[\frac{(2 - k^2)K(k) - 2E(k)}{k^2} \right] \quad (2.49)$$

où l'argument k de l'intégrale elliptique est définie par

$$k^2 = \frac{4ar \sin \theta}{a^2 + r^2 + 2ar \sin \theta} \quad (2.50)$$

Les composantes de l'induction magnétique valent alors :

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{1}{r \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_{\phi}) \\ B_{\theta} &= -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\phi}) \\ B_{\phi} &= 0 \end{aligned} \quad (2.51)$$

et peuvent également être exprimées en terme d'intégrales elliptiques. Bien qu'apparemment complexes, ces intégrales elliptiques sont d'un usage pratique assez facile car elles sont incluses dans presque tous les logiciels de calcul scientifique, en particulier, dans matlab, elles sont accessible par les fonctions ELLIPKE.

Cette solution analytique n'est donnée que pour une spire, dans le cas d'une bobine à plusieurs spires et plusieurs couches, il suffit d'utiliser le théorème de superposition pour obtenir les champs résultants (somme des résultats pour chaque spires de chacune des couches). Pour certaines géométries de bobine, il peut également être pratique d'utiliser les approximation pour $a \gg r$, $a \ll r$ ou $\theta \ll 1$ en puissance de $\frac{a^2 r^2 \sin^2 \theta}{(a^2 + r^2)^2}$, ce qui donne :

$$A_{\Phi}(r, \theta) = \frac{\mu_0 I a^2 r \sin \theta}{4(a^2 + r^2)^{3/2}} \cdot \left[1 + \frac{15a^2 r^2 \sin^2 \theta}{8(a^2 + r^2)^2} + \dots \right] \quad (2.52)$$

Avec le même degré d'approximation, les composantes du champ correspondant valent :

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\mu_0 I a^2 r \cos \theta}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \cdot \left[1 + \frac{15a^2 r^2 \sin^2 \theta}{4(a^2 + r^2)^2} + \dots \right] \\ B_{\theta} &= -\frac{\mu_0 I a^2 r \sin \theta}{4(a^2 + r^2)^{5/2}} \cdot \left[2a^2 - r^2 + \frac{15a^2 r^2 \sin^2 \theta (4a^2 - 3r^2)}{8(a^2 + r^2)^2} + \dots \right] \end{aligned} \quad (2.53)$$

qui peut être aisément décomposé en trois zones, près de l'axe ($\theta \ll 1$), proche du centre de la spire ($r \ll a$) et loin de la spire ($r \gg a$). Pour le dernier, nous obtenons un champ de la forme :

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\mu_0}{2\pi} (I \pi a^2) \frac{\cos \theta}{r^3} \\ B_{\theta} &= \frac{\mu_0}{2\pi} (I \pi a^2) \frac{\sin \theta}{r^3} \end{aligned} \quad (2.54)$$

qui correspond aux caractéristiques d'un dipôle magnétique. Pour cette boucle de courant, en champ lointain et en utilisant l'analogie électrostatique, nous pouvons définir un *moment dipolaire magnétique* $m = \pi I a^2$, avec πa^2 l'aire de la boucle de courant transportant le courant I . Cette solution analytique, bien que très générale, nécessite l'utilisation de logiciel de calculs scientifiques permettant de déterminer la valeur des fonctions elliptiques¹⁰.

Un bobinage composé de 2 couches et de 20 conducteurs par couche a été conçu et simulé à l'aide du modèle présenté précédemment. La moitié de la géométrie de ce dispositif (axisymétrie) ainsi que les résultats de simulation sont reportés sur la FIG. 2.12 pour une densité de courant de 800 A/mm². Les cubes représentent la position des conducteurs.

¹⁰Dans la littérature (cf [Jil98]), nous trouvons des expressions obtenues à l'aide de la loi de Biot et Savart, cependant ces résultats ne permettent de calculer le champ que sur les axes de symétrie de la bobine et non partout dans l'espace comme c'est le cas pour notre expression. Pour une bobines dont le fil est enroulé de manière hélicoïdale, nous pouvons trouver des solutions analytiques à l'aide de logiciels de calcul formel mais les expressions obtenues ne sont alors pas plus simples que celle que nous obtenons dans le cas général.

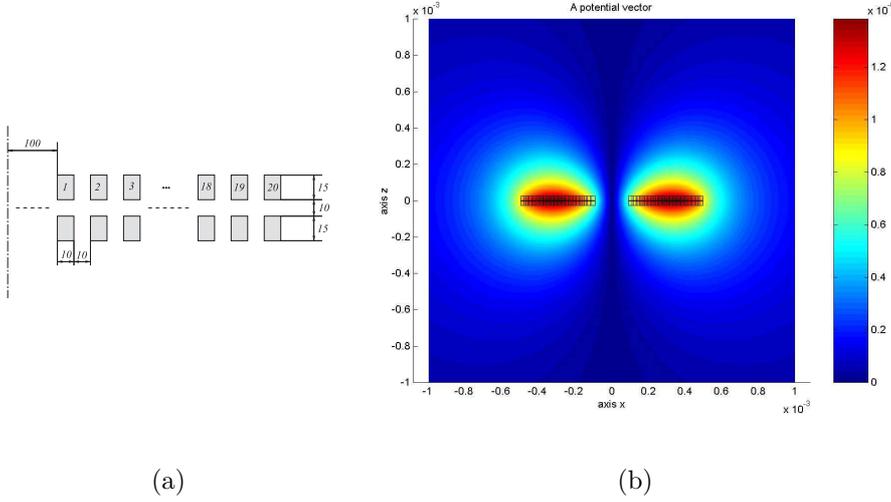


FIG. 2.12 – (a) Demi géométrie (en μm) de la micro-bobine en coupe pour deux couches et 20 tours/spires par couche, (b) Résultat de simulation du champ A par notre modèle et un programme matlab.

Le programme matlab a été étendu afin de calculer les *auto/self*- et *mutuelles*-inductances. Pour cela, nous avons utilisé la définition des inductances en terme d'énergie magnétique :

$$\mathcal{W} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot i_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j>1}^N M_{ij} \cdot i_i \cdot i_j \quad (2.55)$$

Nous savons que ces énergies sont aussi définies par $\mathcal{W} = \frac{1}{2} \cdot \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} d^3x$, où A est définie par la relation (2.46) et d^3x est un élément de volume. Nous avons utilisé certaines hypothèses valides lorsque les dimensions de la section d'une spire du bobinage sont négligeables devant les autres dimensions du circuit :

- nous ré-écrivons alors $\mathbf{J}(x_i) d^3x = \mathbf{J} da dl = I dl$ où da est la section du circuit et dl un vecteur longueur orienté dans le sens des courants.
- nous considérons alors A comme constant dans une section de spire.

Ainsi, les expression des *self*- et *mutuelles*-inductances valent :

$$M_{ij} = \frac{1}{I_i I_j} \cdot I_i \cdot \oint_{\Gamma_i} \mathbf{A}_{ij} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{I_j} \cdot \oint_{\Gamma_i} \mathbf{A}_{ij} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.56)$$

$$L_i = \frac{1}{I_i I_i} \cdot I_i \cdot \oint_{\Gamma_i} \mathbf{A}_{ii} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{I_i} \cdot \oint_{\Gamma_i} \mathbf{A}_{ii} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.57)$$

où A_{ij} est le champ créé dans la $i^{\text{ème}}$ spire par le courant dans la $j^{\text{ème}}$ spire et A_{ii} est le champ créé dans la $i^{\text{ème}}$ spire par le courant circulant dans cette $i^{\text{ème}}$ spire.

Dans notre configuration, nous pouvons relever le champ A moyen sur chacun des conducteurs k et nous l'appelons A_k . La géométrie étant axisymétrique et le champ étant tangent au conducteur, nous avons donc pour chaque conducteur :

$$\oint_{\Gamma_k} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = 2 \cdot \pi \cdot a_k \cdot A_k \quad (2.58)$$

où a_k est le rayon de la $k^{\text{ème}}$ spire. Ainsi, la self-inductance de notre enroulement vaut :

$$L = \frac{2\pi}{i} \cdot \sum_{k=1}^N a_k \cdot A_k \quad (2.59)$$

où N est le nombre total de boucles pour toutes les couches et toutes les spires de chaque couche. Pour la géométrie décrite précédemment, nous trouvons une inductance de $L = 0,76675 \mu\text{H}$ alors que le logiciel utilisé et développé par l'IMT (logiciel *spopt* [HGSB01]) donnait une valeur de $L_{spopt} = 0,79 \mu\text{H}$. Ces valeurs ont pu être validées expérimentalement (différence $< 3\%$, [HGSB01]). Notre programme est cependant beaucoup plus général que *spopt* puisqu'il est basé sur des formules exactes et sur une superposition de boucles élémentaires, ce qui permet d'inclure toutes les géométries possibles de bobinage à la seule condition qu'une boucle/spire élémentaire soit de forme circulaire et qu'il n'y ait pas de matériaux ferromagnétiques (comportement magnétique linéaire sans saturation) alors que le logiciel *spot* permet de ne calculer l'inductance que pour certaines géométries puisqu'il utilise des formules empiriques tirées de [Gro46].

Ces différents résultats furent comparés à des calculs par éléments finis réalisés grâce au logiciel ANSYS. Quand nous affichons A , en raison du choix d'une modélisation axisymétrique, ANSYS n'affiche pas directement le champ A mais une quantité modifiée $A \cdot r$ où r est le rayon du problème axisymétrique. Ce rayon r correspond à la coordonnée x dans notre système de coordonnées¹¹. Le choix de cette nouvelle grandeur $A \cdot r$ peut être expliqué par le fait qu'elle est directement liée au flux magnétique circulant au travers de l'enroulement circulaire de rayon r : en effet, $\Phi = \iint B d^2x = \iint \nabla \times A d^2x = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$ et pour notre configuration \mathbf{l} parcourt l'anneau – la boucle circulaire – de rayon r et de valeur A constante, ainsi le flux vaut alors $\Phi = 2\pi \cdot r \cdot A$. Des comparaisons de calculs effectués avec notre programme et ANSYS sont reportés sur la FIG. 2.13. Comme nous pouvons le constater les résultats sont très comparables bien que la complexité du calcul analytique soit bien inférieure à celle d'une simulation par éléments finis.

Le calcul analytique étant validé par des calculs par éléments finis, nous avons pu l'utiliser pour optimiser la géométrie de notre dispositif, en particulier, nous pouvons ainsi optimiser le nombre de spires et de couches, les rayons intérieurs et extérieurs de la bobine sans avoir à utiliser ANSYS qui nécessite un important travail de *pré-processing* pour définir la géométrie du bobinage et des temps de calcul importants pour des précisions équivalentes à notre modèle semi-analytique.

¹¹Le plan 2D est le plane x - y et A est définis suivant la direction y pour la géométrie de notre bobine.

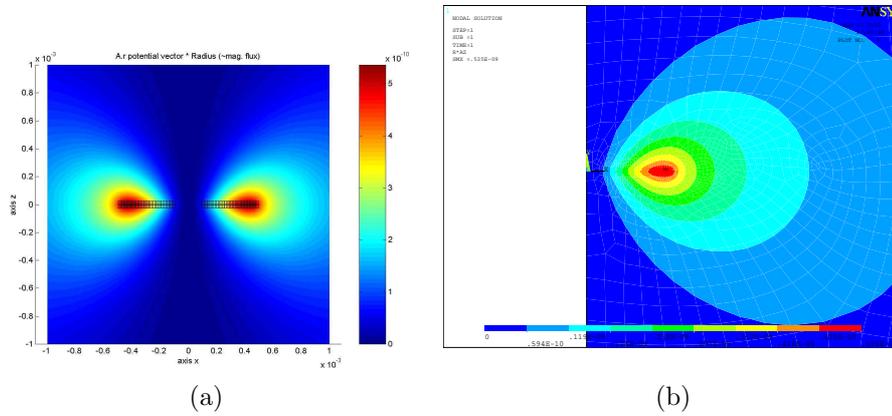


FIG. 2.13 – Comparaison des champs $A \cdot r$ pour la géométrie du bobinage à 2 couches et 20 conducteurs/couche (a) Calcul avec notre programme (Matlab), (b) Calcul avec ANSYS (1/2 géométrie : condition de symétrie).

Dans un second temps, nous avons tenté d'améliorer les performances de nos micro-bobines en utilisant des matériaux ferromagnétiques afin de concentrer et d'amplifier les champs magnétiques. Des réflexions de conception qui ne seront pas détaillées dans ce mémoire ont conduit à la géométrie représentée sur la FIG. 2.14.

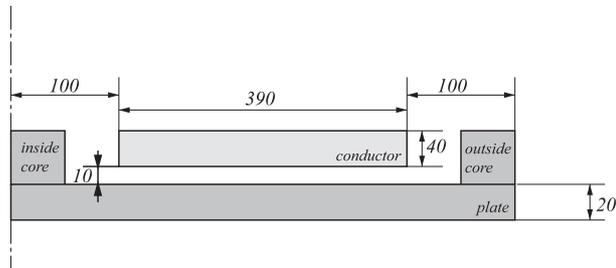


FIG. 2.14 – Demi-section d'un bobinage utilisant un noyau en matériaux ferromagnétiques.

Quand des matériaux ferromagnétiques sont utilisés, les programmes développés en Matlab et le logiciel *spopt* ne sont plus utilisables car les formules analytiques utilisées ne sont pas directement applicables car la répartition et l'amplitude des lignes de champ sont fortement modifiées par la présence de ces matériaux (ainsi que les distances de circulation et les perméabilités sur ces chemins). Cela est très visible sur la FIG. 2.15 calculée par ANSYS avec et sans noyau ferromagnétique.

Un fichier paramétrique pour ANSYS a été développé pour permettre le calcul des champs B pour toutes les positions et pour toutes les dimensions du bobinage correspondant à la géométrie décrite dans la FIG. 2.14. Ce type de

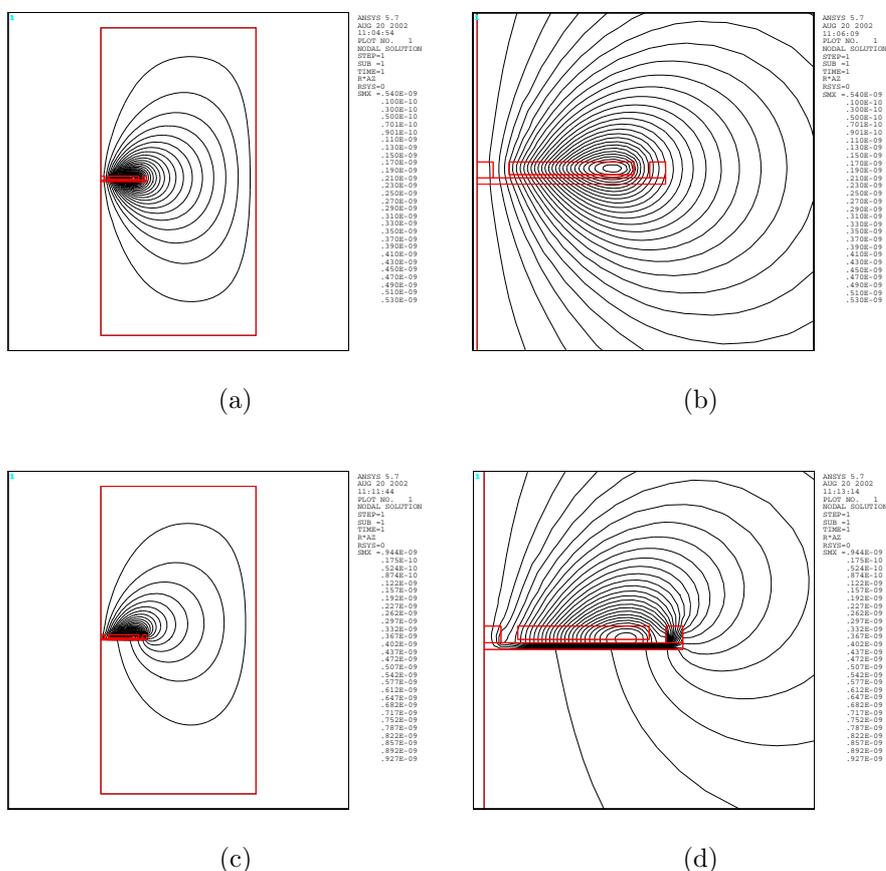


FIG. 2.15 – Distribution des lignes de champs : (a), (b) sans matériau ferromagnétique et (c), (d) avec matériaux ferromagnétiques.

bobinage comportant des plaques ferromagnétiques et deux noyaux à l'intérieur et à l'extérieur des conducteurs avait déjà été développé à l'IMT. Il était basé sur une déposition de *NiFe* – Nickel-Fer – par *micro-galvanic* [Sch02] [OSB00] [SBB01], [SOB99] [SB00]. L'amplitude du champ B à une distance de $500 \mu\text{m}$ est reporté sur la FIG. 2.16 par un calcul avec et sans matériaux ferromagnétiques afin de mettre en évidence les gains obtenus. En raison de la perméabilité importante des matériaux ferromagnétiques, la distance de circulation ($\oint H dl$) n'est sensiblement que la distance de circulation dans l'air puisque la circulation dans les matériaux ferromagnétiques peut être négligée. Dans cette configuration, nous voyons donc que la distance de circulation est pratiquement divisée par deux, ce qui conduit sensiblement à un champ B et des valeurs d'inductance doublées grâce à l'utilisation de ces matériaux ferromagnétiques.

Les formules analytiques des calculs des inductances sont toujours valables dans cette configuration à condition d'utiliser la valeurs des champs A calculés

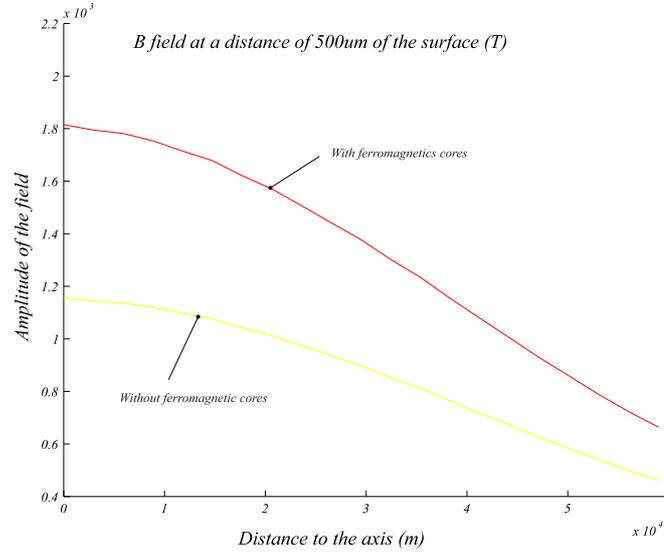


FIG. 2.16 – Champ B a une distance de $500 \mu\text{m}$ de la surface de la bobine avec et sans utilisation de matériaux ferromagnétiques.

par la méthode des éléments finis et non par les programmes semi-analytiques :

$$L_i = \frac{1}{i_i^2} \cdot \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} d^3x \quad (2.60)$$

J est constant sur le volume d'un conducteur et, en raison de l'axisymétrie, nous pouvons modifier cette expression pour utiliser des coordonnées cylindriques $d^3x = dr r d\theta dz$:

$$L_i = \frac{J \cdot \int d\theta}{i_i^2} \cdot \int A \cdot r dr dz = \frac{J \cdot 2\pi}{i_i^2} \cdot \int A \cdot r dr dz \quad (2.61)$$

Le champ $A \cdot r$ est extrait aisément des calculs réalisés par ANSYS et seule une intégration sur le volume des conducteurs est nécessaire pour obtenir la valeur de l'auto-inductance de ce bobinage. Pour un conducteur de section suffisamment faible, nous pouvons considérer A comme constant sur cette section et nous nous ramenons à la formule déjà utilisée (2.59) : $L_i = 2\pi \cdot a_k \cdot A_k$ avec A_k la valeur de A dans cette section et a_k , le rayon de la section en coordonnées cylindriques.

En plus de tous ces développements de modélisation et de conception, des optimisations de géométrie ont également été étudiées en utilisant des configurations symétriques du type *bobines de Helmholtz*, et des estimations d'efforts par interaction de champs entre différentes bobines ont pu être réalisées. Ces calculs ne seront pas détaillés dans ce mémoire.

2.4 Conclusion sur la période de recherche

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents concepts utilisés pendant cette période de recherche pour réaliser un micro-robot. Celui-ci utilisait des

parties mécaniques résonantes basées sur des ressorts et des micro-bobines dont le processus de fabrication avait déjà été mis au point à l'IMT.

Les concepts proposés ont été modélisés avec différents logiciels utilisant deux niveaux de modélisation pour les MEMS :

- niveau conception et optimisation de système : modèle à paramètres localisés, de préférence analytique et éventuellement numérique. Ces modèles furent développés spécifiquement pour l'application et programmés à l'aide de Matlab. Les modèles développés sont des modèles dynamiques qui permettront de développer et de simuler efficacement les lois de commande du dispositif. Les concepts de ces modèles sont parfaitement ré-utilisables pour d'autres applications et dispositifs similaires ;
- niveau analyse et validation : modèle à paramètres distribués résolu numériquement à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis. Ces logiciels, lourds en temps de calcul sont très souvent limités à des fonctionnements statiques même si des extensions dynamiques existent. De plus, ils ne sont pas bien adaptés aux premières phases de conception et de pré-dimensionnement sauf si ils peuvent être couplés à des méthodes d'optimisation.

Les logiciels et les solutions de conception furent testés expérimentalement durant cette période de recherche lorsque c'était possible (dispositifs technologiques disponibles).

Les principales conclusions de ces travaux sur la conception de micro-systèmes et en particulier sur la conception de micro-robots sont les suivantes :

- nous devons prendre en compte dès la conception les processus de fabrication microtechnologiques et les limites et défauts qu'ils risquent d'introduire sinon les dispositifs conçus ne seront pas réalisables technologiquement ;
- certaines valeurs de paramètres localisés (raideurs, inductances) peuvent être extraites avec confiance de calculs par éléments finis sur des structures simplifiées et d'autres (masses, inertie) peuvent être extraites d'une analyse géométrique ou des logiciels de CAO ;
- parce que les modèles utilisant des systèmes à paramètres localisés induisent certaines hypothèses géométriques (corps rigides), ils peuvent mal évaluer certaines caractéristiques lorsque les géométries réelles ne correspondent pas aux hypothèses. Il s'en suit alors une sous-estimation des déplacements et une sur-estimation des fréquences propres. Ces résultats doivent alors être ajustés ou recalés en accord avec une analyse par éléments finis ou des mesures expérimentales. Ces logiciels sont cependant moins lourds à utiliser que des logiciels de calcul par éléments finis et leur flexibilité les rend incontournables durant les premières phases de conceptions ;
- pour le contrôle des mouvements, certains paramètres ne sont pas disponibles lors de la phase de conception et de simulation (amortissements, niveaux de saturation, caractéristiques mécaniques et électromagnétiques exactes après une phase de micro-fabrication) et devront être déterminés après la conception des prototypes par des mesures expérimentales.

Pour conclure cette section, je dois souligner que cette période de recherche

en Allemagne a été très productive et très instructive pour mes futures activités de recherche. Elle m'a permis de connaître les principales techniques de micro-fabrication et de les mettre en œuvre sur des dispositifs réels. Mes compétences en termes de modélisation de systèmes mécatroniques ont pu être étendues à la modélisation de systèmes micro-robotiques et micro-mécatroniques. Ces éléments ont été essentiels pour mon intégration dans l'équipe de recherche de Besançon et des activités de recherche que j'y ai conduites et qui seront exposées dans les prochains chapitres. De plus, cette période de recherche m'a permis de développer mon autonomie de chercheur car, à l'exception d'une collaboration avec deux collègues de l'IMT sur l'intégration et la prise en compte des contraintes technologiques de micro-fabrication, tous les développements des modèles ont été conduits de manière totalement autonome.

Au cours de cette période de recherche, un important rapport de fin de post-doc a été rédigé [Hub02] (135 pages) mais malheureusement aucune publication référencée n'a pu être publiée car j'ai obtenu un poste de maître de conférences avant la fin de ce projet. À Besançon, je me suis alors lancé dans les thématiques abordées par mon nouveau laboratoire d'accueil qui étaient quelques peu différentes de celles de Braunschweig. L'investissement résultant ne m'a malheureusement pas laissé le temps de présenter les travaux de recherche réalisés durant cette période à la communauté scientifique. Avec le recul, je pense aujourd'hui, qu'évidemment, j'aurai du publier ces travaux afin de les rendre accessibles à mes collègues chercheurs travaillant sur les micro-structures résonantes ou sur la conception de micro-bobines. Mais, l'acceptation d'un poste de maître de conférences, l'insertion dans une nouvelle équipe avec ses propres thématiques de recherche et la prise en charge d'un enseignement conséquent est une tâche suffisamment importante et prenante pour que je m'y sois consacré totalement en délaissant, malheureusement, l'exploitation et la dissémination des résultats précédents.

Chapitre 3

Deuxième thématique de recherche (2002 → 2006) : Micro-robotique et micro-manipulation

Mots-clés : *micro-robotique et micro-positionnement, station de micro-manipulation, préhenseurs et micro-pinces.*

Ces travaux de recherche ont été conduits au laboratoire d'automatique de Besançon (LAB) auquel j'ai été rattaché dès mon arrivée en tant que maître de conférences à l'université de Franche-Comté. Les premiers travaux auxquels j'ai participé dans ce laboratoire concernaient la micro-robotique et plus particulièrement le développement de station de micromanipulation. Les thématiques de recherche de cette équipe de rattachement concernaient tous les domaines de la micro-robotique et en particulier les sous-thèmes suivants :

- conception et modélisation de micro-robots ;
- commande pour la micro-robotique ;
- compréhension du micro-monde et effets d'échelle.

Au cours de cette période, mes principaux partenaires de recherche ont été les personnes suivantes :

- Prof. N. Chaillet, responsable de cette équipe de recherche ;
- C. Clévy, doctorant de N. Chaillet dont j'ai co-encadré la thèse [Cle05] et qui est actuellement maître de conférences à l'université de Franche-Comté ;
- Y. Urushima et G. Millet deux masters recherche que j'ai encadrés durant leur stage de fin d'étude [Uru03] [Mil05] ;
- R. Perez et J. Agnus, un post-doctorant et un ingénieur de cette équipe ;
- J. Michler, J.M. Breguet et le Pr S. Fatikow, respectivement chercheur au laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, EMPA) en Suisse, professeur associé à l'école Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse et

professeur à l'université de Oldenburg en Allemagne avec qui nous avons collaboré sur le projet européen ROBOSEM.

3.1 Contexte du travail

Depuis une vingtaine d'année, les problématiques liées à la micro-robotique et plus particulièrement au micro-assemblage n'ont cessé de se développer. En effet, la volonté de réaliser et de commercialiser des produits de plus en plus compacts et de plus en plus intelligents (*smart*) s'accompagne nécessairement du développement de MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*) et de *micro-produits* ou composants de (très) petite taille qui nécessitent souvent des phases de manipulation et d'assemblage (cf FIG 3.1).

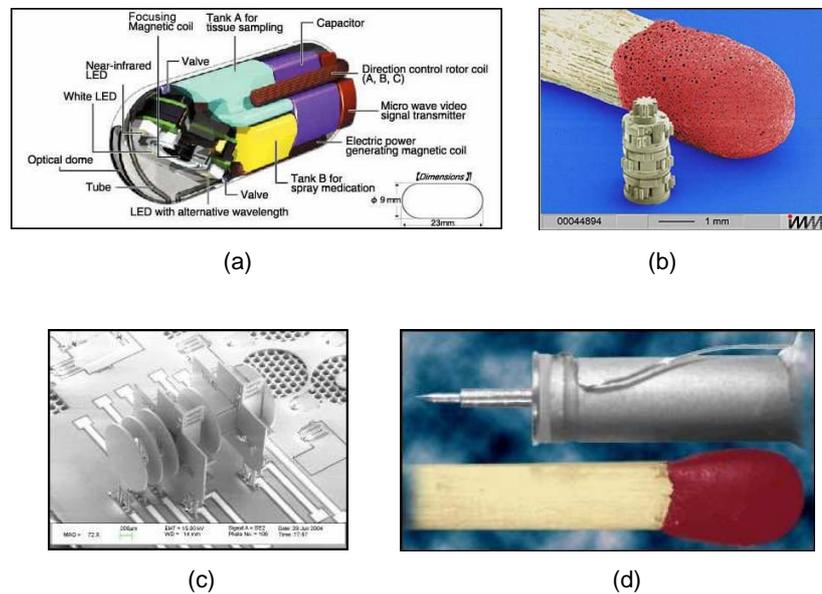


FIG. 3.1 – Exemples de micro-systèmes assemblés : (a) capsule endoscopique miniature NORIKA de 9 mm de diamètre [NOR]; (b) système d'engrenage composé de trains épicycloïdaux miniatures (Institut für Mikrotechnik Mainz [IMM]); (c) spectromètre de masse miniature de dimensions $2 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ (Zyvex [UT05]); (d) nanomoteur[®] (Klocke Nanotechnik [Nan]).

La micro-manipulation telle que nous l'avons abordée dans cette période de recherche concerne essentiellement la manipulation de pièces dont les dimensions caractéristiques *maximales* sont de l'ordre du mm et les précisions et résolutions de positionnement inférieures à $25 \mu\text{m}$ puisqu'au delà de ces valeurs, des systèmes robotiques précis mais *conventionnels* sont suffisants et sont déjà largement utilisés dans l'industrie et cela depuis de nombreuses années. Des exemples d'objets manipulés issus de l'état de l'art de cette période et les précisions de dépose associées sont reportés sur la figure FIG 3.2.

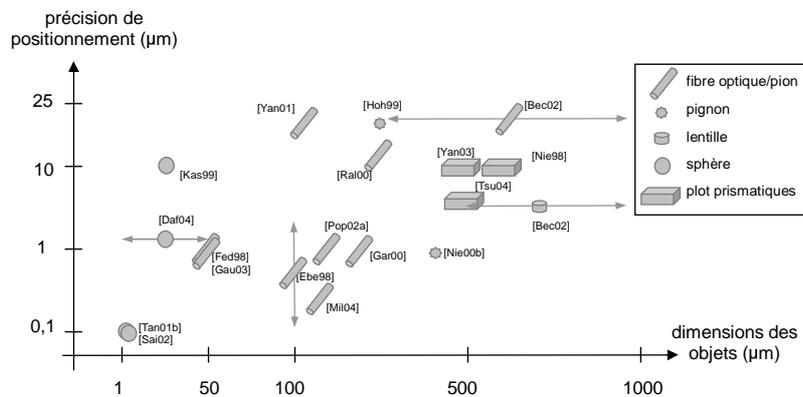


FIG. 3.2 – Exemples d’objets manipulés et précision de dépose (nécessaire ou effectuée réellement). Les dimensions correspondent au diamètre pour les fibres optiques, pour les autres, il s’agit de la plus grande dimension de l’objet.

La manipulation d’objets dont les dimensions sont inférieures au μm ou pour lesquelles les précisions requises sont très inférieures au μm concernent le domaine de la *nano-robotique*. Cette thématique est très étudiée actuellement et de nombreux laboratoire de recherche – dont le notre – s’y intéressent. Cependant au cours de la période de recherche décrite dans ce chapitre, nous ne nous y sommes pas directement intéressés.

Les recherches en micro-robotique ont débuté au LAB au milieu des années 1990. Ces travaux ont tout d’abord concerné la découverte puis la prise en main des technologies et contraintes liées à la conception et à la fabrication de micro-systèmes, ainsi qu’au développement de dispositifs de base pour la micro-robotique (dispositifs de positionnement et de préhension). Mon arrivée au laboratoire a coïncidé avec le lancement d’un nouvel axe de recherche. Il s’agissait d’intégrer les différents composants réalisés précédemment au laboratoire afin de disposer de systèmes plus complets de micro-robotique et de micro-manipulation. C’est en partie dans ce cadre qu’ont débuté mes premiers travaux à Besançon en étroite collaboration avec le Prof. N. Chaillet et C. Clévy, dont j’ai co-encadré la thèse de doctorat, soutenue en décembre 2005.

L’objectif scientifique de ces travaux était de concevoir et de réaliser la première station de micro-manipulation de notre laboratoire. En 2002, il n’existait que quelques stations de ce type au niveau mondial et nos travaux devaient permettre de proposer des solutions à la fois plus fonctionnelles et plus intégrées en utilisant, en partie, les développements précédents du laboratoire. L’intégration d’une telle station n’est pas un simple exercice d’assemblage de composants. Comme je vais tenter de le montrer par la suite, elle a permis, au contraire, de faire apparaître de nouvelles problématiques scientifiques très intéressantes. Nous avons alors tenté de les explorer et de les résoudre au cours de ces années de recherche. Le cadre de ces travaux intégrait également la

participation à un projet européen du 5^{ème} PCRD¹ et nos travaux ont été fortement stimulés par la participation à ce projet. En effet, cette participation nous a permis, tout au long de ces années, de confronter nos idées et tous nos développements aux différents partenaires souvent issus des laboratoires les plus en pointe en Europe sur le domaine de la micro-robotique.

L'application visée par ce projet européen Robosem était particulièrement ambitieuse et très contraignante. D'une part, parce que la place disponible dans la chambre d'un MEB est très réduite et, d'autre part, parce que cette chambre nécessite un vide poussé qui entraîne des problèmes de compatibilités des composants utilisables. Ce projet européen m'a permis de développer des collaborations internationales avec des laboratoires étrangers pour parvenir à répondre au cahier des charges du projet. En particulier, au cours de ces années, j'ai travaillé avec le Dr J.M. Breguet de l'EPFL à Lausanne en Suisse et plusieurs membres de son équipe (intégration de notre micro-pince avec des tables de micro-positionnement compatibles MEB de l'EPFL), avec le Dr J. Michler de l'EMPA en Suisse et plusieurs membres de son équipe (essais et expérimentations de notre pince dans leur MEB) et avec le Prof. S. Fatikow de l'Université d'Oldenburg en Allemagne et plusieurs membres de son équipe (essai dans leur MEB, travail sur leur système de manipulation et de vision et premiers travaux concernant l'utilisation des ferrofluides pour la micro-robotique).

Ce chapitre va être décomposé en deux sections qui présenteront chacune un des différents sous-systèmes intégrés dans ces stations de micro-manipulation et étudiés au cours de cette période :

- micro-pince piézoélectrique et système de positionnement ;
- améliorations des stations et intégration d'un changeur d'outils.

La micro-pince présentée dans la section suivante est le résultat de nombreuses années de recherche au laboratoire sur les actionneurs piézoélectriques. Ces travaux démarrèrent bien avant mon arrivée au laboratoire puisqu'en 2002, une thèse avait déjà été soutenue au laboratoire sur la conception et le contrôle des pinces piézoélectriques et une autre était en cours. Ces travaux se poursuivent encore actuellement, des améliorations sont encore apportées à ce dispositif, notamment en ce qui concerne l'intégration de capteurs d'effort et une poursuite dans la miniaturisation du système. À mon arrivée au laboratoire, un premier prototype avait été conçu et réalisé par J. Agnus (cf. FIG. 3.3). Ce prototype utilisait un *duo-bimorphe* piézoélectrique sur lequel nous reviendrons dans la section suivante. Il était fonctionnel mais n'avait encore jamais été utilisé pour une *vraie* opération de manipulation car il n'était pas encore intégré dans une station dédiée à ces opérations.

¹Projet Robosem, *Development of a Smart Nanorobot for Sensor-based Handling in a Scanning Electron Microscope*, <http://www.robossem.org/>. L'objectif global de ce projet européen était de développer des micro-robots intégrables dans des microscopes électroniques à balayage (MEB).



FIG. 3.3 – Photographie du premier prototype de micro-pince piézoélectrique à mon arrivée au laboratoire [PAC⁺05].

3.2 Conception, modélisation et intégration d'une micro-pince piézoélectrique dans une station de micro-manipulation

La pince à l'origine des travaux de recherche présentés dans cette section est un micro-manipulateur compact composé des deux sous-systèmes suivants :

- actionneurs piézoélectriques ;
- effecteurs/organes terminaux (*end-effectors*).

La FIG 3.4 représente une des versions de micropinçe que nous avons développés pour être intégrée à une station de micro-manipulation.

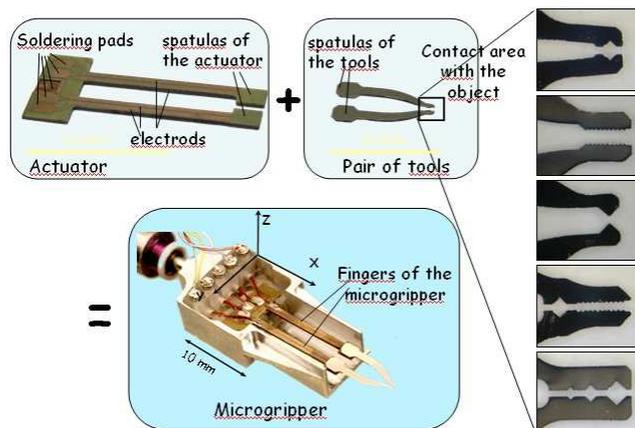


FIG. 3.4 – Description de la micro-pince du LAB constituée d'actionneurs piézoélectriques (bi-couche à base de plaques céramiques piézoélectriques collées) et d'organes terminaux fixés aux extrémités des deux actionneurs.

Des matériaux piézoélectriques ont été choisis pour l'actionnement de cette pince en raison de leurs bonnes propriétés dynamiques, de leur facilité de contrôle et des possibilités de miniaturisation importantes [Uch97] [Pon05]. Deux bimorphes bi-couches piezoélectriques sont utilisés pour l'actionnement de chacun des deux doigts de la pince. Un bimorphe est une structure élancée déformable qui se courbe par flexion sous l'action d'un allongement de sa surface supérieure et/ou sous l'action d'une contraction de sa surface inférieure. Après assemblage du bi-couche, des électrodes sont déposées par des techniques de micro-fabrication puis les doigts sont découpés par usinage ultrasonore pour les anciennes versions, et par usinage laser pour les dernières versions (cf FIG. 3.5). Les effecteurs ont été réalisés par des techniques de micro-fabrication, soit en LIGA pour les effecteurs en nickel, soit en DRIE pour les effecteurs en silicium [Mad02] [Fat00] [FR97].

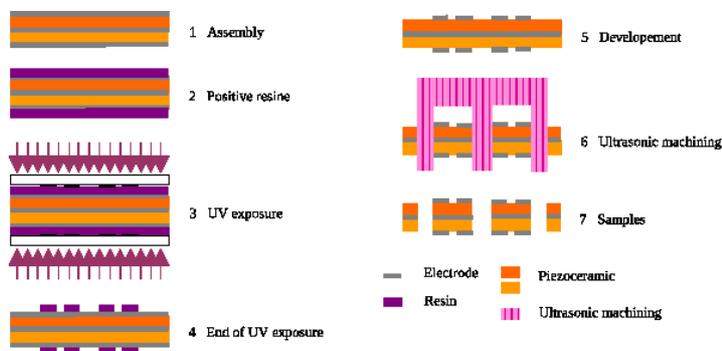


FIG. 3.5 – Étapes de fabrication des actionneurs piézoélectriques de la micro-pince [PAC⁺05].

Pour la section d'un doigt d'actionneur, le principe d'actionnement est représenté sur la figure FIG. 3.6 (a). En contrôlant indépendamment chacune des deux tensions V_y et V_z , nous sommes capable de contrôler indépendamment un déplacement en y et en z sur chacun des deux doigts, ce qui nous permet d'obtenir une pince à quatre degrés de liberté (4 DDLs). Les performances de cette pince sont reportées dans le tableau de la figure FIG. 3.6 (b) pour une tension d'alimentation de ± 100 V.

Un modèle analytique de cette micro-pince a été développé pour la géométrie représentée sur la figure FIG. 3.7 (a). Ces résultats ont été comparés avec des analyses par éléments finis. Des validations expérimentales ont été conduites sur différents prototypes. La modélisation utilise les équations de la piézoélectricité linéaire [ANS87] [RD97] qui permettent de calculer les déformations S et la densité de charge D à partir des contraintes mécaniques T , des champs électriques E et des tenseurs de compliance s , de coefficient de charge piézoélectrique d et de permittivité di-électrique ε :

$$\begin{cases} S = s^E \cdot T + d \cdot E \\ D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \end{cases} \quad (3.1)$$

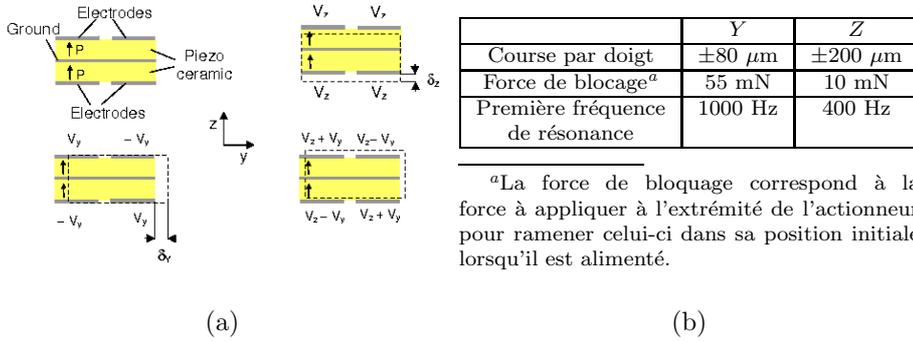


FIG. 3.6 – (a) Principe de fonctionnement de l'actionneur piézoélectrique suivant le plan de coupe de la section d'un doigt de la micro-pince [PAC⁺05], (b) tableau récapitulatif des principales caractéristiques des doigts de la micro-pince pour une tension d'alimentation de ± 100 V.

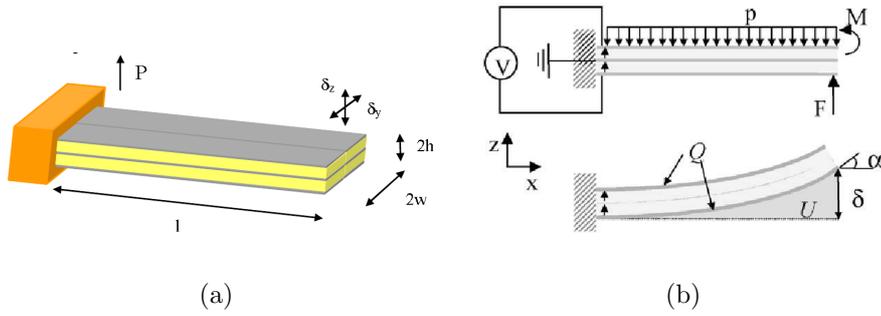


FIG. 3.7 – (a) Configuration géométrique du *duo-bimorphe* utilisé pour le micro-manipulateur (un doigt de pince), (b) description des différentes contraintes électromécaniques appliquées sur cet actionneur [PAC⁺05].

Pour la géométrie de notre bimorphe, les équations précédentes se simplifient en :

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_3 \\ D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \end{cases} \quad (3.2)$$

Combinées aux équations macroscopiques suivantes (cf FIG. 3.7 (b)) :

$$\begin{aligned} \iint T_1(x, y, z) \cdot y \, dA + M_z &= 0 \\ u &= \frac{1}{2} \cdot s_{11}^2 \cdot T_1^2 + d_{31} \cdot E_3 \cdot T_1 + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{33}^T \cdot E_3^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

cela permet de calculer les grandeurs *macroscopiques* d'un bimorphe piézoélectrique (angle α , flexion δ , volume déplacé U et charge Q) en fonction de ses conditions d'utilisation (moment de flexion M , force F , pression p et tension appliquée V)

et sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \alpha_y \\ \delta_y \\ U_y \\ Q_y \\ \alpha_z \\ \delta_z \\ U_z \\ Q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_z \\ F_y \\ p_y \\ V_y \\ M_y \\ F_z \\ p_z \\ V_z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Les différents coefficients a_{ij} sont reportés dans les tableaux TAB. 3.1 (a) et (b).

a_{ij}	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$j = 1$	$\frac{3s_{11}^E l}{2wh^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^2}{4wh^3}$	$\frac{s_{11}^E l^3}{4h^3}$	$-\frac{3d_{31}l}{2h^2}$
$j = 2$	$\frac{3s_{11}^E l^2}{4wh^3}$	$\frac{s_{11}^E l^3}{2wh^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^4}{16h^3}$	$-\frac{3d_{31}l^2}{4h^2}$
$j = 3$	$\frac{s_{11}^E l^3}{4h^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^4}{16h^3}$	$\frac{3ws_{11}^E l^5}{40h^3}$	$-\frac{d_{31}wl}{4h^2}$
$j = 4$	$-\frac{3d_{31}l}{4h^2}$	$-\frac{3d_{31}l^2}{4h^2}$	$-\frac{d_{31}wl^3}{4h^2}$	$\frac{2\varepsilon_{33}^T lw(1-k_{31}/4)}{h}$

(a) Coefficients de la déformation suivant z

a_{ij}	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$	$i = 8$
$j = 5$	$\frac{12s_{11}^E l}{hw^3}$	$\frac{6s_{11}^E l^2}{hw^3}$	$\frac{2s_{11}^E l^3}{hw^3}$	$-\frac{3d_{31}l}{4hw}$
$j = 6$	$\frac{6s_{11}^E l^2}{hw^3}$	$\frac{4s_{11}^E l^3}{hw^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^4}{hw^3}$	$-\frac{3d_{31}l^2}{4hw}$
$j = 7$	$\frac{2s_{11}^E l^3}{hw^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^4}{2hw^3}$	$\frac{3s_{11}^E l^5}{5hw^3}$	$-\frac{3d_{31}l^3}{4hw}$
$j = 8$	$-\frac{3d_{31}l}{4w^2}$	$-\frac{3d_{31}l^2}{8w^2}$	$-\frac{d_{31}hl^3}{4w^2}$	$\frac{\varepsilon_{33}^T lw(1-k_{31}/4)}{2w}$

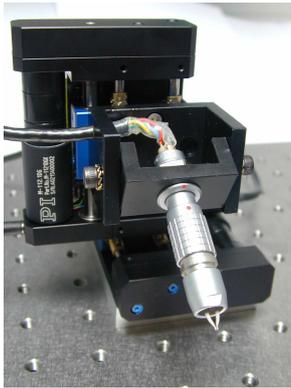
(b) Coefficients de la déformation suivant y

TAB. 3.1 – Valeur des coefficients a_{ij} du modèle analytique de l'actionneur piézoélectrique de la micro-pince [PAC⁺05].

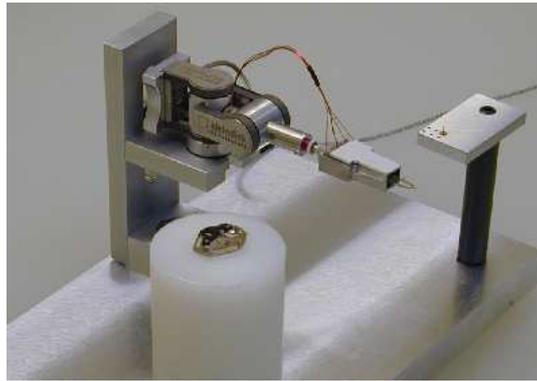
Le modèle analytique développé dans cette étude est une extension des travaux de Smits [SD89] qui ne considéraient que la déformation suivant l'axe z (et correspondant à la partie (a) du tableau TAB. 3.1) que nous avons complétés afin de prendre en compte les mouvements suivant l'axe z et y . Le principe d'actionnement de cette pince a été publié dans une conférence internationale

[PAC⁺04] et les détails de sa modélisation et de sa fabrication dans une revue internationale [PAC⁺05]. Il faut noter que notre modèle considère qu'il n'y a aucun couplage entre les directions y et z , cependant les mesures expérimentales conduites sur les pinces réalisées ont montré que ce n'était pas rigoureusement exact en pratique et que des défauts de fabrications pouvaient entraîner des couplages de plusieurs pourcents sur certains exemplaires. Ce modèle a permis de développer des outils d'aide à la conception pour le dimensionnement des micro-pinces du laboratoire afin de prédire les caractéristiques de fonctionnement statique de ces dispositifs en fonction de leur géométrie et des conditions d'utilisation.

Plusieurs versions de cette micro-pince ont été réalisées au cours de ce projet. Les premières versions étaient intégrées à l'intérieur de boîtiers électroniques ou de connecteurs LEMO ce qui permettait d'en faciliter la connexion rapide à une station de travail (cf FIG 3.8 (a)). Pour des questions de flexibilité et d'*adaptation*, les versions suivantes ont été intégrées dans des boîtiers conçus spécialement et usinés au laboratoire (cf FIG 3.8 (b)). Une commande en tension,



(a)



(b)

FIG. 3.8 – (a) Photographie de la version de pince intégrée dans un connecteur LEMO, (b) photographie de la version de pince intégrée dans un boîtier *maison*.

en charge ou en tension/charge a été spécifiquement développée au cours de cette période dans le cadre de la thèse de J. Agnus afin de réduire les non-linéarités des matériaux piézoélectriques et principalement l'hystérésis. Ces travaux ont permis de construire des amplificateurs de puissance spécifiques pour cette application de micro-pince. Grâce au stage de master de Yuji Urushima, nous avons pu intégrer cette pince dans une station de micromanipulation utilisant deux types de porteurs robotiques :

- une table de positionnement XYZ utilisant des composants standards de la société PI. Cette table est visible au second plan sur la figure FIG 3.8 (a) ;
- un micro-robot MEB-compatible de la société Kleindick. Celui-ci est visible au second plan sur la figure FIG 3.8 (b).

L'intégration de la commande et l'adaptation d'un système de retour visuel ont été finalement ajoutés à la station afin d'obtenir la première station de micro-

manipulation vraiment opérationnelle du laboratoire. Celle ci est représentée sur la figure FIG 3.9 et a fait l'objet d'une publication dans une conférence internationale [ACU⁺04].

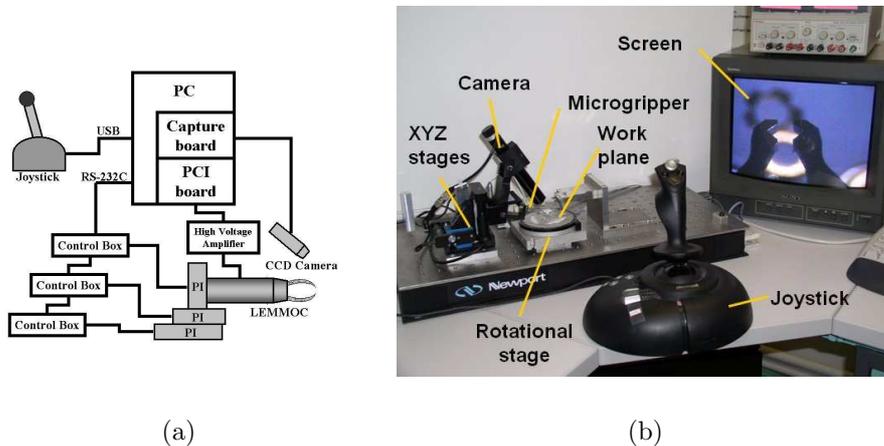


FIG. 3.9 – (a) Schéma d'implantation de notre première station de micro-manipulation, (b) photographie de la station.

3.3 Amélioration de la station et intégration d'un changeur d'outils

À la suite des travaux présentés dans la section précédente, nous avons réalisé de nombreuses améliorations et divers développements annexes dont nous ne pouvons donner tous les détails dans ce mémoire mais les plus importants sont :

- étude et validation de la compatibilité MEB de notre station puis adaptation et intégration de notre pince sur un porteur MEB-compatible développé par l'EPFL en Suisse. Ce travail a été réalisé pour le projet ROBOSEM et de nombreux essais expérimentaux ont pu être conduits dans des MEB en Suisse et en Allemagne. Une publication conjointe a été rédigée avec les partenaires de l'EMPA [CHF⁺06]. Quelques images de manipulation et d'assemblage d'un micro-roulement à l'aide de ces systèmes placés dans un MEB sont reportés sur la figure FIG 3.10.
- développement d'une station de micro-positionnement en utilisant des ferrofluides et un contrôle de champs magnétiques dans des bobines que nous avons présenté dans une conférence internationale [MH06] ;
- développement d'un support compliant et étude de son utilisation en tant qu'estimateur d'effort lors des étapes de préhension ;
- développement d'un système de changeur d'outils pour la micro-pince.

Parmi tous ces travaux d'améliorations, nous ne parlerons dans ce mémoire que du système de changeur d'outils car il a fait l'objet d'une étude conséquente et représente une part importante du travail de thèse de doctorat de C. Clévy [Cle05].

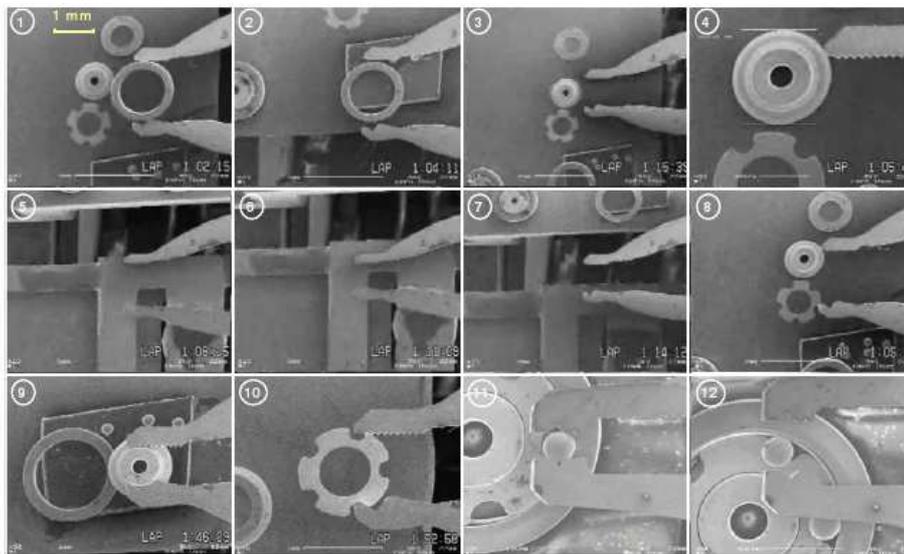


FIG. 3.10 – Photographies de quelques séquences d'assemblage d'un micro-roulement à l'intérieur d'un MEB.

Les tâches qui peuvent être réalisées dans le cadre de la micro-robotique sont nombreuses et très variées (transport, prise/dépose, traitement, assemblage, solidarisation, nano-scratching/nano-indentation,...). La micro-robotique, et la micro-manipulation en particulier, passe donc de plus en plus par le développement de systèmes flexibles pouvant évoluer dans des espaces confinés (chambre de MEB, espaces sous atmosphères contrôlées,...) [YGN03] [YGN01] [TF01] [GBM⁺04] [Fur99] et permettant d'effectuer plusieurs tâches successivement dans l'esprit du concept de *micro-usine* [HNS97] [RHL04] [BB01a]. C'est dans ce cadre que nous avons voulu développer un système de changeur d'outils adapté à la micro-pince du laboratoire qui, dans le cadre du projet ROBOSEM, devait fonctionner dans l'enceinte d'un MEB, c'est-à-dire dans un espace très restreint et qui, de plus, n'offre pas un accès facile pour effectuer des modifications puisque la mise sous vide de la chambre d'un MEB peut prendre plusieurs heures. L'idée du changeur d'outils consistait à changer la paire d'organes terminaux en fonction de la tâche à réaliser et des propriétés des objets à manipuler.

Lors de son projet de recherche de DEA, Cédric Clévy [Cle02], avait étudié la conception de systèmes de fixation temporaire pour des dispositifs micro-robotiques. Ce projet avait permis d'identifier les différents concepts utilisables et de pointer les limites des systèmes mécaniques de solidarisation temporaire qui présentaient des problèmes importants de fabrication et d'usure lors de leur miniaturisation. La solution identifiée au cours des travaux de thèse de C. Clévy et qui nous a semblé la plus prometteuse, reposait sur l'utilisation d'une colle thermique (liquide à 65°C et solide à température ambiante) permettant de solidariser les organes terminaux aux actionneurs piézoélectriques. Aucune autre équipe de recherche mondiale ne s'était encore intéressé à ce genre de dispositifs ce qui nous a encouragé à explorer ce nouveau concept. Un contrôle de

température, réalisé par une commande en courant de résistances CMS (*Surface Mounted Devices*) judicieusement placées, aurait ainsi permis de modifier la phase solide/liquide de la colle et donc de solidariser ou non la liaison entre ces organes terminaux et les actionneurs ou le magasin de stockage des outils. Le fonctionnement de ce dispositif est expliqué sur les différents diagrammes de la figure FIG 3.11. Les premiers résultats de ce principe de fonctionnement ont été publiés dans une conférence internationale [CHC04] et dans une revue internationale [CHAC05].

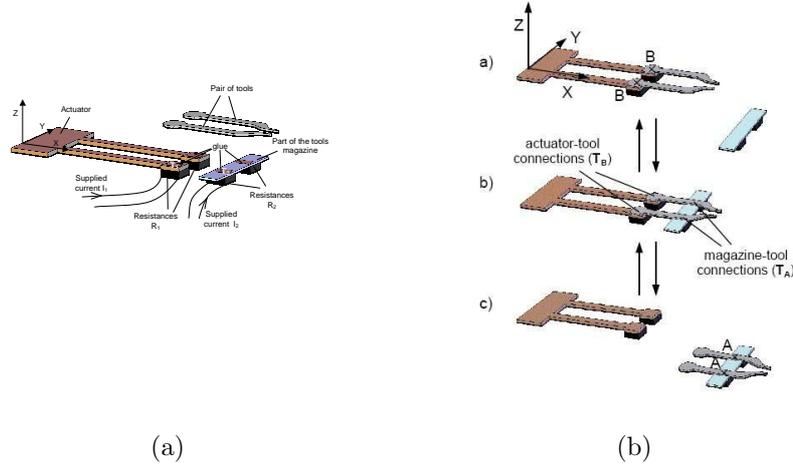


FIG. 3.11 – (a) Constitution du micro-changeur d'outils adapté sur la micro-pince piézoélectrique du LAB, (b) étapes à réaliser pour obtenir un changement d'outils.

Bien que le principe de ce changeur d'outil soit relativement simple, son contrôle était délicat puisqu'il fallait s'assurer que les phénomènes de convection et de conduction thermique ne viennent pas perturber le fonctionnement de ce dispositif. Le point le plus délicat apparaît lors de l'étape d'un changement d'outil, représentée en position centrale de la figure FIG. 3.11 (b). En effet, il faut à cet instant que la température T_1 (au dessus des résistances R_1) dépasse le point de fusion de la colle pour détacher les contacts B alors que la température T_2 (au dessus de la résistance R_2) doit impérativement rester en dessous du point de solidification de la colle pour maintenir les contacts A. Afin de s'assurer du bon fonctionnement du dispositif et d'optimiser la commande en terme de temps de cycle et de choix des amplitudes de commande des courants, une modélisation des phénomènes thermiques était nécessaire. Celle-ci est basée sur une loi de conservation de l'énergie [Eyg97] :

$$\int_V \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_S \vec{q} \cdot \vec{n}_{ext} dS + \int_V Q dV \quad (3.5)$$

où ρ est la masse volumique, C la capacité calorifique, V le volume de l'élément considérée, S la surface de l'élément considéré, \vec{q} la densité de flux de chaleur et Q la source de chaleur volumique. Dans ces travaux, le rayonnement thermique a été négligé. La densité de flux de chaleur comprend les phénomènes de conduc-

tion (Loi de Fourier) et de convection (approximation conducto-convective) :

$$\vec{q} = \vec{q}_{cond} + \vec{q}_{conv} \quad (3.6)$$

avec :

$$\begin{cases} \vec{q}_{cond} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T \\ \vec{q}_{conv} = h \cdot (T - T_\infty) \cdot \vec{n}_{ext} \end{cases} \quad (3.7)$$

où λ est le coefficient de conduction de l'élément considéré, h le coefficient de convection à la surface de l'élément et T_∞ la température ambiante. En raison de la faible épaisseur de l'outil ($180 \mu\text{m}$) devant sa longueur (forme élancée), la température a été considérée comme constante sur une section et le problème a pu se réduire à un problème de modélisation unidimensionnelle selon l'axe x . Ces hypothèses conduisent à l'équation aux dérivées partielles (EDP) suivante où la température est une fonction de l'espace et du temps $T = T(x, t)$:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] - \tilde{h} \cdot (T - T_\infty) + Q \quad (3.8)$$

$\tilde{h} = 2 \cdot \frac{(w+e) \cdot h}{w \cdot e}$ avec w et e respectivement la largeur et l'épaisseur de l'élément considéré. La source de chaleur volumétrique Q est distribuée suivant l'axe x et est considérée comme nulle dans l'outil et égale à $Q = \frac{R \cdot I^2}{V_R}$ dans la résistance de valeur R , de volume V_R et alimentée par un courant I . Afin de définir les lois de contrôle en courant des résistances du changeur d'outils, un modèle simplifié a d'abord été utilisé qui néglige l'influence de l'actionneur et du magasin. Ces hypothèses ont ensuite été vérifiées expérimentalement. Le modèle utilisé est représenté sur la figure FIG. 3.12 (l'indice r correspond à la résistance et l'indice o à l'outil) :

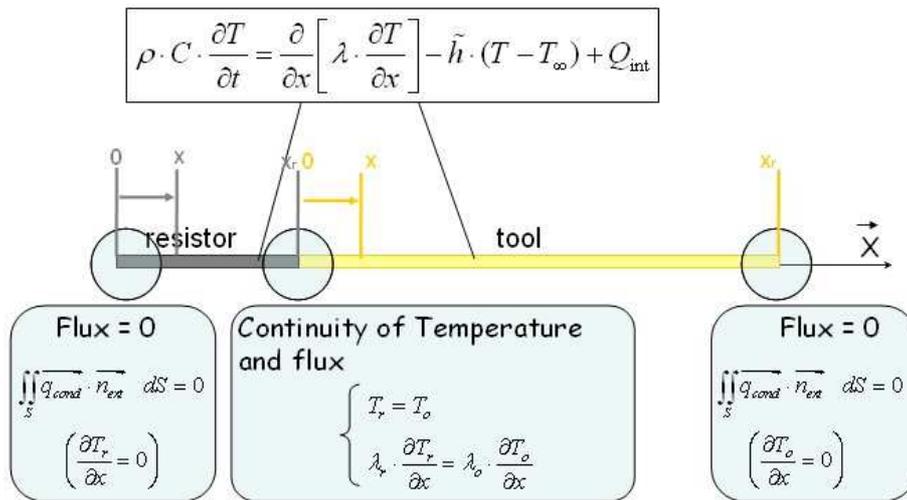


FIG. 3.12 – Schéma de la modélisation 1D du problème thermique et hypothèses utilisées.

- le modèle simplifié est l'assemblage d'une résistance au bout de laquelle est connecté un outil ;
- les conditions aux limites des EDP sont les suivantes : pas de flux de chaleur à l'extrémité des deux composants, et les températures et les flux sont considérés comme continus entre la résistance et l'outil.

L'EDP a été résolue analytiquement pour les régimes permanents pour des sources constantes, cependant la solution en régime dynamique est beaucoup plus difficile à obtenir analytiquement. Deux méthodes numériques ont alors été utilisées pour résoudre ce problème :

- une méthode des différences finies programmée en matlab ;
- une méthode des éléments finis utilisant le logiciel commercial *Comsol Multiphysic*.

Puisque nous l'avons programmée nous même, la première méthode était beaucoup plus flexible et mieux adaptable à notre problème que la seconde. Elle était donc beaucoup mieux adaptée à la phase de conception du dispositif. Pour sa résolution numérique par différences finies, l'EDP a été discrétisée en une équation de récurrence en temps et en espace. Les dérivées du premier ordre ont été approximées par une méthode d'Euler et les dérivées du second ordre par une méthode d'approximation centrée [Ozi94]. La température le long de l'outil qui est une fonction du temps et de l'espace $T(x, t)$ est alors approximée par une série $T(i, j)$ où i est l'indice d'échantillonnage de l'espace et j l'indice d'échantillonnage du temps (cf FIG. 3.13).

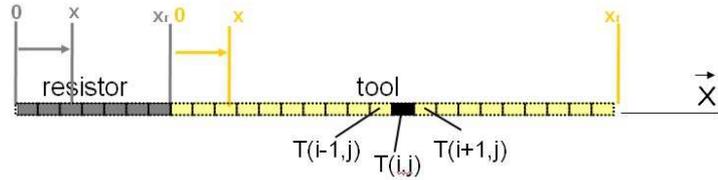


FIG. 3.13 – Maillage et éléments utilisés dans la modélisation au temps j .

L'équation de récurrence est alors de la forme :

$$\begin{aligned}
 T(i, j + 1) = & \frac{\lambda(i + 1)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T(i + 1, j) \\
 & + \left(1 - \frac{\lambda(i + 1) + \lambda(i)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \right. \\
 & \quad \left. - \widetilde{h(i)} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \right) \cdot T(i, j) \\
 & + \frac{\lambda(i)}{(\Delta x)^2} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T(i - 1, j) \\
 & + \widetilde{h(i)} \cdot \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot T_\infty + \frac{\Delta t}{\rho(i) \cdot C(i)} \cdot Q(i)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Pour faciliter les simulations numériques, cette équation de récurrence a été réécrite sous forme d'état, où la variable d'état $\mathbf{X}(j)$ contient la température de

tous les éléments au temps $j \cdot \Delta t$, soit $\mathbf{X}(j) = \{T(1, j) \cdots T(N, j)\}^T$:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(j+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(j) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(j) \\ \mathbf{Y}(j) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}(j) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}(j) \end{cases} \quad (3.10)$$

\mathbf{U} est la commande du système composé de la source thermique à chaque discrétisation d'espace et de la température ambiante, soit un vecteur de la forme $\mathbf{U}(j) = \{Q(1, j) \cdots Q(N, j) T_\infty\}^T$. \mathbf{A} est la matrice d'état construite à partir de l'équation de récurrence (3.9) et des conditions aux limites (cf. [CHC06] [CHC08]). \mathbf{C} est une matrice qui dépend de la localisation des températures considérées comme les sorties de mesure de ce système dynamique. La matrice \mathbf{D} est nulle pour cette application puisque le système est strictement causal. Contrairement à la méthode des éléments finis utilisant le logiciel Comsol, cette modélisation permet assez simplement et assez rapidement de déterminer les températures dans chacun des éléments de l'outil en fonction du courant d'alimentation des résistances et des conditions initiales de fonctionnement. Quelques résultats de simulations comparés à des mesures expérimentales sont reportés sur les figures FIG. 3.14 et FIG. 3.15 pour des régimes permanents et transitoires. Elles montrent la validité de notre modélisation thermique et de notre résolution par différences finies pour des temps de calculs raisonnables et une bonne flexibilité d'utilisation lors des phases de conception.

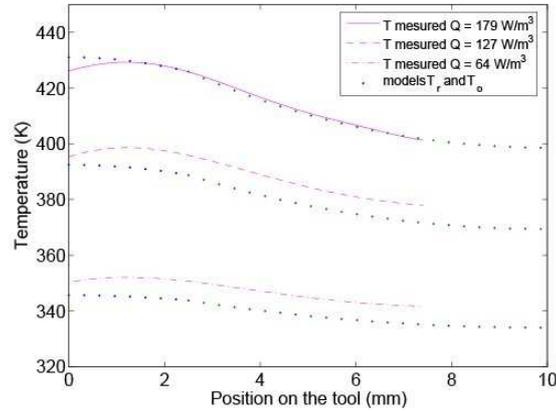


FIG. 3.14 – Comparaison entre des simulations en régime permanent et les mesures expérimentales pour trois sources de chaleur différentes ($Q = 179 \text{ W/m}^3$ a été utilisée pour l'identification alors que $Q = 127 \text{ W/m}^3$ et $Q = 64 \text{ W/m}^3$ a été utilisée pour vérifier la validité des résultats).

Lorsque des modélisations thermiques sont réalisées, certains coefficients sont extrêmement délicats à déterminer de manière théorique, c'est en particulier le cas des coefficients de convection naturelle qui dépendent, en plus de la géométrie du système et des matériaux utilisés, de beaucoup d'autres paramètres difficiles à déterminer autrement qu'expérimentalement. Il est donc souvent nécessaire de *recaler* les résultats de simulations aux mesures expérimentales afin d'obtenir de bonnes corrélations des résultats. Ces recalages sont possibles grâce à des phases préliminaires d'identification expérimentale des paramètres de l'EDP. Cette

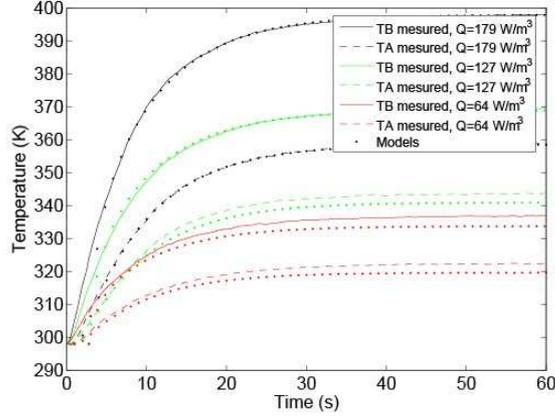


FIG. 3.15 – Comparaison entre des simulations en régime transitoire et les mesures expérimentales pour trois sources de chaleur différentes ($Q = 179W/m^3$ a été utilisée pour l'identification alors que $Q = 127W/m^3$ et $Q = 64W/m^3$ a été utilisée pour vérifier la validité des résultats).

phase préliminaire d'identification paramétrique est d'autant plus nécessaire qu'en raison des effets d'échelle, le comportement thermique des micro-systèmes est en général très différent du comportement thermique des macro-systèmes. Ainsi, les paramètres physiques (liés à la convection et à la conduction) tabulés de manière empirique dans de nombreux ouvrages classiques *macroscopiques* ne sont pas forcément utilisables pour des micro-systèmes.

Pour *automatiser* les phases d'identification paramétrique et de recalage de modèles pour nos micro-systèmes, nous avons eu recours à des méthodes numériques d'identification paramétrique. La méthode des différences finies basée sur l'équation (3.9) correspond à une équation de récurrence de la variable d'espace (indice i) et de la variable de temps (indice j). Ainsi, une méthode d'identification paramétrique de type ARX (*Auto-Régressive à partie eXogène*) peut être utilisée soit suivant l'indice de temps soit suivant l'indice d'espace. Ces deux procédures ont pu être utilisées dans nos travaux. Présentons à titre d'exemple, cette méthode pour la variable d'espace x . Dans le cas général, la méthode ARX s'applique à un modèle de la forme [Lan93] [Lju99] :

$$y(k+1) = -a_1 \cdot y(k) - \dots - a_n \cdot y(k-n+1) + b_1 \cdot u(k) + \dots + b_m \cdot u(k-m+1) \quad (3.11)$$

où la convention matricielle suivante est utilisée :

$$\tilde{y}(k | \theta) = \varphi(k)^T \cdot \theta \quad (3.12)$$

$\tilde{y}(k | \theta)$ est le calcul de $y(k+1)$ à partir des données passées $\varphi(k)$ (entrées et sorties accessibles à l'instant discret k) et des paramètres estimés θ :

$$\begin{cases} \varphi(k) = (-y(k) \dots - y(k-n+1) u(k) \dots u(k-m+1))^T \\ \theta = (a_1 \dots a_n b_1 \dots b_m)^T \end{cases} \quad (3.13)$$

Pour un temps fixe (par exemple, la réponse en régime permanent à $j = \infty$) et en utilisant l'échantillonnage spatial, l'équation (3.9) peut être ré-écrite pour $\widetilde{T} = T - T_\infty$ à l'intérieur de la résistance et de l'outil comme :

$$\begin{cases} \widetilde{T}_r(i+1, j) = a_r \cdot \widetilde{T}_r(i, j) - \widetilde{T}_r(i-1, j) - b_r \cdot Q \\ \widetilde{T}_o(i+1, j) = a_o \cdot \widetilde{T}_o(i, j) - \widetilde{T}_o(i-1, j) \end{cases} \quad (3.14)$$

avec $a_r = -(2 + \frac{\widetilde{h}_r \cdot \Delta x^2}{\lambda_r})$, $b_r = -\frac{\Delta x^2}{\lambda_r}$ et $a_o = -(2 + \frac{\widetilde{h}_o \cdot \Delta x^2}{\lambda_o})$.

Si nous définissons $\theta_r = (a_r \ b_r \ 1)^T$, $\theta_o = (a_o \ 1)^T$, $\tilde{\mathbf{y}}_r = (y_r(3) \ y_r(4) \ \dots \ y_r(n_r))^T$, $\tilde{\mathbf{y}}_o = (y_o(3) \ y_o(4) \ \dots \ y_o(n_o))^T$ et que nous introduisons les notations suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi_r^T &= \begin{pmatrix} -y_r(2) & Q & -y_r(1) \\ -y_r(3) & Q & -y_r(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_r(n_r-1) & Q & -y_r(n_r-2) \end{pmatrix} \\ \varphi_o^T &= \begin{pmatrix} -y_o(2) & -y_o(1) \\ -y_o(3) & -y_o(2) \\ \vdots & \vdots \\ -y_o(n_o-1) & -y_o(n_o-2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.15)$$

deux problèmes d'identification doivent alors être résolus :

$$\tilde{\mathbf{y}}_r = \varphi_r^T \cdot \theta_r \quad \text{et} \quad \tilde{\mathbf{y}}_o = \varphi_o^T \cdot \theta_o \quad (3.16)$$

L'estimé $\tilde{\theta}$ de θ peut alors être trouvée à l'aide d'une méthode des moindres carrés [Lju99] avec $i \in r, o$:

$$\tilde{\theta}_i = (\varphi_i \cdot \varphi_i^T)^{-1} \cdot \varphi_i \cdot \mathbf{y}_i \quad (3.17)$$

Les paramètres a_r , b_r et a_o ont été identifiés avec une grande précision (10^{-3} pour a_r et a_o , 10^{-9} pour b_r). Cependant, a_r et a_o sont extrêmement proches de la valeur -2 et b_r est presque nul, ce qui génère de fortes imprécisions dans la détermination des *paramètres physiques* (λ_r , \widetilde{h}_r et $\frac{\widetilde{h}_o}{\lambda_o}$). Pour b_r , cette imprécision dépend fortement de la valeur de Δx , ce qui signifie que la précision de la méthode sera d'autant mieux améliorée que le système sera grand ou que l'échantillonnage spatial des mesures sera rapproché². Les paramètres a_r et a_o , quant à eux, ne dépendent pas de la dimension des objets mais du problème physique – de l'EDP –, ainsi quelles que soient les dimensions des objets il sera toujours difficile d'utiliser ces paramètres d'identification pour déterminer les paramètres physiques $\frac{\widetilde{h}_r}{\lambda_r}$ et $\frac{\widetilde{h}_o}{\lambda_o}$.

Pour notre dispositif de changeur d'outils, les méthodes d'identification paramétriques que nous avons appliquées au cas thermique et micro sont donc efficaces pour déterminer précisément les paramètres des EDP correspondantes, cependant elles sont délicates à utiliser pour identifier précisément les paramètres *physiques* entrant dans la composition de ces EDP. Les détails de ces travaux de

²Nous avons utilisé un système de micro-positionnement associé à des micro-thermocouples développés au laboratoire afin de réaliser ces mesures en pratique.

modélisation et d'identification paramétriques ont été publiés dans une conférence internationale [CHC06].

Grâce à tous ces travaux, nous avons pu finalement concevoir avec succès ce dispositif de changement d'outils dont la figure FIG. 3.16 montre quelques séquences de fonctionnement. Au cours de ces travaux, les nombreux prototypes développés nous ont permis de quantifier les performances des dispositifs réalisés et de valider les résultats des modélisations développées au cours de cette période de recherche. Une synthèse complète de tous ces travaux a été publiée dans une revue internationale [CHC08]. Cette période de recherche nous a permis de concevoir un dispositif innovant de changeur d'outils pour lequel nous avons développé une démarche de conception intégrée, partant de la modélisation, de l'estimation de performance et de l'identification paramétrique permettant un recalage de modèle. Ce dispositif est, à ma connaissance, le plus petit à avoir été réalisé en 2006. Il présente un niveau de performance tout à fait honorable avec des erreurs maximales de repositionnement de $3 \mu\text{m}$ pour des valeurs moyennes inférieures à $1 \mu\text{m}$.

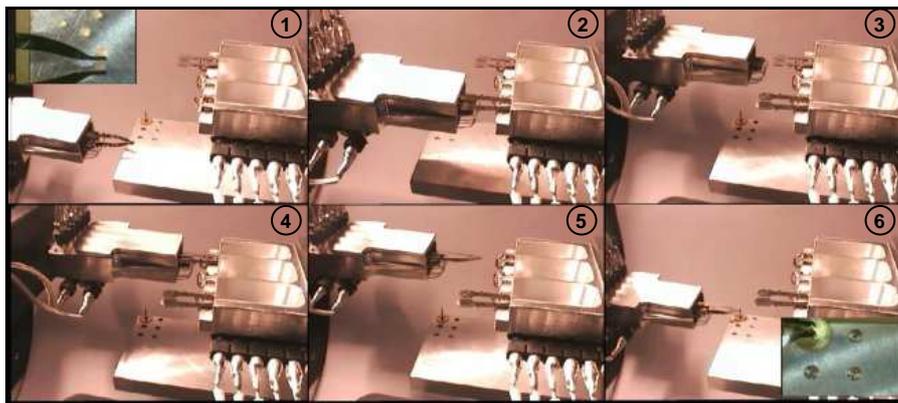


FIG. 3.16 – Étapes successives pour réaliser un changement d'outils : (1) manipulation d'un objet cubique de $300 \mu\text{m}$ de côté; (2) dépose des outils dans le magasin en refroidissant d'abord les contacts outils-magasin puis en chauffant les contacts outils-actionneur; (3) l'actionneur se déplace seul pour aller chercher l'autre paire d'outils; (4) fixation de la seconde paire d'outils à l'actionneur en refroidissant d'abord les contacts outils-actionneur puis en chauffant les contacts outils-magasin; (5) déplacement de la pince; (6) manipulation d'un pignon dont l'axe mesure $140 \mu\text{m}$ de diamètre.

3.4 Conclusion sur la période de recherche

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents concepts utilisés pendant cette période de recherche pour concevoir et modéliser une station de micro-manipulation. Celle-ci utilisait une micro-pince piézoélectrique, des porteurs robotiques ainsi que des dispositifs auxiliaires (système de *micro*-vision, changeur d'outil, estimateur d'efforts...).

Les différents dispositifs développés ont du être modélisés par des modèles de type *systèmes à paramètres distribués*. En effet, lors de la réduction de taille, il est de plus en plus délicat de modéliser ces dispositifs par des modèles à paramètres localisés et nous sommes alors contraint de modéliser leur distribution dans l'espace ce qui conduit à des EDP à la place d'EDO pour les systèmes à paramètres localisés. La résolution de ces EDP est beaucoup plus difficile et dans notre cas, elles ont pu être résolues :

- analytiquement pour des géométries simples (problème piézoélectrique du bimorphe de la micro-pince) ou pour des régimes permanents (problème thermique du changeur d'outils) ;
- numériquement pour des géométries plus complexes ou pour les régimes transitoires.

Pour les simulations numériques, des méthodes de différences finies ont été spécifiquement développées et programmées et des méthodes des éléments finis ont été utilisées à l'aide de logiciels commerciaux. Le développement spécifique d'outils numériques permet une grande flexibilité d'utilisation qui est extrêmement appréciable lors des phases de conception. De plus, les différences finies ont pu être couplées à des méthodes d'identification paramétriques (ARX + moindres carrés) afin d'effectuer des recalages de modèles et de déterminer la valeur de certains paramètres physiques. Ces paramètres sont en effet extrêmement délicats à déterminer théoriquement pour une géométrie précise et pour des dispositifs micro et bien souvent, seule une identification expérimentale permet de déterminer précisément ces caractéristiques de fonctionnement.

Les principales conclusions de ces travaux sur la conception de stations de micro-manipulation sont les suivantes :

- les microsystèmes et les dispositifs de petites tailles présentent souvent un caractère distribué qu'il est nécessaire de modéliser à partir de modèles à paramètres distribués ;
- Les modèles résultants, de type EDP, ne sont solubles analytiquement que pour des cas très simples et il est souvent nécessaire de résoudre numériquement les équations obtenues ;
- les méthodes de résolution numérique développées spécifiquement permettent de bien comprendre les phénomènes et sont utilisables lors des phases de conception ou de recalage de modèles, ce que ne peuvent souvent pas faire les logiciels d'éléments finis *du commerce* ;
- le développement de systèmes micro-robotiques nécessite d'importantes compétences multiphysiques non seulement en terme de modélisation mais également en terme de simulation, de conception et de validation expérimentales.

Pour terminer cette section, je veux souligner l'intérêt de cette période de recherche au LAB puisqu'elle m'a permis d'entrer *de plein pied* dans la modélisation, la conception et la réalisation de systèmes micro-robotiques. J'ai eu l'opportunité, au cours de cette période, de pouvoir encadrer ou co-encadrer plusieurs étudiants dont un thésard et deux masters recherche, ce qui m'a permis de développer mes capacités d'encadrement et de direction de recherches. La participation au projet européen ROBOSEM reste une très bonne expérience

qui nous a permis de tisser des liens importants avec des équipes de recherche européennes de très haut niveau. La qualité de ces relations internationales ne s'est pas démentie puisque nous avons été associés, par la suite, au montage d'un second projet européen de grande envergure³. La station de micro-manipulation développée au cours de cette période a également pu servir de base à tous les collègues du laboratoire pour développer les stations de micromanipulation suivantes. Les résultats de ces travaux ont été diffusés dans la communauté scientifique par trois revues et sept conférences internationales à comités de lectures publiées au cours de cette période de recherche. Enfin la qualité des recherches du doctorant ayant participé à ces travaux a été très bien reconnue puisqu'il a été qualifié dans deux sections CNU (60 et 61) et qu'il a réussi à obtenir un poste de maître de conférences l'année suivant la présentation de sa thèse.

Ces quatre années de recherche ont permis de mettre en évidence certaines spécificités du micro-monde et de faire émerger de nouvelles problématiques scientifiques concernant notamment l'intérêt des micro-actionneurs face aux actionneurs classiques miniaturisés. Ces réflexions m'ont poussé à ré-orienter une partie de mes activités de recherche vers la conception, la modélisation et le développement de micro-actionneurs utilisant des matériaux actifs. Ces points seront abordés dans le chapitre suivant.

³Il s'agit du projet européen Hydromel dont nous parlerons dans le prochain chapitre.

Chapitre 4

Troisième thématique de recherche (2005 → 2010) : Matériaux actifs et micro-actionneurs

Mots-clés : *modélisation et contrôle, systèmes dynamiques, mécatronique et micro-mécatronique, matériaux actifs, actionneurs pour la micro-robotique.*

Ces travaux de recherche ont été conduits au laboratoire d'automatique de Besançon (LAB) qui est devenu le département Automatique et Systèmes Micro-Mécatronique (AS2M) de l'institut Femto-ST le 01 janvier 2008. Ils se situent donc dans le même contexte et le même environnement que les travaux abordés au chapitre précédent.

Au cours de cette période, mes principaux partenaires de recherche ont été les personnes suivantes :

- Prof. N. Chaillet, directeur du département AS2M, institut Femto-ST ;
- Prof. C. LExcellent, responsable de l'équipe matériaux du Département de Mécanique Appliquée (DMA) de l'institut Femto-ST ;
- J.Y Gauthier, doctorant de N. Chaillet et C. LExcellent dont j'ai co-encadré la thèse [Gau07] et encadré le DEA [Gau04] et qui est actuellement maître de conférences à l'INSA de Lyon ;
- M. Grossard, doctorant du Prof. N. Chaillet [Gro08] et qui est actuellement ingénieur de recherche au CEA de Fontenay-aux-Roses. R. El Koury Moussa, actuellement doctorante au CEA que je co-encadre avec le Prof. N. Chaillet et le Dr M. Grossard ;
- Y. Loirat dont j'ai encadré le projet de fin d'étude d'ingénieur [Loi08].

4.1 Contexte du travail

Les travaux que nous avons menés au cours de cette période tirent leur origine des limites et des problématiques scientifiques que nous avons pu identifier au

cours de la période précédente. En effet, les tables de positionnement équipant la station de micro-manipulation de notre laboratoire étaient des axes *classiques* du commerce (moteur à courant continu et système de transmission/réduction mécanique de haute précision). La précision de ces dispositifs était suffisante pour l'application envisagée ($\pm 1 \mu\text{m}$), cependant il était évident que le niveau maximale de précision de ce type de dispositif de positionnement était pratiquement atteint. Pour améliorer encore la précision de la station, il semblait nécessaire et pertinent d'envisager le remplacement des axes *classiques* par des dispositifs de positionnement mieux adaptés à la réduction d'échelle. En particulier, afin d'éviter l'utilisation de mécanisme de transmission mécanique complexe, il fallait utiliser un actionnement linéaire direct que seuls les matériaux actifs peuvent proposer à ces échelles¹.

Les matériaux actifs sont effectivement de plus en plus utilisés en tant qu'actionneurs dans les systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques. Les matériaux piézoélectriques, magnétostrictifs, électroactifs et les alliages à mémoire de forme sont actuellement, parmi ces matériaux, les plus représentatifs et les plus utilisés [Smi05] [Pon05]. Dans le cadre de cette thématique de recherche, je me suis donc orienté vers l'étude de ces matériaux actifs et de leur utilisation comme actionneur au sein de dispositifs de micro-positionnement. Au cours de cette période de recherche, les matériaux actifs auxquels je me suis intéressé plus particulièrement ont été :

- les alliages à mémoire de forme magnétique (AMFM) ;
- les matériaux piézoélectriques.

En fait, certains de ces matériaux avaient déjà été utilisés dans des dispositifs du laboratoire (piézoélectrique et alliage à mémoire de forme non magnétique) mais il restait encore beaucoup de problématiques scientifiques à explorer concernant leur modélisation, leur commande et leur utilisation pour des applications en micro-robotique.

Mon objectif de recherche au cours de cette période a donc été d'améliorer ma compréhension du comportement de ces matériaux et de proposer des règles et des outils d'aide à la conception pour leur utilisation au sein de dispositifs micro-mécatroniques et micro-robotiques. Les applications envisagées concernaient essentiellement le positionnement à haute résolution. Pour les matériaux piézoélectriques, j'ai pu profiter de l'expérience acquise précédemment par plusieurs membres du laboratoire. Pour les AMFM, j'ai pu profiter de l'expérience qui avait été acquise sur les alliages à mémoire de forme classique (AMF : thermique et non magnétique) lors de travaux antérieurs conduits par le laboratoire en collaboration avec le laboratoire de mécanique appliquée de Besançon et le Prof. C. L'excellent. Mes objectifs de recherche s'inséraient parfaitement dans les thématiques et les objectifs du laboratoire et le Prof. N. Chaillet m'a donc soutenu dans cette voie.

4.2 Alliages à mémoire de forme magnétique

Les alliages à mémoire de forme magnétique sont une nouvelle classe de matériaux actifs dont les caractéristiques combinent celles des alliages à mémoire

¹C'est d'ailleurs, ce qui avait été fait pour la réalisation de la micropince en matériau piézoélectrique.

de forme thermiques classiques et celles des matériaux magnétostrictifs. Ils complètent ainsi l'offre actuelle en matière de matériaux actifs. Les travaux que nous avons réalisés sur ce sujet se situent dans le cadre d'une collaboration entre une équipe de recherche en mécanique et sciences des matériaux (Prof. C. L'excellent du département DMA de l'institut Femto-ST) et le département AS2M de l'institut Femto-ST auquel j'étais rattaché. Cette collaboration se justifie par la forte pluridisciplinarité nécessaire dans toutes les recherches sur les matériaux actifs.

4.2.1 Principe de fonctionnement

De par leurs caractéristiques héritées des AMF classiques et des matériaux magnétostrictifs, le mode de conversion d'énergie des AMFM peut être vu comme une superposition des effets obtenus pour ces deux classes de matériaux. Leurs performances se situent donc entre les performances de ces deux matériaux. La FIG. 4.1 donne un comparatif des performances des différents matériaux actifs concernant la relation densité d'énergie/fréquence d'utilisation.

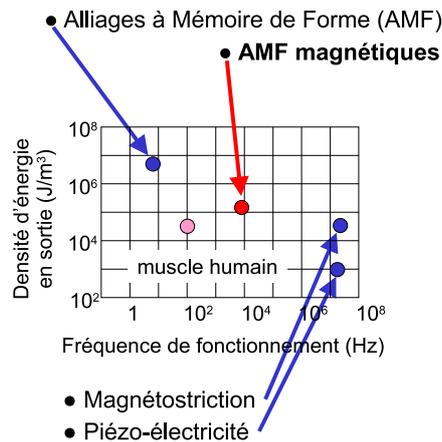


FIG. 4.1 – Caractéristiques des principaux matériaux actifs.

Les AMFM offrent une déformation maximale de l'ordre de 6 à 10 % comme les AMF thermiques classiques mais présentent des temps de réponse de l'ordre de ceux des matériaux magnétostrictifs (ordre de la milliseconde). À l'heure actuelle, deux matériaux présentant les caractéristiques des AMFM sont principalement étudiés et utilisés. Ils ont tous les deux été mis au point dans les années 1995/1996 aux États-Unis, par une équipe du MIT pour le Ni-Mn-Ga [UHK⁺96] et par une équipe de l'université du Minnesota pour le FePd [JW98]. Parmi tous les matériaux présentant les propriétés des AMFM, le plus utilisé est sans conteste le Ni-Mn-Ga. C'est ce matériau qui a été utilisé dans tous nos travaux. Le matériau à notre disposition (bâtonnets monocristallins) présente deux formes cristallographiques différentes en fonction de la température : l'austénite (la phase haute température) et la martensite (la phase basse température). L'austénite se présente sous une forme cristallographique cubique (c'est en fait plus exactement la forme cristallographique dite d'Heusler) alors que la martensite

(forme 5M pour notre matériau) se présente sous une forme parallélépipédique avec trois variantes possibles (cf. FIG. 4.2 (a)).

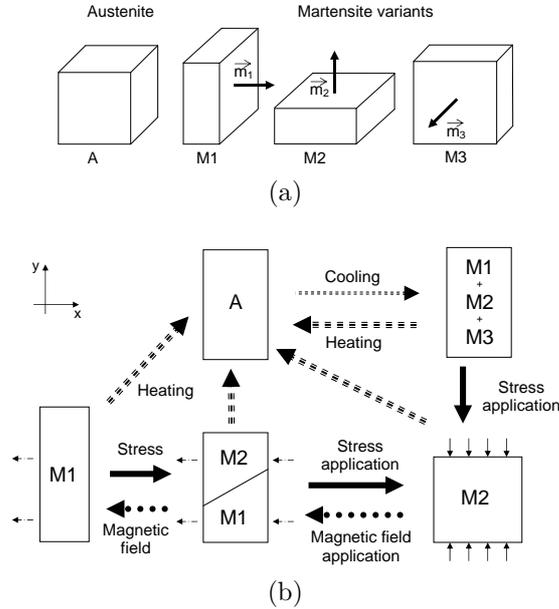


FIG. 4.2 – Constitution d'un AMFM : (a) représentation de l'austénite et des trois variantes de martensite, (b) réarrangement martensitique et transformation de phase sous l'action d'un champ de contrainte, d'un champ magnétique et de la température.

Les différents cycles de passage d'une phase à l'autre sont représentés schématiquement sur la FIG. 4.2 (b). À partir de la phase mère austénite A, un refroidissement sous contraintes nulles fait apparaître les trois phases M1, M2 et M3 à parts égales. L'application d'une contrainte magnétique ou mécanique permet de favoriser l'une ou l'autre de ces variantes. Un champ mécanique favorise la variante qui a son axe court orienté suivant l'axe de cette contrainte et un champ magnétique favorise la variante qui a son axe de facile aimantation orienté suivant l'axe de ce champ. On parle alors de réarrangement ou de réorientation martensitique. L'axe court étant le même que l'axe de facile aimantation, une disposition perpendiculaire de ces deux champs permet de favoriser dans le plan xy l'une ou l'autre des deux variantes perpendiculaires pour un actionnement en deux dimensions (M1 et M2 pour une étude et un contrôle de la déformation dans le plan xy tel que celui représenté sur la FIG. 4.2 (b)). La favorisation de l'une ou l'autre des variantes M1 et M2 permet de générer une déformation, leurs axes courts étant perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. La déformation résultant de ce principe permet de réaliser des actionneurs à partir d'un morceau d'AMFM à condition d'utiliser les contraintes mécaniques et magnétiques de manière antagoniste pour obtenir un actionnement bidirectionnel.

En résumé, un champ magnétique favorise la création de la martensite qui a son axe court dans la direction du champ appliqué. Le réarrangement d'une variante en une autre crée une déformation macroscopique et donc un déplacement. Ce comportement nous permet d'utiliser l'AMFM comme actionneur. Pour avoir un actionnement bi-directionnel en appliquant un champ magnétique, il est nécessaire de pré-contraindre l'échantillon dans une direction orthogonale au champ magnétique appliqué. Notons également que nous pouvons toujours revenir à l'état austénitique en chauffant le matériau. Ce matériau ne présente malheureusement pas que des avantages et parmi ses limitations, nous pouvons citer la fragilité du matériau, le champ magnétique important à créer (400 kA/m), la forte dépendance à la température des paramètres du matériau, la faible contrainte de blocage (2-3 MPa), ainsi qu'un hystérésis très important.

4.2.2 Modélisation thermo-magnéto-mécanique

Deux théories sont utilisées pour modéliser le comportement des AMFM :

- La première est basée sur une approche *microscopique* en utilisant la physique du solide. Les références suivantes sont les plus représentatives des travaux conduits avec cette approche [TJ99], [DJ02], [MCK03], [ALS06].
- La seconde est basée sur une approche *macroscopique* en utilisant la thermodynamique. Quelques travaux très représentatifs de ces recherches sont [Hec05], [KL05] et [CC07]. Les travaux des deux groupes de recherche suivants [SDBM06] et [SD07] sont, à mon avis, les plus proches des travaux que nous avons réalisés durant cette période. Cependant ces travaux ne prennent pas ou peu en compte l'aspect dynamique, alors qu'il est fondamental pour la conception d'actionneurs.

Alors que la première théorie est préférée par les physiciens, la seconde est préférée par la communauté des sciences pour l'ingénieur et est beaucoup plus adaptée à la conception d'actionneurs et de dispositifs de micro-positionnement. Ainsi, c'est l'approche thermodynamique que nous avons privilégié dans nos travaux, d'autant que nos partenaires du DMA l'utilisaient déjà amplement pour la modélisation des AMF *classiques*.

Pour modéliser le comportement quasi-statique des AMFM en utilisant l'approche thermodynamique, il est d'abord nécessaire de proposer une expression pour l'énergie interne \mathcal{U} de ce matériau ou pour un potentiel thermodynamique similaire (en utilisant une transformation de Legendre pour définir, par exemple, une énergie libre de Gibbs \mathcal{G} ou de Helmholtz \mathcal{F} [Cal85]). Ce potentiel thermodynamique doit prendre en compte les différents phénomènes physiques représentatifs du comportement expérimental de ce matériau. En particulier pour le comportement magnéto-thermo-mécanique des AMFM, il s'agissait de prendre en considération :

- l'énergie d'origine chimique ;
- l'énergie d'origine thermique ;
- l'énergie d'origine mécanique ;
- l'énergie d'origine magnétique.

Dans le cas des AMFM, les phénomènes de réarrangement de martensite et de transformation austénite/martensite font intervenir des comportements

fortement irréversibles. Ceux-ci doivent être décrits par des fonctions de dissipation et une inégalité de Clausius-Duhem qui permettra de traduire le second principe de la thermodynamique (irréversibilité et augmentation de l'entropie du système). Dans nos travaux de recherche, la thermodynamique des processus irréversibles à variable interne a été utilisée. Le détail complet des expressions thermodynamiques que nous avons proposé pour les AMFM ne peut pas être développé dans ce mémoire faute de place mais celle-ci utilisent une approche micro/macro qui consiste à utiliser un *volume élémentaire représentatif* pour tenter de décrire de manière macroscopique, les phénomènes apparaissant au niveau microscopique.

La Fig. 4.3 représente le volume élémentaire représentatif qui nous a permis de définir les variables internes suivantes :

- la fraction volumique d'austénite z_o ;
- la fraction volumique de la variante de martensite $1 \leq k \leq n$, z_k . Le terme $\sum_{k=1}^n z_k = (1 - z_o)$ est la fraction globale de toutes les martensites ;
- α et $(1 - \alpha)$ sont les proportions des domaines de Weiss à l'intérieur du volume élémentaire représentatif ;
- θ est l'angle de rotation de la magnétisation associé aux deux domaines de Weiss de la variante M_2 puisque, sous l'influence d'un champ d'excitation magnétique \vec{H} , la magnétisation pivote pour s'aligner sur ce champ d'excitation. Comme ce champ est parallèle à \vec{x} , il n'y a pas de rotation de la magnétisation des domaines de Weiss associés à la variante M_1 .

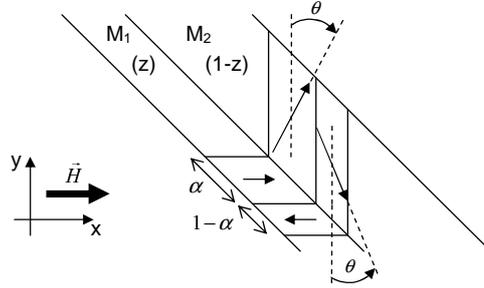


FIG. 4.3 – Volume élémentaire représentatif pour un échantillon d'AMFM constitué de deux variantes de martensite M_1 et M_2 ($z = z_1$ et $1 - z = z_2$).

Dans nos travaux de recherche sur l'actionnement plan isotherme (présence de M_1 et M_2 uniquement), nous avons pu montrer que l'énergie libre de Gibbs pouvait être exprimée par des expressions de la forme :

$$\begin{aligned}
 \rho G(\sigma, H, T, z, \alpha, \theta) = & C_p \left[(T - T_o) - T \cdot \log \frac{T}{T_o} \right] \\
 & - \sigma \gamma z - \frac{\sigma^2}{2E} + K_{12} z (1 - z) \\
 & - \mu_o M_S \left(z \left((2\alpha - 1)H - \frac{M_S}{2\chi_a} (2\alpha - 1)^2 \right) \right. \\
 & \left. + (1 - z) \left((\sin \theta)H - \frac{M_S}{2\chi_t} (\sin \theta)^2 \right) \right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

où σ , H et T sont respectivement, la contrainte, le champ magnétique appliqué et la température de l'échantillon d'AMFM. Tous les autres termes de cette expression sont des paramètres du matériau qui peuvent être estimés expérimentalement et qui ne seront pas détaillés dans ce mémoire. Dans ce type d'expression, les couplages entre les phénomènes mécaniques et magnétiques sont exprimés par le choix de la variable interne z . La déformation totale ε peut alors en être déduite :

$$\varepsilon = -\frac{\partial(\rho G)}{\partial \sigma} = \frac{\sigma}{E} + \gamma z = \varepsilon^e + \varepsilon^{dtw} \quad (4.2)$$

ainsi que la magnétisation M :

$$\mu_o M = -\frac{\partial(\rho G)}{\partial H} \quad (4.3)$$

$$= \mu_o M_S ((2\alpha - 1)z + \sin \theta(1 - z)) \quad (4.4)$$

et la force thermodynamique π^{f*} associée à la fraction de martensite z :

$$\begin{aligned} \pi^{f*} = & -\frac{\partial \rho G}{\partial z} = \sigma \gamma - K_{12}(1 - 2z) \\ & + \mu_o M_S \left[(2\alpha - 1)H - \frac{M_S}{2\chi_a}(2\alpha - 1)^2 \right. \\ & \left. - H \sin \theta + \frac{M_S}{2\chi_t} \sin^2 \theta \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

L'inégalité de Clausius-Duhem permettant de déterminer l'irréversibilité et la dissipation associée à ce réarrangement martensitique peut alors être déduite grâce à une expression de la forme :

$$dD = \pi^{f*} dz \geq 0 \quad (4.6)$$

Les cinétiques de transformation et de réorientation de phases peuvent être décrites par des fonctions linéaires par morceaux pour un comportement hystérique simple sans boucles internes ($\dot{\pi}^{f*} = 0$ ou $\dot{\pi}^{f*} = \lambda_{kin} \dot{z}$). Au cours de cette période, nous avons également mené des travaux pour modéliser des comportements hystériques plus complexes, comprenant notamment des boucles internes et des comportements anisothermes mais ils ne seront pas décrits dans ce mémoire. Cette modélisation quasi-statique nous a permis de prédire de manière assez précise le comportement dans l'espace déformation-contrainte d'un échantillon d'AMFM en fonction du champ magnétique appliqué et des contraintes mécaniques appliquées de l'extérieur. Une comparaison des résultats théoriques et expérimentaux de ces travaux est reporté sur la Fig. 4.4. Ces travaux ont pu être publiés dans [GLH⁺07].

Pour modéliser le comportement dynamique des actionneurs basés sur des AMFM, il nous a semblé pertinent d'associer la thermodynamique des processus irréversibles avec la modélisation hamiltonienne. Dans nos travaux de recherche présentés dans les chapitres précédents, nous avons utilisé la méthode de Lagrange pour modéliser les phénomènes dynamiques. L'approche variationnelle et la définition d'un Lagrangien nous permet de mélanger les différents

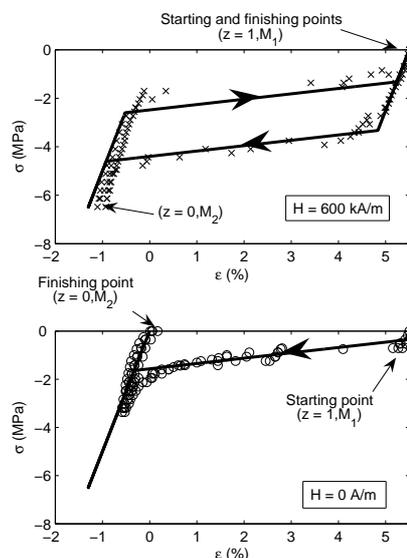


FIG. 4.4 – Déformation *vs* contraintes mécaniques pour deux valeurs de champ magnétique appliqué : prédiction du modèle (lignes continues) et résultats expérimentaux (croix ou cercles).

phénomènes physiques d'un dispositif mécatronique et de tenir compte des contraintes cinématiques et cinétiques à l'aide des multiplicateurs de Lagrange. Dans le cas des AMFM, le comportement du matériau était décrit par une approche thermodynamique, il semblait alors pertinent de remplacer la méthode de Lagrange par une méthode de Hamilton à partir d'une transformée de Legendre. En effet, le potentiel thermodynamique utilisé dans la modélisation quasi-statique de l'AMFM pouvait être beaucoup plus facilement incorporé dans la définition de l'hamiltonien (ou fonction de Hamilton) \mathcal{H} que dans un Lagrangien \mathcal{L} . La transformation de Legendre permettant de définir l'hamiltonien à partir du Lagrangien est la suivante :

$$\mathcal{H}(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \mathbf{p} \cdot \dot{\mathbf{q}} - \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.7)$$

où \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$ et \mathbf{p} sont respectivement les coordonnées, les vitesses et les impulsions généralisées du système dynamique. Le comportement irréversible associé à la non-linéarité des AMFM pouvait être décrit grâce aux variables internes et le comportement des autres composants pourrait être décrit grâce à des coordonnées généralisées classiques et à des impulsions généralisées. Cette association nous a permis d'étendre le formalisme de Hamilton aux cas non-conservatifs (ouverts et dissipatifs) et aux systèmes qui comportent des contraintes cinématiques et cinétiques. Ce formalisme hamiltonien utilisait alors une fonction d'énergie – un potentiel thermodynamique – correspondant à l'énergie totale du système et qu'on nomme l'*Hamiltonien* $\mathcal{H}(\mathbf{q}, \mathbf{p})$ [Lan86], [Gol80].

Pour un système conservatif – un système fermé thermodynamiquement et non-dissipatif –, nous avons simplement : $\mathcal{H}(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \mathcal{T}(\mathbf{p}) + \mathcal{V}(\mathbf{q})$ avec \mathcal{T} et

\mathcal{V} les énergies cinétiques et potentielles du système. Pour un système *ouvert* comme notre actionneur, celui-ci *échange* de l'énergie avec l'extérieur. C'est le cas lorsque nous contrôlons notre système grâce à une force extérieure généralisée \mathbf{f}_{ext} qui dépend explicitement du temps t (on parle aussi de systèmes *non-autonomes*). Dans notre cas, la force généralisée extérieure était soit une tension, soit un courant, ceci étant fonction du type de contrôle adopté pour l'actionneur et l'électronique de puissance. Lorsqu'un système est *dissipatif*, cela signifie qu'une partie de son énergie interne n'est pas – ou plus – disponible pour générer du travail comme l'exprime l'irréversibilité et l'inégalité de Clausius-Duhem. Cela a été pris en compte en considérant une énergie dissipée au cours de toute variation. Un système comportant des contraintes cinématiques ou cinétiques signifie qu'il existe des contraintes topologiques sur les mouvements *admissibles* du système. Ces contraintes ont pu être prises en compte dans les équations dynamiques à l'aide de multiplicateurs de Lagrange.

Pour inclure tous ces phénomènes, nous avons utilisé une *fonction de Hamilton étendue* \mathcal{H}' :

- Les forces généralisées extérieures $\mathbf{f}_{ext}(\mathbf{q}, t)$ sont prises en compte dans la variation de \mathcal{H}' en ajoutant l'influence de leur travail virtuel $\delta\mathcal{W}_{ext} = \mathbf{f}_{ext}(\mathbf{q}, t) \cdot \delta\mathbf{q}$.
- Les dissipations par frottements visqueux et sec sont prises en compte en ajoutant les variations d'énergies dissipées $\delta\mathcal{Q}_s(\mathbf{q})$ et $\delta\mathcal{Q}_v(\dot{\mathbf{q}})$. La dissipation par frottement visqueux $\mathcal{Q}_v(\dot{\mathbf{q}})$ est déterminée grâce à une fonction de dissipation de Rayleigh $\mathcal{R}(\dot{\mathbf{q}})$ de telle sorte que $\mathcal{Q}_v(\dot{\mathbf{q}}) = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{R}(\dot{\mathbf{q}}) dt$.
- Les contraintes cinématiques *holonomes* $\mathbf{c}(\mathbf{q}) = 0$ sont prises en compte grâce à une technique de multiplicateur de Lagrange en ajoutant le terme $\lambda \cdot \delta\mathbf{c}(\mathbf{q})$ à la variation $\delta\mathcal{H}'$. Dans ce dispositif, nous n'avons pas de contrainte cinétique *non-holonomes*.

$$\delta\mathcal{H}' = \delta\mathcal{H} - \mathbf{f}_{ext} \cdot \delta\mathbf{q} - \delta\mathcal{Q}_s - \delta\mathcal{Q}_v + \lambda \cdot \delta\mathbf{c} \quad (4.8)$$

Le principe de Hamilton a pu ensuite être appliqué en utilisant l'hamiltonien augmenté défini précédemment :

$$\delta\mathcal{S} = \delta \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{p}\dot{\mathbf{q}} - \mathcal{H}' dt = 0 \quad (4.9)$$

Après utilisation du calcul variationnel, nous avons pu en déduire les équations de Hamilton :

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} \\ \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} - \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \mathcal{Q}_s}{\partial q_i} + f_{ext,i} - \lambda_i \cdot \frac{\partial c_i}{\partial q_i} \end{cases} \quad (4.10)$$

Dans un premier temps, ces équations ont pu être utilisées pour modéliser un actionneur très simple représenté sur la Fig. 4.5. Les comparaisons entre les résultats théoriques et les réponses expérimentales sont reportées sur la Fig. 4.6. Les prédictions sont relativement bonnes vue la complexité des phénomènes mis en jeu dans ce dispositif d'actionnement. Tous ces développements ont été publiés dans une revue internationale [GHA⁺08b].

Il est important de remarquer que ce genre d'actionneurs ne peut fonctionner de manière bi-directionnelle (en $\pm x$) que si une précontrainte mécanique

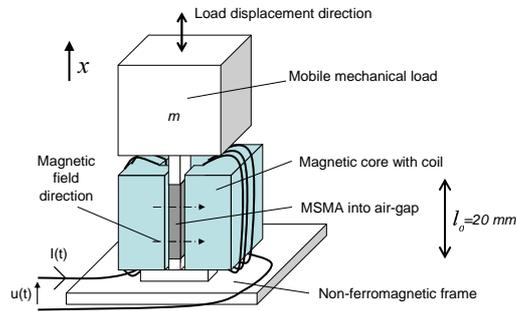


FIG. 4.5 – Description de l'actionneur simple à base d'AMFM.

est appliquée sur l'AMFM. Dans ce prototype, elle est appliquée par la masse à déplacer alors que dans beaucoup de prototypes de la littérature, celle-ci est obtenue à l'aide de ressorts de précontrainte. Cet impératif résulte du comportement non-linéaire fortement hystérétique comme cela a pu être montré dans nos travaux de recherche et publié dans la conférence internationale [GHA⁺07b].

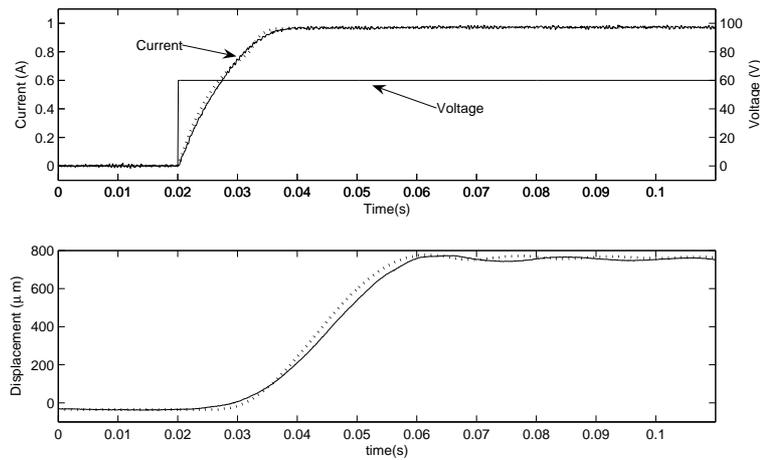


FIG. 4.6 – Comportement dynamique du système simple : tension, courant et déplacement en fonction du temps : simulations (lignes pointillées) et résultats expérimentaux (lignes continues).

Nous pouvons noter que le formalisme de Hamilton correspond à une description dynamique sous forme d'état. Cette description peut-être modifiée pour utiliser une description *hamiltonienne à ports* (*Port-Hamiltonian*) qui va modifier les équations précédentes afin de faire apparaître les interconnexions dans le système [Van00] [BLME07]. Pour un système conservatif (fermé et non-dissipatif) et en utilisant le formalisme Hamiltonien à ports, les équations de Hamilton sont ré-écrites sous la forme suivante où \mathbf{J} est appelée la matrice

d'interconnexion :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} q_i \\ p_i \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix}}_{\mathbf{J}} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \\ \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Cette formulation peut être étendue pour s'appliquer à un système non conservatif. L'extension à un système dissipatif, commandé et avec des contraintes cinématiques est alors écrite sous forme hamiltonienne à ports en utilisant une matrice \mathbf{A} qui représente les contraintes cinématiques entre les différentes variables q_i , ainsi qu'une matrice \mathbf{R} de dissipation tenant compte des frottements secs et visqueux et une matrice \mathbf{B} liée à la commande $u(t)$:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & -\mathbf{R} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{q}} \\ \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{p}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{A} \end{pmatrix} \cdot \lambda + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} \cdot u(t) \quad (4.12)$$

Lors de ces travaux, nous n'avons pas utilisé complètement le formalisme Hamiltonien à ports qui nécessite de définir également une variable de sortie duale de la variable d'entrée de commande. Le produit scalaire entre ces deux variables d'entrée et de sortie correspond alors à la puissance transmise à ce système, c'est-à-dire à la variation totale au cours du temps de son hamiltonien (principe de conservation d'énergie). Cette représentation a alors le mérite de faire apparaître une matrice d'interconnexion qui donne explicitement la structure d'interconnexion des différents sous-systèmes du dispositif. Des outils récents permettent alors de développer des commandes non-linéaires innovantes basées justement sur cette structure. Actuellement, nous travaillons sur l'adoption de ce formalisme hamiltonien à ports pour développer de nouvelles lois de commande non-linéaires mais ces travaux n'en étant qu'à leurs débuts, nous ne les présenterons pas dans ce chapitre. Nous y reviendrons dans la dernière partie de ce mémoire lorsque nous aborderons la synthèse et les perspectives de ces travaux.

Comme l'indique le titre de cette sous-section, le modèle développé au cours de ces recherches inclut également les phénomènes thermiques. En effet, bien que nous ayons utilisé essentiellement ces matériaux en réorientation de phases martensitiques (comportement isotherme), ils peuvent également être utilisés en mode de transformation de phase austénite/martensite (mode anisotherme). Ces transformations ont aussi été étudiées et des modèles proposés et présentés dans la conférence [GLH⁺10]. Les modèles obtenus sont très complexes et ne seront pas développés dans ce mémoire. Faute d'un dispositif expérimental adéquat, ils n'ont malheureusement pas pu être validés expérimentalement au sein de notre département. Cependant des confrontations avec des résultats expérimentaux issus de la littérature nous ont permis de montrer qualitativement une bonne représentativité des premiers résultats de ces modélisations thermo-magnéto-mécaniques.

4.2.3 Application à la conception et à la commande d'actionneurs

En dehors des très nombreux travaux réalisés sur les AMFM par les chercheurs en science des matériaux, assez peu d'études sont effectuées dans les domaines applicatifs et notamment celui de la conception d'actionneurs et de capteurs.

Les principales réalisations sont l'œuvre de la firme finlandaise Adaptamat et de quelques laboratoires de recherche. Ils utilisent essentiellement le principe décrit précédemment pour notre actionneur simple avec en plus un ressort de précontrainte [TSJ⁺02], [STP⁺02], [STA⁺04], [SPU04]. La société Adaptamat a également réalisé un actionneur de type *Inchworm* ainsi qu'une pompe. Un concept de pompe est également proposé par la société Active Control eXperts située à Cambridge dans le Massachusetts aux États-Unis en collaboration avec le MIT. Quelques prototypes de soupapes existent également, notamment celui recensé dans [STP⁺02] et celui présenté par la société Midé technology Corp. Nous pouvons également citer un micro-actionneur pour scanner optique [KBOT04] [KBK06] contrôlé en température. Celui-ci utilise l'effet reluctance variable associé au passage de la température de Curie du matériau plutôt que le principe de réorientation des variantes M1/M2 comme dans toutes les autres réalisations. Quelques prototypes de type push-pull sont également proposés en Chine [WLZW05] [WLZ⁺05] [ZW07] en association avec une locomotion de type *Inchworm* et en Allemagne [GHU06]. Nous en avons nous-même proposé une version dès 2005/2006 [GHA⁺06]. En dehors de ces quelques réalisations issues de travaux de laboratoires de recherche, peu de réalisations existent et pratiquement aucune en France. De plus, aucun de ces prototypes n'est véritablement utilisé industriellement. Le manque d'applications concrètes est en grande partie dû aux difficultés de conception et de contrôle de ces dispositifs.

Durant cette période de recherche, nous avons pu exploiter certaines propriétés dynamiques résultant de l'hystérésis afin d'augmenter la course du prototype d'actionneur simple publié dans [GHA⁺08b] en faisant appel à une commande hybride innovante. Celle-ci utilise des retours en arrière et des prises d'élan assez similaires aux techniques utilisées dans les pendules inversés pour les amener dans le demi-plan supérieur (cf. [ÅströmF00]). Ces structures de commande hybride permettent d'intégrer à la fois, de la commande classique (PID) et de la commande *prédictive* en couplant l'algorithme de commande à des simulations qui permettent ainsi de prédire en temps réel, le *régime actuel de fonctionnement* et ainsi, de pouvoir *commuter* entre différentes stratégies de commande (prise d'élan ou commande linéaire) et différents réglages (correcteurs adaptatifs). Dans un premier temps, ce prototype d'actionneur a été contrôlé en boucle fermée à la fois en position et en courant en suivant le schéma-bloc de la figure 4.7.

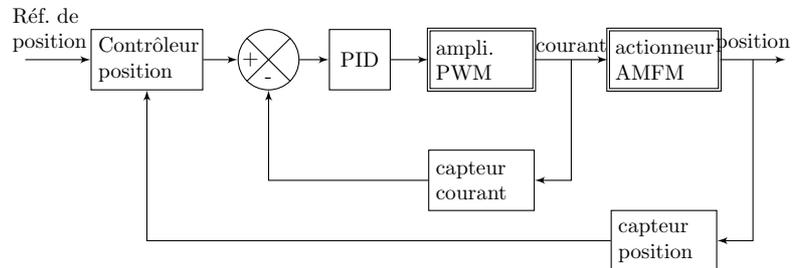


FIG. 4.7 – Schéma-bloc du contrôle en boucle fermée de l'actionneur à base d'AMFM.

La FIG. 4.8 reporte les performances obtenues avec ce contrôle classique par PID en incluant une limitation de courant permettant de maîtriser les échauffements et donc les problèmes de transformation de phase. Pour ce type de contrôle, nous constatons que la plage maximale de déplacement est de l'ordre de la moitié des 6% maximum de déformation du NiMnGa.

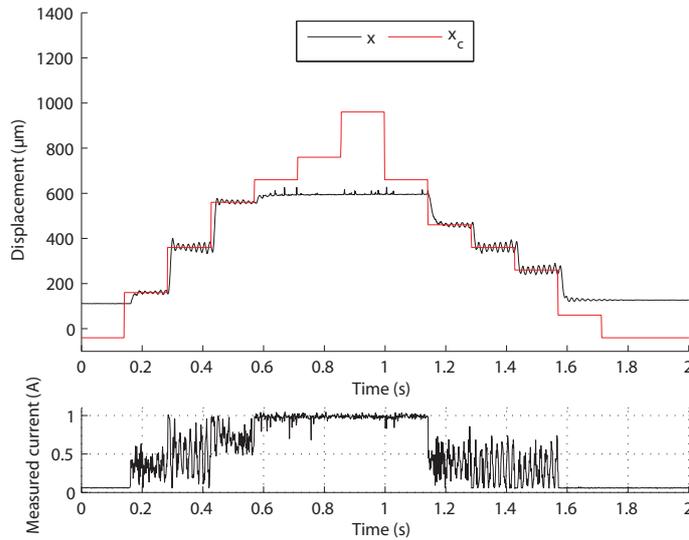


FIG. 4.8 – Résultats expérimentaux de commande de l'actionneur simple à l'aide d'un contrôleur en boucle fermée utilisant des PID et une limitation de courant.

Les travaux de modélisation présentés précédemment ont permis de montrer qu'un actionnement dynamique permettrait d'augmenter les déplacements en limitant les pertes par hystérésis. Ce phénomène a été expliqué en mettant en évidence les différences dans les transferts d'énergie entre un mouvement dynamique (rapide) et un mouvement quasi-statique (lent) dans [GHA⁺07b]. Des prises d'élan devaient donc permettre d'étendre la plage de fonctionnement maximale de cet actionneur. Deux types de commande hybride ont donc été développés afin d'améliorer cette première commande. Le fonctionnement de la première commande hybride est assez simple. Il utilise, en plus du correcteur PID de position, des détections de seuils et des mesures de délais qui permettent alors de générer une prise d'élan lorsque l'actionneur est au bout de sa course en mode quasi-statique. La seconde commande hybride, plus perfectionnée que la première, utilise de plus un modèle prédictif de comportement afin de déclencher ces prises d'élan dès que c'est nécessaire. Les résultats de ces deux commandes sont reportés sur la FIG. 4.9 pour la première commande hybride et sur la FIG. 4.10 pour la seconde commande hybride. Ces deux commandes permettent de doubler la plage de déplacement par rapport à la commande classique reporté sur la FIG. 4.8 et ainsi de se rapprocher des 6% de déformation maximale normalement atteignable par ce type de matériau actif. La description de la partie prédictive de ce contrôleur a été publiée dans la conférence internationale [GHA⁺06] et la partie commande ainsi que les résultats expérimentaux

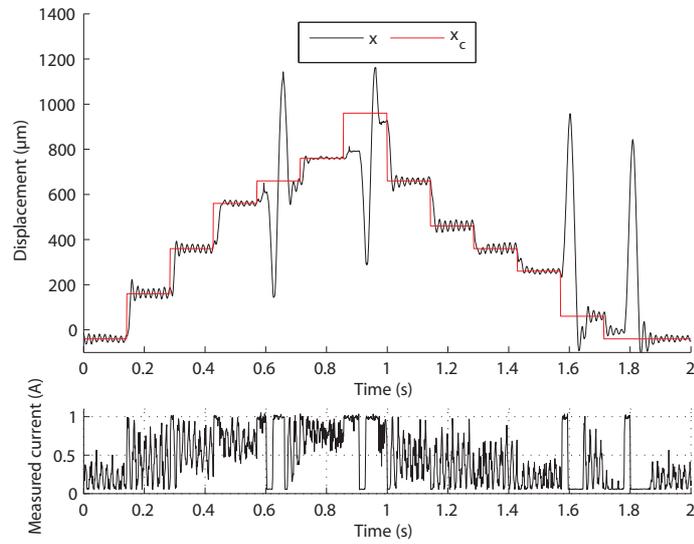


FIG. 4.9 – Résultats expérimentaux de commande de l'actionneur simple à l'aide d'un contrôleur hybride sans modèle de prédiction.

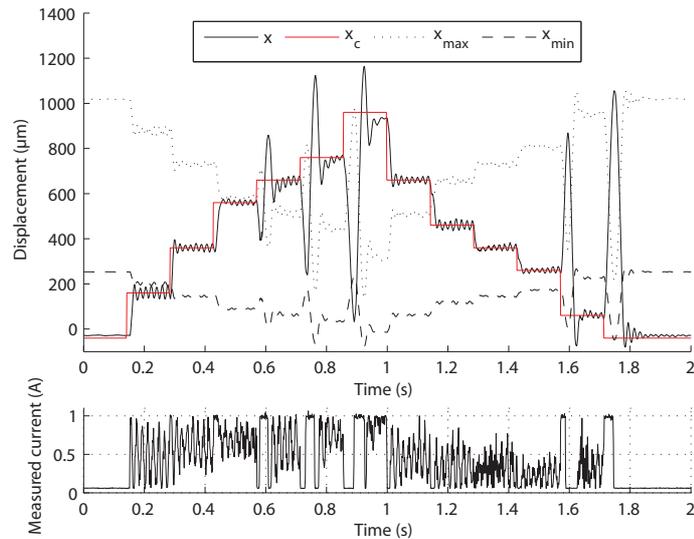


FIG. 4.10 – Résultats expérimentaux de commande de l'actionneur simple à l'aide d'un contrôleur hybride avec modèle de prédiction.

l'ont été dans la conférence internationale [GHA⁺07b]. Cette commande permet d'exploiter au maximum le comportement non-linéaire modélisé dans nos précédents travaux et elle permet ainsi de doubler les plages de déplacement des actionneurs en AMFM par rapport à une commande classique, tout en conservant une stabilité et une précision comparable. Bien évidemment, la prise d'élan

fait nécessairement apparaître des dépassements importants, ce qui restreindrait son utilisation à des applications où cela n'est pas gênant.

L'étude de ce premier prototype d'actionneur a mis en évidence un certain nombre d'avantages et de défauts qui doivent être judicieusement exploités pour pouvoir concevoir des dispositifs à base d'AMFM concurrentiels ou tout du moins complémentaires des dispositifs utilisant d'autres matériaux actifs. En premier lieu, il est évident que l'AMFM n'est pas concurrentiel pour des applications où d'autres matériaux sont bien implantés. En particulier sur des positionnements précis et de très faibles amplitudes, le choix de matériaux piézoélectriques est beaucoup plus pertinent (par exemple pour les tubes de microscope à force atomique). De même, pour des applications micro et macroscopiques nécessitant très peu de dynamique, les AMF classiques ou les actionneurs thermiques sont plus performants (manchons de raccordement de durites d'aviation, joints d'étanchéité, bilames thermiques).

Le champ applicatif des AMFM ne peut a priori se trouver que sur des niches où leurs qualités peuvent être exploitées et leurs défauts masqués. Par exemple, la présence d'un fort hystérésis peut-être utilement exploitée pour conserver une position stable à excitation ou alimentation nulle. Ceci permet une consommation réduite d'énergie pour des applications embarquées de type spatial ou micro. Cependant dans ce cas, il est nécessaire de supprimer le retour en position par précontrainte mécanique (création d'un offset dans la courbe de comportement) sans pour autant supprimer la capacité d'actionnement bidirectionnel. Ceci peut-être fait de manière similaire à ce qui est fait en électronique pour les amplificateurs (passage de la classe A à la classe B) en utilisant un fonctionnement en push-pull à l'aide de deux actionneurs simples fonctionnant en antagonisme comme décrit sur la Fig. 4.11 pour remplacer le dispositif de pré-contrainte des actionneurs simples.

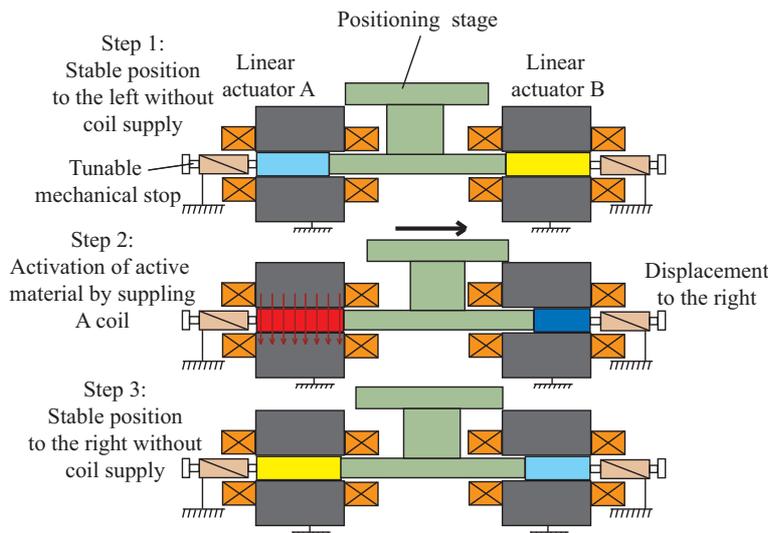


FIG. 4.11 – Description de la configuration en actionneur push-pull utilisant deux AMFM antagonistes.

Un autre inconvénient des AMFM est leur très faible rendement en terme de conversion d'énergie électromécanique. C'était déjà le cas pour les AMF classique mais pour les AMFM, la situation est aggravée en raison des niveaux importants de champ magnétique (environ 1 T) nécessaires pour déclencher le processus de ré-orientation des phases de martensites. Pour atteindre ces valeurs, des courants importants doivent circuler dans les bobinages, ce qui crée d'importantes pertes par effet Joule. En raison de la diffusion thermique de cette chaleur dans les AMFM, ces pertes peuvent élever la température dans ces matériaux, ce qui conduit à une transformation de phase austénitique et une *destruction* du principe de fonctionnement de l'actionneur par ré-orientation des martensites. Pour éviter ces problèmes, nous avons développé des stratégies de contrôle par impulsion de courant.

Toutes ces règles de conception d'actionneurs AMFM ont fait l'objet d'une présentation dans une conférence [GHA⁺07a] qui a été par la suite sélectionnée pour être republiée dans une revue [GHA⁺08a].

Un nouveau prototype a été conçu lors du projet de fin d'étude d'ingénieur de Yann Loirat et dans le cadre du projet européen Hydromel. Cet actionneur a été conçu en respectant le cahier des charges suivant :

- cet actionneur doit être aussi rapide que possible (grande dynamique). Cette propriété dépend essentiellement du temps d'établissement des courants et donc de la conception des bobinages et de l'électronique de puissance ;
- les structures mécaniques doivent être conçues pour éviter les jeux et les frottements (précision et efficacité) ;
- la température du dispositif doit être maintenue en dessous de 40 °C afin d'éviter une transformation en austénite ;
- un capteur de position doit être inclu dans le dispositif final et les dimensions totale doivent être réduites au maximum.

Les enroulements ont été optimisés en utilisant des méthodes analytiques et numériques par éléments finis. Les enroulements actuels permettent de créer un champ magnétique de 1 T à l'aide de courant de 2 A pour des dimensions de $19 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$. L'électronique de puissance a été conçue pour alimenter les deux bobinages par une technique de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation - PWM) et un capteur de déplacement a été intégré au prototype final. L'électronique inclut un contrôle en boucle fermée du courant, un générateur PWM, un contrôle en boucle fermée de position et un contrôle de température à l'aide de micro-thermocouples. La figure 4.12 représente le modèle CAO du dispositif et la figure 4.13, une photographie de l'actionneur. Les dimensions totales de cet actionneur sont de $110 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$.

Des mesures de performances ont pu être réalisées sur ce dispositif de micro-positionnement :

- Plage de déplacement : un déplacement total d'approximativement 1 mm est désormais possible et le déplacement maximal est plus important en mode dynamique qu'en mode quasi-statique comme nos modèles et nos prédictions théoriques le laissaient prévoir. Ces résultats sont reportés sur

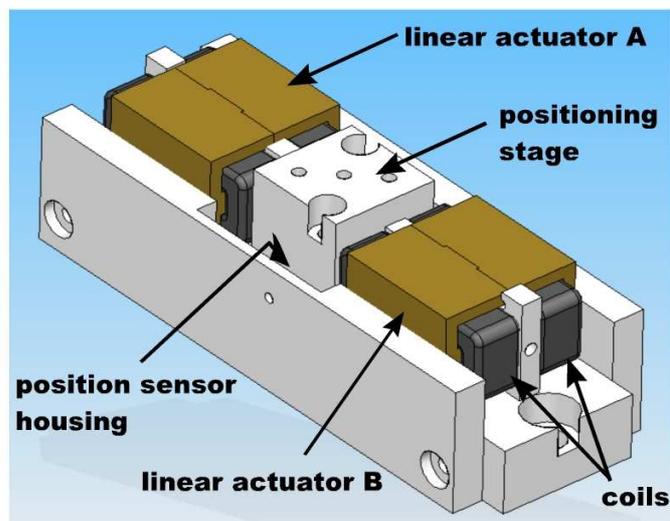


FIG. 4.12 – Modèle CAO de l'actionneur push-pull utilisant des AMFM antagonistes.



FIG. 4.13 – Photographie de l'actionneur push-pull utilisant des AMFM antagonistes.

la Fig. 4.14 pour ces deux modes de fonctionnement. Pour un mouvement sans charge, la constante de temps du contrôle de position est de l'ordre de 10 millisecondes. La force maximale de bloquage est située entre 2 et 3 MPa.

- Rendement et contrôle par impulsions de courant : comme expliqué précédemment, un contrôle par impulsions de courant est possible (cf. Fig. 4.15). Ce mode de fonctionnement procure deux avantages au dispositif. Premièrement, l'actionneur peut conserver une position sans alimentation : cela

permet de limiter l'énergie d'alimentation et donne au dispositif un très bon rendement en mode statique. Deuxièmement, l'actionneur peut être alimenté par des impulsions de courant pour changer sa position : cela permet de réduire fortement la puissance moyenne et efficace des courants et donc de réduire drastiquement les pertes par effets Joule. Le courant maximal peut être très fortement augmenté sans échauffement important du dispositif et sans provoquer de transformation de phases austénitique.

- Résolution et précision : la résolution de l'actionneur a été mesurée à l'aide d'un train d'impulsion (cf. Fig. 4.16). La précision maximale de ce micro-actionneur est actuellement de l'ordre du micromètre. Les actionneurs à base d'AMFM sont donc une alternative viable pour des dispositifs de positionnement dans cette plage de précision.

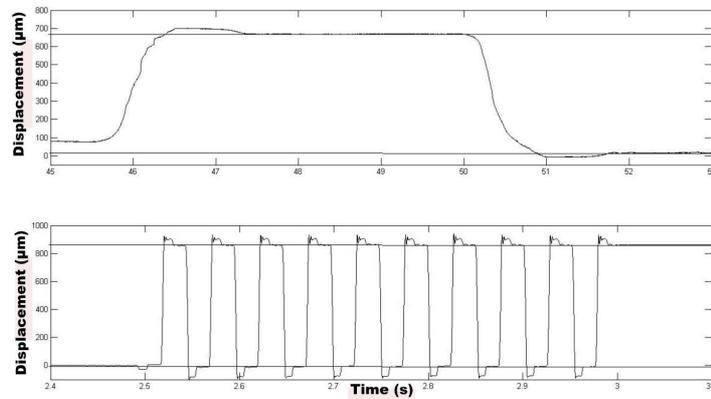


FIG. 4.14 – Mesures de déplacement de l'actionneur à base d'AMFM (mode de fonctionnement quasi-statique et dynamique).

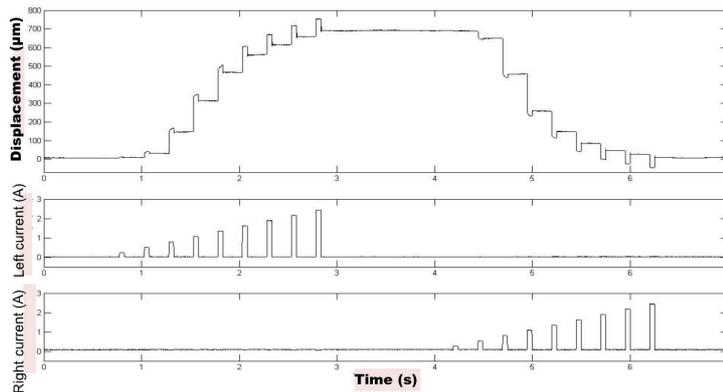


FIG. 4.15 – Contrôle par impulsions de courant de l'actionneur utilisant des AMFM.

Le prototype de la Fig. 4.13 peut également être contrôlé en boucle fermée à la fois en position et en courant comme représenté sur le schéma-bloc de

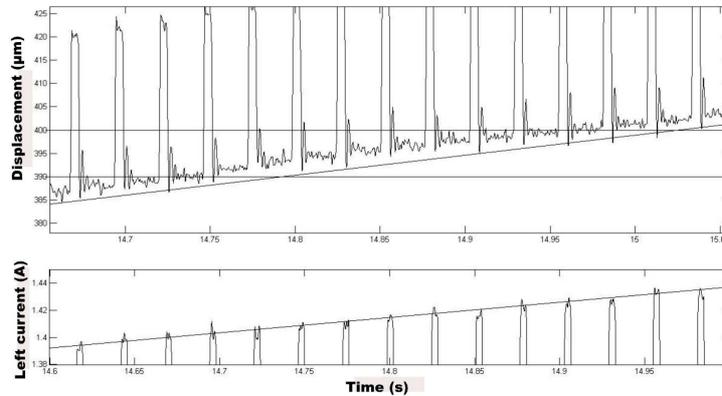


FIG. 4.16 – Résolution de l'actionneur utilisant des AMFM.

la figure 4.7 (contrôle linéaire du courant et non par impulsion dans ce cas). Les résultats principaux concernant cette dernière version d'actionneur utilisant les AMFM a été assez récemment soumis à une revue internationale et est actuellement en cours d'évaluation.

Ces systèmes de contrôle sont suffisants pour donner une précision de positionnement de quelques micromètres cependant un des avantages des matériaux actifs est de les utiliser aussi bien en tant qu'actionneur qu'en tant que capteur. Nous avons envisagé cette possibilité pour les AMFM dès 2005 dans un *workshop* spécifiquement dédié aux AMFM [GHA⁺05] et nous y avons beaucoup retravaillé depuis. La figure 4.17 montre des résultats expérimentaux que nous avons publié dans [GHA⁺08b] et qui valident cette idée. Un échelon de 100 V est appliqué sur le bobinage pour l'AMFM bloqué à $z=0$ puis pour un AMFM libre de contraintes initialement à $z = 1$. Nous voyons clairement un changement de la réponse en fonction de z et donc une possibilité d'utilisation des AMFM en self-sensing pour estimer la déformation du matériau et donc le déplacement de l'actionneur. Peu d'études concernant cette possibilité ont été publiées dans la littérature. [SPU05] utilise une mesure de l'inductance des bobines comme paramètre d'entrée des estimateurs, cependant, cette étude a été réalisée pour un faible champ magnétique et dans des conditions expérimentales spécifiquement dédiées à ces mesures. Nos travaux ont, quand à eux, été réalisés dans les conditions de fonctionnement standards de l'actionneurs (champs magnétiques élevés, saturation des matériaux et perturbations due aux convertisseurs statiques) et dans ce cas, l'estimation de position par self-sensing est beaucoup plus délicate. À l'heure actuelle, les estimations de positions à l'aide du self-sensing sont donc d'une précision bien inférieure à celle obtenue par le capteur de déplacement. Cependant la possibilité d'utilisation des AMFM en *self-sensing* est validée et les résultats pourront certainement être améliorés dans le futur.

Les travaux futurs concernant le contrôle de ces actionneurs s'orientent vers l'utilisation des méthodes hamiltonienne à ports qui sont parfaitement compatibles avec la modélisation thermodynamique/hamiltonienne augmentée, que nous avons développée dans ces travaux.

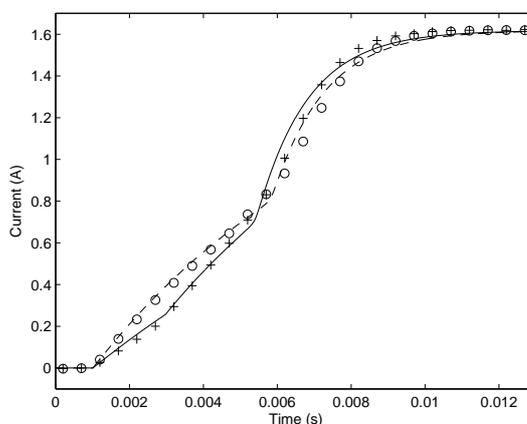


FIG. 4.17 – Possibilité d’utilisation du self-sensing pour les AMFM : mesure du courant en fonction du temps pour un échelon de tension de 100 V pour $z = 1$ (modélisation : lignes continues et résultats expérimentaux : croix) et pour $z = 0$ (modélisation : lignes pointillées et résultats expérimentaux : cercles).

Pour finir, Il est également important de noter qu’il n’y a pour l’instant aucun intérêt à utiliser l’AMFM en mode de conversion d’énergie par transformation de phase (fonctionnement des AMF thermiques classiques) puisque d’autres matériaux et notamment le NiTi ont des propriétés bien plus intéressantes dans ce mode de conversion. En effet, le NiTi n’a pas besoin d’être monocristallin et est donc bien moins fragile, bien moins cher et beaucoup plus facile à mettre en œuvre. Cependant, nous avons toutefois étudié la modélisation du comportement anisotherme de ces matériaux. Une partie de ces résultats a été publiée récemment dans une conférence internationale [GLH⁺10] et la totalité a été soumise à une revue internationale et est encore en cours d’évaluation.

4.3 Matériaux piézoélectriques

Dans plusieurs ouvrages d’origine allemande, le terme *adaptronique* est utilisé pour décrire des structures intégrant à la fois des fonctions d’actionnement, de mesure et de contrôle [Jan07]. Ce terme d’adaptronique renvoie alors aux appellations plus connues sur le plan international sous les noms de *smart structures*, *smart materials*, *intelligent systems*, *adaptive structures* ou encore *active structures* [HG06]. La notion d’adaptronique désigne un système commandé en boucle fermée dans lequel au moins un élément – en général un matériau actif – est utilisé de manière multifonctionnelle. Lorsque nous réduisons l’échelle des systèmes mécatroniques en systèmes micro-mécatroniques, la miniaturisation s’accompagne nécessairement d’une intégration fonctionnelle. Cette tendance générale pousse les systèmes micro-mécatroniques à posséder une densité fonctionnelle de plus en plus grande, convergeant ainsi vers le concept d’adaptronique. Cette section se propose de présenter les développements que nous avons réalisés sur ces intégrations fonctionnelles et adaptroniques en utilisant les matériaux piézoélectriques.

Mes travaux sur les matériaux piézoélectriques ont débuté dès mon arrivée à Besançon puisque la pince intégrée à la première station de micro-manipulation utilisait des bimorphes piézoélectriques. Dans ce cadre, j'ai donc pris part dès 2002 aux travaux de recherche du laboratoire sur la modélisation et la commande des systèmes piézoélectriques. Mes travaux sur ce sujet n'ont cependant pris toute leur ampleur que plus récemment (2006/2007) à la suite d'une collaboration entre notre département de recherche et le CEA de Fontenay-aux-Roses. En effet, le CEA avait développé un logiciel d'optimisation topologique de structures flexibles (FlexIn) pour concevoir des dispositifs mini ou micro-robotiques passifs et il voulait en développer une extension qui pourrait prendre en compte un actionnement et une mesure intégrés. Il s'agissait dès lors de s'investir dans des problèmes d'optimisation de structures flexibles contenant des actionneurs et des capteurs intégrés. En raison de leur facilité de modélisation et de commande, les matériaux piézoélectriques² furent assez vite et assez naturellement choisis comme matériaux actifs intégrés pour l'actionnement et la mesure de ces structures topologiques déformables.

4.3.1 Conception optimale de structures flexibles

L'actionnement à base de matériaux piézoélectriques est largement utilisé pour la conception de systèmes micro-mécatroniques. Nous l'avons nous-même utilisé précédemment pour concevoir la micropince décrite dans le chapitre 2. Contrairement aux AMFM utilisés dans les dispositifs micro-mécatroniques de la section précédente, les matériaux piézoélectriques présentent de faibles déformations (de l'ordre de 0,1%) qui nécessitent d'imaginer des schémas d'actionnement maximisant les courses des actionneurs (jusqu'à quelques dizaines de micromètres) sans réduire fortement les forces développées à leur extrémité. La plupart des méthodes existant dans la littérature pour concevoir de manière systématique des structures actionnées amplificatrices s'orientent vers l'emploi de structures flexibles. En effet, les mécanismes déformables monolithiques ne posent pas les problèmes d'assemblage usuels que l'on peut rencontrer lors des phases de fabrication des mécanismes et améliorent la précision du mécanisme du fait de l'absence de frottement aux niveaux des articulations.

Diverses méthodes topologiques de synthèse de structures flexibles passives basées sur des méthodes d'optimisation existent : méthode d'optimisation de paramètres structurels [CF00], de forme [AJT04], d'homogénéisation [BS03]. Pour autant, peu de travaux traitent du problème d'optimisation multidisciplinaire de structures actives. Les travaux que nous avons menés en collaboration avec le CEA de Fontenay-aux-Roses ont donc consisté à développer des outils de conception optimale pour des structures flexibles, actives et sensibles. La méthode, implémentée dans un logiciel baptisé FlexIn, repose sur un algorithme génétique multicritères pour optimiser la topologie (l'actionnement, la mesure et les conditions aux limites) de structures flexibles décrites par un assemblage de blocs flexibles élémentaires. Ces blocs sont des réseaux de poutres décrites

²En effet, de tous les matériaux actifs, les matériaux piézoélectriques sont actuellement ceux dont le comportement est le plus linéaire même si il existe toutefois des problèmes d'hystérésis à tension élevée et des problèmes de *creep* (relaxation des charges au cours du temps). De plus, leur commande en tension les rend relativement aisés à utiliser et à commander.

par un modèle aux éléments finis. Pour éviter de considérer toute la combinatoire des agencements possibles de poutres, le mécanisme est sous-structuré en blocs flexibles de rigidités variables. Ces blocs sont définis comme des agencements prédéfinis de plusieurs poutres au sein d'un encombrement donné. Ils sont caractérisés par leur forme géométrique, leur matériau, leurs dimensions, puis sont assemblés de façon à constituer la structure du mécanisme déformable. Cet assemblage permet ainsi la conception finale de structures monolithiques.

Méthode des blocs

Au départ de notre collaboration avec le CEA, une bibliothèque de blocs passifs utilisée par un algorithme génétique d'optimisation était déjà accessible, elle avait été développée durant la thèse de P. Bernardoni [Ber04]. La thèse de M. Grossard [Gro08] avec qui j'ai pu travailler activement au cours de cette période s'est attachée à compléter cette bibliothèque par des éléments piézoélectriques actifs (actionneurs). La thèse de R. El Koury Moussa que je co-encadre actuellement avec le Prof. N. Chaillet et le Dr Grossard se propose de la compléter par des éléments piézoélectriques sensitifs (capteurs). La FIG. 4.18 représente les différents blocs élémentaires actuellement disponibles dans cette bibliothèque.

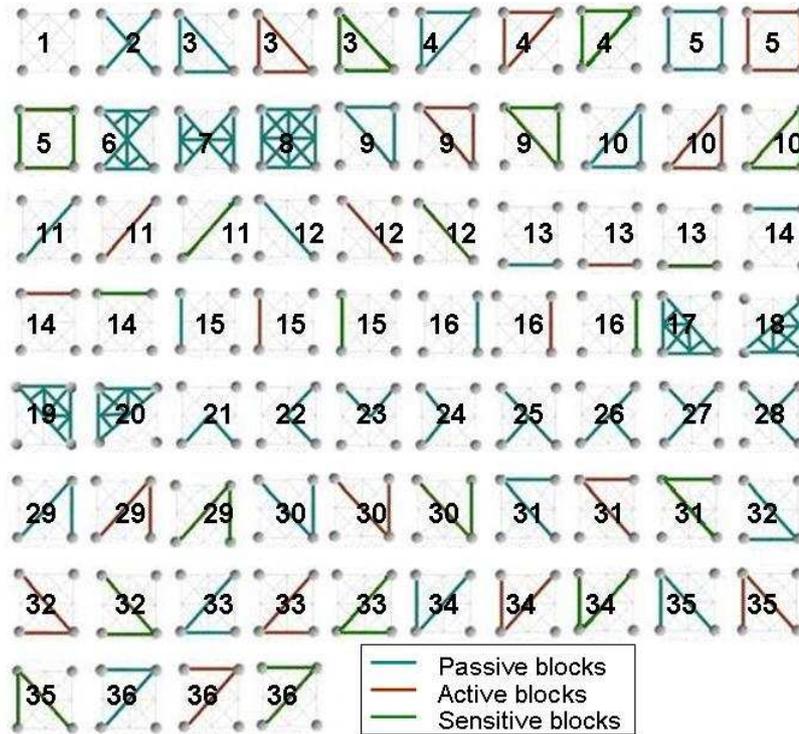


FIG. 4.18 – Bibliothèque de blocs flexibles passifs (bleu), actifs (rouge) et sensitifs (vert) implémentées dans FlexIn.

Ces différents blocs, composés d'assemblages de poutres élémentaires faites de blocs monomatériaux piézoélectriques, permettent la synthèse d'une grande

variété de topologies. Ces blocs ont trois types de fonctions possibles :

- soit les blocs sont alimentés en tension et font office simultanément de structure et d'actionneurs intégrés;
- soit les blocs sont branchés à une électronique de mesure et font office simultanément de structure et de capteurs intégrés;
- soit ils ne sont pas alimentés, auquel cas ils ne jouent que le rôle de structure mécanique passive.

Le logiciel de conception optimal permet de spécifier le problème de conception en imposant entre autres, des noeuds de sortie, des noeuds bloqués, des conditions de symétrie, le nombre de blocs et les dimensions générales de la structure finale. La phase complète de conception passe ainsi par des étapes qui peuvent être représentées par le schéma de la FIG. 4.19 et sont résumées ci-dessous :

- spécification d'un problème d'optimisation sur la base d'un cahier des charges;
- traitement du problème d'optimisation par l'algorithme génétique;
- sélection d'une solution pseudo-optimale vis-à-vis de différents critères parmi l'ensemble de solutions retournées par l'algorithme multi-objectif;
- interprétation et affinage de l'assemblage de blocs de cette structure;
- export du modèle de la structure en vue de simulations complémentaires;
- réalisation du prototypage de la solution retenue et tests expérimentaux.

Dans ces développements, nous avons fait l'hypothèse que les mécanismes flexibles étaient soumis à des déformations structurelles résultant principalement de la déformation de flexion des poutres dans le plan. Ainsi, les modèles des blocs sont obtenus en considérant une formulation éléments finis (EF) des poutres du type Navier-Bernoulli. Les paramètres structurels de chaque bloc rectangulaire sont la hauteur, la largeur et l'épaisseur. Les caractéristiques matériaux de chaque bloc sont paramétrés par le module de Young, le coefficient de Poisson, la densité, ainsi que les coefficients piézoélectriques. Pour permettre le calcul des différents critères d'optimisation, FlexIn utilise le modèle EF de chaque bloc de la bibliothèque. Pour obtenir ce modèle, un modèle de poutre piézoélectrique élémentaire a été développé. L'assemblage de poutres piézoélectriques élémentaires permet la construction de blocs actifs de topologies variées.

Les différentes matrices de chaque bloc sont calculées numériquement en considérant chaque combinaison des valeurs discrètes permises par les variables d'optimisation, i.e. matériaux et taille des blocs. Ainsi, le calcul de l'ensemble des matrices est fait une seule fois au début de l'algorithme, permettant ainsi de gagner sur les temps de calculs. De cette structuration par blocs, il est possible de déduire le comportement dynamique global de la structure par assemblage matriciel [Gir97]. Le modèle dynamique discrétisé du comportement non dissipatif des structures est ramené sous la forme canonique. Celle-ci a déjà été utilisées sous des formes très proches dans la modélisation des structures vibratoires discrètes présentées dans le chapitre 2. Cependant dans le cas de cette section, s'ajoute une équation donnant la valeur des sorties à commander \mathbf{y}_{co} (en position) et une équation donnant la valeurs des sorties à observer \mathbf{y}_{co} (en

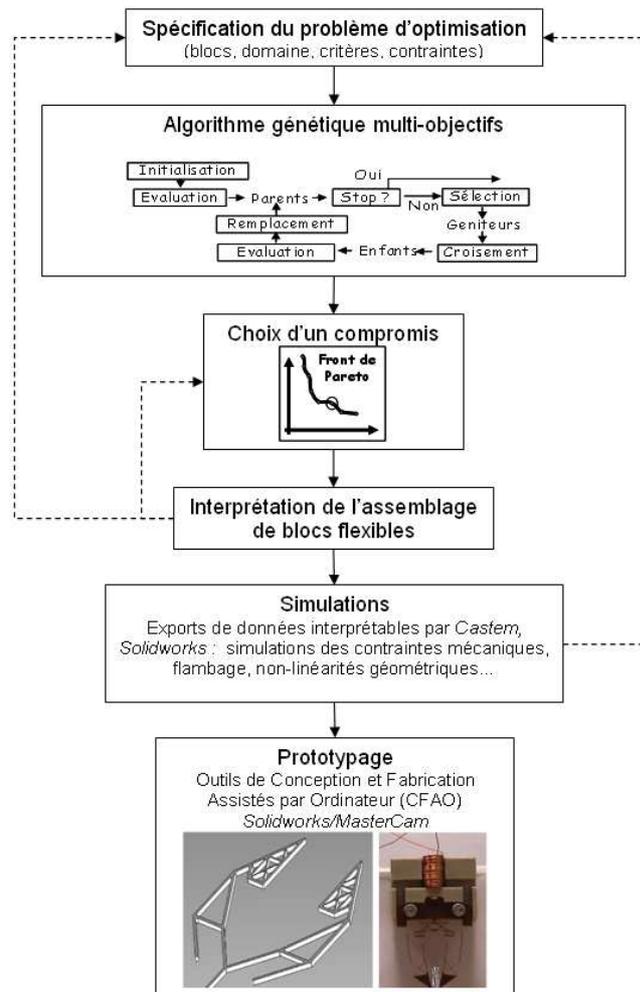


FIG. 4.19 – Démarche développée pour la conception optimale de structures flexibles adaptroniques.

charge électrique) :

$$\begin{cases} \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_n = \mathbf{E} \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y}_{co} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_n \\ \mathbf{y}_{ob} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{x}_n \end{cases} \quad (4.13)$$

Le modèle dynamique de ce mécanisme flexible est paramétré par un triplet (p, r, s) d'entiers qui définissent la taille des matrices utilisées dans l'écriture du modèle. Cette modélisation fait intervenir :

- les vecteurs \mathbf{x}_n et $\ddot{\mathbf{x}}_n$, qui représentent respectivement les déplacements et accélérations nodaux de la structure treillis. Ils sont de dimension $p \times 1$ avec p le nombre de degrés de liberté (au sens éléments finis) de la structure ($p = 3 \times \text{nombre de nœuds}$, dans le plan) ;
- le vecteur \mathbf{u} , dont les composantes dépendent du temps et qui est de

taille $s \times 1$. Ce vecteur définit les actions de commande sur le système (fonction actionneur des poutres piézoélectriques). \mathbf{E} est donc la matrice de répartition des entrées de commande sur le système ;

- le vecteur des sorties à commander \mathbf{y}_{co} est de dimension $r \times 1$. \mathbf{F} est donc la matrice de répartition des nœuds à commander. Dans une première implémentation, cette matrice, de taille $r \times p$, est uniquement constituée de 0 et de 1. Les 1 sont placés aux emplacements nodaux correspondant aux sorties du mécanisme et les 0 sont disposés aux emplacements des nœuds libres qui ne désignent pas de sortie mécanique.
- le vecteur de sortie à observer \mathbf{y}_{ob} est de dimension 1×1 , c'est donc un scalaire. Il permet d'obtenir la charge totale accumulée sur les poutres piézoélectriques servant de capteur. \mathbf{L} est donc la matrice de taille $1 \times p$ qui permet de spécifier la répartition des poutres servant de capteur piézoélectrique dans la structure.

Avec cette notation, le vecteur de sortie \mathbf{y} est séparé en deux, \mathbf{y}_{co} les sorties de position qui doivent être contrôlées mais ne devraient pas être mesurées et \mathbf{y}_{ob} la sortie en charge qui ne sera pas contrôlée mais sera mesurée et servira de variable de reconstruction pour les autres sorties. Considérant des sorties à commander en déplacement, FlexIn est ainsi capable d'optimiser la flexibilité dynamique (cas d'un actionneur en force), ou la transmissibilité dynamique (cas d'un actionneur en déplacement) d'un mécanisme ainsi que le placement des capteurs et des actionneurs dans la structure *treilli*.

Les travaux concernant la modélisation des blocs actifs ont été publiés dans les revues [GRLCB08] et [GCB⁺10b] et ceux plus récents concernant les blocs sensitifs ont été publiés lors de la conférence [MGC⁺10].

Critères d'optimisation

Au départ de notre collaboration avec le CEA, seuls des critères d'optimisation statiques (déplacements et forces maximaux) étaient implantés dans le logiciel. Nous avons tenté d'améliorer l'algorithme en proposant de nouveaux critères d'optimisation. Afin de pouvoir prendre en compte de nouvelles stratégies de conception optimale de ces systèmes, les modèles dynamiques précédents ont été ré-écrits sous une forme plus adaptée à la définition de critères d'optimisation des performances dynamiques. De nouveaux critères numériques ont alors été introduits dans le logiciel pour tenter de répondre, dès l'étape amont de conception du mécanisme, aux problématiques liées à l'identification, à l'observation et à la commande des systèmes flexibles.

De même que dans mes travaux de recherche présentés dans le chapitre 2 de ce mémoire, les équations dynamiques ont d'abord été ré-écrites dans la base modale du système sans amortissement, c'est-à-dire dans la base qui diagonalise les matrices du système dynamique. Pour cela, il est nécessaire de calculer les coordonnées modales \mathbf{q} ainsi que les valeurs et vecteurs propres \mathbf{Q} de ce système qui vont nous permettre de définir une nouvelle base de projection des positions des nœuds :

$$\mathbf{x}_n(t) = \sum_{i=1}^p \mathbf{Q} \cdot \mathbf{q}(t) \quad (4.14)$$

Les valeurs propres sont liées aux fréquences de résonance de la structure non amortie et les vecteurs propres sont les déformées modales correspondantes. Ces coordonnées modales ont ensuite été utilisées pour définir un vecteur d'état $\mathbf{x}(t)$ de dimension $N \times 1$ (où $N = 2p$) sous la forme particulière suivante :

$$\mathbf{x} = \left(\dot{\mathbf{q}}_1 \quad \omega_1 \mathbf{q}_1 \quad \dots \quad \dot{\mathbf{q}}_p \quad \omega_p \mathbf{q}_p \right)^t \quad (4.15)$$

Dans ce choix de vecteur d'état, ω_i représente la pulsation du i^e mode et \mathbf{q}_i le vecteur de déplacement modal associé. Cette forme est parfois utilisée en dynamique des structures où le nombre de degrés de liberté est très important [LG93] parce qu'elle présente l'avantage d'avoir toutes ses composantes dans la même unité ce qui permet d'éviter des problèmes numériques dus à un mauvais conditionnement des matrices. Le choix de variables d'état que nous avons fait dans ces travaux est donc différent des choix qui sont fait classiquement et que nous avons fait dans les autres parties de ce mémoire, à savoir de type position/vitesse (cf. [HL93] pour une application vibratoire similaire) pour une modélisation lagrangienne et de type position/quantité de mouvement pour une modélisation hamiltonienne. Le système dynamique de la structure flexible étant linéaire et propre, il peut être ré-écrit sous la forme classique de représentation d'état :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (4.16)$$

La matrice d'état \mathbf{A} est implicitement fonction des caractéristiques de certains paramètres de spécifications de la structure mécanique (comme la configuration, la topologie, le couple matériau(x)/épaisseur). La matrice de commande \mathbf{B} est plus directement liée au type et à l'emplacement des actionneurs, et la matrice d'observation \mathbf{C} à l'emplacement des sorties mécaniques à contrôler ou électrique à mesurer.

Dans les coordonnées physiques, le nombre de degrés de liberté d'un modèle discrétisé de structure par la méthode EF est généralement très important et ce, d'autant plus que la géométrie laisse apparaître un nombre de nœuds important. Cependant, pour la commande, et notamment pour l'utilisation des méthodologies de synthèse modernes, il est indispensable de se ramener à des modèles identifiés d'ordre le plus faible possible. La réduction de modèle est donc indispensable afin de se ramener à un système d'ordre raisonnable. La technique de la troncature dans la base de représentation modale peut être un moyen de réduire de manière drastique le nombre de degrés de liberté contribuant effectivement à la réponse du mécanisme. Cette technique consiste à négliger les modes d'ordre élevés dans une représentation de type entrée/sortie où la fonction de transfert $\mathbf{G}(s)$ est définie par la formule classique [Gaw04] :

$$\mathbf{G}(s) = \sum_{i=1}^p \mathbf{G}_i(s) = \sum_{i=1}^p \mathbf{C}_i (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{B}_i = \sum_{i=1}^p \frac{\mathbf{c}_i \mathbf{b}_i^t}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (4.17)$$

À partir de l'expansion modale du transfert entrée(s)-sortie(s), la troncature modale peut s'avérer être une opération délicate. Elle passe nécessairement par un choix à faire sur le compromis entre l'ordre du modèle tronqué et sa précision de représentation du modèle complet. Sans que l'ordre ne devienne trop élevé,

il faut veiller à ce que le contenu fréquentiel ne soit pas insuffisant en ne retenant qu'un nombre trop faible de modes. Pour éviter ce risque et s'assurer de la bonne représentativité du modèle tronqué, il est généralement nécessaire en post-traitement de conduire des simulations avec un modèle de structure (modèle de simulation) le plus fin possible, qui inclut tous les modes possédant une contribution significative dans la réponse du système. Cette remarque nous a poussé à définir un critère dynamique d'optimisation \mathcal{J}_1^k qui permette de s'assurer que la troncature modale est acceptable.

La base dite *équilibrée* d'un système représenté sous forme d'état est définie comme la base dans laquelle les grammians de commandabilité \mathbf{W}_C et d'observabilité \mathbf{W}_O associés à la représentation d'état sont diagonaux et égaux [GL96] :

$$\mathbf{W}_C = \mathbf{W}_O = \mathbf{W} = \text{diag} (\sigma_1 \quad \dots \quad \sigma_N) \quad (4.18)$$

Les scalaires σ_i sont appelés les *valeurs singulières de Hankel (VSH)* du système. Ces termes reflètent les commandabilité et observabilité jointes des variables d'état dans la base équilibrée. La technique de Moore [Moo81] qui consiste à éliminer les états peu commandables et observables, se révèle très précieuse lorsqu'il est nécessaire d'élaborer un modèle réduit. Les *VSH* sont donc une bonne indication de la précision du modèle réduit. Dans le cas spécifique des structures flexibles, les *VSH* peuvent être rapidement approchées par l'expression suivante :

$$\sigma_i = \frac{\|b_i\|_2 \|c_i\|_2}{4\xi_i\omega_i^2} \quad (4.19)$$

Dès l'étape de conception du système flexible, la réduction optimale du modèle dynamique peut être prise en compte dans FlexIn grâce à un nouveau critère d'optimisation \mathcal{J}_1^k qui utilisera le calcul de ces VSH. Par son implémentation logicielle, ce critère numérique doit répondre à une double exigence :

- d'une part, il doit permettre de laisser le concepteur libre de choisir le nombre k de modes vibratoires dominants de la structure ;
- d'autre part, il doit permettre de quantifier l'erreur causée par l'approximation du modèle complet en un modèle tronqué aux k premiers modes.

Les autorités de contrôle sur les k premiers modes doivent ainsi être maximisées. À l'inverse, celles sur les modes plus haute fréquence situés hors de la bande d'intérêt (modes supérieurs au $(k+1)$ ^{ième} mode) sont minimisées pour limiter à terme les risques de déstabilisation (*spillover*). Ces états modaux caractérisés par de faibles *VSH* sont faiblement commandables et observables et peuvent ainsi être écartés du modèle. Le critère \mathcal{J}_1^k qui a été proposé dans nos travaux avec le CEA et qui doit être maximisé, prend ainsi la forme suivante :

$$\mathcal{J}_1^k = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i}{\sum_{i=k+1}^p \sigma_i} \quad (4.20)$$

où les σ_i sont ordonnées selon les modes ω_i croissants. La définition de la norme infinie $\|\cdot\|_\infty$ peut permettre une interprétation graphique du critère : σ_i est

directement proportionnelle à l'amplitude du pic de résonance

$$\|G_i\|_\infty \simeq 2\sigma_i \quad (4.21)$$

ce qui laisse augurer par l'utilisation du critère \mathcal{J}_1^k une forme de la réponse fréquentielle de la structure telle que décrite à la figure 4.20.

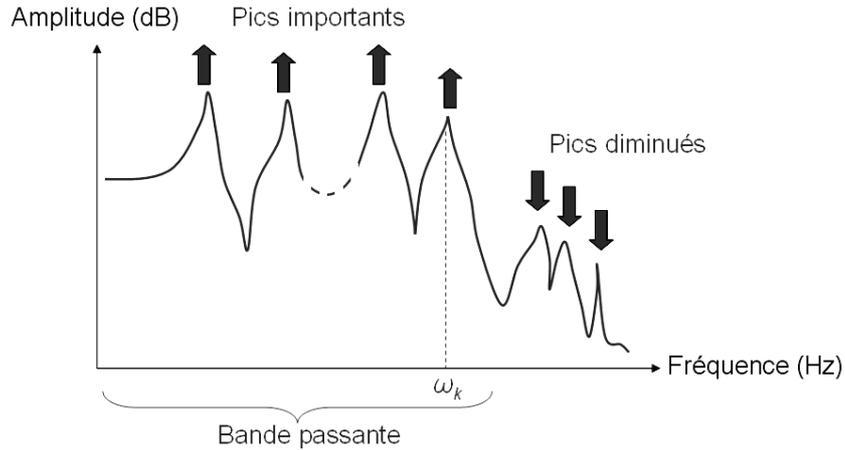


FIG. 4.20 – Forme de la réponse fréquentielle en amplitude d'un système dans le cas SISO favorisée par l'utilisation du critère \mathcal{J}_1^k : l'amplitude des pics de résonance est maximisée dans la fenêtre fréquentielle $[0; \omega_k]$ et est minimisée sur $[\omega_k; +\infty]$.

Ce critère a été implanté avec succès dans le logiciel comme cela sera vérifié sur le prototype de micropince conçu avec ces outils et présenté dans la prochaine section. Au cours de ces travaux, nous n'avons pas proposé que ce seul critère dynamique mais plusieurs autres. Ceux-ci ne seront pas détaillés dans ce mémoire et peuvent être retrouvés dans nos publications [GCB⁺10a] et [GCB⁺10b]. Seules quelques grandes lignes de ces travaux seront rappelées ci-dessous.

Un second critère proposé, $\mathcal{J}_2^{k'}$, a été un critère permettant d'augmenter la robustesse et les performances de la commande. Celui-ci a été conçu pour être associé à des techniques de contrôle dites *High Authority Control/Low Authority Control* (HAC/LAC) spécifiquement dédiées au contrôle des structures flexibles faiblement amorties [Pre02]. Ces techniques de contrôle sont particulièrement intéressantes pour des structures collocalisées³ ou lorsque la réponse fréquentielle en boucle ouverte de la structure flexible présente une alternance pôles/zéros. En effet, dans ce cas, la commande HAC/LAC assure tout d'abord de bonnes performances de contrôle parce que cette approche conduit à des lois de commande simples à calculer et à implémenter qui consistent à amortir les modes dominants [AFM07]. Ces techniques de commande amènent, d'autre part, un gain en robustesse qu'il est possible d'exploiter pour stabiliser a posteriori une boucle de compensation globale assurant les performances de suivi de consigne [MI83].

³C'est-à-dire des structures où les capteurs et les actionneurs sont situés aux mêmes emplacements.

Ainsi, le second critère développé $\mathcal{J}_2^{k'}$ vise à forcer artificiellement le comportement d'alternance pôles/zéros jusqu'au pôle k' . La définition de ce critère a, en partie, été inspiré des travaux de [Mar78] sur des structures flexibles spatiales.

Des travaux ont également été conduits récemment pour proposer de nouveaux critères d'optimisation afin d'augmenter la quantité de charge accumulée sur les structures piézoélectriques servant de capteur. Ces travaux sont encore en cours et devraient nous permettre de nous passer des mesures externes en utilisant un observateur basé sur les capteurs intégrés. Les résultats actuels ont pu être présentés dans [MGB⁺10] et [MGC⁺10].

4.3.2 Application à la conception et à la commande d'actionneurs

La méthode optimale de synthèse présentée précédemment a été mise à profit pour concevoir plusieurs structures micro-mécatroniques, mais seule une sera présentée dans ce mémoire. Il s'agit d'une structure microrobotique monolithique piézoélectrique capable de réaliser une fonction de préhension telle une micropince et faite de deux doigts de serrage symétriques et à mobilité indépendante.

La topologie du doigt-actionneur gauche est choisie comme paramètre d'optimisation. Elle est définie par l'assemblage de blocs élémentaires actifs et/ou passifs dans la (2×2) -matrice de maillage, sous les contraintes dimensionnelles des blocs données par la FIG. 4.21. Le nombre de blocs actifs de la structure est laissé libre au cours de l'optimisation, il est compris entre 1 et 4.

La différence de potentiel V_{gauche} doit induire une déformation globale du doigt de préhension fournissant :

- un mouvement d'ouverture et de fermeture ;
- l'application d'une force de réaction F_m sur l'objet saisi dans la direction de l'axe \mathbf{x}_R (cf. FIG. 4.21).

Enfin, les nœuds à la base de la structure-trellis définissent les conditions aux limites d'encastrement et peuvent être laissés, tous ou en partie, bloqués en déplacement et rotation par l'optimisation (cf. FIG. 4.21).

Deux premiers critères mécaniques relatifs aux performances du système en régime quasi statique ont été considérés au cours de l'optimisation multicritère :

- la maximisation de la déflexion δ selon la direction \mathbf{x}_R permet de tendre vers une amplification des faibles déplacements inhérents à la nature de l'actionnement piézoélectrique ;
- la force de réaction mécanique à sortie bloquée est maximisée au nœud de sortie pour permettre d'atteindre des performances adaptées à une tâche de micromanipulation.

Par ailleurs, les critères \mathcal{J}_1^k et $\mathcal{J}_2^{k'}$ ont été considérés simultanément aux deux critères mécaniques statiques précédents. Pour cette application, le nombre k de modes dominants a été choisi égal à 2 et l'alternance est également souhaitée jusqu'à ce même second mode, $k' = 2$. Après simulations, ces choix sur k et k' apparaissent comme un compromis intéressant entre le cas restrictif $k = 1$ qui limite la combinatoire du problème et le cas où le nombre excessif de modes

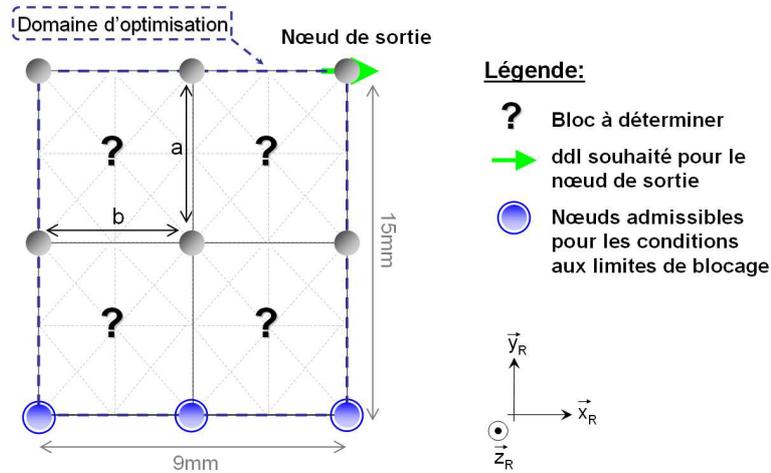


FIG. 4.21 – Spécifications des paramètres du problème d’optimisation pour le doigt de préhension gauche.

Critères évalués	Solution
Déplacement libre δ (μm)	10,69
Force de blocage (N)	0,84
\mathcal{J}_1^2	5842,35
\mathcal{J}_2^2	2

TAB. 4.1 – Performances théoriques évaluées par FlexIn (pour une différence potentiel électrique $V_{gauche} = 200$ V).

dominants impliquerait *a posteriori* l’obtention d’un modèle d’état d’ordre élevé. Les valeurs d’amortissements modaux du système ont été arbitrairement choisies égaux à 1 %. L’hypothèse de structures faiblement amorties est ainsi respectée, laissant l’écriture des critères \mathcal{J}_1^2 et \mathcal{J}_2^2 valide.

Parmi le panel de solutions pseudo-optimales obtenues, une solution en particulier a été étudiée puis conçue. Celle-ci est caractérisée par de très bonnes propriétés mécaniques, ainsi que de bonnes valeurs pour les critères \mathcal{J}_1^2 et \mathcal{J}_2^2 (cf. tableau 4.1). La topologie de la structure correspondante est représentée sur la FIG. 4.22 et un prototype est présenté sur la FIG. 4.23. Le comportement dynamique de la structure réalisée a pu être identifié grâce à une étude harmonique (cf FIG. 4.24).

De par le caractère optimal de cette solution, les deux premiers modes résonants sont bien dominants par rapport aux modes résiduels plus hautes-féquences et l’alternance désirée des pôles et zéros est maintenue dans le spectre d’intérêt. Ce comportement particulier du système, nous a ainsi permis de réaliser une identification fréquentielle de sa dynamique en ne considérant que ces deux modes flexibles, impliquant de ce fait l’obtention d’un modèle réduit d’ordre 4. Celui-ci est également reporté sur la FIG. 4.24. Au dénominateur de

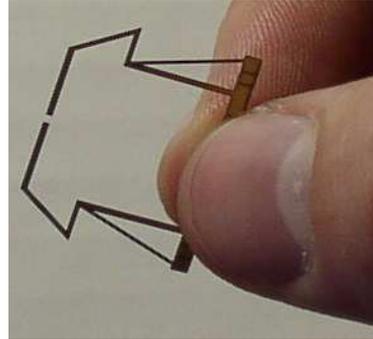
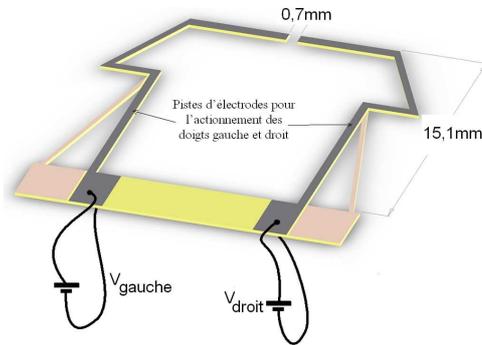


FIG. 4.22 – Vue 3D de la micropince piézoélectrique montrant les pistes d'électrodes supérieures pour les doigts gauche et droit.

FIG. 4.23 – Photographie du prototype de la micropince usinée par découpe laser.

cette fonction de transfert, les pulsations naturelles ω_{ni} et les amortissements ξ_i ont été déterminés à partir des relevés expérimentaux reportés dans le tableau 4.2. La comparaison de la réponse fréquentielle identifiée avec celle observée par l'expérimentation indique que le modèle du quatrième ordre traduit convenablement les premières dynamiques vibratoires, avant la phase de *roll-off* débutant à $2 \times \pi \times 1,5 \text{ kHz} \simeq 9,4 \text{ krad/s}$ (cf FIG. 4.24).

ξ_1	$\omega_{n1}(\text{rad.s}^{-1})$	ξ_2	$\omega_{n2}(\text{rad.s}^{-1})$
1,97 %	1597,1	2,12 %	5934,1

TAB. 4.2 – Paramètres modaux identifiés pour définir la fonction de transfert identifiée (Pour indication, ω_{n1} correspond à une fréquence de 254,1 Hz, ω_{n2} à 944,4 Hz).

Au cours de cette période, des travaux concernant le développement de commande ont également été réalisés non seulement sur l'implantation et la validation en temps réel de la commande HAC/LAC mais également sur des commandes RST et \mathcal{H}_∞ . Ces dispositifs de contrôle utilisaient dans un premier temps une mesure extérieure de la déflexion de sortie grâce à un capteur laser de position. Ces trois commandes ont donné des réponses et des performances assez similaires mais le respect des critères d'optimisation a permis au final de se contenter d'une commande HAC/LAC d'ordre moins élevé et donc plus facile à implémenter expérimentalement que les deux autres. Des travaux ont également été réalisés sur la compensation des non-linéarités (hysteresis) des matériaux piézoélectriques en utilisant des modèles de Preisach et de Prandl. Ces travaux se poursuivent encore. La part la plus importante de nos travaux actuels sur cette thématique concerne l'intégration de capteurs piézoélectriques et leur utilisation afin de se passer de la mesure extérieure à l'aide du capteur laser. Les résultats de ces recherches permettront, nous l'espérons, de proposer un système complètement adaptronique où les fonctions *structures*, *actionnements* et *mesures* sont totalement intégrées.

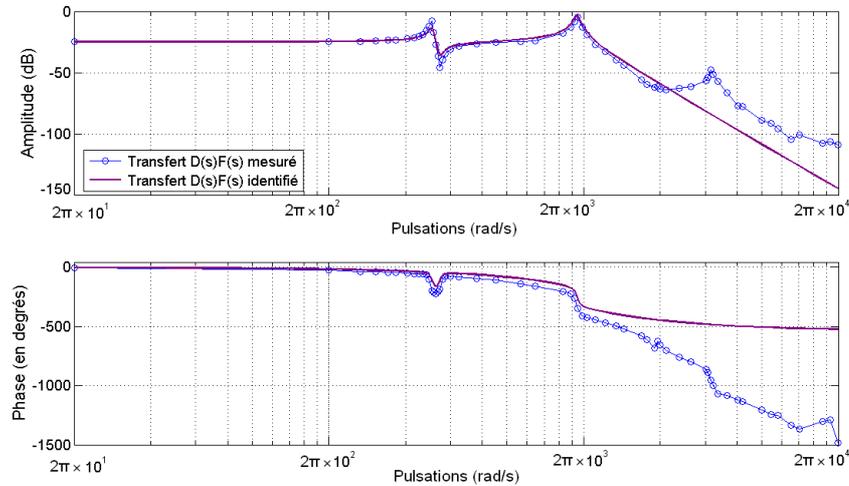


FIG. 4.24 – Diagramme de Bode expérimental de la fonction de transfert de déflexion (sortie $\delta = \delta_x$ en μm et entrée U en Volt) et diagramme de Bode identifié par un modèle linéaire d'ordre 4 (pointillés).

4.4 Conclusion sur la période de recherche

Les résultats obtenus concernant les AMFM sont très satisfaisants et placent aujourd'hui notre équipe parmi les meilleurs équipes mondiales en modélisation dynamique et en conception d'actionneurs à base d'AMFM. En particulier au niveau français, nous sommes pratiquement la seule équipe à travailler sur ce sujet difficile. Malgré toutes ces avancées, de nombreux points restent encore à approfondir pour modéliser plus finement l'influence des phénomènes thermiques sur les changements de phase austénite/martensite. En effet, nos travaux de recherche se sont pour l'instant essentiellement focalisés sur le principe de réorientation entre différentes phases de martensite de ces matériaux plutôt que sur la transformation de phase austénite/martensite. Cependant, ce dernier point fait déjà l'objet d'une étude importante pour les AMF classiques et ne présente donc pas le caractère aussi innovant que les recherches que nous avons entreprises sur la réorientation de martensites. De plus, il présente moins d'intérêt en terme d'actionnement en raison d'un temps de réponse plus long que l'actionnement magnétique puisque il met en œuvre un contrôle des phénomènes thermiques forcément plus lent. Quelques nouveaux travaux sur la modélisation du comportement de ces matériaux sont donc envisagés à l'avenir, mais leur place dans mes activités de recherche va se réduire au profit de travaux sur leur commande non-linéaire.

La dernière version de prototype d'actionneur à base d'AMFM du laboratoire a été conçue et réalisée au cours de l'année 2008/2009 dans le cadre d'un projet européen Hydromel où nous devons concevoir des actionneurs de haute précision. Le prototype correspondant a été fourni dans les temps mais malgré ses qualités intrinsèques, je pense qu'il n'est actuellement pas encore optimal car sa commande n'exploite pas encore suffisamment les propriétés spécifiques non-linéaires des AMFM. Bien que les modèles actuellement utilisés soient très

complets et qu'ils aient pu être validés expérimentalement, les phénomènes complexes non linéaires, observés et modélisés, rendent la commande de ces dispositifs très délicate et actuellement encore problématique. Les résultats de ces travaux scientifiques ont été bien reconnus par la communauté scientifique puisque deux revues et quatre conférences internationales à comité de lecture ont déjà été acceptées pour publications. Pour cette thématique, je suis largement à l'initiative du début de ces travaux au sein du département AS2M puisque le sujet de DEA que j'ai proposé et qui a été choisi par J.Y. Gauthier était le premier du département sur ce thème. Les premiers résultats ont été si encourageants que ces travaux ont été poursuivis par une thèse de doctorat en collaboration avec le département de mécanique appliquée et du professeur L'excellent. La qualité des recherches produites au cours de la thèse de J.Y. a été très bien reconnue et montre la très forte pluridisciplinarité du sujet puisque J.Y. a été qualifié dans trois sections CNU différentes (60, 61 et 63) et qu'il a réussi à obtenir un poste de maître de conférences l'année suivant la présentation de sa thèse.

Les résultats sur la conception optimale de structures flexibles adaptroniques sont également très encourageants. Ils sont parmi les plus avancés au niveau mondial dans le domaine de la conception optimale de structures micro-robotiques et micro-mécatroniques. Même si les fonctions intégrées capteurs ne sont pas encore pleinement utilisées dans la commande, ces travaux sont en poursuite et nous espérons qu'ils donneront des résultats aussi satisfaisants que ce que nous avons obtenu sur l'actionnement intégré.

L'ensemble de ces travaux sur les matériaux actifs et la conception de micro-actionneurs m'a donc au final permis de participer à l'encadrement de trois doctorants et de renforcer mes capacités à diriger des recherches et à proposer des sujets novateurs et pertinents d'un point de vue scientifique.

Ces différents travaux sur les structures micro-mécatroniques et sur les matériaux actifs ont cependant fait apparaître un élément clé en terme de comportement de ces dispositifs : ces systèmes sont tous des systèmes assez fortement non linéaires avec des non-linéarités à la fois géométriques (cinématique et grande déformation) et dynamiques (hystérésis, comportement irréversibles). Ce type de comportement entraîne bien évidemment d'importants problèmes en termes de modélisation, de simulation et surtout de commande.

Jusqu'il y a quelque temps, les techniques de commande utilisées au laboratoire pour le contrôle des micro-actionneurs étaient essentiellement de deux types, soit des techniques assez classiques issues de la commande linéaire (PID, RST et retour d'état), soit des techniques issues des méthodes de l'intelligence artificielle (apprentissage et réseaux de neurones). Cependant, ces deux types de commande présentent des limites et défauts qu'il est nécessaire de dépasser pour obtenir des systèmes micro-mécatroniques et adaptroniques véritablement plus performants. Les techniques d'IA présentent des temps d'apprentissage et d'adaptation très longs qui les rendent souvent inutilisables en temps réel et leur stabilité et leurs performances ne peuvent pas toujours être garanties. Les techniques issues de la commande linéaire peuvent être rendues plus robustes et plus performantes en utilisant des extensions comme les filtres de Kalman ou

la commande \mathcal{H}_∞ . Certaines non-linéarités peuvent, de même, être compensées par de la commande *feedforward*, des modèles de Prandl ou de Preisach. Ces pistes sont intéressantes et sont actuellement explorées par plusieurs collègues du laboratoire pour des matériaux piézoélectriques. Cependant, je ne pense pas que les améliorations obtenues par ces méthodes puissent être significatives pour le contrôle de matériaux au comportement aussi complexe et aussi non-linéaire que celui des AMFM. Dans le cas de systèmes micro-mécatroniques utilisant des matériaux actifs, il semble essentiel et opportun d'exploiter au maximum les résultats de modélisation afin de concevoir des lois et des stratégies de contrôle plus performantes. Dans nos travaux précédents, c'est en particulier l'étude des transferts d'énergie entre mouvements rapides (dynamiques) et mouvements lents (quasi-statiques) qui nous a mis sur la piste de la commande hybride proposée. Cette stratégie nous a permis, à courant constant et borné, de doubler la plage de déplacement de cet actionneur, ce que n'aurait jamais pu faire une commande linéaire et ses variantes H_∞ quelle que soit sa robustesse. Mes axes de recherche futurs vont donc dans ce sens : exploiter au maximum les modèles et les résultats de simulation afin d'envisager des lois et stratégies de commande exploitant au maximum les propriétés inhabituelles et fortement non-linéaires des matériaux actifs et des systèmes micro-mécatroniques. Actuellement, ces réflexions de recherche gravitent autour de la commande basée sur l'énergie ou des concepts similaires (*Lyapunov, passivité/dissipativité et systèmes Hamiltonien à ports*). Malheureusement, comme toute ré-orientation ou conversion thématique, celle-ci demande une maîtrise de nouveaux outils et concepts et dans mon cas, il s'agit d'outils *avancés* de mathématiques. Depuis quelques années, j'ai dû faire un important effort de remise à niveau qui a monopolisé une part importante de mon temps de recherche. En particulier, grâce à l'obtention d'un congé de recherche et de conversion thématique (CRCT) de six mois en 2009/2010, j'ai pu prendre part aux cours du master 2 de mathématiques approfondies de l'université de Franche-Comté (géométrie différentielle, analyse fonctionnelle, EDO et EDP, systèmes non-linéaires). Cette reconversion me demande actuellement un effort important mais je ne doute pas qu'elle devrait porter ses fruits et me permettre de proposer des résultats innovants et intéressants pour la commande des systèmes micro-mécatroniques non-linéaires. Dans ce cadre, je me suis associé récemment avec un jeune professeur du laboratoire pour travailler sur ces thématiques et nous avons proposé conjointement un sujet de thèse sur ce thème extrêmement porteur. Nous avons obtenu un financement par une bourse BDI-CNRS qui devrait débiter à l'automne 2010.

Je voudrais terminer cette section en soulignant que la thématique de recherche sur la commande non-linéaire des systèmes micro-mécatroniques envisagée n'est pas, à proprement parlé, une nouvelle thématique de recherche mais plutôt une évolution naturelle et une extension des travaux précédents puisqu'après avoir conçu et modélisé un système micro-mécatronique, il est nécessaire de le commander pour l'utiliser. De par le comportement complexe non-linéaire de ces dispositifs, il n'est bien souvent pas possible de réaliser cette commande à posteriori, c'est-à-dire, après la phase de conception et de modélisation. En fait, le processus *conception/modélisation/commande* doit être envisagé comme un tout qui doit être abordé de manière cohérente et compatible pour aboutir à une solution pertinente comme cela a pu être fait sur l'optimisation topologique des structures déformables piézoélectriques.

Conclusion et perspectives

Although this may seem a paradox,
all exact science is dominated by
the idea of approximation.
Bertrand Russel

La présentation d'une HDR est une étape particulière de la vie de chercheur au cours de laquelle celui-ci se pose un moment pour évaluer ce qu'il a réalisé, en fait une présentation à ses pairs et propose des perspectives à ses travaux précédents. Il en profite surtout pour présenter les résultats qu'il considère comme les plus importants et les projets de recherche qu'il compte mener au cours des années futures. Cette *évaluation* permet à ses pairs de valider son recul, son autonomie et ses qualités de chercheur et de l'autoriser alors à proposer, conduire et encadrer seul des activités de recherche.

Je voulais, dans un premier temps, faire la synthèse de mes travaux de recherche sous la forme d'un condensé du cours que je développe actuellement pour l'enseignement de la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques à l'université de Franche-Comté. Après la rédaction d'une partie de ce condensé, je me suis rendu compte que cet objectif était certainement trop ambitieux, trop long et finalement assez peu adapté à un mémoire d'HDR. J'y ai donc renoncé temporairement mais je garde cette idée pour un ouvrage que j'aimerais écrire sur le sujet. Plus modestement, ce chapitre de synthèse et conclusion se proposera d'établir les grandes lignes et les points clés de l'exercice de modélisation tel que je le conçois actuellement. Cependant, celui-ci sera certainement amené à évoluer au cours des mes prochaines années de recherches et d'enseignement. En m'appuyant sur les différents travaux que j'ai réalisés ou encadrés, j'essayerai de montrer les apports mais aussi les manques de ces travaux et comment j'envisage à l'avenir de dépasser les limites identifiées en proposant de nouveaux thèmes et objectifs de travail.

Synthèse sur la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques

Contribution à la modélisation des systèmes mécatroniques et micro-mécatroniques est le titre que j'ai choisi pour ce mémoire d'HDR. Choisir un titre est toujours un exercice difficile et mon choix a changé plusieurs fois au cours

de la rédaction de ce mémoire. Chaque mot y a son importance comme cela va être montré dans cette section.

En premier lieu, mes travaux concernent principalement la *modélisation*, c'est-à-dire l'exercice scientifique consistant à trouver une représentation⁴ permettant de *dupliquer* le comportement d'un dispositif réel. Ce modèle est donc toujours une approximation comme le rappelle Bertrand Russel dans la citation que j'ai reproduite au début de ce chapitre. Le degré d'approximation d'un modèle dépendra bien évidemment de la précision recherchée dans l'utilisation que nous voulons faire de ce modèle. En effet, et contrairement aux croyances du XVIII^e et XIX^e^{me} siècle – le *fameux* démon de Laplace –, un modèle *parfait* de la réalité n'existe pas et il est parfaitement illusoire de chercher à en trouver un.

Une des notions les plus fécondes que nous trouvons à la base de nombreux travaux de modélisation est celle de *système*. Mais qu'appelons nous au juste un système ? À la fois, tout et rien. Chaque livre traitant du sujet en donne sa propre définition et nous ne chercherons pas à en donner une liste exhaustive dans ce mémoire. La définition proposée par F. E. Cellier dans [Cel91] est cependant celle que je préfère :

The largest possible system of all is the universe. Whenever we decide to cut out a piece of the universe such that we can clearly say what is *inside* that piece (belongs to that piece), and what is *outside* that piece (does not belong to that piece), we define a new "system".[...] A system is characterized by the fact that we can say what belongs to it and what does not, and by the fact that we can specify how it interacts with its environment. System definitions can furthermore be hierarchical. We can take the piece from before, cut out a yet smaller part of it, and we have a new "system".

Des mots de F. E. Cellier, nous comprenons que ce qui caractérise le mieux un système est en fait sa ou ses *frontières*, c'est-à-dire la définition de ce qui appartient ou non à ce système, la manière dont il interagit avec son environnement et la manière dont il peut encore lui-même être décomposé en *sous-systèmes* en définissant de nouvelles frontières internes. C'est cette possibilité de décomposition plus que toute autre propriété qui donne au concept de système toute sa fécondité. En premier lieu, l'approche système permet de décomposer des *choses* ou des *phénomènes* complexes en une interconnexion de choses ou de phénomènes plus simples et donc plus aisés à comprendre et à modéliser. Cette propriété essentielle est largement soulignée par les tenants du *réductionnisme* et elle permet effectivement dans bien des situations de comprendre le *tout* en comprenant d'abord ses *parties*. Mais l'approche système permet également de satisfaire les tenants de l'approche *holistique* qui pensent au contraire, mais avec tout autant de raison, que certaines propriétés *émergentes* ne peuvent être saisies et expliquées qu'en explorant surtout les interactions entre les différents sous-systèmes plutôt qu'en explorant le détail de leur comportement propre. En un sens, ces derniers pensent que le *tout* est plus que ses *parties*. C'est particulièrement le cas en sciences de l'ingénieur lors d'une activité de conception ou

⁴En sciences de l'ingénieur, nous cherchons presque toujours à mettre cette représentation sous la forme d'équations mathématiques.

bien en biologie pour comprendre le fonctionnement d'organismes vivants complexes. Par exemple, ce n'est pas parce que le physicien sait comment fonctionnent précisément tous les différents composants électroniques qu'il sait comment les agencer dans un circuit pour réaliser une fonction électronique particulière. Dans cette activité de conception, effectivement, l'interaction entre chaque sous-système est plus importante que le détail du comportement de chacun de ces sous-systèmes. Au final, l'approche système permet donc de réconcilier les deux visions – réductionniste et holistique – et de les présenter non comme opposées mais plutôt comme complémentaires. Le degré de décomposition auquel il est nécessaire d'avoir recours dépend simplement du cahier des charge, c'est-à-dire de ce que nous désirons comprendre et expliquer par ce modèle, ce pourquoi nous le créons. Ce point de vue est finalement assez proche de celui de J.C. Willems lorsqu'il présente ses concepts de *tearing, zooming and linking* [Wil07].

Concernant le processus même de modélisation et après maintenant plus de dix ans d'enseignement et de recherche sur ces thématiques, il m'apparaît clairement que ce processus contient trois étapes successives qui ne doivent pas être confondues avec les étapes suivantes de manipulation et de ré-organisation du modèle, elles-mêmes suivies par des étapes de simulation et de développement du contrôle. Les trois étapes de modélisation sont les suivantes :

1. décomposition de l'objet d'étude en sous-systèmes ;
2. description des interactions entre ces sous-systèmes ;
3. description du comportement de chacun de ces sous-systèmes.

La première étape de modélisation consiste à décomposer le dispositif d'étude réel en plusieurs sous-systèmes interconnectés. Cette décomposition d'un système en sous-systèmes peut être réelle (physique) ou conceptuelle⁵.

Si les caractéristiques essentielles des sous-systèmes peuvent être *moyennées* (pour des grandeurs intensives) ou *intégrées spatialement* (pour des grandeurs extensives), nous parlons alors de systèmes à paramètres localisées (*Lumped Parameters Systems*). Chacun des sous-systèmes globaux (moyennés et intégrés) est alors localisé ponctuellement dans l'espace. Ses caractéristiques sont représentées à l'aide de grandeurs globales (moyennées et intégrées), localisées en un ou entre plusieurs points de l'espace. Pour des sous-systèmes dynamiques, ces grandeurs sont généralement des fonctions du temps. Les interconnexions entre sous-systèmes à paramètres localisés se font alors ponctuellement à l'aide de terminaux ou noeuds d'interconnexion. Dans la très grande majorité des cas, ces systèmes sont de dimensions finies puisque le nombre de sous-systèmes interconnectés est fini comme le nombre de grandeurs caractéristiques globales associées. Les équations de modélisation sont généralement des équations algébriques ou des équations différentielles. Pour ces systèmes à paramètres localisés, les méthodes relèvent principalement de ce qui est appelé *la théorie des réseaux, des circuits ou des graphes*.

⁵F.E. Cellier l'exprime par la phrase suivante : *The cutting does not necessarily denote a separation in the physical world, it can also take place at the level of a mathematical abstraction... and in the context of modeling, this is actually most commonly the case* [Cel91].

Dans nos travaux, nous avons largement utilisé cette approximation en termes de systèmes à paramètres localisés. Tout d'abord, pour des systèmes mécaniques comme les structures à ressorts réalisées en post-doctorat en Allemagne et présentées dans la section 2.2 mais également pour des systèmes électromagnétiques comme pour les circuits d'alimentation et d'excitation des actionneurs utilisant des AMFM décrits dans la section 4.2. Ces méthodes ont l'avantage de conduire directement à des systèmes de dimensions finies qui sont plus faciles à manipuler et à résoudre. Le degré de décomposition à choisir dépend finalement de la précision recherchée et du degré d'intuition du modélisateur. Par exemple, des comparaisons avec des calculs par éléments finis ont montré sur les ressorts de la section 2.2 qu'une décomposition des barres rigides composant les ressorts en deux sous-systèmes aurait permis d'améliorer grandement la précision des calculs de fréquence de résonance pour les modes d'ordre élevé. En effet, cette division permettait de prendre en compte le premier mode de déformation de flexion de ces barres rigides qui n'étaient en définitive pas si rigides que cela.

Si les caractéristiques essentielles des sous-systèmes ne peuvent pas être moyennées ou intégrées spatialement, les différents sous-systèmes doivent être distribués dans l'espace et nous parlons alors de systèmes à paramètres répartis ou distribués (*Distributed Parameters Systems*). Les grandeurs caractéristiques de ces sous-systèmes dépendent alors de leur position spatiale et sont donc distribuées continument dans l'espace. Il y a ainsi une infinité, ce qui permet aussi de parler de *systèmes de dimensions infinies*. Pour des sous-systèmes dynamiques, ces grandeurs caractéristiques sont donc non seulement des fonctions du temps mais également de l'espace et les équations décrivant leur comportement sont donc généralement des équations aux dérivées partielles. Pour les systèmes à paramètres distribués, l'interconnexion entre différents sous-systèmes n'est plus ponctuelle (via un terminal) mais distribuée sur une frontière et les méthodes de modélisation ne relèvent plus de la théorie des réseaux mais de *la théorie des champs*.

Dans nos travaux, nous avons également largement utilisé cette approximation en termes de systèmes à paramètres distribués. En mécanique, nous l'avons utilisée pour calculer les déformations et vibrations de coques, plaques ou poutres (par exemple, piézoélectriques dans les sections 3.2 et 4.3). Nous l'avons également utilisée en électromagnétisme lorsque nous nous sommes servis des équations de Maxwell et des potentiels scalaires dans la section 2.3 pour calculer les champs magnétiques dans nos différents actionneurs ou bien en thermique pour calculer la diffusion de chaleur dans le changeur d'outils décrit dans la section 3.3. Contrairement à la modélisation par systèmes à paramètres localisés, la modélisation par systèmes à paramètres distribués conduit à des systèmes de dimension infinie qu'il n'est en général possible de résoudre analytiquement que pour des géométries extrêmement simples (poutres, conditions d'axisymétrie...). De ce fait, ces modèles sont alors souvent approximés une seconde fois, soit par des méthodes de type éléments finis (section 2.3 et 4.3), soit par des méthodes de différences finies (section 3.3) afin d'obtenir des modèles plus faciles à résoudre. Nos travaux sur l'optimisation topologique de structures déformables décrits dans la section 4.3 ont mixé ces deux approches en associant une modélisation à paramètres localisés – les blocs – avec une modélisation à paramètres répartis – les poutres composants chacun des blocs.

Au cours de chaque exercice de modélisation, chacun des sous-systèmes considérés est toujours caractérisé par des variables de deux types :

- les variables *externes*⁶ qui sont accessibles de l'extérieur des sous-systèmes et qui interviennent dans l'interconnexion entre sous-systèmes. Ces variables sont des grandeurs sur lesquelles il est possible d'agir – par observation ou contrôle – dès lors que nous avons accès au terminal ou à la frontière d'interconnexion ;
- les variables *internes*⁷ qui ne sont pas directement accessibles de l'extérieur des sous-systèmes et traduisent le comportement interne du sous-système considéré. En particulier, les variables dites d'état sont un type particulier de variables internes.

Les variables externes servent à décrire l'interconnexion entre sous-systèmes alors que les variables internes servent à décrire le comportement d'un sous-système.

La deuxième étape de modélisation consiste à décrire mathématiquement l'interconnexion entre les différents sous-systèmes définis lors de l'étape 1. celle-ci peut être décrite mathématiquement en liant deux terminaux ou deux frontières ensemble et donc en posant des contraintes entre les variables externes de ces deux sous-systèmes. Ces contraintes sont généralement des contraintes linéaires. Les variables externes peuvent être séparées en deux groupes distincts de type dynamique ou géométrique :

1. Le premier groupe de variables externes est lié à une *grandeur conservative*, c'est-à-dire à une grandeur qui ne peut apparaître ou disparaître spontanément au cours du temps et dont la variation temporelle résulte nécessairement d'un flux de *quelque chose*. La grandeur conservative en question dépend du domaine physique étudié, par exemple, la charge en électricité, la quantité de mouvement en mécanique du solide, la masse en mécanique des fluides ou l'énergie en thermodynamique. Le flux de cette variable est appelé une variable *trans* ou une variable *through* dans la littérature anglosaxonne (cf. [Can67]).
2. Le second groupe de variables externes est associé à une grandeur définie *continuellement* dans l'espace, c'est-à-dire qui ne présente pas de saut (ou de discontinuité) pour une variation infinitésimale de sa position de mesure dans l'espace. Des grandeurs de ce type sont appelées des *potentiels* (au sens électrique du terme et non au sens thermodynamique). Entre deux positions ponctuelles de l'espace, il est possible de définir une *variable de différence de potentiel* qui prend le nom de variable *per* ou variable *across* dans la littérature anglo-saxonne.

Pour des systèmes à paramètres localisés, les interconnexions sont particulièrement faciles à décrire de manière systématique en utilisant des méthodes de graphes linéaires (cf [SMR67], [KTK67], [DK69]) ou les bond-graphs (cf [KMR90]). Ces méthodes ont alors l'avantage de faire apparaître *explicitement* la structure géométrique d'interconnexion. Les méthodes hamiltoniennes à ports (cf [Van00] et [BLME07]) sont une extension naturelle de cette idée mais qui s'appuie sur

⁶J.C. Willems les nomment les *variables manifestes* [PW06].

⁷J.C. Willems les nomment les *variables latentes* [PW06].

une description du comportement interne aux sous-systèmes en termes hamiltoniens. Nous n'avons commencé qu'assez récemment à explorer cet outils très proche de la description hamiltonienne que nous avons proposé pour les actionneurs à base d'AMFM. C'est une piste que nous aimerions explorer notamment lors de la thèse co-encadré avec le Pr. Y. Legorrec qui débutera à l'automne 2010. Pour les systèmes à paramètres répartis, la description de l'interconnexion ne se fait le plus souvent qu'en spécifiant des conditions aux limites sur les frontières des sous-systèmes. C'est ce que nous avons fait lors de nos travaux en mécanique (section 2.2) et en thermique (section 3.3). Il existe cependant une extension des méthodes hamiltoniennes à ports pour les systèmes de dimension infinie. La collaboration que nous aimerions débiter avec Y. Legorrec et des collègues de Lyon (B. Maschke) et de Twente aux Pays-Bas (H. J. Zwart) s'oriente dans ce sens. En effet, ce qui différencie principalement un système mécatronique d'un système micro-mécatronique est le degré d'intégration et de miniaturisation croissant qui nécessite presque inévitablement l'utilisation de modèles à paramètres distribués plutôt que localisés. Les modèles des systèmes micro-mécatroniques sont donc au final presque toujours des systèmes de dimensions infinies.

Dans nos travaux de recherche (sauf pour les plus récents), nous n'avons malheureusement pas utilisé la théorie des graphes linéaires, des bond-graph ou des systèmes hamiltonien à ports et la décomposition en sous-systèmes s'est souvent réduite à la définition d'un seul gros sous-système. De ce fait, les interconnexions étaient internes à ce sous-système et étaient prises en compte grâce à des techniques de multiplicateurs de Lagrange. Les interconnexions n'étaient donc pas exprimées de manière explicites ce qui avait tendance à rendre la compréhension ou le contrôle du dispositif plus complexe. Dans nos futurs travaux, nous devons prendre garde d'explicitier autant que possible les interconnexions les plus essentielles de nos dispositifs pour favoriser une utilisation plus rationnelle de l'approche système. L'utilisation des multiplicateurs de Lagrange a également l'inconvénient de faire apparaître des équations algébro-différentielles qu'il n'est pas toujours facile de résoudre. Dans les travaux reportés dans la section 2.2, nous avons pu résoudre le problème parce qu'il s'agissait de contraintes holonomes linéaires mais ce n'est malheureusement pas toujours le cas. Nous avons également abordé ce problème assez récemment avec B. Maschke pour le cas des actionneurs en AMFM mais ces travaux n'ont malheureusement que peu avancé en raison du temps consacré à la rédaction de cette HDR. J'aimerais cependant les poursuivre dès que cette rédaction sera achevée. Il y a, de plus, des travaux très intéressants concernant l'interconnexion et les méthodes formelles pour la suppression des contraintes résultantes qui sont abordés dans le dernier ouvrage de F. E. Cellier [Cel06] et sur lesquelles j'aimerais me pencher dans les prochaines années. Ces travaux sont très liés aux réflexions et au développements autour du standard de modélisation *modelica* et de sa version la plus aboutie *Dymola*.

La troisième étape de modélisation est une étape de description mathématique du *comportement* de chacun des sous-systèmes. Contrairement aux lois d'interconnexion, les lois de comportements sont des relations qui lient, non pas les variables externes, mais les variables internes ou latentes d'un sous-système. Ce sont des lois physiques dans le sens où elles résultent de l'*adoption* d'une

représentation de la nature physique *d'un* sous-système et non d'une géométrie d'interconnexion – topologie – *entre les* sous-systèmes. La modélisation n'étant qu'une approximation, elle dépendra forcément de la précision voulue pour le modèle et des phénomènes à prendre en compte dans ce sous-système. D'un point de vue externe à ce sous-système, les lois de comportement permettent de lier les variables through et across entre elles en définissant le comportement interne à ce sous-système.

En première approximation, ces lois sont souvent choisies linéaires – ou linéarisées autour d'un point de fonctionnement – mais ce n'est pas toujours possible ni acceptable d'utiliser une telle simplification. Si ce n'est pas possible, la modélisation du dispositif fait alors intervenir des équations non-linéaires beaucoup plus délicates à résoudre. Par exemple, dans nos travaux sur les AMFM, la saturation des matériaux ferromagnétiques et le comportement complexe des AMFM nous a forcé à utiliser des lois de comportement fortement non linéaires, notamment pour définir les comportement magnétiques et mécaniques des matériaux composant l'actionneur. La particularité des matériaux actifs est qu'ils ont pratiquement tous des comportements assez fortement non-linéaires, ce qui va nous pousser à poursuivre et approfondir nos travaux sur l'analyse et la commande des systèmes non-linéaires.

Dans une très grande majorité de cas, une description par systèmes à paramètres localisés pose l'hypothèse que chacun des sous-systèmes est un élément *simple* – une brique de base –, c'est-à-dire qu'il ne fait intervenir qu'un seul phénomène physique. C'est par exemple, l'hypothèse qui est faite lorsque nous disons qu'un sous-système est une masse ponctuelle ou une inductance pure dans une modélisation par graphe linéaire ou par bond-graph. Cette relation – assez triviale pour un élément simple – est alors posée comme une contrainte de comportement ou de fonctionnement interne associée à un choix de modèle comportemental à ce sous-système. Si le sous-système considéré est un système statique, nous avons une loi de comportement *algébrique*, si le sous-système est dynamique, nous avons une loi de comportement *différentielle* ou *algébro-différentielle*. Lorsque le sous-système n'est pas un élément simple, la méthode la plus efficace pour trouver sa ou ses lois de comportement interne est d'utiliser une approche variationnelle dans le cadre du théorème de Hamilton et de la méthode de Lagrange. Nous avons fait une large utilisation de ces méthodes dans tous nos travaux de recherche. La loi de comportement associée à ce sous-système prend alors la forme d'un système algébro-différentiel. La partie différentielle permet de décrire les sous-parties dynamiques de ce sous-système et la partie algébrique permet de décrire les sous-parties statiques et les contraintes entre ces différentes sous-parties (techniques des multiplicateurs de Lagrange). Dans le cas d'un système mécatronique ou micro-mécatronique où plusieurs domaines physiques entrent en jeu, nous avons pu montrer que la modélisation hamiltonienne est plus pratique que la modélisation lagrangienne puisqu'elle s'adapte mieux au formalisme et aux résultats issus de la thermodynamique.

L'ensemble de ces trois étapes constitue, à proprement parlé, le processus de modélisation c'est-à-dire le processus de construction d'un jeu d'équations mathématiques à même de représenter plus ou moins finement le comportement réel du dispositif d'étude. En raison des hypothèses faites lors de l'étape

1 (décomposition en sous-systèmes) et lors de l'étape 3 (description d'un comportement physique), le jeu d'équations résultant du processus de modélisation n'est qu'une représentation *approximative* du fonctionnement réel du dispositif et en toute rigueur, tout modèle devrait être accompagné d'une notice spécifiant ses conditions d'utilisation. Dans cet ordre d'idée, Åström et Murray conseillent dans [ÅströmM08] de définir pour tout modèle, un *citron d'incertitude*, c'est-à-dire un graphique qui définit, pour quelle plage de fréquence et quelle plage d'amplitude, le modèle est une représentation pertinente du fonctionnement réel.

Quel que soit le type de modèle développé, il existe généralement une étape de post-traitement qui consiste à *ré-organiser* ce modèle afin de lui donner une forme mieux adaptée à son utilisation pour des simulations⁸. En effet, le but du développement d'une modélisation est de pouvoir réaliser des simulations (analytiques ou numériques), c'est-à-dire des expériences virtuelles de fonctionnement du dispositif réel pour certaines conditions de fonctionnement, généralement en fonction d'un nombre plus ou moins grand d'entrées imposées et de conditions initiales. Le modèle est ainsi disponible et utilisable lors des phases de conception de ce dispositif et de son contrôle. Grâce à ce modèle, nous pouvons alors tester de manière virtuelle son comportement, ses performances et ses limites sans avoir à réaliser des expériences réelles coûteuses en temps et en argent et qui nécessiteraient de fabriquer des prototypes et de conduire des expériences réelles longues et fastidieuses. Bien évidemment, un modèle n'étant par définition qu'une approximation du dispositif réel, il sera tout de même nécessaire de recourir à des phases de tests et de validation réels au final, mais celles-ci seront d'autant moins nécessaires et d'autant plus courtes que le modèle utilisé pour les expériences virtuelles aura été adéquat et représentatif du comportement réel dans la plage d'utilisation envisagée.

Au cours de nos recherches, nous avons également abordé la conception optimale de structures micro-mécatroniques d'un point de vue global, c'est-à-dire en intégrant à la fois le point de vue conception, modélisation, performance et commande. C'est une voie particulièrement intéressante qu'il sera essentiel de poursuivre dans les années à venir.

Conclusion

Parmi tous les systèmes conçus et étudiés par l'homme, le travail de recherche que j'ai conduit au cours des années précédentes s'est focalisé sur les dispositifs *mécatroniques* et *micro-mécatroniques*, c'est-à-dire sur les dispositifs mettant en œuvre des sous-systèmes mécaniques, électriques, thermodynamiques et informatiques. Ces systèmes sont incontestablement mieux compris et donc plus faciles à modéliser que les processus biologiques, chimiques, écologiques ou économiques, ce qui permet d'avoir une plus grande confiance dans les modèles développés. Cependant les forts couplages existant entre les différents domaines de la mécatronique ont nécessité, et nécessitent encore à l'heure actuelle, d'importantes recherches pour améliorer la compréhension et la pertinence des modèles proposés pour la conception et la commande de ces dispositifs.

⁸Les modèles d'état ou entrée/sortie en sont deux formes particulières.

La modélisation reste cependant, aujourd'hui comme hier, un exercice complexe et délicat qui nécessite beaucoup d'expérience et d'intuition. Comme le soulignait de manière si judicieuse P.E. Wellstead en 1979 déjà [Wel79], elle est autant un art qu'une discipline scientifique et c'est pourquoi elle est si difficile à enseigner. De ce fait, quelles que soient la précision et la confiance que nous avons envers nos modèles, il faut savoir rester humble et critique et seule la validation réelle nous permet de confirmer incontestablement les résultats virtuels issus de nos modélisations. La nécessité de cette étape finale de validation expérimentale échappe souvent aux chercheurs plus théoriciens et donc plus éloignés des sciences de l'ingénieur alors qu'elle représente en général une part considérable (notamment en temps) du travail de recherche en modélisation.

Bibliographie

- [ACU⁺04] J. Agnus, C. Clévy, Y. Urushima, R. Perez, A. Hubert, and N. Chaillet. A micromanipulation station based on a new integrated microprehensile microrobot on chip (mmoc). In *35th International Symposium on Robotics (ISR'2004)*, Paris, France, March 2004.
- [AFM07] S. S. Aphale, A. J. Fleming, and S. O. R. Moheimani. Integral resonant control of collocated smart structures. *Smart Materials and Structures*, 16 :439–446, 2007.
- [AJT04] G. Allaire, F. Jouve, and A.-M. Toader. Structural optimization using sensitivity analysis and a level set method. *J. Comp. Phys.*, pages 363–393, 2004.
- [ALS06] R. Ahluwalia, T. Lookman, and A. Saxena. Dynamic strain loading of cubic to tetragonal martensites. *Acta materialia*, 54 :2109–2120, 2006.
- [ANS87] ANSI/IEEE. *IEEE Standard on Piezoelectricity - Standard 176-1987*. IEEE, 1987.
- [ÅströmF00] K. J. Åström and K. Furuta. Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica*, 36(2) :287–295, 2000.
- [ÅströmM08] K. J. Åström and R. M. Murray. *Feedback Systems : An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008.
- [BB01a] J. M. Breguet and A. Bergander. Toward the personal factory? *SPIE*, 4568 :293–303, 2001.
- [BB01b] S. Bütetfisch and S. Büttgenbach. A new pneumatically actuated miniature gripper for micro assembly. In *SPIE conf. on micro-robotics and microassembly III*, pages 32–39, oct. 2001.
- [Ber04] P. Bernardoni. Outils et méthodes de conception de structures mécaniques à déformations réparties et actionnement discret - applications en microrobotique, thèse de l'université de paris vi. 2004.
- [BLME07] B. Brogliato, R. Lozano, B. Maschke, and O. Egeland. *Dissipative Systems Analysis and Control. Theory and applications, 2nd edition*. Springer-Verlag, 2007.
- [BS03] M. P. Bendsøe and O. Sigmund. *Topology optimization : theory, methods and applications*. Springer Verlag, 2003.

- [BWB01] S. Bütetisch, R. Wilke, and S. Büttgenbach. Silicon three-axial tactile probe for mechanical characterization of micro grippers. In *SPIE conf. on microrobotics and microassembly III*, pages 61–67, oct. 2001.
- [Cal85] H. B. Callen. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics, 2nd edition*. John Wiley and Sons, 1985.
- [Can67] R. H. Cannon. *Dynamics of Physical Systems*. McGraw-Hill, 1967.
- [CC07] R. N. Couch and I. Chopra. A quasi-static model for nimga magnetic shape memory alloy. *Smart Materials and Structures*, 16 :S11–S21, 2007.
- [Cel91] F. E. Cellier. *Continuous System Modeling*. Springer, 1991.
- [Cel06] F. E. Cellier. *Continuous System Simulation*. Springer, 2006.
- [CF00] S. Canfield and M. Frecker. Topology optimization of compliant mechanical amplifiers for piezoelectric actuators. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 20 :269–278, 2000.
- [CGG98] A. Cox, E. Garcia, and M. Goldfarb. Actuator development for a flapping microrobotic microaerial vehicle. In *SPIE conf. on microrobotics and micromanipulation*, pages 102–108, Nov. 1998.
- [CH89] R. Courant and D. Hilbert. *Methods of mathematical physics*. John Wiley & Sons, 1989.
- [CHAC05] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus, and N. Chaillet. A micromanipulation cell including a tool changer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15 :292–301, September 2005.
- [CHC04] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. A new micro-tools exchange principle for micromanipulation. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2004)*, Sendai, Japan, September 2004.
- [CHC06] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Modeling, identification and control of a thermal glue based temporary fixing system : Application to the microrobotic field. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2006)*, Orlando (Florida), USA, May 2006.
- [CHC08] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Flexible micro-assembly system equipped with an automated tool changer. *Journal of MICO-Nano Mechatronics. Special Issue on Automation in Micro and Nanohandling*, 4(1) :59–72, 2008.
- [CHF⁺06] C. Clévy, A. Hubert, S. Fahlbusch, N. Chaillet, and J. Michler. Design, fabrication and characterization of a flexible system based on thermal glue for in air and in sem microassembly. In *EFAC Third International Precision Assembly Seminar (IPAS'2006)*, Bad Hofgastein, Austria, February 2006.
- [Chi06] C. Chicone. *Ordinary Differential Equations with Applications, 2nd ed.* Springer Verlag, 2006.
- [Cle02] C. Clevy. étude et réalisation d'un micromanipulateur piézoélectrique monolithique permettant les changements

- d'outils. Master's thesis, Université de Franche-Comté, Sept. 2002.
- [Cle05] C. Clevy. *Contribution à la micro-manipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, Déc. 2005.
- [CMGG99] A. Cox, D. Monopoli, M. Goldfarb, and E. Garcia. The development of piezoelectrically actuated micro-aerial vehicles. In *SPIE conf. on microrobotics and microassembly*, pages 101–108, Sept. 1999.
- [Cug02] O. Cugat, editor. *Micro-actionneurs électromagnétiques MAG-MAS*. Lavoisier, Hermès, 2002.
- [DJ02] A. DeSimone and R. D. James. A constrained theory of magnetoelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50(2) :283–320, 2002.
- [DK69] C.A. Desoer and E.S. Kuh. *Basic Circuit Theory*. McGraw-Hill, 1969.
- [Ewi00] D.J. Ewins. *Modal testing 2*. Research Studies Press Ltd (John Wiley & Sons), 2000.
- [Eyg97] B. Eyglument. *Manuel de thermique : théorie et pratique*. Hermès, 2ième édition, 1997.
- [Fat00] S. Fatikow. *Mikroroboter und mikromontage*. B.G. Teubner, 2000.
- [FR97] S. Fatikow and U. Rembold. *Microsystem technology and micro-robotics*. Springer Verlag, 1997.
- [Fri86] B. Friedland. *Control System Design, an introduction to state-space methods*. MacGraw-Hill, 1986.
- [Fur99] K. Furuta. Experimental processing and assembling system (microfactory). In *The fifth International Micromachine Symposium*, pages 173–177, Tokyo, Japan, October 1999.
- [Gau04] J.-Y. Gauthier. Conception d'actionneurs à base d'alliage à mémoire de forme magnétique. Master's thesis, Université de Franche-Comté, Sept. 2004.
- [Gau07] J.-Y. Gauthier. *Modélisation des alliages à mémoire de forme magnétique pour la conversion d'énergie dans les actionneurs et leur commande*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, Déc. 2007.
- [Gaw04] W. K. Gawronski. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of structures*. Springer Verlag, 2004.
- [GBM⁺04] T. Gaugel, M. Bengel, D. Malthan, J. Schliesser, J. Kegeler, and G. Munz. Miniaturized reconfigurable micro-assembly system. In *International Precision Assembly Seminar*, Bad Hofgastein, Austria, February 2004.
- [GCB⁺10a] M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel, A. Hubert, and C. Rotinat-Libersa. Towards the mechanical and control-oriented optimization of micromechatronic systems for robust control. In *Workshop Control issues in the micro/nano-world, (part of ICRA'2009)*, May 2010.

- [GCB⁺10b] M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel, C. Rotinat-Libersa, and A. Hubert. Synthèse et commande robuste d'une micropince piézoélectrique intégrée. *Journal européen des systèmes automatisés (RS-JESA), numéro spécial "commande dans le micro-monde"*, 44/2010 (à paraître) :661–691, 2010.
- [GFGG99] M. Gogola, G. Fischer, M. Goldfarb, and E. Garcia. The development of two piezoelectrically actuated mesoscale robot quadrupeds. In *SPIE conf. on microrobotics and microassembly*, pages 76–84, Sept. 1999.
- [GHA⁺05] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent, and N. Chaillet. Multistable actuator based on magnetic shape memory alloys. In *Workshop on Magnetic Shape Memory Alloys*, Ascona, Switzerland, September 2005.
- [GHA⁺06] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent, and N. Chaillet. Multistable actuator based on magnetic shape memory alloys. In *ACTUATOR'2006*, Bremen, Germany, 14-16 June 2006.
- [GHA⁺07a] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet, and C. LExcellent. Conversion d'énergie magnéto-thermo-mécanique dans les alliages à mémoire de forme magnétiques. In *Conférence sur les Sciences et Applications des Matériaux Electroactifs (CSAME'07)*, Toulouse, France, 6-7 September 2007.
- [GHA⁺07b] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent, and N. Chaillet. Original hybrid control for robotic structures using magnetic shape memory alloys actuators. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2007)*, San Diego (CA), USA, 29 oct. - 2 Nov. 2007.
- [GHA⁺08a] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet, and C. LExcellent. Conversion d'énergie magnéto-thermo-mécanique dans les alliages à mémoire de forme magnétiques. *Revue de l'électricité et de l'électronique*, 4, avril 2008.
- [GHA⁺08b] J.Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet, and C. LExcellent. Nonlinear hamiltonian modelling of magnetic shape memory alloy based actuators. *Sensors and Actuators A : Physical*, 141(2) :536–547, 2008.
- [GHU06] H.H. Gatzten, M. Hahn, and K. Ullakko. Characterization of magnetic shape memory (msm) material and its application in a hybrid micro actuator. In *ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany*, pages 406–409, 2006.
- [Gir97] A. Girard. Dynamique des structures - techniques d'analyse et d'essai. *Dossier Techniques de l'Ingénieur*, Dossier B5150, 1997.
- [GL96] W. K. Gawronski and K. B. Lim. *Balanced Control of Flexible Structures*. Springer Verlag, 1996.
- [GLH⁺07] J.Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie, and N. Chaillet. Modeling rearrangement process of martensite platelets in a magnetic shape memory alloy Ni₂MnGa single crystal under magnetic field and (or) stress action. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(3) :289–299, 2007.

- [GLH⁺10] J.Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie, and N. Chaillet. Ni-mn-ga single crystal shape memory alloy magneto-thermo-mechanical modeling. In *14th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM14)*, Poitiers, France, July 2010.
- [Gol80] H. Goldstein. *Classical Mechanics*. Addison-Wesley, 1980.
- [GR96] M. Geradin and D. Rixen. *Théorie des vibrations, application à la dynamique des structures 2^e édition*. Masson, recherche en mécanique, 1996.
- [GRLCB08] M. Grossard, C. Rotinat-Libersa, N. Chaillet, and M. Boukallel. Mechanical and control-oriented design of a monolithic piezoelectric microgripper using a new topological optimisation method. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pages 32–45, 2008.
- [Gro46] F.W. Grover. *Inductance calculations*. Dover Publications, 1946.
- [Gro08] M. Grossard. *Contribution à la conception optimale et la commande de systèmes mécatroniques flexibles à actionnement piézoélectrique intégré - Application en microrobotique*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2008.
- [HABC99] S. Henein, C. Aymon, S. Bottinelli, and R. Clavel. Fatigue failure of thin wire-electrodischarge machined flexible hinges. In *SPIE conf. on microrobotics and microassembly*, pages 110–121, Sept. 1999.
- [HBC97] S. Henein, S. Bottinelli, and R. Clavel. Parallel spring stages with flexures of micrometric cross-sections. In *SPIE conf. on microrobotics and microfabrication*, pages 209–220, Oct. 1997.
- [Hec05] O. Heczko. Determination of ordinary magnetostriction in ni-mn-ga magnetic shape memory alloy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291 :846–849, 2005.
- [HG06] S. Hurlebausa and L. Gaul. Smart structure dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 :255–281, 2006.
- [HGSB01] U. Hansen, J. Güttler, V. Seidmann, and S. Büttgenbach. An optimization software for the design of micro coils. In *Proc. of 12th micromechanics Europe workshop*, pages 241–244, 2001.
- [HL93] A. Hac and L. Liu. Sensor and actuator location in motion control of flexible structures. *Journal of Sound and Vibrations*, 167 :239–261, 1993.
- [HNS97] Y. Hatamura, M. Nakao, and T. Sato. Construction of an integrated manufacturing system for 3d microstructure-concept, design and realization. *Annals of the CIRP*, 46(1) :313–318, 1997.
- [Hub02] A. Hubert. Modeling, simulation and design of legged micro-robot. Technical report, IMT, TU Braunschweig, 2002.
- [Hur60] W.C. Hurty. Vibration of structural systems by component-mode-synthesis. *Journal of Engineering Mechanical Division, ASCE*, 86 :51–69, August 1960.
- [Hur65] W.C. Hurty. Dynamic analysis of structural systems using component modes. *AIAA Journal*, 3(4) :678–685, 1965.
- [IMM] <http://www.imm-mainz.de/v0/vvseitene/vvleistung/getriebe.html>.

- [Jac99] J.D. Jackson. *Classical electrodynamics, 3rd ed.* John Wiley & Sons, 1999.
- [Jan07] H. Janocha. *Adaptronics and Smart Structures - Basics, Materials, Design and Applications.* Second Edition Springer Berlin Heidelberg New-York, 2007.
- [Jil98] D. Jiles. *Introduction to magnetism and magnetic materials, 2nd ed.* Chapman & Hall, 1998.
- [JW98] R. D. James and M. Wuttig. Magnetostriction of martensite. In *Philosophical Magazine A*, volume 77(5), pages 1273 – 1299, 1998.
- [KBK06] M. Kohl, D. Brugger, and B. Krevet. Ferromagnetic shape memory actuator for large 2d optical scanning. In *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Istanbul, Turkey*, 2006.
- [KBOT04] M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka, and T. Takagi. A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic sma thin films. *Sensors and Actuators A*, 114 :445–450, 2004.
- [KL05] B. Kiefer and D. C. Lagoudas. Magnetic field-induced martensitic variant reorientation in magnetic shape memory alloys. *Philosophical Magazine Special Issue : Recent Advances in Theoretical Mechanics, in Honor of SES 2003 A.C. Eringen Medalist G.A. Maugin*, 85(33-35) :4289–4329, 2005.
- [KMR90] D.C. Karnopp, D.L. Margolis, and R.C. Rosenberg. *System Dynamics : A Unified Approach 2nd edition.* John Wiley & Sons, 1990.
- [KTK67] H. E. Koenig, Y. Tokad, and H. K. Kesavan. *Analysis of Discrete Physical Systems.* McGraw-Hil, 1967.
- [Lan86] C. Lanczos. *The variational principles of mechanics 4th ed.* Dover publications Inc. (Originally published : University of Toronto Press 1970), 1986.
- [Lan93] Ioan Doré Landau. *Identification et commande des systèmes.* Traité des nouvelles technologies, série Automatique. Hermès, 1993.
- [Les88] C. Lesueur. *Rayonnement acoustique des structures–Vibroacoustique, Interaction fluide-structure.* Editions EY-ROLLES, collection de la direction des études et recherche d’électricité de France, 1988.
- [LG93] K. B. Lim and W. Gawronski. *Actuators and sensor placement for control of flexible structures in Control and Dynamics Systems : Advances in Theory and Applications.* ed. London, Academic Press, 1993.
- [LGF+98] N.O. Lobontiu, M.K. Gordon, G. Fischer, E. Garcia, and M. Goldfarb. Design and analysis of elastodynamic locomotion for robotic insects. In *SPIE conf. on microrobotics and micromanipulation*, pages 118–127, Nov. 1998.
- [Lju99] L. Ljung. *System identification, theory for user.* Prentice Hall PTR, 2nd edition, 1999.

- [Loi08] Y. Loirat. Conception et réalisation d'actionneur à haute résolution utilisant des matériaux actifs de type alliage à mémoire de forme magnétique. Master's thesis, École Polytech'Orléans, Sept. 2008.
- [Mad02] M. J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication : The Science of Miniaturization, Second Edition*. CRC Press, 2002.
- [Mar78] G. D. Martin. On the control of flexible mechanical systems. *PhD Dissertation, Stanford University, USA*, 1978.
- [MCK03] P. Müllner, V.A. Chernenko, and G. Kostorz. A microscopic approach to the magnetic-field-induced deformation of martensite (magnetoplasticity). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 267 :325–334, 2003.
- [Mei97] L. Meirovitch. *Principles and techniques of vibrations*. Prentice-Hall international Inc., 1997.
- [MFRW00] T. Mukherjee, G.K. Fedder, D. Ramaswamy, and J. White. Emerging simulation approaches for micromachined devices. *IEEE trans. on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 19(12) :1572–1589, dec. 2000.
- [MGB⁺10] R. El Khoury Moussa, M. Grossard, M. Boukallel, N. Chaillet, and A. Hubert. Observation-oriented design of a monolithic piezoelectric microac- tuator with optimally integrated sensor. In *41st International Symposium on Robotics (ISR'2010)*, June 2010.
- [MGC⁺10] R. El Khoury Moussa, M. Grossard, N. Chaillet, M. Boukallel, and A. Hubert. Optimal design and control simulation of a monolithic piezoelectric microactuator with integrated sensor. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'2010)*, 2010.
- [MH06] G. Millet and A. Hubert. Design of a 3 dof displacement stage based on ferrofluids. In *ACTUATOR'2006*, Bremen, Germany, 14-16 June 2006.
- [MI83] Lockheed Missiles and Space Company Inc. Vibration control of space structures : a high and low authority hardware implementation. *AFWAL-TR-83-3074*, July 1983.
- [Mil89] T.J.E. Miller. *Brushless Permanent-magnet and reluctance motor drives*. Clarendon Press - Oxford University Press, 1989.
- [Mil05] G. Millet. étude des possibilités d'utilisation des ferrofluides en micro-robotique. Master's thesis, Université de Franche-Comté, Sept. 2005.
- [Moo81] B. C. Moore. Principal component analysis in linear systems : controllability, observability, and model reduction. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 26 :17–32, 1981.
- [Nan] http://www.nanomotor.de/p_nanomotor.htm.
- [NOR] http://www.rfnorika.com/eng/system/sys_001.html.
- [OSB00] M. Ohnmacht, V. Seidmann, and S. Büttgenbach. Microcoils and microrelays - an optimized multilayer fabrication process. *Sensors & actuators A*, 83 :124–129, 2000.

- [Ozi94] M. N. Ozisik. *Finite difference methods in heat transfert*. CRC Press, 1994.
- [PAC⁺04] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. 2 dof piezoactuator for micromanipulation tasks. In *ACTUATOR 2004*, pages 767–770, Bremen, Germany, June 2004.
- [PAC⁺05] R. Perez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Modelling, fabrication and validation of a high performance 2 dof microgripper. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(2), April 2005.
- [Pon05] J. L. Pons. *Emerging Actuator Technologies : A Micromechatronic Approach*. John Wiley and Sons, 2005.
- [Pre02] A. Preumont. *Vibration control of active structures : an introduction, 2nd edition*. Kluwer academic publishers, 2002.
- [PW06] J. W. Polderman and J. C. Willems. *Introduction to Mathematical Systems Theory – A Behavioral Approach*. Springer, 2006.
- [RD97] D. Royer and E. Dieulesaint. *Ondes élastiques dans les solides, tomes 1 et 2*. Masson, 1997.
- [RHL04] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, and F. Lutz. Modular and reorganisable micromanipulation station. In *RTP Microrobotique*, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [SB00] V. Seidmann and S. Büttgenbach. A optimized fabrication process for microcoils utilizing uv-depth-lithography and bcb. In *proc. of the VDE world microtechnologies congres*, 2000.
- [SBB01] V. Seidmann, S. Bütefisch, and S. Büttgenbach. Application and investigation of in-plane compliant su8-structures formems. In *11th int. conf. on solid-state sensors and actuators, Transducer'01*, June 2001.
- [Sch02] M. Schober. Konstruktive Studienarbeit : Konstruktion und mikrotechnische Realisierung eines Sensor-Labormusters zur Drehwinkelerfassung auf Basis des Wirbelstromprinzips. Technical report, I.M.T., Technische Universität Braunschweig, 2002.
- [SD89] J. G Smits and S. I. Dalke. The constituent equations of piezoelectric bimorphs. In *International Ultrasonic Symposium*, pages 781–784, 1989.
- [SD07] N. N. Sarawate and M. J. Dapino. A continuum thermodynamics model for the sensing effect in ferromagnetic shape memory ni-mn-ga. *Journal of applied physics*, 101 :123522–1–123522–11, 2007.
- [SDBM06] R. C. Smith, M. J. Dapino, T. R. Braun, and A. P. Mortensen. A homogenized energy framework for ferromagnetic hysteresis. *IEEE Transactions on Magnetism*, 42(7) :1747–1769, 2006.
- [Smi05] R. C. Smith. *Smart Material Systems*. SIAM, 2005.
- [SMR67] J. L. Shearer, A. T. Murphy, and H. H. Richardson. *Introduction to System Dynamics*. Addison Wesley, 1967.

- [SOB99] V. Seidmann, M. Ohnmacht, and S. Büttgenbach. A optimized multilayer fabrication process for high aspect ratio electromagnetic devices and microsystems (mems). In *10th int. conf. on solid-state sensors and actuators, Transducer'99*, pages 102–105, 1999.
- [SPU04] I. Suorsa, E. Pagounis, and K. Ullakko. Magnetic shape memory actuator performance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 272-276 :2029–2030, 2004.
- [SPU05] I. Suorsa, E. Pagounis, and K. Ullakko. Position dependent inductance based on magnetic shape memory materials. *Sensors and Actuators A*, 121 :136–141, 2005.
- [STA⁺04] I. Suorsa, J. Tellinen, I. Aaltio, E. Pagounis, and K. Ullakko. Design of active element for msm-actuator. In *ACTUATOR 2004 / 9th International Conference on New Actuators*, Bremen (Germany), juin 2004.
- [STP⁺02] I. Suorsa, J. Tellinen, E. Pagounis, I. Aaltio, and K. Ullakko. Applications of magnetic shape memory actuators. In *8th international conference ACTUATOR 2002*, Bremen (Germany), 2002.
- [TF01] J.A Thompson and R.S. Fearing. Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui HI, 2001.
- [TJ99] R. Tickle and R. D. James. Magnetic and magnetomechanical properties of ni₂mnga. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 195 :627–638, juin 1999.
- [Tri89] W.S.N. Trimmer. Microrobots and micromechanical systems. *Sensors & actuators*, 19 :267–287, 1989.
- [TSJ⁺02] J. Tellinen, I. Suorsa, A. Jääskeläinen, I. Aaltio, and K. Ullakko. Basic properties of magnetic shape memory actuators. In *8th international conference ACTUATOR 2002*, Bremen (Germany), 2002.
- [TYW74] S. Timoshenko, D.H. Young, and W. Weaver. *Vibration problems in engineering 4th ed.* John Wiley & Sons Inc, 1974.
- [Uch97] K. Uchino. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [UHK⁺96] K. Ullakko, J. K. Huang, C. Kantner, R. C. O’Handley, and V. V. Kokorin. Large magnetic-field-induced strains in ni₂mnga single crystals. In *Applied Physics Letters*, volume 69(13), pages 1966–1968, 1996.
- [Uru03] Y. Urushima. Study and development of an interface for the lemmoc micro-gripper. Master’s thesis, Tokyo Denki University, Jul. 2003.
- [UT05] T. Udeshi and K. Tsui. Assembly sequence planning for automated micro assembly. In *International Symposium on Assembly and Task Planning*, 2005.
- [Van00] A. Van der Schaft. *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. Springer-Verlag, 2000.

- [Wel79] P. E. Wellstead. *Introduction to Physical Modelling*. Academic Press, 1979.
- [Wil07] J. C. Willems. The behavioral approach to open and interconnected systems – modeling by tearing, zooming, and linking. *IEEE Control Systems Magazine*, pages 46–99, Dec. 2007.
- [WLZ+05] F.-X. Wang, W.-J. Li, Q.-X. Zhang, X.-J. Wu, and C. Ge. Design and control of linear actuators made by magnetically controlled shape memory alloy. In *IEEE International Conference on Mechatronics*, pages 583–586, July 10-12 2005.
- [WLZW05] F. Wang, W. Li, Q. Zhang, and X. Wu. Operation principle and design of a differential magnetic shape memory actuator. In *Fourtieth IAS Annual Meeting*, volume 3, pages 2114–2118, 2005.
- [YGN01] G. Yang, J. A. Gaines, and B. J. Nelson. A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3d microassembly. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 133–138, Seoul, Korea, May 2001.
- [YGN03] G. Yang, J. A. Gaines, and B. J. Nelson. A supervisory wafer-level 3d microassembly system for hybrid mems fabrication. *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, 37 :43–68, 2003.
- [ZW07] Q.-X. Zhang and F.-X. Wang. A novel linear actuator and its controlling system. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pages 979–984, August 18-21 2007.