



Contribution à l'introduction de concepts mécaniques dans les Micro et Nano Systèmes

Lionel Buchaillot

► To cite this version:

Lionel Buchaillot. Contribution à l'introduction de concepts mécaniques dans les Micro et Nano Systèmes. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2004. tel-00087273

HAL Id: tel-00087273

<https://theses.hal.science/tel-00087273>

Submitted on 25 Jul 2006

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.

N° d'ordre :

MÉMOIRE

présenté à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

LE 29 MARS 2004

En vue de l'obtention de

**L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES
Spécialité : Sciences Physiques**

**CONTRIBUTION À L'INTRODUCTION DE CONCEPTS
MÉCANIQUES DANS LES MICRO ET LES NANO SYSTÈMES.**

par

Lionel BUCHAILLOT

**M. A. BOSSEBOEUF
M. G. CAIGNAERT
M. A. CAPPY
M. X. GRISON
M. R. PLANA
M. P.-A. ROLLAND**

Rapporteurs

**M. Ph. KAPSA
M. M. de LABACHELERIE
M. A. TOUBOUL**

Directeur de Recherche

M. D. COLLARD

Introduction

ABSTRACT: This introduction gives the definition of microtechnologies, microsystems and microfluidics. It gives also a brief history of the research related to the microsystems as well as the development of this field in France. Eventually, it describes how I became involved in the MEMS research from my Doctor's thesis until now. The framework of this report is also given.

RÉSUMÉ : Cette introduction précise les notions de microtechnologies, microsystèmes et de la microfluidique. Elle présente également un bref historique de la recherche dans le domaine des microsystèmes ainsi que le développement de cette activité en France. Finalement, la manière dont je me suis impliqué dans la recherche sur les microsystèmes depuis ma thèse de doctorat jusqu'à maintenant est décrite. La structure de ce rapport figure à la fin de l'introduction.

KEY WORDS: MEMS, Microtechnologies, Microfluidics.

MOTS-CLÉS: Microsystèmes, Microtechnologies, Microfluidique.

C'est en 1995, lors d'un séjour post-doctoral effectué au Laboratory for Integrated Micro Mechatronic Systems (LIMMS), laboratoire conjoint entre le CNRS et l'Université de Tokyo, que l'opportunité m'a été offerte de m'impliquer dans la recherche sur les microsystèmes et les microtechnologies. A cette époque, le Département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS et l'Institut des Sciences Industrielles de l'Université de Tokyo avaient scellé cet accord de partenariat centré sur les microtechnologies et les microsystèmes. Aujourd'hui, si le partenaire japonais n'a pas changé, c'est le Département Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) qui est l'acteur français de cette alliance. Durant le doctorat, c'est la modélisation mécanique théorique des moteurs piézo-électriques à onde progressive qui avait été étudiée au Laboratoire de Mécanique Appliqué R. Chaléat à Besançon, sous la direction de Patrice Minotti. Une étude sur la miniaturisation d'un moteur piézo-électrique avait été entreprise mais il s'agissait davantage de mécanique de précision que de microtechnologies. Le véritable contact avec ces dernières a donc eu lieu au Japon, dans le laboratoire du professeur Hiroyuki Fujita, où, en collaboration avec un étudiant japonais, je devais réaliser des films minces en alliages à mémoire de forme (AMF).

A l'issue de ce séjour au LIMMS, j'ai été impliqué dans un projet de recherche européen de type EUREKA alors que je travaillais pour la société SFIM (maintenant SAGEM). Ce projet, intitulé PAMELA pour Piezo Active Motor for more ELectrical Aircraft visait l'intégration de moteurs piézo-électriques dans les avions de moins de 50 places. Outre les recherches sur un moteur destiné à actionner des commandes de vol secondaires, un manche à retour d'effort piézo-électrique devait aussi être étudié. Des AMF étaient envisagés pour améliorer les performances des interfaces entre les stators et les rotors.

Mon entrée au CNRS a coïncidé avec la création à l'Institut d'Électronique, de Microélectronique du Nord (IEMN - maintenant N=Nanotechnologie), de l'équipe Microsystèmes Silicium créée et dirigée par Dominique Collard. Après avoir effectué un transfert de savoir-faire entre le LIMMS et l'IEMN basé sur la technologie tridimensionnelle auto-assemblée (SAT3D), et les films minces d'AMF, nous avons développé nos propres thèmes de recherche.

Le groupe Microsystèmes Silicium dont j'ai pris la responsabilité en novembre 2000 a axé sa recherche sur les micro-actionneurs et leur environnement. Cela nous permet d'étudier des problématiques amont liées au micro-actionnement, à son interaction technologique, ainsi que des voies applicatives telles que les microsystèmes pour les télécommunications, la microrobotique, entre autres...

Dans la suite de cette introduction, quelques précisions sont données sur la terminologie de notre domaine de recherche, puis un bref historique retrace le développement de la recherche sur les microsystèmes dans le monde et en France.

Outre cette introduction, ce rapport se compose principalement de trois chapitres. Le premier, consacré aux micro-actionneurs, présente une partie des travaux effectués sur des études conceptuelles exploitant le potentiel de différents modes d'actionnement : transition de phase; électrostatique et thermique.

Le second chapitre décrit les activités de recherche effectuées dans le thème applicatif des microsystèmes pour les télécommunications. Il s'agit de travaux soutenus par de nombreux contrats de recherche nationaux ou européens. Deux composants en particulier ont été étudiés par trois doctorants. Emmanuel Quévy a étudié des résonateurs électromécaniques destinés à une application de filtrage dans la gamme intermédiaire de fréquence de la téléphonie mobile. Vincent Agache a étudié des résonateurs dont les fréquences propres se situent au voisinage du GHz. Les premières recherches effectuées à l'IEMN sur des microcommutateurs pour les signaux hyperfréquences sont également présentées.

Le troisième chapitre est dédié aux résultats récemment obtenus par Olivier Millet sur l'évolution de la raideur de microstructures soumises à un chargement cyclique. Il s'agit d'une partie de l'étude transversale des mécanismes de défaillance des microsystèmes destinée à la modélisation du phénomène de fatigue dans les microstructures.

Enfin, quelques perspectives de recherche impliquant les micro-actionneurs dans les microsystèmes seront présentées, suivies d'une conclusion et des annexes.

1. Microtechnologies, microsystème et microfluidique : De quoi s'agit-il ?

Le terme "**microsystème**" (Micro Electro Mechanical System – MEMS - en anglais) est le plus général et il désigne l'assemblage dans un même composant, et quelle que soit la technique employée, d'un actionneur, d'un capteur, et d'une électronique. En fait, on parle encore de microsystème même si l'assemblage ne comporte qu'un

capteur ou un actionneur associé à une électronique. Dans le cas où le composant ne comporte qu'un actionneur contrôlé par une électronique non-intégrée, on parle plutôt de micro-actionneur et ceci est également valable pour les capteurs.

On attribue souvent la découverte de ce domaine de recherche au physicien et prix Nobel de physique (1965) Richard Feynman qui, lors d'une conférence, annonça que le monde microscopique serait un formidable champ d'investigation scientifique dès que la technologie en donnerait les moyens.

La dimension micrométrique des objets réalisés est un aspect important qui permet de distinguer les microsystèmes des microtechniques, ce dernier terme pouvant admettre des objets de dimension centimétrique. Comme on le verra plus tard, dans le bref historique de la section suivante, les premiers acteurs du domaine ont été ceux qui, comme Feynman l'avait entrevu, possédaient le moyen technologique, à savoir les chercheurs issus de la micro-électronique. La différence entre un composant micro-électronique et un composant microsystème réside dans le fait que ce dernier ne réalise pas seulement une fonction électronique, mais intègre une fonction mécanique qui nécessite qu'un film mince soit partiellement libéré du substrat. Les exemples les plus simples sont la membrane et la micropoutre. Dans le cas d'un micro-actionneur, la différence entre micro-électronique et microsystème est encore plus marquée car il y a génération d'un mouvement.

Les "**microtechnologies**" constituent l'ensemble des procédés à mettre en œuvre pour fabriquer un microsystème. Il s'agit là d'un véritable domaine de recherche sans l'évolution duquel les concepts nouveaux en microsystèmes n'auraient jamais vu le jour. On peut établir une distinction entre la recherche qui fait progresser la technologie – la recherche technologique – et les aspects techniques qui sont liés au fonctionnement d'une machine. Là encore, les précurseurs étaient à l'origine des chercheurs en micro-électronique ou en physique des composants qui ont imaginé des concepts technologiques permettant d'améliorer les performances de leurs dispositifs électroniques. On peut citer par exemple le transistor à grille (métallique) résonante réalisé à la fin des années 60. A l'exception de nouveaux matériaux employés, jusqu'à la fin des années 80, les microtechnologies et les technologies de la micro-électronique étaient difficiles à dissocier. De nos jours, ce n'est plus le cas, il existe des technologies spécifiques aux microsystèmes qui ne sont pas mises en œuvre dans l'industrie micro-électronique. On parle de fonderies "microsystèmes" dans l'industrie, ce sont des usines dont l'outil de production ne pourrait être employé pour faire de la micro-électronique et inversement. A l'échelle des laboratoires, il existe des centrales de technologie ayant une finalité de recherche technologique.

La "**microfluidique**" est, au même titre que les **MOEMS** (microsystèmes optiques ou pour l'optique), les **RF MEMS** (microsystèmes pour les télécommunications), les **BioMEMS** (microsystèmes pour la biologie), une des orientations scientifiques des microsystèmes, que ce soit au niveau de la recherche fondamentale en mécanique des fluides ou dans un cadre plus appliquée lorsqu'il s'agit d'une partie constitutive d'un BioMEMS. Le terme exact serait plutôt "microfluidique intégrée" car la microfluidique existe depuis très longtemps dans la chimie de la séparation où elle se pratique avec des capillaires en verre. Dans la suite de ce rapport, le terme "microfluidique" désignera donc la "microfluidique intégrée". La conférence IEEE MEMS a permis de présenter les premiers articles "microfluidique" dans les années 90 et depuis, comme pour les autres orientations mentionnées ci-dessus, des conférences internationales plus spécifiques ont été organisées.

Les progrès réalisés dans la recherche sur les microsystèmes sont souvent le fruit d'une forte interaction avec ceux observés dans les microtechnologies. Les laboratoires universitaires comme le Berkeley Sensors and Actuators Center (BSAC) [gravure sélective du silicium par du difluorure de xénon XeF_2], ou industriels comme Bosch [procédé de gravure profonde anisotrope du silicium], sont à l'origine de sauts technologiques qui ont permis des avancées considérables dans la recherche conceptuelle menée dans les microsystèmes. Microsystèmes et microtechnologies sont donc indissociables pour mener à bien des activités de recherche pertinentes à l'état de l'art international.

2. Les microsystèmes en France

Le contexte national et international est présenté de manière très synthétique dans cette section. A travers un bref historique qui donne les dates clés et les faits marquants, on montre l'implication progressive de la France dans le domaine.

- **1959** : R. P. Feynman (Caltech, Prix Nobel de Physique 1965), "There is Plenty of Room at the Bottom" [1].

- Cette référence est communément admise comme le discours préfigurant la découverte d'un nouveau domaine de recherche à l'échelle microscopique. Feynman revisita son premier discours en 1983 au Jet Propulsion Laboratory, Pasadena CA, USA, en l'intitulant cette fois : "Infinitesimal Machinery"[2].
- **1967** : Nathanson *et al.* présentent un transistor à grille métallique résonante. Il s'agit d'un composant de taille millimétrique, mais le concept de couche sacrificielle permettant de libérer un film mince (ayant la forme d'une poutre encastrée – libre dans ce cas) est exploité pour la première fois [3].
- **1982** : Petersen *et al.* (IBM Research Lab.) écrivent un article intitulé "Silicon as a Mechanical Material" où le silicium, matériau de prédilection de l'industrie de masse de la micro-électronique, est présenté comme un bon candidat pour la fabrication de microstructures mécaniques. Les procédés technologiques permettant l'usinage de volume du silicium sont également décrits [4].
- **1983** : Angell *et al.* proposent un certains nombres de dispositifs fabriqués en silicium dans un papier intitulé "Silicon Micromechanical Devices" [5].

Le milieu des années 80 marque le développement du domaine de recherche sur les microsystèmes qui bénéficie de contributions majeures des américains et des japonais qui se sont auparavant (**début 80**) structurés avec : aux États-Unis la création du Berkeley Sensors and Actuators Center (BSAC) à San Francisco ; et au Japon dans le laboratoire du Professeur Esashi à Sendai.

- **1988** : Le moteur électrostatique rotatif de R. S. Muller (BSAC, USA) constitue un fait marquant que beaucoup tenteront de reproduire comme pour obtenir un passeport d'entrée dans la communauté MEMS.
- **1985-90** : Les pays européens débutent leurs recherches dans le domaine des microsystèmes (Suisse, Pays-Bas, Suède, Allemagne).
- **Début 90** : Ce sont les premières réalisations de microsystèmes en France.
- **1992** : On assiste à une structuration du domaine de recherche "Microsystèmes" en France avec la création des pôles autour de laboratoires CNRS ou du CEA (le LAAS-CNRS à Toulouse, le LETI-CEA à Grenoble, l'IMFC à Besançon, et l'IEMN à Villeneuve d'Ascq). C'est également à cette date qu'est initié, par le département SPI du CNRS, le premier "Programme Microsystèmes". C'est sans doute à la même époque que commencent les activités de recherche sur les microsystèmes dans de grandes entreprises françaises.
- **1995** : Date de la création du Laboratory for Integrated Micro Mechatronics Systems (LIMMS), laboratoire conjoint entre le CNRS (Dpt SPI) et l'Institut des Sciences Industrielles (IIS) de l'Université de Tokyo qui, en accueillant des chercheurs permanents et des post-doctorants français, doit permettre d'acquérir des connaissances dans le domaine des microsystèmes, puis de transférer les connaissances acquises dans la recherche publique et privée française.
- **1995-2000** : C'est la poursuite de la structuration de ce domaine de recherche en France avec l'élargissement des pôles existants. Le pôle Rhone – Alpes (le LEOM à l'Ecole Centrale de Lyon, le LETI, le LEG à Grenoble) ; le pôle Sud-Ouest (le LAAS, le LIRMM à Montpellier, l'IXL à Bordeaux) ; le pôle Francilien (l'Institut d'Electronique Fondamentale à Orsay, l'ENS Cachan, l'ENS Ulm, l'ESPCI, le LPN, etc...) et l'ESIEE (Ecole d'ingénieurs) à Noisy le Grand qui dispose également d'une centrale de technologie.

- **2003** : Lancement du programme : "Recherche Technologique de Base" (RTB) – Programme du Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies associant le CEA et le CNRS.

Dans le secteur industriel, au cours des années 90, THALES AVIONICS à Valence (ex SEXTANT) s'est doté d'une centrale de technologie dédiée aux microsystèmes, de même que SAGEM. Il est évidemment plus difficile de connaître la nature des recherches conduites dans ces sociétés, mais les capteurs d'attitudes (gyroscopes, accéléromètres) ainsi que des capteurs nécessitant l'usage des microtechnologies (capteurs de pression à membrane) sont sans doute fabriqués dans ces centrales. Le CEA-LETI en France, le CSEM en Suisse permettent des transferts vers des sociétés de type "start-up" ou "spin-off".

3. Bibliographie

- [1] Feynman R P 1992 There's Plenty of Room at the Bottom J. Microelectromech. Syst. **1** 1 60
- [2] Feynman R P 1993 Infinitesimal Machinery J. Microelectromech. Syst. **2** 1 4
- [3] Nathanson H C *et al.* 1967 The resonant gate transistor IEEE Trans. on Electron Devices p. 117
- [4] Petersen K E 1997 Silicon as a mechanical material Micromechanics and MEMS Ed. W S Trimmer, IEEE Press, New-York p. 58
- [5] Angell J 1983 Silicon Micromechanical Devices Scientific American **2** p. 44

I. Les micro-actionneurs

Isabelle Roch¹ — Emmanuel Quévy² — Philippe Basset³ — Vincent Agache⁴ — Olivier Millet⁵ — François Conseil⁶ —

¹*Thèse soutenue en Décembre 2001*

²*Thèse soutenue en Décembre 2002*

³*Thèse soutenue en Juin 2003*

⁴*Thèse soutenue en Octobre 2003*

⁵*Thèse soutenue en Décembre 2003*

⁶*Soutenance prévue en 2004*

ABSTRACT: This chapter presents one part of the work done on the microactuator topic. It deals with conceptual studies using the potential of various actuating principles: electrostatic; thermal and phase transition. For some of them, test vehicles have been realized at the device level. Electrostatic actuation has also served as a support for the remote power supply experience during the Ph.D. of Philippe Basset. Resonators studied within the frame of the Ph.D. of Emmanuel Quévy are presented in the chapter dedicated to "RF MEMS". Microactuators which have been used as in situ test benches by Olivier Millet are presented in the chapter entitled "Etude des mécanismes de défaillance des micro-actionneurs." Microswitches and RF MEMS are explained and shown in the next chapter. Research focusing on microactuator is the core research activity of the "Silicon Microsystems" Group.

RÉSUMÉ: Ce chapitre présente une partie des travaux effectués sur le thème des micro-actionneurs. Il s'agit là d'études conceptuelles exploitant le potentiel de différents modes d'actionnement : transition de phase; électrostatique et thermique. Pour certains d'entre eux, un véhicule de test a été réalisé à l'échelle du dispositif. L'actionnement électrostatique a également servi de support à la démonstration de la télé-alimentation dans le cadre de la thèse de Philippe Basset. Les résonateurs étudiés dans le cadre de la thèse d'Emmanuel Quévy, tout comme les travaux sur les micro-actionneurs dédiés aux applications "télécommunication" tels les micro-interrupteurs pour ligne hyperfréquence sont présentés dans le chapitre consacré aux "Microsystèmes pour les télécommunications." Les micro-actionneurs ayant servi de bancs de test in situ pour l'étude de la fiabilité et exploités par Olivier Millet sont présentés dans le chapitre intitulé "Etude des mécanismes de

défaillance des micro-actionneurs." Ce thème de recherche, " les micro-actionneurs" constitue le cœur de l'activité de recherche du groupe "Microsystèmes Silicium".

KEY WORDS: Shape memory alloy; TiNi; electrostatic, self-assembled 3D MEMS; thermal; remote power supply; surface micromachining; polysilicon

MOTS-CLÉS : Alliage à mémoire de forme ; TiNi ; électrostatique ; microsystèmes 3D auto-assemblés ; thermique ; télé-alimentation ; micro-usinage de surface ; polysilicium.

I.1. Introduction

Le thème de recherche de l'équipe est centré sur les micro-actionneurs ou, plus généralement, sur les microsystèmes qui intègrent une partie mobile ou une partie vibrante. A partir de l'automne 1999, nous avons pu réaliser les micro-actionneurs conçus par notre groupe dans la salle à empoussièrement contrôlé (salle blanche) de l'IEMN dédiée aux microsystèmes. Les premières réalisations ont été le fruit d'un transfert de savoir-faire entre le LIMMS CNRS-IIS Université de Tokyo, ce transfert portait en particulier sur les films minces d'alliages à mémoire de forme (AMF), et sur les microsystèmes tridimensionnels auto-assemblés par des scratch drive actuators (SDA) que nous avons été les premiers à réaliser en France.

Dans les sections suivantes, trois modes d'actionnement seront illustrés à travers des microdispositifs ayant davantage une vocation de démonstrateur qu'une véritable vocation applicative, il s'agit : des alliages à mémoire de forme en film mince ; de l'actionnement électrostatique ; et de l'actionnement thermique. Ils seront présentés dans cet ordre qui correspond à la chronologie de l'étude de chacun d'eux.

I.2. Alliage à mémoire de forme en film mince

Le travail de thèse d'Isabelle Roch avait pour but de démontrer l'existence d'un potentiel d'intégration des films minces d'AMF dans les microsystèmes. La thèse a été soutenue en décembre 2001. La première phase de la thèse était la microfabrication des films minces d'AMF par pulvérisation cathodique selon une technologie transférée du LIMMS à l'IEMN. S'agissant d'un transfert de technologie, on pouvait s'attendre à ce que la phase de mise au point de la fabrication de films minces d'AMF soit de courte durée or, il n'en fut rien. En effet, plusieurs étapes du procédé d'élaboration du matériau ont dû faire l'objet de développements technologiques liés à des différences entre les bâtis de pulvérisation cathodique utilisés au Japon et ceux de l'IEMN, à l'emploi de cibles de composition différente, ainsi qu'à l'absence d'un moyen de recuit à température élevée (800°C) sous vide.

I.2.1. Motivations

Les endoscopes ainsi que la micromanipulation *in vitro* de matériel biologique ou de composants électroniques requièrent l'utilisation de préhenseurs miniaturisés et puissants. De tels dispositifs doivent être capables de saisir et de maintenir un micro-objet pendant qu'un autre dispositif (*e.g.* un scalpel ou faisceau laser) l'analyse ou le sépare de son milieu. Une micropince peut également être utile pour accomplir des tâches de transport. Durant la dernière décennie, les microtechnologies ont donné le jour à des microprehenseurs électrostatiques mais leur faible rapport d'aspect ne permettait pas la saisie précise des micro-objets [1]. De plus, les actionneurs électrostatiques utilisés n'étaient pas adaptés à la génération de déplacements quasi-statiques ; ils étaient davantage dédiés à l'excitation de vibrations. Les actionneurs piézo-électriques ont également été employés pour des applications de micropositionnement avec une bonne résolution. Cependant, ils produisent des déplacements de quelques micromètres qui nécessitent une amplification réalisable soit en empilant plusieurs actionneurs, soit en exploitant des multicouches piézo-électriques, soit encore en leur adjoignant un mécanisme d'amplification [2]. Une alternative consiste donc à employer les AMF qui présentent de nombreux avantages tels que la déformation admissible qui avoisine les 10%, une force de recouvrement importante et une grande densité de travail ($2,7 \times 10^7 \text{ J.m}^{-3}$). Même si les matériaux piézo-électriques peuvent être déposés par pulvérisation cathodique comme les AMF, le rendement de pulvérisation de ces derniers est nettement supérieur, quelques Angströem par heure contre plusieurs micromètres par heure respectivement. Par conséquent, nous avons opté pour l'actionnement d'un préhenseur au moyen d'un film mince d'AMF.

I.2.2. Contexte

Dans la littérature, nous avons relevé des exemples de préhenseurs en AMF [3-5], ainsi que l'assemblage par des technologies hybrides d'un film mince d'AMF avec une mâchoire faite d'un autre matériau structurel [6, 7]. Dans l'optique de l'intégration maximale des microdispositifs, la conception de Just *et al* intégrant un antagonisme dans le mécanisme permet d'utiliser l'AMF sans l'ajout d'un ressort de rappel [5]. Quant aux micro-

actionneurs réalisés par Takeuchi *et al* [3] et Lee *et al* [6], ils exploitent les contraintes résiduelles dues au traitement thermique qui agissent comme des ressorts de rappel.

Dans les sections suivantes, la fabrication de films minces d'AMF destinés aux procédés monolithique et hybride est présentée, puis celle du mécanisme de préhension en SU-8, enfin des résultats sont donnés et discutés.

I.2.3. Microfabrication des films mince d'AMF

I.2.3.1. Procédé monolithique

Avec un procédé monolithique, l'élaboration de l'AMF doit être intégrée à la fabrication du micromécanisme. Un procédé de "lift-off" permettant de réaliser des films d'AMF d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 10 μm a été développé (figure I.1)[8], il nécessite trois niveaux de masquage. Tout d'abord, afin d'éviter les réactions entre la couche de titane-nickel (TiNi) et le silicium, une couche d'oxyde de silicium (SiO_2) est déposée par dépôt en phase vapeur assisté par plasma (PECVD – acronyme anglais) sur une épaisseur de 1,2 μm . Un premier niveau de photolithographie utilisant une résine positive (AZ 5218) définit un moule dans lequel 300 nm de titane sont évaporés, il servira à promouvoir l'adhérence entre la microstructure en TiNi et le SiO_2 .

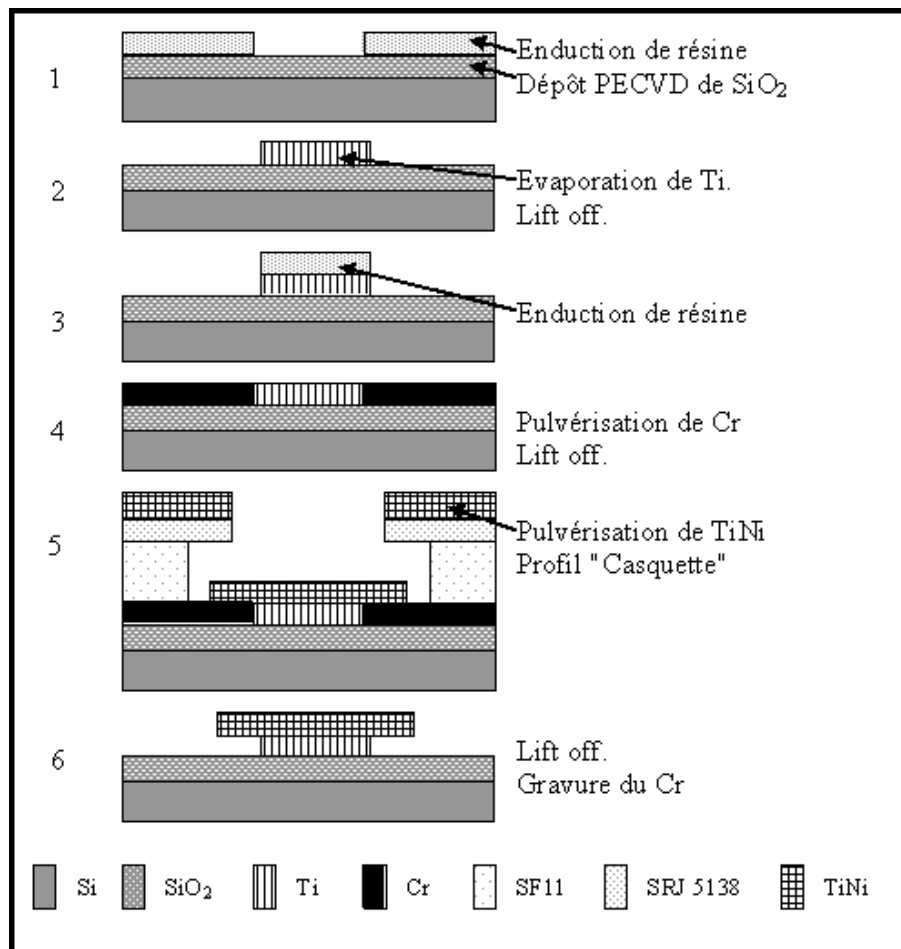


Figure I.1. Procédé de fabrication monolithique des microstructures en TiNi.

Le second niveau de lithographie est effectué avec un masque négatif et 300 nm de chrome (Cr) sont déposés par pulvérisation cathodique. Le dernier niveau de lithographie consiste à superposer deux résines différentes : du PMGI SF11, quatre couches de 2,4 μm chacune, et de la SRJ 5138, une couche de 1,4 μm . On obtient ainsi une épaisseur totale de résine de 10 à 12 μm . Le procédé photolithographique conduit à l'obtention d'un profil "casquette" tel qu'il est montré sur la figure I.2, il permet la fabrication de microstructure relativement épaisses

avec des contours nets, dépourvus de bavures inhérentes à l'emploi d'un procédé de dépôt conforme comme la pulvérisation cathodique.

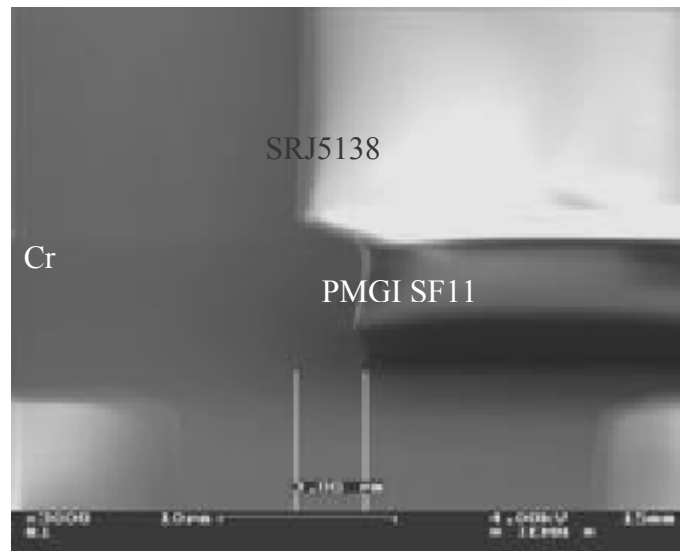


Figure I.2. Vue latérale d'une microstructure montrant le profil "casquette".

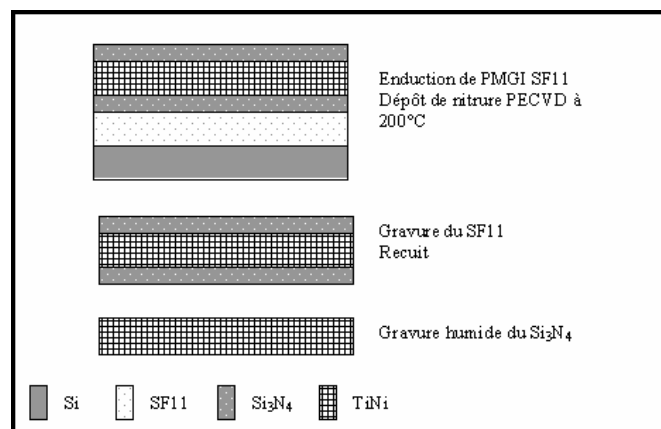


Figure I.3. Procédé de fabrication d'une feuille en AMF.

Avec les conditions de dépôt résumées dans le tableau I.1, 6 à 7 μm de TiNi sont déposés par pulvérisation DC. Après l'étape de "lift-off", la libération de la structure est obtenue par gravure de la couche de chrome. Ainsi les plots servant au chauffage de la microstructure par effet Joule restent attachés au substrat tandis que les parties mobiles du micro-actionneur sont libérées. Enfin, comme le TiNi élaboré par pulvérisation cathodique est amorphe, l'échantillon est cristallisé lors d'un recuit, la forme de la couche est "mémorisée" lors de cette étape. A l'exception de la contrainte intrinsèque due aux conditions de pulvérisation, aucune contrainte additionnelle n'a été appliquée au film mince durant le traitement thermique. Habituellement, le recuit est effectué sous vide secondaire. Ceci est principalement justifié par la grande réactivité du Ti avec l'oxygène qui est encore accentuée par la température élevée [9]. A l'IEMN, le traitement thermique a été réalisé dans un four tubulaire sous atmosphère potentiellement oxydante (air) et à pression atmosphérique ; une étude concernant la pollution des échantillons a été menée et les résultats sont présentés et discutés dans Roch *et al* [10].

1.2.3.2. Procédé hybride

Une technologie alternative, décrite sur la figure I.3, a été développée dans le but de réaliser des feuilles de TiNi. Cette approche technologique permet ensuite le report de la couche active sans étape de recuit ultérieure car la cristallisation du TiNi a déjà été réalisée comme cela est expliqué par la suite. On enduit tout d'abord du

PMGI, capable de résister à des températures de l'ordre de 300°C sur un substrat de silicium ou d'un tout autre matériau, le PMGI servira de couche sacrificielle. Ensuite, 20 nm de Si_3N_4 sont déposés par PECVD à 200°C.

Pulvérisation	DC			
Echantillon	Q	X	Y	Z
Phase	A	A + M	M	M
Cible	Ti-50%at.Ni			Ti-48%at.Ni
Addition de Ti		×	×	
Pression initiale	$< 1 \times 10^{-7}$ mbar			
Débit d'argon (sccm)	24	24	30	28
Tension DC	600 V	660 V	600 V	600 V
Distance cible-substrat	45 mm			
Durée	50 min	25 min	50 min	60 min
Épaisseur	6 μm	4.3 μm	7.2 μm	4.5 μm
Composition en Ni	51.9 %	50.6 %	47.9 %	48.9 %
Recuit	700 °C	600 °C	700 °C	700 °C
	60 min	45 min	60 min	60 min
Atmosphère	Air			
Pression	Atmosphérique			
Refroidissement	Dans le four			

Tableau I.1. Conditions de pulvérisation et de recuit des films minces d'AMF.

Le TiNi est pulvérisé selon les conditions données dans le tableau I.1 et une seconde couche de Si_3N_4 recouvre le TiNi. La couche de PMGI est dissoute par de l'EBRPG. On procède alors au traitement thermique puis à la gravure du Si_3N_4 dans une solution de $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$. Le film d'AMF peut alors être reporté sur un micromécanisme. Bien qu'aucun cyclage thermomécanique n'ait été pratiqué sur l'échantillon Y de composition Ti-47,9at%Ni (cf. tableau I.1), un effet mémoire double sens a pu être observé. Cela est dû aux contraintes internes provenant de l'élaboration du matériau, *i.e.*, pulvérisation cathodique, recuit à 700°C et refroidissement. Cette contrainte interne se substitue un procédé d'éducation [11]. L'effet mémoire double sens est observé en appliquant une tension de 1 V et un courant de 0,8 A.

1.2.4. Fabrication du mécanisme de préhension en SU-8 et assemblage avec le film mince d'AMF

La conception du mécanisme de préhension est largement inspirée d'un préhenseur piézo-électrique étudié par Carozza *et al* [2]. De simples lois d'échelle ont été appliquées pour obtenir les dimensions du préhenseur en SU-8 de l'IEMN.

La résine épaisse SU-8 a déjà été employée comme matériau fonctionnel dans des applications microsystèmes [12]. Elle présente de bonnes propriétés mécaniques et permet la fabrication de structures ayant un grand rapport d'aspect, propriété intéressante dans l'optique de réaliser un organe de préhension.

Comme le micromécanisme est intégralement réalisé en SU-8, les désavantages tels que la sélectivité d'adhésion et les difficultés de décollement ("stripping") sont évitées en libérant toute la microstructure par le sacrifice d'une couche d'oxyde de silicium. Le procédé est décrit sur la figure I.4(a). La résine SU-8₁₀₀ de la société MicroChem est enduite sur une épaisseur de 145 μm en une seule fois sur une couche de SiO_2 déposé par PECVD et dont l'épaisseur est égale à 100 nm. Une succession de recuits avant et après une insolation (lampe UV, 17mW cm^{-2} pendant 30 s), puis le développement dans du PGMEA pur permettent d'obtenir la structuration de la résine épaisse. La libération du micromécanisme s'opère lors de la gravure du SiO_2 dans de l'acide fluorhydrique tamponné (BE 7:1). La figure I.4(b) montre la structure en SU-8.

Le protocole d'assemblage se fait en deux temps : premièrement, le préhenseur en SU-8 est collé sur un substrat (ici du silicium) en utilisant une colle Epotecnny E205 qui est polymérisée pendant 3 min à 100°C, temps relativement court pour ne pas endommager la structure. Ensuite, le "moteur" constitué d'un film mince d'AMF

en forme de "U" est collé sur le mécanisme en SU-8 avec le même type de colle (figure I.4(c)). L'assemblage du film mince d'AMF avec la pince en SU-8 est effectué avec la pince en position fermée. Une extrémité du film mince d'AMF est reliée à la partie fixe du mécanisme alors que l'autre est solidaire de la partie mobile. La figure I.4(d) montre un schéma du mode opératoire de la pince selon le sens du déplacement généré par l'AMF.

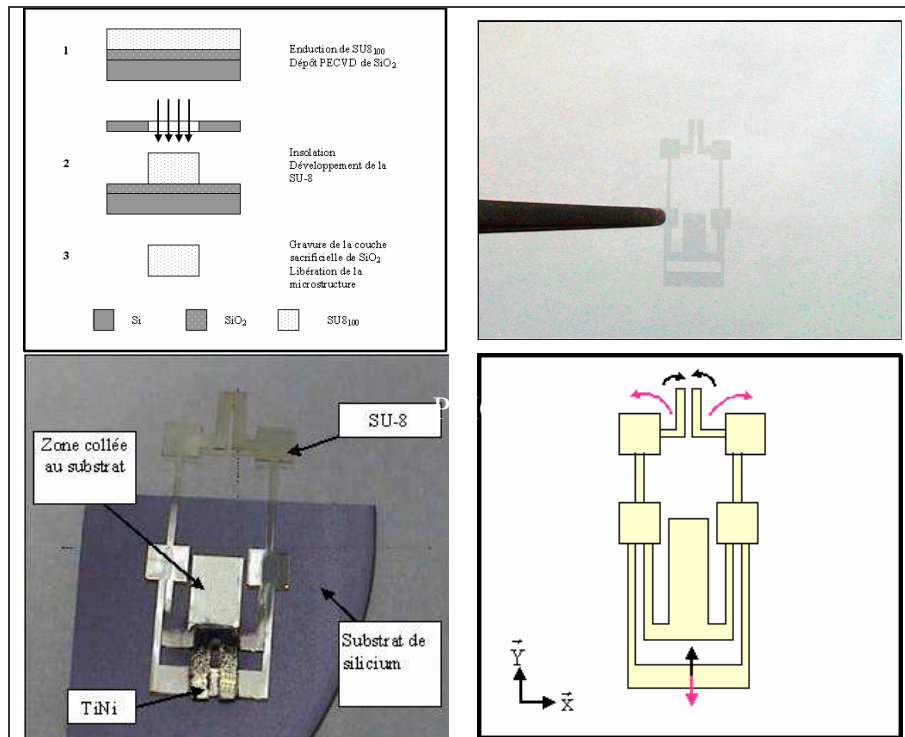


Figure I.4. (a) Procédé de fabrication du mécanisme en SU-8. (b) Préhenseur en SU-8 après libération. Épaisseur = 145 μm , Longueur = 17 mm, Largeur = 6 mm. (c) Vue de dessus montrant le préhenseur en SU-8 et l'actionneur en AMF. (d) Représentation schématique du principe de fonctionnement du préhenseur. Foncé (noir) $\Rightarrow$ fermeture ; clair (rouge) $\Rightarrow$ ouverture.

I.2.5. Caractérisation du préhenseur

Le comportement du préhenseur a été caractérisé grâce à un montage expérimental permettant la mesure du déplacement de la partie utile (extrémité où la saisie s'opère). Il consiste en une règle micrométrique en or fabriquée sur un substrat de silicium placée sous l'extrémité de la pince, l'ensemble étant disposé sous un microscope connecté à une acquisition vidéo. Le film mince d'AMF est actionné lors du chauffage par effet Joule. Le courant est appliqué à travers la structure en "U" en AMF grâce à deux pointes en contact direct avec le film d'AMF ou via des fils d'or soudés sur des plots matérialisés sur le substrat (figure I.4(c)). Le chauffage de l'AMF induit la transformation de la phase martensitique ("basse température") en phase austénitique ("haute température") et produit ainsi le mouvement du mécanisme en SU-8. Lors du refroidissement, la transformation inverse s'opère et la forme originale est restaurée.

La figure I.5 montre le déplacement obtenu pour l'un des bras du préhenseur en fonction du courant requis pour le chauffage par effet Joule de l'AMF. L'ouverture initiale de la pince est de 200 μm . Durant le chauffage, le préhenseur subit une déformation en deux étapes : premièrement, la courbure initiale inhérente aux procédés de fabrication et d'assemblage disparaît et il redevient planaire, puis l'ouverture se produit selon une relation linéaire entre le déplacement observé et le courant appliqué. Le déplacement atteint un plateau à 250 μm pour un courant de 0,9 A.

L'amplitude de déplacement en fonction de la fréquence du signal d'excitation est reportée sur la figure I.6. Le courant appliqué est fixé à 0,8 A et la fréquence varie de 50 mHz à 6 Hz. L'ouverture initiale du préhenseur est de 100 μm . L'amplitude de déplacement du bras de la pince considéré reste constante (200 μm) jusqu'à 500 mHz, puis elle diminue très rapidement au-delà pour complètement disparaître à 6 Hz, *i.e.*, le préhenseur reste en position ouverte. Cela signifie que la transformation de phase inverse (A $\rightarrow$ M) ne se produit plus. Des expériences complémentaires ont montré que, pour une fréquence comprise entre 2 et 3 Hz, le préhenseur

pouvait effectuer environ 10 cycles avant d'être complètement immobilisé, alors qu'au dessus de 3 Hz, ce nombre tombe à 3 cycles.

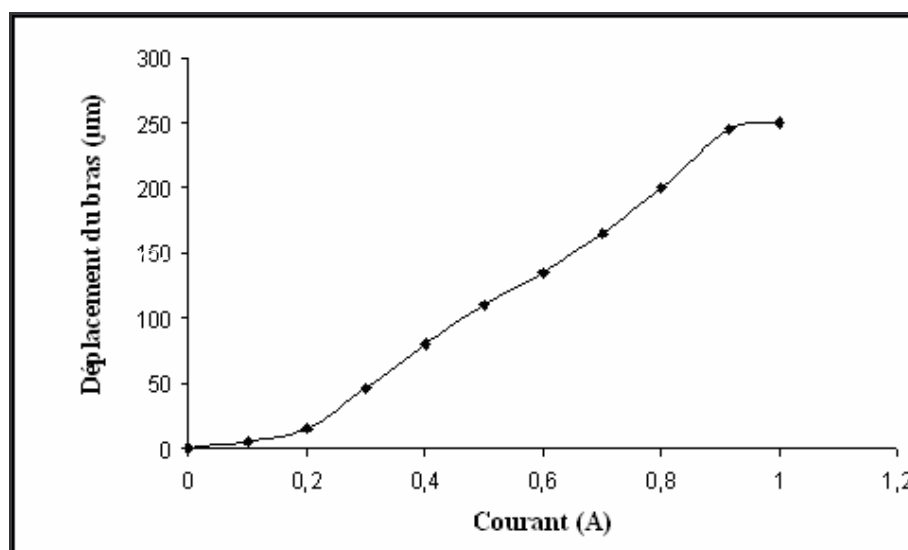


Figure I.5. Déplacement d'un bras du préhenseur en fonction du courant.

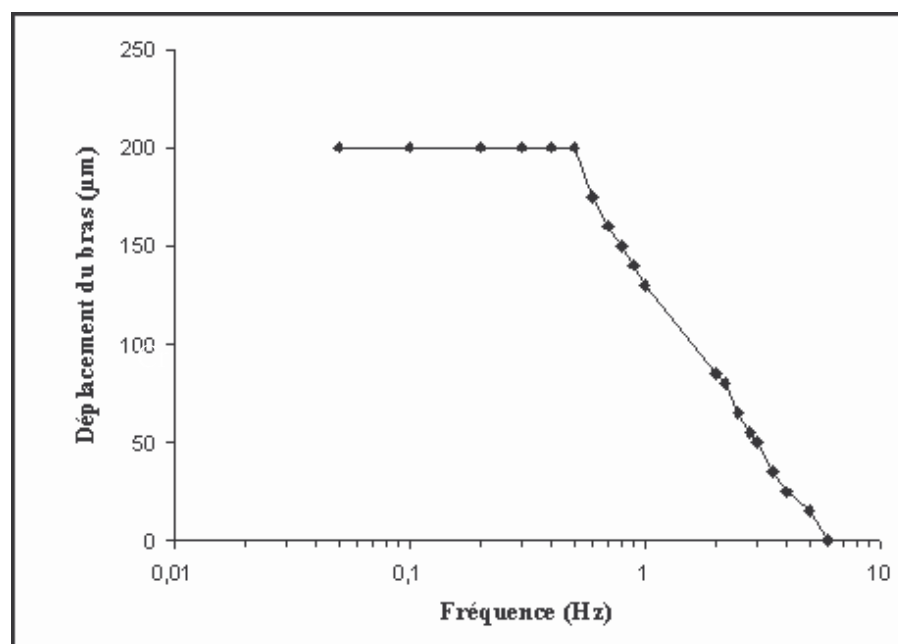


Figure I.6. Déplacement d'un bras en fonction de la fréquence.

Dans l'air, l'échange thermique est limité d'où le temps de réponse très long observé. La puissance électrique d'entrée est relativement élevée (2 W) et les transferts de chaleur s'opèrent surtout par conduction. Après un grand nombre de cycles, la colle est probablement affectée par la conduction de la chaleur et flue à l'interface entre l'AMF et la structure en SU-8, réduisant ainsi l'efficacité de la transmission mécanique des efforts. Afin d'estimer la force générée par le "moteur" AMF, une simulation éléments finis de la pince en SU-8 a été réalisée avec le logiciel ANSYS 5.5.3 en utilisant des éléments tri-dimensionnels de type "Solid 45". La valeur du module d'Young de la résine SU-8 a été fixée à 4,8 GPa. Pour des raisons de symétrie, seule la moitié de la structure a été considérée lors de la simulation, et le déplacement de l'AMF requis pour ouvrir le préhenseur de 400 μm a été extrait (figure I.7). La simulation montre qu'une force de 46 mN doit être produite par le film mince d'AMF "moteur" résultant en un déplacement de 12 μm. De telles conditions d'actionnement permettent d'obtenir une ouverture de 400 μm lors d'un actionnement quasi-statique de la pince.

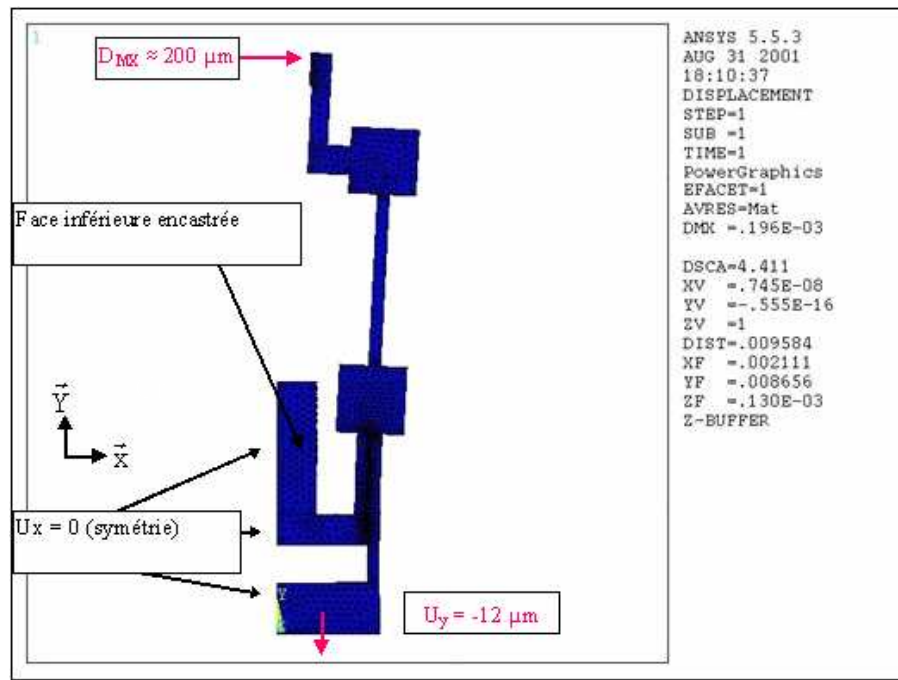


Figure I.7. Résultat de simulation ANSYS 5.5.3. Le déplacement de l'un des bras est de $200\ \mu\text{m}$ pour un courant appliqué de $0.8\ \text{A}$. Les propriétés de la résine SU-8 entrées dans le modèle sont : module d'Young $E = 4.02\ \text{GPa}$, coefficient de Poisson $\nu = 0.22$ et masse volumique $\rho = 1190\ \text{kg m}^{-3}$.

Des essais ont montré que l'ouverture maximale pouvait atteindre $500\ \mu\text{m}$ pour un courant de $0,9\ \text{A}$. L'épaisseur du préhenseur étant d'environ $150\ \mu\text{m}$, un micro-objet contenu dans un volume de $500\ \mu\text{m}^3$ peut être saisi et transporté de manière fiable, sans risque d'être relâché, au moyen de ce préhenseur. S'agissant du transport d'un composant électronique, la résine SU-8 présente également une bonne isolation électrique et permet ainsi de prévenir les chocs électrostatiques. Cependant, les quelques avantages ci-dessus doivent être modérés par le faible rendement global du micro-actionneur, principalement dû à des aspects thermiques évoqués plus haut. Des améliorations pourraient être apportées au dispositif en changeant les interfaces (type de colle et matériaux en contact).

1.2.6. Synthèse sur l'actionnement au moyen d'un film mince d'AMF

Deux procédés de fabrication monolithique et hybride de films minces d'AMF ont été développés et mis en œuvre. La démonstration de l'actionnement a été faite en assemblant un film mince d'AMF avec un mécanisme fabriqué en résine épaisse SU-8. Une force de $50\ \text{mN}$ produite par l'AMF pour générer une ouverture de la pince de $500\ \mu\text{m}$ a été extraite de simulations éléments finis. Bien que le micro-actionnement ait pu être démontré, les interfaces doivent être améliorées pour augmenter le rendement des conversions d'énergie. En effet, le fluage de la colle employée ainsi que les pertes thermiques limitent les performances du dispositif. Un autre inconvénient réside dans l'hybridation elle-même car, de fait, elle signifie qu'il serait délicat d'envisager une production de masse.

Du point de vue de l'application, le préhenseur fabriqué permet le transport de micro-objets en offrant une sécurité de saisie grâce à un grand rapport d'aspect et une bonne isolation électrique.

I.3. Actionnement électrostatique

L'actionnement électrostatique est très employé dans les microsystèmes, on peut même ajouter qu'en dehors de ce domaine d'application et de l'échelle des microstructures correspondante, les forces électrostatiques ne sont que très rarement employées à des fins d'actionnement. Ce n'est pas exceptionnel dans le domaine de la motorisation puisqu'à l'échelle macroscopique, dans le domaine aéronautique en particulier, on constate par exemple que les actionneurs électromécaniques sont inadaptés à la motorisation des commandes de vol primaires

des avions de plus de 50 places car ils sont incapables de vaincre les efforts aérodynamiques s'exerçant sur les organes directeurs (volets, gouvernes), ils sont alors supplantés par des actionneurs hydrauliques. La bonne adéquation entre les forces électrostatiques et les efforts requis pour déplacer ou déformer des microstructures n'est pas la seule raison permettant d'expliquer leur utilisation, il faut aussi souligner la compatibilité naturelle du mode d'actionnement électrostatique avec le reste du microsystème et notamment avec la partie électronique, la plupart des actionneurs de ce type pouvant être assimilés à des condensateurs dont l'une des armatures, voire les deux, serait mobile ou déformable.

La gamme de force des actionneurs électrostatiques est généralement comprise entre 10^{-12} et 10^{-6} N. La découverte, par T. Akiyama au début des années 90 [13], d'un transducteur électromécanique appelé "Scratch Drive Actuator" (SDA) a permis d'atteindre par conversion des forces électrostatiques en forces mécaniques, des valeurs de quelques dizaines de μ N. Dans ce qui suit sont présentés les travaux d'Emmanuel Quévy et de Philippe Basset à travers deux démonstrateurs : une membrane continûment déformable pour de l'optique adaptative, et un microrobot télé-alimenté et télécommandé respectivement. Ces deux dispositifs font intervenir des transducteurs de type SDA.

La "technologie SDA" et son développement vers les microsystèmes tridimensionnels auto-assemblés (SAT3D) ont, comme les films minces d'AMF, bénéficié d'un transfert de savoir-faire du LIMMS vers l'IEMN.

1.3.1. Membrane continûment déformable pour une application en optique adaptative

1.3.1.1 Motivations et contexte

Pendant de nombreuses années, l'amplitude des déplacements dans la direction hors-plan, *i.e.*, selon la normale au substrat, était limitée à l'épaisseur de la couche sacrificielle, typiquement de l'ordre de 2 μ m. Puis vint l'idée de réaliser une cavité sous l'actionneur par gravure humide ou plus récemment par gravure ionique réactive profonde (DRIE). Ces technologies sont très attractives mais elles impliquent souvent qu'une contre-électrode soit reportée sur un second substrat subséquentement assemblé au premier. Par conséquent, pour augmenter cette amplitude de déplacement, deux approches ont été étudiées : La première a consisté à développer des microtechnologies tridimensionnelles comme la LIGA [14] ou la stéréolithographie [15]. La technologie LIGA permet la fabrication de masse de microstructures par électrodéposition dans un moule de résine épaisse, alors que la seconde est utilisée pour fabriquer des micro-objets 3D en matière plastique couche par couche. La seconde approche, qui est beaucoup intéressante si l'on considère le coût et l'aptitude à être produite en masse, est basée sur le micro-usinage de surface, les microstructures 3D sont obtenues en soulevant des éléments initialement dans le plan. Habituellement, le mouvement hors-plan est autorisé par la rotation de parties mobiles autour de liaisons charnières en polysilicium [16] ou par la flexion d'articulations en polysilicium [17, 18]. Par l'une ou l'autre de ces technologies assistées par l'emploi de micropointes, plusieurs dispositifs 3D ont été relevés dans la littérature tels que des microrobots [17], des microsondes [18], et des microsystèmes pour l'optique (Micro Opto Mechanical Systems - MOEMS) [19, 20].

Néanmoins, l'intégration de l'actionnement est préférable afin de réduire les risques liés à la micromanipulation et d'assurer la compatibilité avec la production de masse qui requiert l'automatisation de la procédure permettant de passer de l'état planaire à l'état tridimensionnel. Cette capacité d'auto-assemblage a été démontrée en utilisant la flexion d'articulations au moyen d'une oxydation électrochimique [21], les forces de Lorentz [22], la fusion d'un volume de résine [23], ou par contraction d'un polymère [24]. Même si ces techniques ont été améliorées [24, 25], la plupart d'entre elles requièrent un suivi très précis du procédé de transformation 2D→3D pour le contrôle de la forme finale désirée. Pour surmonter cette difficulté, des dispositifs de verrouillage ont été ajoutés pour des applications MOEMS [26, 27]. Des micromoteurs vibrants ont également été testés pour le positionnement précis de composants optiques [28], néanmoins, de très grandes surfaces sont occupées par les actionneurs au regard de la surface utile.

Avec le micro-usinage de surface du polysilicium et l'actionnement électrostatique intégré, l'auto-assemblage 3D par flambement de poutre hors-plan a montré qu'il pouvait constituer une approche alternative prometteuse [29, 30]. Dans un premier temps, une poutre flambe dans la direction hors-plan sous l'effet de la force produite par un SDA [13]. Ensuite, la forme tridimensionnelle est "mémorisée" par recristallisation de la poutre en polysilicium [31] lors d'un chauffage par effet Joule. Malheureusement, la redistribution des contraintes résultant du traitement thermique rend la forme tridimensionnelle peu prédictible. Pour la réalisation d'une table $x/y/z$, l'actionnement au moyen de SDA a été employé avec succès pour soulever la structure hors-plan [32], mais la forme 3D ne pouvait être maintenue qu'avec les SDA sous tension. Des systèmes de verrouillage thermiques ont

aussi été testés [33], mais les grandes surfaces requises pour l'actionneur thermique limitent la densité d'intégration.

A l'IEMN, nous avons développé une technologie compacte permettant l'auto-assemblage, le contrôle de la forme finale et le verrouillage d'une microstructure tridimensionnelle sans maintien de la tension d'actionnement des SDA. Cette technologie est basée sur le flambement de poutres induit par des SDA combiné à un verrouillage mécanique intégré. Une telle approche permet d'augmenter la densité de microstructures 3D et, une fois la forme 3D obtenue, d'actionner une microplaque avec des amplitudes de déplacement équivalentes à celles qui sont atteignables en réalisant une cavité dans un substrat. Si la microplaque est placée au contact d'une membrane élastique, il est alors possible de déformer cette dernière vers le haut ou vers le bas [34].

Une application immédiate de ce genre de dispositif est l'optique adaptative, utile par exemple pour corriger les aberrations primaires, mais d'autres débouchés peuvent s'ouvrir dans le domaine des microsystèmes pour les télécommunications par exemple. Ainsi, pour atteindre le niveau de performances requis, il faut contrôler très précisément la déformation d'une membrane continue, soumise à des déplacements importants, de l'ordre de la dizaine de micromètres, et associer l'ensemble à une électronique de commande d'où la nécessité de disposer d'une technologie compatible CMOS. Les études traitant de miroirs adaptatifs rapportent des déplacements unidirectionnels maximaux de $0,8\text{ }\mu\text{m}$ en utilisant le mode d'actionnement électrostatique [35]. D'autres systèmes, basés sur l'actionnement magnétiques permettent d'obtenir de meilleures performances en terme de déplacement, au détriment de la qualité de la membrane détériorée par l'incorporation d'insert en son sein [36, 37]. Des membranes actionnées par des bimorphes thermiques ont démontré des aptitudes à produire des déplacements bidirectionnels, *i.e.*, vers le haut et vers le bas, mais leur consommation de l'ordre de 100 mW et la température de fonctionnement les rendent peu compatibles avec une électronique CMOS intégrée [38].

1.3.1.2. Principe de l'auto-assemblage 3D

Le principe de l'auto-assemblage 3D (SAT3D) est montré sur la figure I.8.

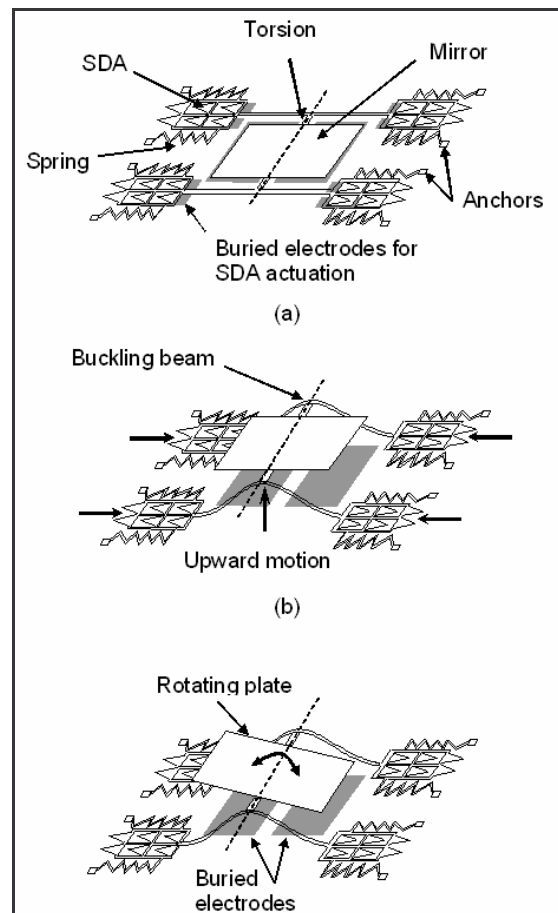


Figure I.8. Principe de l'auto-assemblage 3D dans le cas d'une microplaque. (a) Structure initiale. (b) Actionnement des SDA pour induire le flambement. (c) Actionnement de la microplaque.

Le dispositif, fabriqué par usinage de surface, est initialement plan et il est gravé dans le niveau de polysilicium structurel (figure I.8(a)). La partie mobile contient la microplaque qui sera ultérieurement actionnée en 3D liée à deux poutres par un support flexible. L'extrémité des poutres est formée par des trains de 4 SDA. La structure complète est ancrée au substrat par des ressorts reliant les trains de SDA aux plots de contact. Des contre-électrodes sont situées sous les trains de SDA pour permettre leur déplacement, ainsi que sous la microplaque pour sa mise en action une fois soulevée.

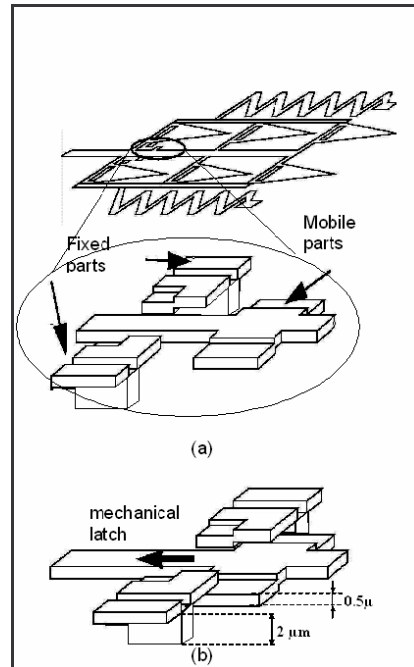


Figure I.9. Principe du verrou mécanique. (a) Etat initial. (b) Après le déplacement des SDA.

En appliquant une tension alternative, les SDA avancent et compriment les poutres qui, de par leur élancement important, flambent soulevant ainsi la microplaque à laquelle elles sont liées (figure I.8(b)). A ce stade, il est nécessaire de prévenir les poutres d'un flambement trop important et à l'inverse, d'éviter leur retour à la géométrie plane initiale par restauration élastique une fois l'alimentation des SDA coupée. Pour éviter ces problèmes, un dispositif de verrouillage est intégré, il sert de butée et limite le déplacement des SDA, et il empêche le retour élastique des deux poutres-supports garantissant ainsi le maintien de la géométrie 3D. Comme on peut le voir sur la figure I.9, ce verrou est composé de deux fentes ancrées sur le substrat dans lesquelles la partie complémentaire solidaire des poutres mises en flambement vient simplement s'emboîter. Dès que cette opération est réalisée, l'actionnement des SDA est stoppé et la partie mobile se soulève grâce à l'énergie élastique stockée dans les poutres flambées. L'arc-boutement combiné aux forces interfaciales mises en jeu assure un blocage irréversible. En effet, même en appliquant à nouveau une tension aux trains de SDA après cette opération, il est impossible de déverrouiller la structure 3D sans la détruire.

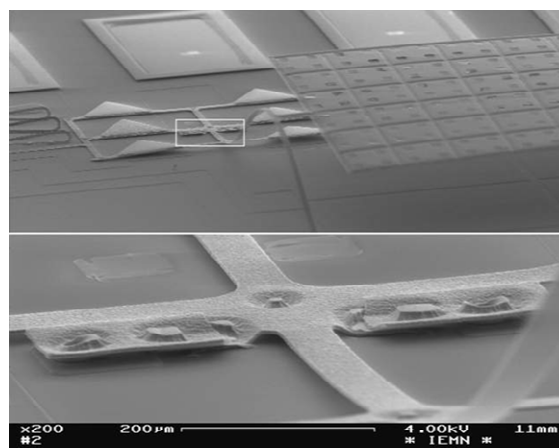


Figure I.10. Principe du verrou mécanique. (a) Etat initial. (b) Après le déplacement des SDA.

La figure I.10 montre une image obtenue par microscopie électronique du dispositif. Finalement, après l'étape de maintien, la microplaque peut être mise en rotation (figure I.8(c)). Une tension de ± 150 V appliquée aux SDA permet de vaincre les forces d'adhésion telles que les forces de capillarité et les couplages électrostatiques, et de produire le flambement des poutres associées ($L/l/e$ $560\text{ }\mu\text{m}/8\text{ }\mu\text{m}/0,5\text{ }\mu\text{m}$). La force critique de flambement requise avait auparavant été déterminée par le calcul et le résultat était voisin de $7\text{ }\mu\text{N}$. Étant donné qu'un SDA triangulaire de $70\text{ }\mu\text{m}$ de côté est capable de générer une force de l'ordre de $50\text{ }\mu\text{N}$ [13], un train de 4 SDA peut sans difficulté faire flamber les poutres-supports. Une image obtenue par microscopie électronique montre le microdispositif auto-assemblé par la technique qui vient d'être décrite. Il s'agit là d'une variante de la conception schématisée sur la figure I.8 où seul un train de SDA est couplé à chaque poutre-support, l'autre extrémité étant encastree, confirmant ainsi la puissance suffisante de ces micro-actionneurs pour garantir le flambement.

I.3.1.3 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication est basé sur le micro-usinage de surface du polysilicium en exploitant une couche d'oxyde de silicium sacrificielle. Ce procédé est relativement rapide à mettre en œuvre car il ne nécessite que deux niveaux de polysilicium, un pour le niveau d'électrodes enterrées, l'autre pour le niveau dit "structurel", quatre niveaux de masque sont requis.

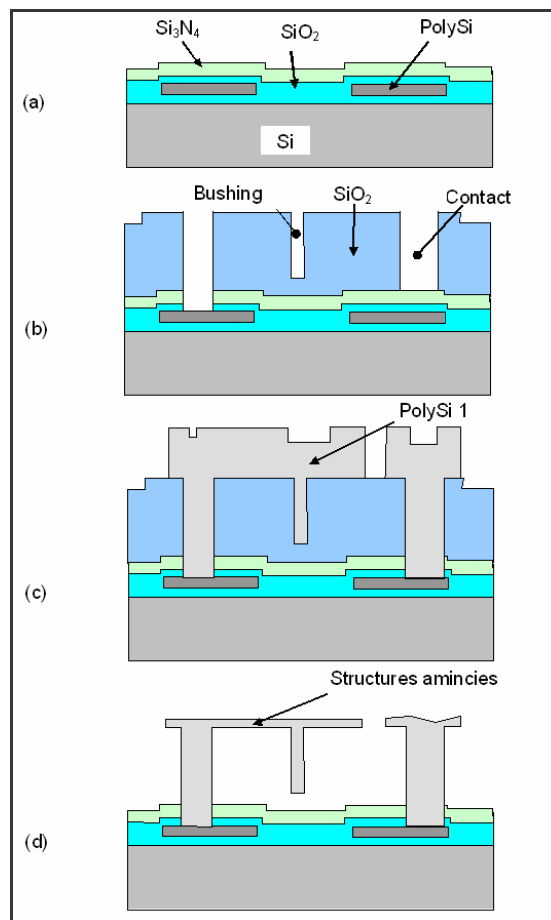


Figure I.11. Procédé de fabrication.

Le procédé est présenté sur la figure I.11 montrant l'évolution de la section droite pour la fabrication simultanée des SDA, de la microplaque, et des plots de contact. Une oxydation sèche d'une épaisseur de $0,35\text{ }\mu\text{m}$ sur un substrat de silicium (100) constitue la première étape, suivie du dépôt LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) de la première couche de silicium polycristallin destinée aux électrodes enterrées. Une couche de nitrure de silicium LPCVD recouvre alors le polysilicium préalablement oxydé et gravé. La couche d'oxyde basse-température (LTO – Low Temperature Oxide) de $2\text{ }\mu\text{m}$ est ensuite déposée, elle servira également de

moule comme le montre la figure I.11(b) pour structurer la partie inférieure des SDA (fabrication du "bushing" et d'éventuels "dimples"). La couche structurée formée de $2\text{ }\mu\text{m}$ de polysilicium est obtenue par LPCVD, le matériau est soit dopé *in situ*, soit par implantation, soit par diffusion. La gravure anisotrope des motifs est réalisée par gravure ionique réactive en utilisant le Cl_2 comme gaz réactif. Le polysilicium est alors aminci afin d'une part de garantir le bon fonctionnement du verrou mécanique, et d'autre part de diminuer la raideur des structures à déformer ce qui contribue implicitement à réduire les tensions d'actionnement. Enfin, le microdispositif est libéré en immergeant le substrat dans de l'acide fluorhydrique (figure I.11(d)).

I.3.1.4 Actionnement de la microplaque

La microplaque représentée sur la figure I.12 a été actionnée par les forces électrostatiques en appliquant une tension sur la demi-électrode enterrée située sous la structure, les autres électrodes étant à la masse.

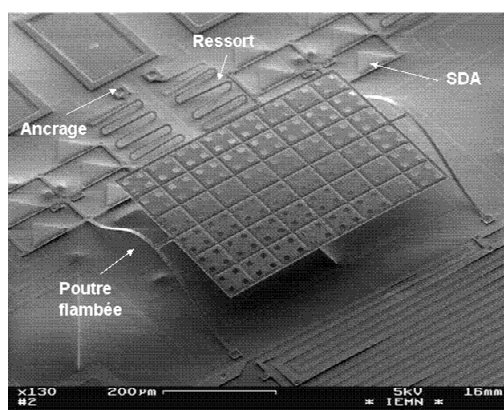


Figure I.12. Image MEB d'une microplaque auto-assemblée.

L'état initial de la structure avant la mise sous tension est visible sur la figure I.13. La microplaque est parallèle au substrat démontrant ainsi l'efficacité de la technique SAT3D, et son axe de rotation est situé à $90,5\text{ }\mu\text{m}$ au dessus de la surface du substrat et donc de la contre-électrode.

La figure I.14 montre un schéma représentant la structure après assemblage. Les caractérisations ont montré qu'il est possible de contrôler continûment la rotation de la plaque dans une plage angulaire de $\pm 15^\circ$. La figure I.15 représente la position selon l'axe z du bord libre de la plaque en fonction de la tension appliquée dans un mode de fonctionnement quasi-statique. Selon la littérature [39], une telle plage de déflexion requerrait une tension de l'ordre de 3600 V !

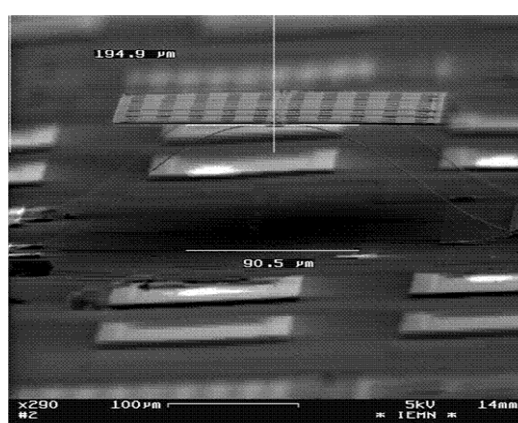


Figure I.13. Image MEB d'une microplaque auto-assemblée.

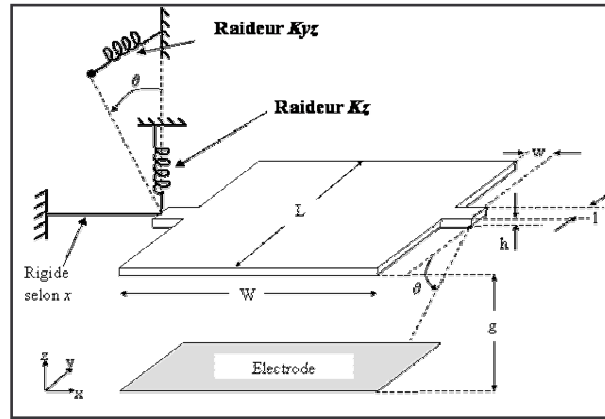


Figure I.14. Représentation schématique du système 3D.

Cette différence importante avec les valeurs relevées lors de la caractérisation s'explique par la conception même de la microstructure. En effet, les liaisons de la microplaque aux poutres-supports sont beaucoup plus rigides que ces dernières, la rotation de la plaque est due à la flexion des poutres en flambement.

Une modélisation en deux étapes a permis de confirmer cette hypothèse de flexion des poutres-supports lors de l'actionnement 3D de la microplaque. La première étape a permis d'extraire les raideurs en rotation (cf. figure I.14 - K_{yz}) et selon la direction hors-plan (cf. figure I.14 - K_z) en effectuant une simulation où une poutre-support est soumise au couple électrostatique correspondant à l'application d'une tension variant entre 0 et 200 V.

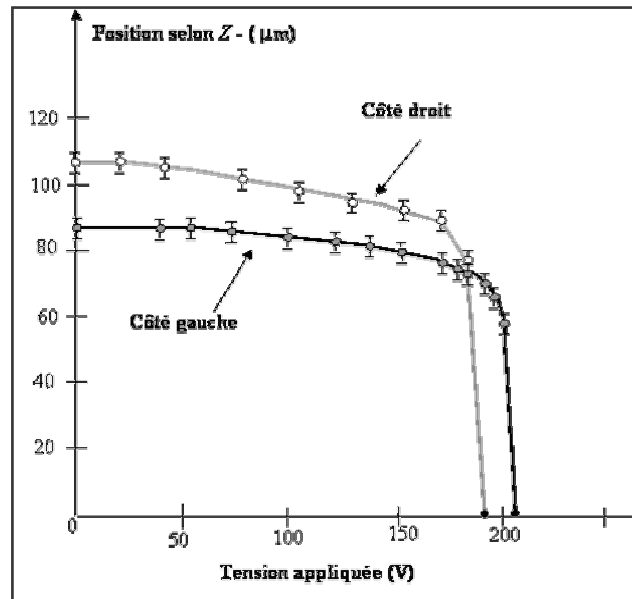


Figure I.15. Position selon z des arêtes de la microplaque en fonction de la tension appliquée.

Pour cela, le logiciel éléments-finis ANSYSTM a été utilisé. Les raideurs de liaison ayant été déterminées, elles ont été interpolées mathématiquement puis introduites comme conditions aux limites lors d'une seconde étape de simulation en employant le logiciel COVENTORWARETM pour résoudre le problème couplé électromécanique. Les résultats sont reportés sur la figure I.16, la différence entre la tension de *pull in* obtenue expérimentalement (218 V) et celle calculée par la simulation (208 V) n'est que de 4,8%. La rotation de la microplaque est effectivement due à une composition de mouvement des poutres-supports, mais elle reste cependant contrôlable sur un tiers de la valeur de l'espace inter-électrodes initial. La légère différence entre les valeurs expérimentale et calculée est imputable aux conditions aux limites choisies lors de la première étape de simulation où la poutre-support est supposée encastree-encastree dans le modèle, alors qu'elle est encastree à une seule de ses extrémités dans la réalité, l'autre extrémité étant maintenue par le verrouillage mécanique.

Le microdispositif 3D a été actionné en calant la fréquence de l'alimentation sur sa première fréquence propre (1,9 kHz), dans l'air pendant 72 h, l'angle de rotation étant de 13° et aucun dommage n'a été constaté.

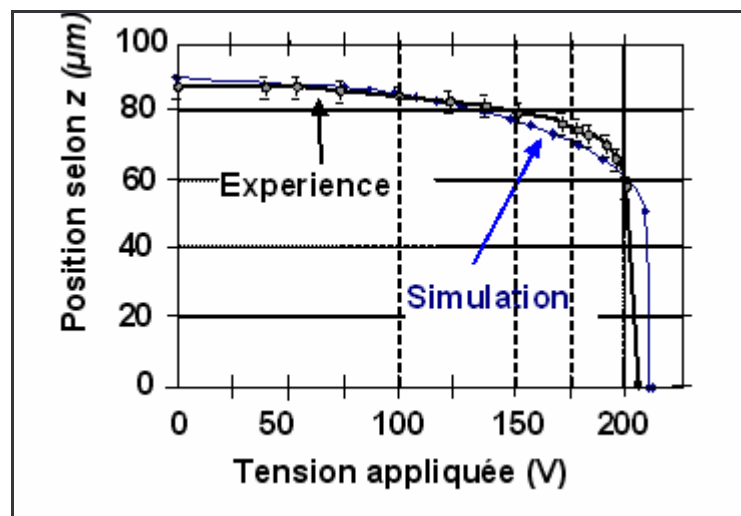


Figure I.16. Représentation schématique du système 3D.

I.3.1.5. Intégration du microdispositif 3D et de la membrane

Il s'agit là de démontrer la faisabilité avec des technologies d'assemblage simples mais inadaptées à la production de masse. Cependant, le concept est transférable en l'état en employant des techniques d'assemblage telle que le "soft bonding" ou l'assemblage au moyen d'un eutectique.

Le concept de base est présenté sur la figure I.17. Le dispositif complet est en deux parties qui sont fabriquées séparément puis assemblées. Le substrat inférieur contient le système 3D qui vient d'être décrit avec les microplaques à large débattement angulaire. La seconde partie est la membrane flexible formée, par exemple, d'une bicouche $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ recouverte d'un film d'or pour assurer une bonne réflectivité du miroir. La membrane peut être libérée par une gravure humide du substrat de silicium dans de l'hydroxyde de potassium (KOH), elle est dans un état de contrainte contrôlé par les contraintes résiduelles et l'épaisseur de chacune des couches la composant afin d'être initialement parfaitement plane. La membrane est placée au dessus du substrat contenant les dispositifs 3D (microplaques) à une distance égale à la hauteur de ces derniers moins $2\text{ }\mu\text{m}$, afin d'assurer une légère précontrainte dans le but de coupler au mieux les déplacements de la microplaque avec la membrane. Pour discrétiser finement les déformations de la membrane, il est possible de placer plusieurs dispositifs 3D en dessous comme le montre la figure I.18.

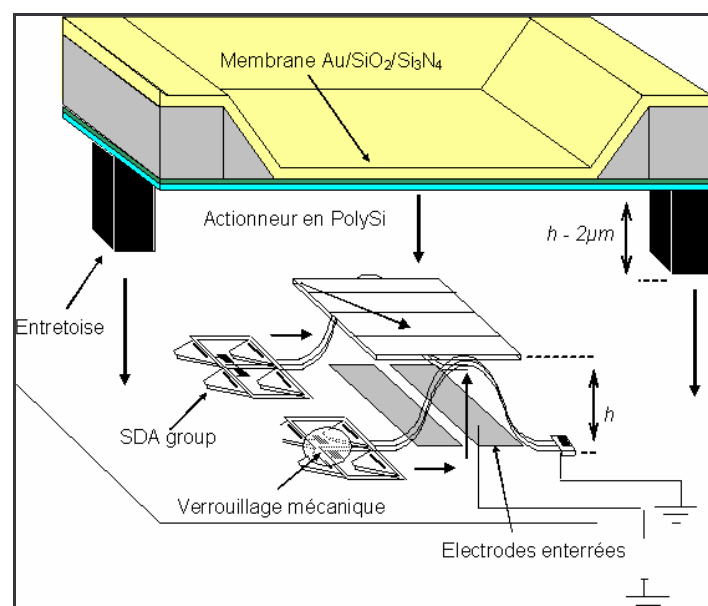
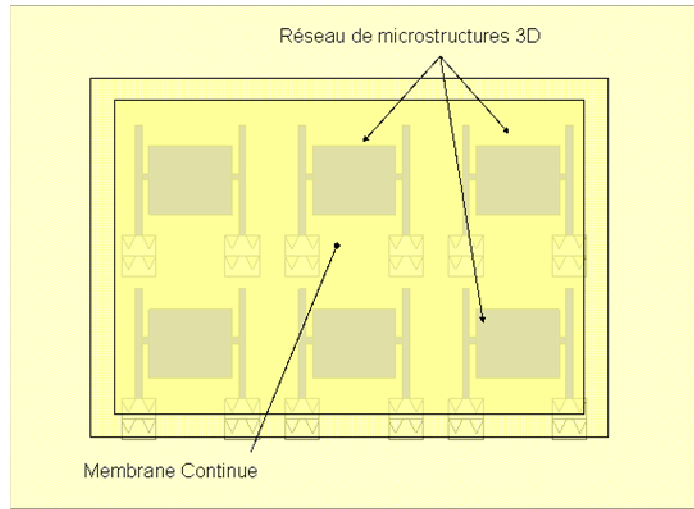
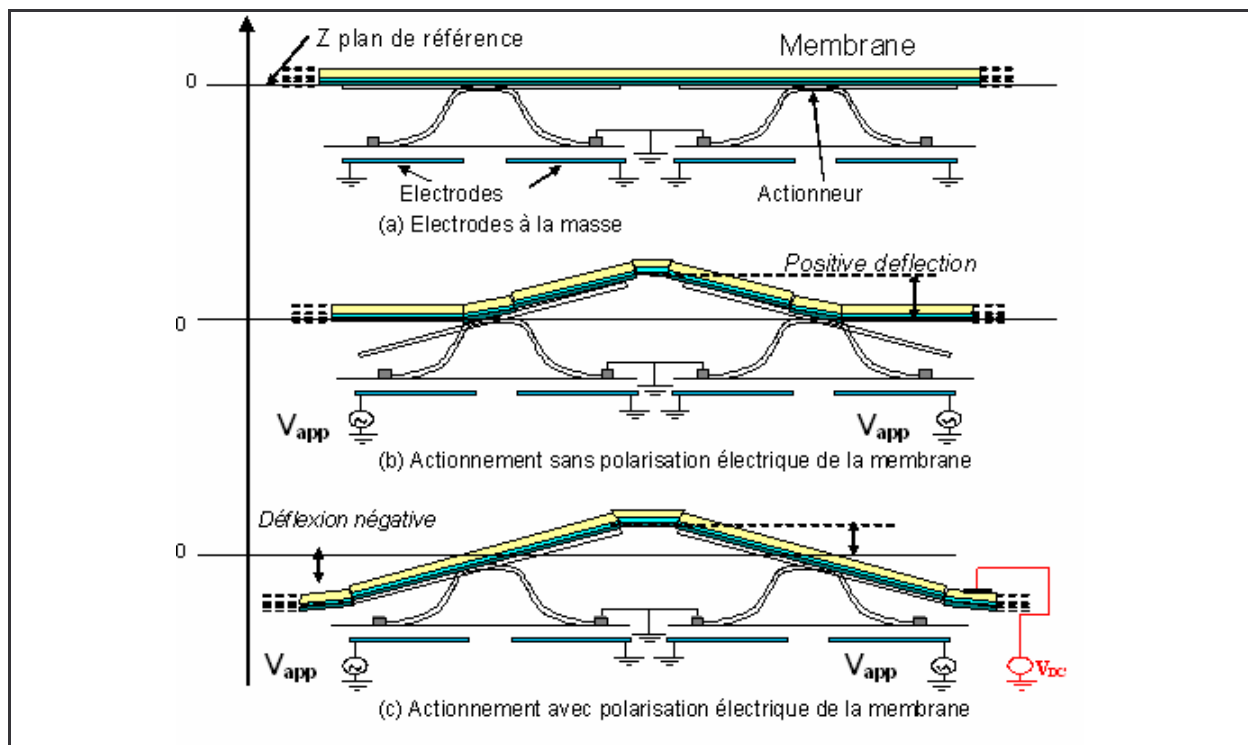


Figure I.17. *Microsystème 3D destiné à l'optique adaptative.***Figure I.18.** *Arrangement en réseau des microstructures 3D.*

Le principe d'actionnement est représenté sur la figure I.19 en section droite. A l'état initial, les électrodes sont à la masse (figure I.19(a)). En actionnant les microdispositifs 3D, la membrane fléchit vers le haut (figure I.19(b)). Enfin, en polarisant le revêtement métallique de la membrane et en actionnant simultanément les microplaques en rotation, la membrane se déforme en épousant le contour des actionneurs 3D, cela résulte en une déformation vers le haut et vers le bas (figure I.19(c)).

**Figure I.19.** *Principe de fonctionnement du dispositif destiné à l'optique adaptative.*

I.3.1.6. Résultats expérimentaux

Deux types de membranes ont été fabriquées : une membrane réfléchissante en superposant les trois matériaux suivants $\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$; et une membrane en matière plastique de 25 mm^2 reportée sur un cadre en silicium. Cette dernière a été employée pour réaliser un démonstrateur. L'actionnement était assuré par un microdispositif 3D unique de dimensions $380 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ élevé à $90 \mu\text{m}$ au dessus du substrat. Afin de mesurer le déplacement résultant, une plaquette de silicium a été placée sur la membrane transparente (figure I.20). En mode d'actionnement quasi-statique, un déplacement de $10 \mu\text{m}$ (vers le haut car la membrane employée n'était évidemment pas polarisable) a pu être relevé. Les résultats expérimentaux sont consignés dans le tableau I.2.

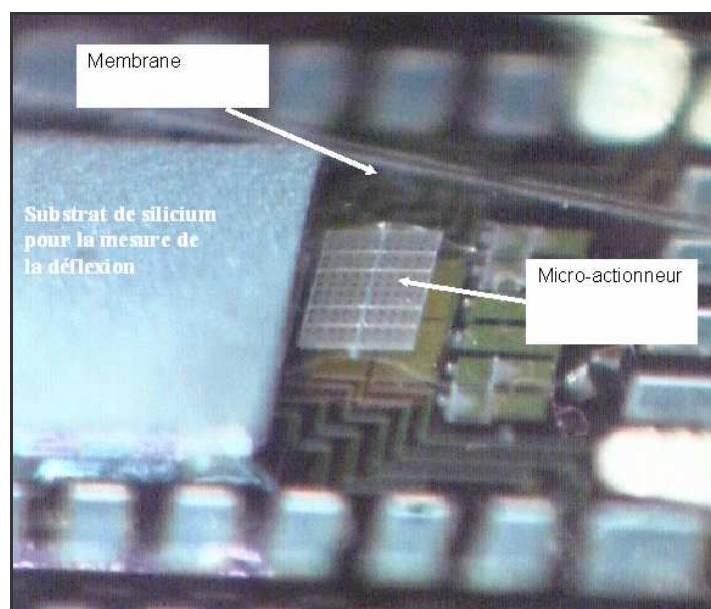


Figure I.20. Démonstrateur de faisabilité.

Tension Appliquée	Déflexion
180 V	3 μm
190 V	4 μm
200 V	5 μm
220V	10 μm

Tableau I.2. Résultats expérimentaux obtenus sur le véhicule de test à membrane transparente non polarisable.

I.3.1.7. Synthèse sur la technologie SAT3D

La possibilité d'intégrer lors d'une même étape de microfabrication un microdispositif et l'actionneur permettant de le faire passer d'une configuration planaire à une géométrie tridimensionnelle contrôlée et prédictible a été démontrée. Pour cela, trois éléments doivent être combinés, ce sont les SDA, le flambement des poutres-supports et le maintien de la forme 3D à l'aide des verrous mécaniques. Une telle technologie autorise de grands débattements en rotation comparés à ceux que l'on peut atteindre en utilisant une technologie planaire associée à une couche sacrificielle. L'application à la déformation d'une membrane, au départ pour conformer un micromiroir, trouve aujourd'hui des débouchés dans la recherche aéronautique pour modifier les conditions d'écoulement d'un fluide en adaptant la paroi.

I.3.2. Microrobot télé-alimenté et télécommandé

Le second dispositif faisant intervenir les SDA est un microrobot télé-alimenté. Comme cela sera montré par la suite, le microrobot est constitué d'actionneurs électrostatiques et à ce titre, s'il ne servait pas à démontrer la faisabilité de la télé-alimentation et la télécommande, il pourrait être considéré comme une application de ce type d'actionnement. En fait, avec cette étude, un problème clé des microsystèmes est abordé : l'apport d'énergie

associée au contrôle et à l'autonomie. Peu de puissance est nécessaire à la génération des forces électrostatiques et c'est ce qui a motivé le choix de ce type d'actionnement. Les actionneurs thermiques exploitent des courants de plusieurs dizaines de mA, ils sont donc inadaptés à la stratégie de transmission de puissance par couplage électromagnétique qui a été choisie pour le microrobot. En revanche, ils produisent des forces beaucoup plus importantes que les actionneurs électrostatiques et cela a conduit un groupe de recherche à les employer pour déplacer un microrobot au détriment de l'autonomie [45]. L'interface entre le microrobot vu comme un solide à déplacer et le support sur lequel il se déplace doit également être étudiée. Plusieurs solutions sont exploitables, parmi lesquelles les pattes ou plots, les roues et la propagation d'une onde. C'est la première voie qui a été développée en créant une cellule d'actionnement par frottement sur la base des SDA, cette cellule peut être fabriquée par usinage collectif et sa conception bénéficie du savoir-faire acquis à l'IEMN. L'utilisation de roues requiert des technologies hybrides et la propagation d'une onde nécessite un substrat spécifique et impose une parfaite planéité du support sur lequel se déplacerait le microrobot.

Dans la littérature, on relève de nombreux exemples de microrobots à des degrés d'achèvement variables, ceux que l'on pourrait qualifier d'étude en cours [40-44], et les réalisations avancées [45-48]. Un seul intègre la télé-alimentation par des cellules photo-voltaïques sans volonté des concepteurs de le télécommander [48].

1.3.2.1. Principe du microrobot télé-alimenté et télécommandé

Le schéma de principe du système complet est représenté sur la figure I.21. L'idée consiste à utiliser le couplage électromagnétique entre une antenne d'émission macroscopique et une antenne de réception intégrée sur le micro-robot. La réalisation du micro-robot nécessite l'utilisation des deux faces du substrat : la face supérieure supporte l'antenne de réception et une électronique permettant à la fois d'amplifier le signal électrique issu de l'antenne de réception, et de délivrer un signal de commande dont la fréquence et la phase conditionnent le sens et la vitesse de déplacement du micro-robot ; la face inférieure, en contact avec le support, peut être qualifiée de surface "active" car elle contient le réseau d'actionneurs censé produire le mouvement. La fréquence à laquelle s'effectue le couplage est égale à 13,56 MHz. Hormis par la fréquence elle-même, le rayon d'action du micro-robot est limité par la taille de l'antenne d'émission et la distance entre cette dernière et le micro-robot doit rester inférieure à une dizaine de centimètres.

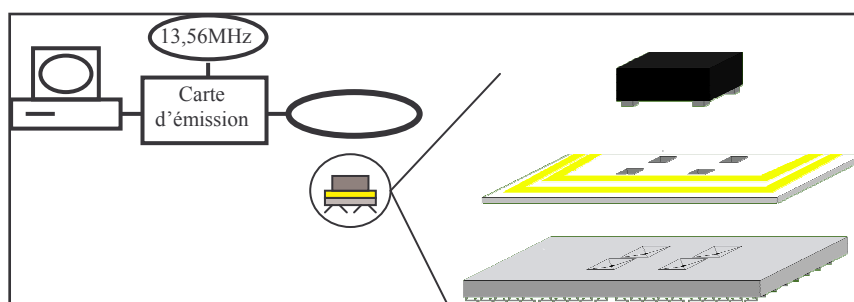


Figure I.21. Schéma de principe de la télé-alimentation d'un microrobot.

Un tel principe permet de s'affranchir des câbles d'alimentation sans ajouter de masse comme cela serait le cas en employant une batterie embarquée. En outre, il est non seulement possible de transmettre de l'énergie, mais également de transmettre une information en modulant le signal émis vers l'antenne de réception intégrée sur le micro-robot.

1.3.2.2. La cellule d'actionnement

Le micro-actionneur est en silicium polycristallin, sa fabrication nécessite deux niveaux de polysilicium structuraux. Il se compose d'une plaque encastrée-libre recouvrant partiellement une électrode enterrée, et il se prolonge par un bras de levier, permettant d'amplifier le déplacement, et il est surmonté d'un élévateur (figure I.22).

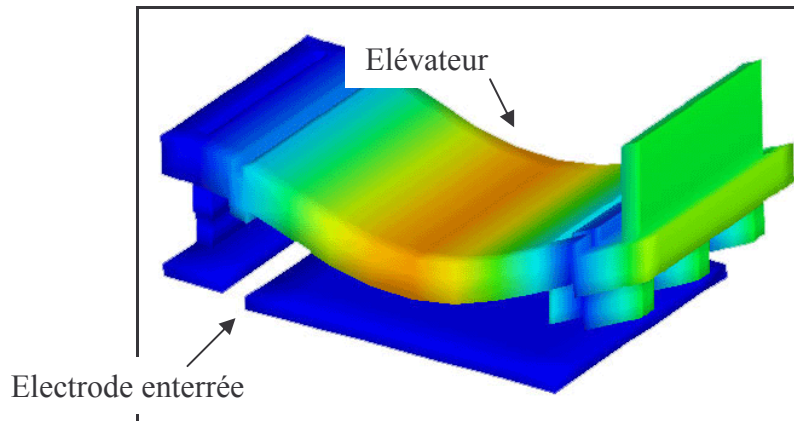


Figure I.22. Cellule d'actionnement élémentaire du micro-robot.

Lors de sa mise sous tension, l'actionneur se déforme et la butée vient au contact du substrat provoquant le déplacement de l'extrémité libre selon x et z . L'élévateur sert à compenser l'espace initial entre la butée et la contre-électrode. La tension requise par les actionneurs est de l'ordre de 40 V, soit environ la moitié de ce que délivre le circuit électronique haute tension connecté à la sortie de l'antenne de réception. La figure I.23 montre le réseau constitué des cellules d'actionnement et un agrandissement de l'élévateur.

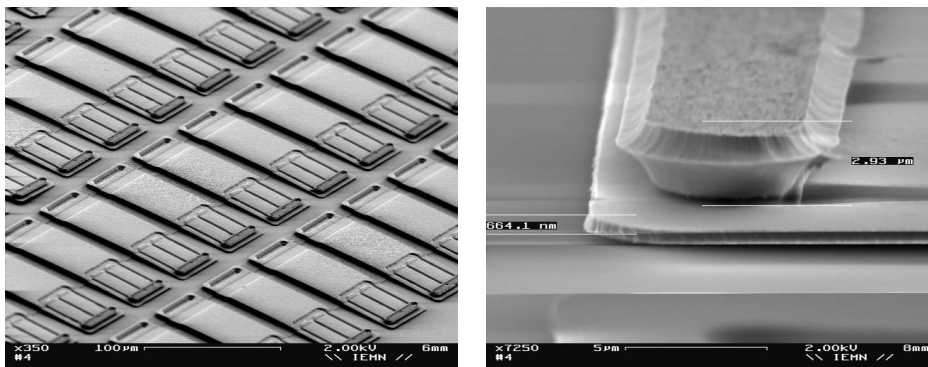


Figure I.23. Réseau d'actionneurs et agrandissement au niveau de l'élévateur.

I.3.2.3. L'antenne intégrée et le circuit électronique embarqué

Le procédé de fabrication de l'antenne intégrée sur le microrobot est représenté sur la figure I.24.

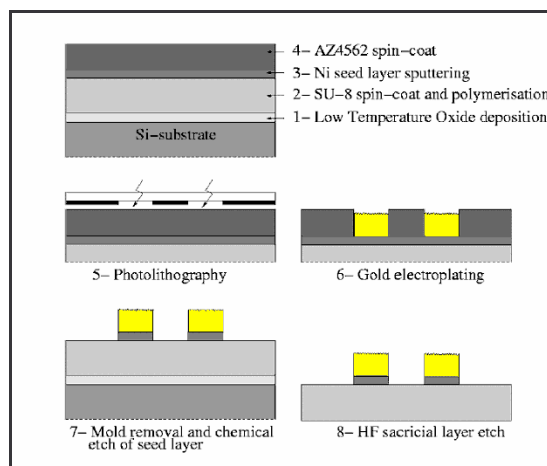


Figure I.24. Procédé de fabrication de l'antenne intégrée.

L'originalité réside dans le choix du substrat sur lequel sont électrodéposées les antennes en or d'épaisseur 25 μm . puisqu'il s'agit de la résine SU-8 déjà évoquée dans la partie relative aux films minces d'AMF. Elle a été choisie pour ses propriétés diélectriques, sa souplesse, sa relative robustesse et sa légèreté. Cela permet en outre d'hybrider les antennes sur n'importe quel type de substrat hôte. Elles sont représentées sur la figure I.25.

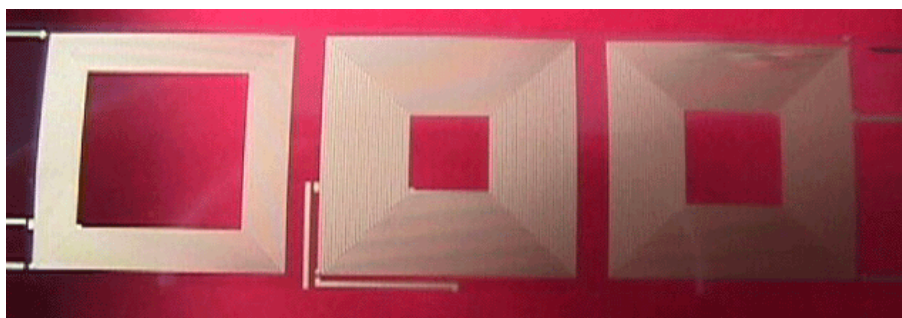


Figure I.25. Antennes intégrées réalisées sur un substrat de SU-8.

Les facteurs de qualité obtenus pour les différentes géométries testées à 13,56 MHz sont compris entre 19 et 29. Couplé à l'antenne intégrée, un circuit électronique fabriqué avec la technologie mixte I2T100 chez AMI Semiconductor consomme 230 mW. Il délivre une puissance maximale de 23 mW en sortie ; des tensions comprises entre 15 et 65 V, et un courant maximal de 1,5 mA pour une puissance minimale d'émission de 6 W. Il permet d'actionner de façon asynchrone quatre sorties grâce à une information transmise par modulation d'amplitude de la porteuse à 13,56 MHz, notamment les actionneurs de la figure I.23.

1.3.2.4. Synthèse sur le microrobot télé-alimenté et télécommandé

Cette étude est la première réalisation permettant, à distance, la commande asynchrone d'un dispositif MEMS par couplage inductif. Plusieurs points méritent d'être revus pour améliorer les performances du circuit électronique, l'amplitude du déplacement élémentaire produit par les actionneurs, la sensibilité à l'environnement à la fois de l'émission d'énergie (métal = apparition de courants de Foucault), et des micro-actionneurs (humidité, état de surface du support). La nécessité, liée au choix du mode d'actionnement électrostatique, d'obtenir des tensions d'au moins 20 V imposera vraisemblablement à l'avenir de découpler la commande de l'alimentation et d'utiliser plusieurs sources d'énergie. Par exemple, on pourrait utiliser des cellules photo-voltaïques pour générer la haute-tension et n'utiliser le couplage inductif que pour la télécommande. L'évolution du micro-robot en milieu confiné ne serait alors plus possible, mais la distance d'actionnement serait considérablement accrue.

I.4. Actionnement thermique

L'actionnement thermique présente sensiblement les mêmes propriétés que l'actionnement exploitant les films minces d'alliage à mémoire de forme, c'est-à-dire principalement la possibilité de produire une quantité d'énergie mécanique importante, mais une constante de temps élevée. La différence avec le film mince d'AMF réside dans la variation continue du mouvement généré en fonction de l'évolution de la température, alors que pour les AMF, le mouvement ne s'opère que lors de la transition de phase à une température fixe que conditionne la stœchiométrie de l'alliage. Par rapport au monde macroscopique, la comparaison peut être faite avec les bilames utilisés comme interrupteurs dans de nombreux dispositifs. L'actionneur thermique fait essentiellement appel à deux principes : le chauffage d'un bistable mécanique ; et le chauffage d'une structure formée de deux couches minces dont les coefficients de dilatation thermiques diffèrent, cette dernière est fréquemment appelée bimorphe thermique.

Le travail de thèse de François Conseil, effectué dans le cadre d'une convention CIFRE avec un industriel français de la défense, avait pour objectif de concevoir un élément de dispositif de sécurité et de mise à feu (DSMF), il est résumé dans les sections suivantes.

1.4.1. Motivations

L'élément du DSMF à réaliser est un relais destiné à l'exécution d'opérations logiques. Différents types de microrelais ont déjà été présentés dans la littérature, ils exploitent les forces électrostatiques [49], les effets thermiques [50], l'électromagnétisme [51] ou la piézo-électricité [52]. La plupart de ces microdispositifs sont actionnés dans la direction hors-plan, leur géométrie est celle d'une poutre ou d'une membrane, peu d'entre eux fonctionnent dans le plan. Les microrelais conçus pour une utilisation en environnement sévère sont très rares. L'objectif de l'étude était de réaliser un microdispositif capable d'effectuer des commutations DC dans la gamme de température $[-40^{\circ}\text{C} +100^{\circ}\text{C}]$, de 20 à 2000 Hz, dans les conditions d'accélération (10 g_{rms} , 30 g_{max}), et $\pm 300\text{ g}$ en choc.

1.4.2. Principe retenu pour le microrelais

Pour remplir la fonction, avec les spécifications précisées ci-dessus, c'est un actionnement thermique exploitant un bimorphe dans la direction hors-plan qui a été choisi, associé à un verrouillage électrostatique une fois le contact établi.

Dans la position ouverte, la courbure initiale est obtenue en exploitant les contraintes résiduelles dans la poutres, elle garantie un espace suffisant pour une bonne isolation électrique. Pour atteindre la position "contact fermé", un courant circule dans une couche métallique et la température s'élève par effet Joule. Le chauffage de la microstructure, composée de deux couches de coefficients de dilatation thermiques différents, produit le déplacement vertical. On réalise ainsi le contact électrique avec une force significative (de l'ordre de quelques mN), et l'actionnement électrostatique, dont l'efficacité est d'autant plus grande que l'espace entre la partie mobile et la contre-électrode est petit, permet alors le verrouillage du relais. Afin de minimiser la résistance de contact, c'est un contact métal-métal qui est réalisé (figure I.26).

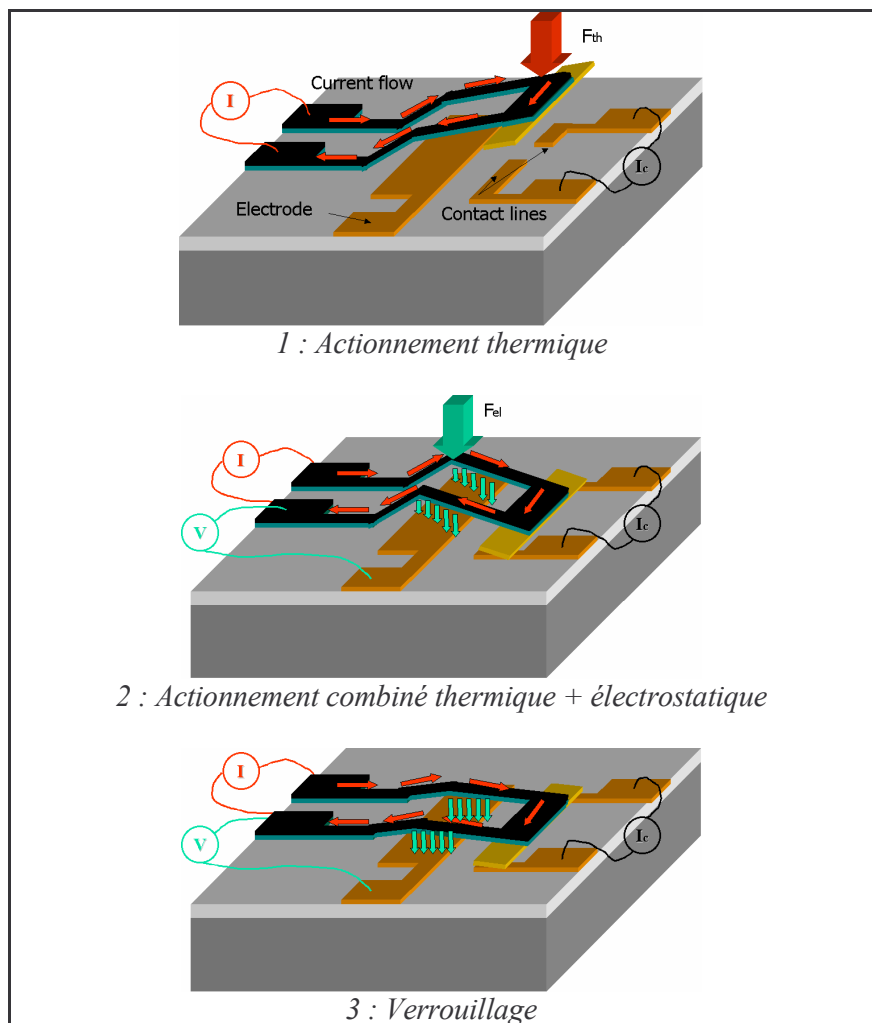


Figure I.26. Description séquentielle du fonctionnement du microrelais.

Deux types de positionnement ont été envisagés. Le premier utilise une surface de contact située à l'extrémité du bimorphe thermique, l'objectif étant d'établir le contact électrique avec l'actionnement thermique. L'actionnement électrostatique étant employé pour le verrouillage. Le second dispose d'une surface de contact située à mi-longueur et dans ce cas, l'actionnement thermique sert à réduire l'espace entre la partie mobile et une contre-électrode pour favoriser l'action des forces électrostatiques qui assurent la fin de course de l'actionneur dans la direction verticale (figure I.27).

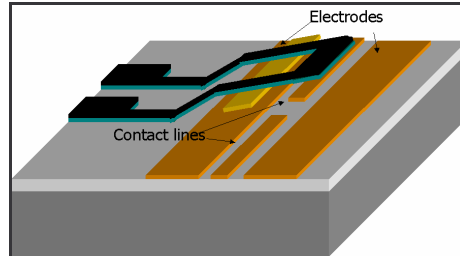


Figure I.27. *Positionnement médian du contact.*

I.4.3 Procédé de fabrication du microrelais

Pour des raisons de confidentialité, le détail des conditions de dépôt des matériaux employés n'est pas dévoilée dans ce rapport mais l'on peut tout de même dire qu'il s'agit d'un diélectrique associé à un métal qui forment le bicouche thermique.

Les microrelais ont été fabriqués en utilisant une technologie d'usinage de surface. Il s'agit d'un procédé "basse-température", moins de 250°C, dans le souci de pouvoir intégrer le microdispositif avec une électronique environnante. Une telle température autorise la fabrication de contact or-or et l'emploi d'une résine comme couche sacrificielle (PMGI SF11). Le procédé de fabrication nécessite quatre niveaux de lithographie optique, il est détaillé sur la figure I.28.

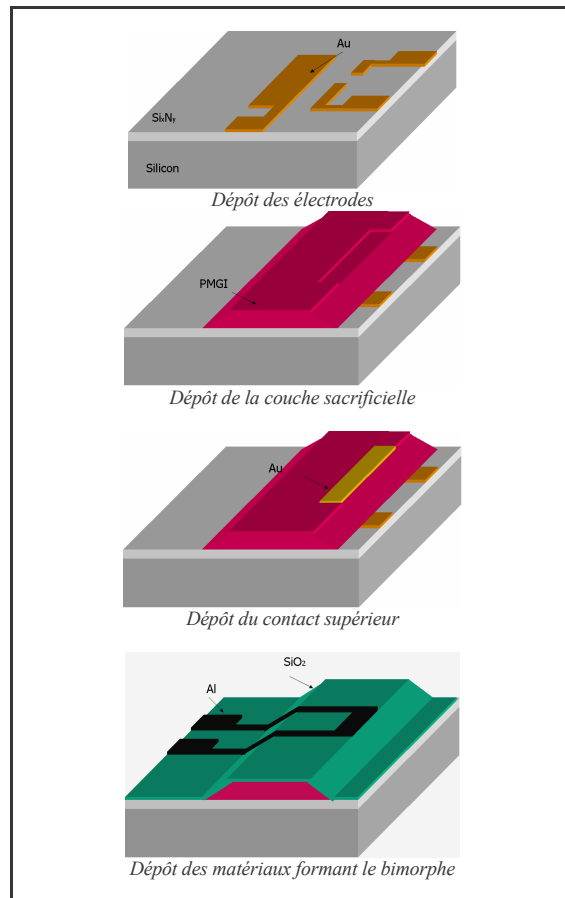


Figure I.28. *Procédé de fabrication du microrelais.*

I.4.4. Résultats expérimentaux

Avant de discuter les résultats expérimentaux, il convient de dire que des simulations analytiques et numériques ont permis de concevoir et de prédire avec succès le comportement des microrelais pour différentes configurations.

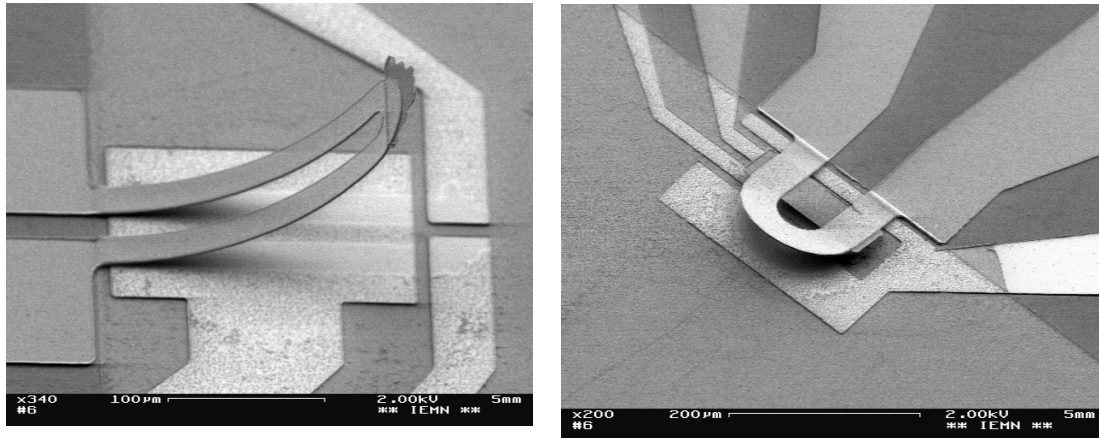


Figure I.29. *Deux types de microrelais. (a) Contact à l'extrémité. (b) Contact au milieu.*

Deux types de microrelais ont donc été caractérisés, ils sont représentés sur les figures I.29(a)(b). Les figures (I.30-I.33) représentent respectivement le déplacement du cantilever en fonction de la température, la position de l'extrémité du cantilever à l'état initial en fonction de sa longueur, le déplacement en fonction de la puissance électrique utilisée pour produire l'effet Joule, et enfin la même courbe pour des températures ambiantes différentes. Ces valeurs ont été obtenues au moyen d'un microscope interférométrique dont les limites étaient atteintes pour les flèches initiales les plus importantes.

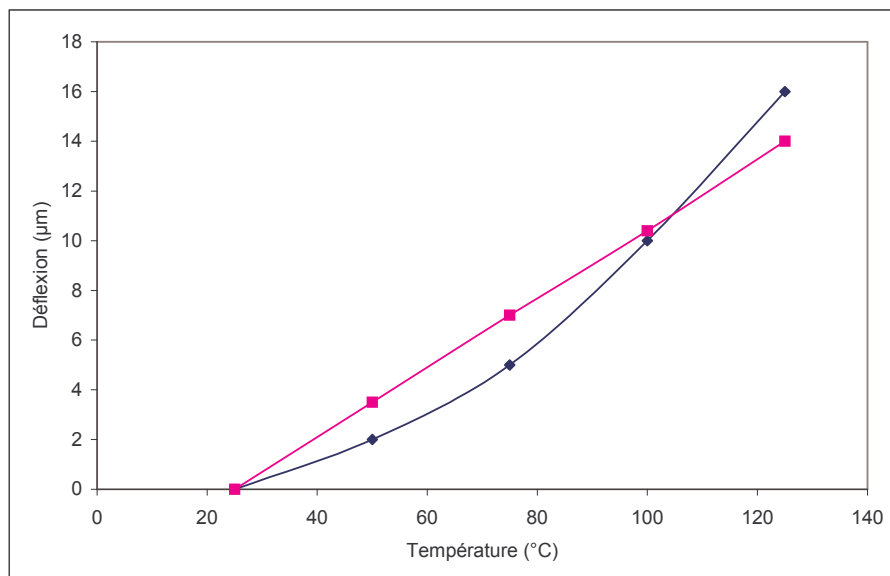


Figure I.30. *Déplacement du cantilever en fonction de la température.*

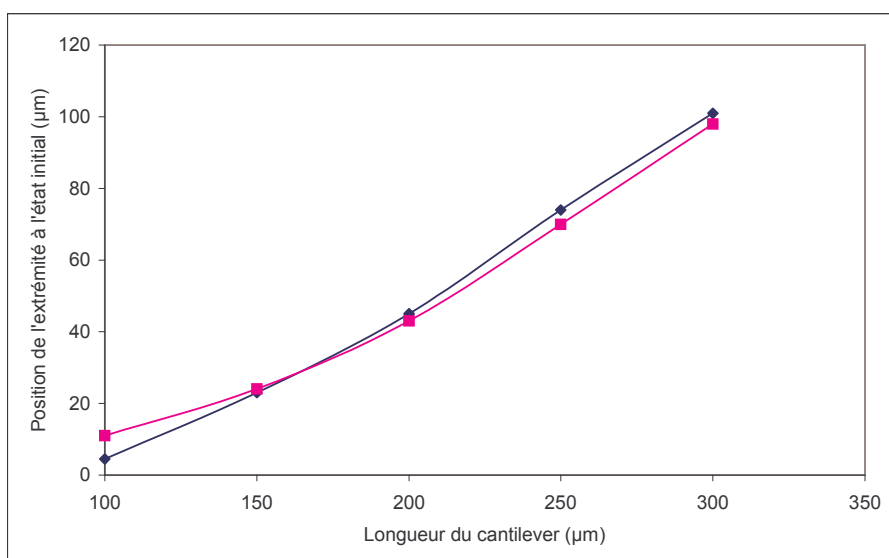


Figure I.31. Position (altitude) de l'extrémité du cantilever à l'état initial. Déflexion due aux contraintes résiduelles.

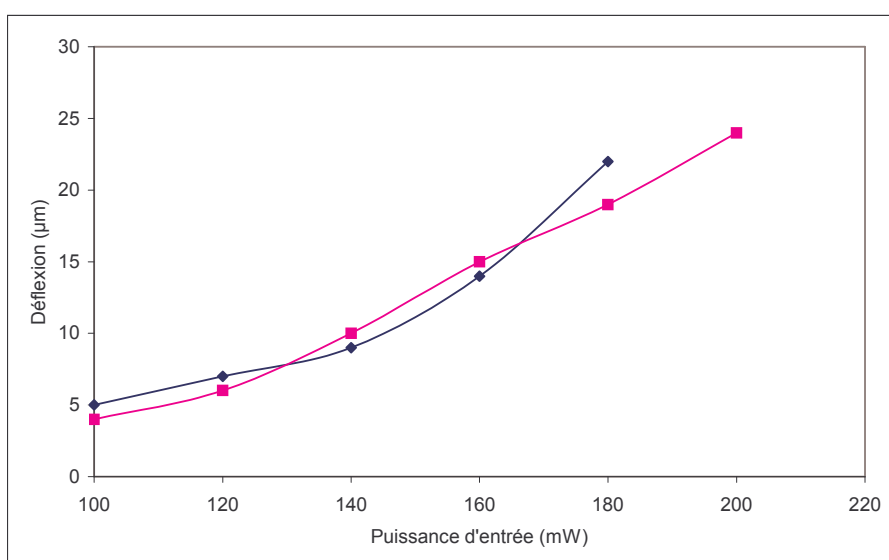


Figure I.32. Déflexion en fonction de la puissance électrique d'entrée.

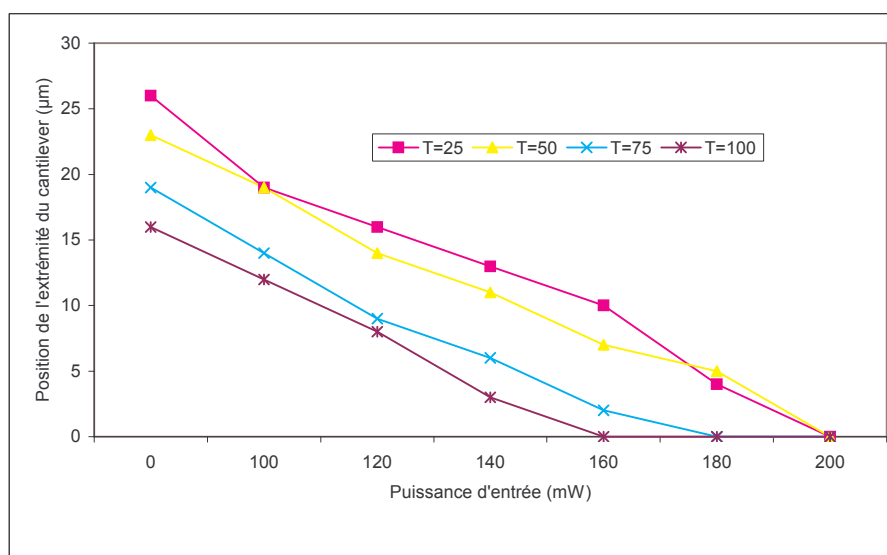


Figure I.33. Position (altitude) de l'extrémité du cantilever en fonction de la puissance électrique d'entrée.

On obtient ainsi une résistance de contact à l'état "ON" de $3\ \Omega$, un courant maximal nécessaire à l'actionnement thermique de 400 mA, et une fréquence maximale d'actionnement de 20 Hz.

1.4.5. Synthèse sur le microrelais du DSMF

Le microrelais, exploitant un actionnement thermique pour assurer la plus grande partie du déplacement dans la direction verticale et pour produire une force de contact importante, s'avère capable de remplir une fonction de logique sécuritaire. Le verrouillage électrostatique du contact augmente la fiabilité du microdispositif. Les résultats expérimentaux doivent être complétés par une série de tests de qualification reproduisant l'environnement sévère dans lequel il sera amené à être utilisé.

La fiabilité de l'actionnement ayant été démontrée, les futurs travaux s'orienteront vers une optimisation de ce microrelais DC, mais également vers des applications RF pour lesquelles, à ce jour, aucune réalisation ne semble présenter une robustesse équivalente dans la même plage de température ou d'accélération.

1.5. Synthèse sur les micro-actionneurs

Trois principes de micro-actionnement ont été présentés. Les films minces d'AMF ont fait l'objet d'un développement particulier car l'IEMN est l'un des rares laboratoires à effectuer des recherches qui s'étendent du mode d'élaboration jusqu'à la caractérisation de microsystèmes mus par ce moyen. Des travaux de modélisation ont aussi été réalisés par Isabelle Roch au cours de sa thèse, ils ne sont pas présentés dans ce rapport. Les limites de ce principe d'actionnement sont mises en évidence lors de la caractérisation d'un micropréhenseur. Il s'agit principalement de problèmes de compatibilité technologique entre les AMF et d'autres parties du microsystème sensibles à des températures supérieures à 600°C , ainsi que des temps de réponse lents, la fréquence de coupure du microdispositif était de l'ordre du Hertz.

L'actionnement de microstructures par des forces électrostatiques a été abordé à travers deux démonstrateurs originaux : un microsystème pour l'optique adaptative et un microrobot télé-alimenté. Le premier permet de montrer l'intérêt de maîtriser une technologie tridimensionnelle auto-assemblée (SAT3D), et le second s'inscrit dans un thème scientifique très important pour l'avenir des microsystèmes autonomes : l'énergie. Le couplage par ondes électromagnétiques entre une antenne d'émission et une antenne de réception constitue une solution sans fil pour d'une part transmettre de l'énergie, et d'autre part pour communiquer au microsystème des informations. Soulignons que cette solution est évidemment prometteuse pour les micro-actionneurs censés se mouvoir, mais aussi pour les systèmes exploitant des capteurs distribués comme c'est le cas pour le projet SmartDUST de Ken Pister à Berkeley (UCB, BSAC, Etats-Unis)[53].

Enfin, l'actionnement thermique a aussi été étudié, il permet d'obtenir de grands déplacements avec des forces de l'ordre du mN. Il s'agit d'un principe simple et fiable lorsque le micro-actionneur est configuré en bimorphe thermique. Le démonstrateur fabriqué allie ce mode d'actionnement à l'actionnement électrostatique afin d'assurer une fonction de logique sécurisée. Comme pour les films minces d'AMF, ce principe ne permet pas d'atteindre des vitesses de commutation élevées, mais les forces développées sont si importantes qu'elles garantissent le bon fonctionnement d'un dispositif interrupteur en environnement sévère (accélération, température).

Les perspectives de ces trois modes d'actionnement sont sensiblement différentes... Pour les films minces d'AMF, force est de constater que leur mode d'élaboration freine et freinera encore longtemps leur large utilisation dans les microsystèmes.

Pour l'actionnement électrostatique, bien que très exploré par de nombreuses équipes, il reste un moyen privilégié pour mettre en mouvement des microstructures. Par contre, pour ce qui concerne les matériaux employés, les contraintes d'intégration avec l'électronique conduiront et conduisent déjà à fabriquer des microdispositifs mobiles ou vibrants en SiGe, en métal, voire en polymère conducteur.

Enfin, les actionneurs thermiques qui, contrairement aux films minces d'AMF, ne requièrent pas de recuit, seront encore très employés dans des applications où une forte énergie mécanique est requise, et la puissance nécessaire à leur mise en œuvre disponible.

Quant aux autres modes d'actionnement des microsystèmes, les matériaux piézo-électriques en film mince sont très prometteurs pour les systèmes résonnants. Les matériaux magnétiques et magnéto-strictifs sont encore peu employés mais les recherches menées sur l'intégration des sources magnétiques environnantes devraient permettre leur développement à moyen terme (3-5 ans). Ils ont l'avantage de la transmission d'énergie sans fil.

I.6. Bibliographie

- [1] Kim C J, Pisano A P and Muller R 1992 Silicon-processed overhanging microgripper J. Microelectromech. Syst. 1 31
- [2] Carrozza M C, Menciassi A, Tiezzi G and Dario P 1998 The development of a LIGA-microfabricated gripper for micromanipulation tasks J. Micromech. Microeng. 8 141
- [3] Takeuchi S and Shimoyama I 1999 Three dimensional SMA microelectrodes with clipping structure for insect neural recording Proc. IEEE, MEMS'99 464
- [4] Takeuchi S and Shimoyama I 2000 A three-dimensional SMA microelectrodes with clipping structure for insect neural recording J. Microelectromech. Syst. 9 24
- [5] Just E, Kohl M, Pfleging W and Miyazaki S 1999 SMA microgripper with integrated antagonism Proc. Transducer'99 p 3P5.8
- [6] Lee A P, Ciarlo D R, Krulevitch P A, Lehew S, Trevino J and Northrup A 1996 A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation Sensors Actuators A 54 755
- [7] Krulevitch P, Lee A P, Ramsey P B, Trevino J C, Hamilton J and Northrup A 1996 Thin film shape memory alloy microactuators J. Microelectromech. Syst. 5 270
- [8] Nakaruma Y, Nakamura S, Buchaillot L and Fujita H 1997 A three-dimensional shape memory alloy loop actuator Proc. IEEE, MEMS'97 p. 262
- [9] Chu C L, Wu S K and Yen Y C 1996 Oxidation behaviour of equiatomic TiNi alloy in high temperature air environment Material Science Engineering A 216 193
- [10] Roch I, Buchaillot L, Wallart X and Collard C 2001 Silicon nitride as an effective protection against oxidation of a TiNi thin film in high temperature oxidizing air environment at atmospheric pressure. J. Vacuum Science Technology B 19 1 305
- [11] M. Bendahan 1996 Réalisation et caractérisation de films d'alliage à mémoire de forme NiTi : Application à la réalisation de micro-actionneur et de microcapteurs Ph.D. Dissertation (in French), Université Aix-Marseille III
- [12] Conradie E H and Moore D 2002 SU-8 thick photoresist processing as a functional material for MEMS applications J. Micromech. Microeng. 12 368
- [13] T. Akiyama, and K. Shono, "Controlled stepwise motion in polysilicon structures ", J. Microelectromechanical Syst., Vol. 2, pp. 106-110, 1993
- [14] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, "Fabrication of Microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic molding (LIGA process)", Microelectronic Engineering, Vol. 4, pp. 35-56, 1986.

- [15] A. Bertsch, H. Lorentz and P. Renaud, "Combining microstereolithography and thick resist UV lithography for 3D microfabrication ", Proc. 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Heidelberg, Germany, Jan 24-29, pp. 18-23, 1998.
- [16] K.S. Pister, M.W. Judy, S.R. Burger, and R.S. Fearing, "Microfabricated hinges ", Sensors and Actuators, Vol. A33, pp. 249-256, 1992.
- [17] K. Suzuki, I. Shimoyama, and H. Miura, "Insect model based microrobot with elastic hinges", J. Microelectromech. Syst., Vol. 3, pp. 4-9, 1994.
- [18] G. Lin, R.E. Palmer, K.S.J. Pister, K.P. Roos, "Single Heart cell force measured in standard CMOS", Proc. 9th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducer'97), Chicago, IL, USA, June 16-19, pp. 199-200, 1997..
- [19] M.C. Wu, L.Y. Lin, S.S. Lee, and K.S.J. Pister, "Microfabricated free space integrated micro-optics ", Sensors and Actuators, Vol. A50, pp. 127-134, 1995.
- [20] N.C. Tien, O. Solgaard, M.H. Kiang, N.J. Daneman, K.Y. Lau, and R.S. Muller, "Surface micromachined mirrors for laser beam positioning", Sensors and Actuators, Vol. A52, pp. 76-80, 1996.
- [21] E. Smela, O. Inganä, and I. Lundströ, "Controlled folding of micrometer-size structures", Science, Vol. 268, pp. 1735-1738, 1995.
- [22] I. Shimoyama, O. Kano, and H. Miura, " 3D microstructures folded by Lorentz forces", Proc. 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Heidelberg, Germany, Jan 24-29, pp. 25-29, 1998.
- [23] R.R.A. Syms and E.Y. Yeatman, "Self-assembly of fully three-dimensional microstructures using rotation by surface tension forces", Electron. Lett., Vol. 29, pp. 662-664, 1993.
- [24] T. Ebefors, E. Kälvesten, G. Stemme, "New small radius joints based on thermal shrinkage of polyimide in V-grooves for robust self-assembly of 3D microstructures", J. Micromech. Microeng., vol.8, pp. 188-194, 1988.
- [25] R.R.A. Syms, "Refractive collimating microlens arrays by surface tension self-assembly", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 12, pp. 1507-1509, 2000.
- [26] R.R.A. Syms, "Surface tension powered self-assembly of 3D micro-optomechanical structures", J. Microelectromech. Syst., Vol. 8, pp. 448-455, 1999.
- [27] R.R.A. Syms, C. Gormley, S. Blackstone, "Improving yield, accuracy and complexity in surface tension self-assembled MOEMS", Sens. Actuators A 88 3, pp. 273-283, 2001.
- [28] N.J. Daneman, N.C. Tien, O. Solgaard, A.P. Pisano, K.Y. Lau, and R.S. Muller, "Linear vibromotor for positioning optical components", J. Microelectromech. Syst., Vol. 5, pp. 159-165, 1996.
- [29] W. Fang, J.A. Wickert "Post-buckling of micromachined beams" ", Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical system, Oiso, Japan, pp. 182-187, 1994.
- [30] E.J. Garcia "Microflex mirror and instability actuation technique" ", Proc. 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Heidelberg, Germany, pp. 470-475, 1998.
- [31] Y. Fukuta, D. Collard, T. Akiyama, E.H. Yang and H. Fujita "Microactuated self-assembling of 3D polysilicon structures with reshaping technology" ", Proc. 10th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Nagoya, Japan, pp. 447-481, 1997.
- [32] L. Fan, M.C Wu, K.D. Choquette, M.H. Crawford, "Self-assembled microactuated XYZ stage for optical scanning and alignment", Proc. 9th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducer'97), Chicago, IL, USA, June 16-19, pp. 319-322, 1997.
- [33] S.S Lee, E. Motamedi, and M.C Wu, "Surface-Micromachined Free-Space Optic switches with integrated microactuators for Optical Fiber Communication Systems", Proc. 9th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducer'97), Chicago, IL, USA, June 16-19, pp. 85-88, 1997.
- [34] E. Quévy, L. Buchaillet, D. Collard, "Realization and actuation of continuous membrane by an array of 3D self-assembling micro-mirrors for adaptive optics", Proc. 14th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Interlaken, Switzerland, pp. 329-332, 2001.
- [35] T. G. Bifano, R. K. Mali, J. K. Dorton, J. Perreault, N. Vandelli, M. N. Horenstein, D. A. Castafion, "Continuous membrane surface-micromachined silicon deformable mirrors", Opt. Eng., Vol. 36 5, pp. 1354-1360, 1997.
- [36] G. Vdovin, S. Middelhoeck, P. M. Sarro, "Technology and applications of micro-machined silicon adaptive mirrors", Opt. Eng., Vol. 36 5, pp. 1382-1390, 1997.
- [37] O. Cugat, P. Mounaix, S. Basrour, C. Divoux, G. Reyne, "Deformable magnetic mirror for adaptive optics: first results", ", Proc. 13th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical system, Miyazaki, Japan, pp. 485-490, 2000.
- [38] C. Hsu, W. Hsu, "A two way membrane-type micro-actuator with continuous deflections", J. Micromech. Microeng., Vol. 10, pp. 387-394, 2000.

- [39] H. Toshiyoshi, H. Fujita, "Electrostatic Micro Torsion Mirror for an Optical Switch Matrix", J. Microelectromechanical Syst., Vol. 6, pp. 10-17, 1997
- [40] R. Yeh and K. S. J. Pfister, "Design of a low power silicon articulated microrobot", Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, ??? (2000).
- [41] P. E. Kladitis and V. M. Bright, "Prototype microrobots for micro-positioning and micro-unmanned vehicles", Sensors and Actuators, vol 80, (2000), 132-137.
- [42] D. Ruffieux, M. A. Dubois and N. F. de Rooij, "An ALN piezoelectric microactuator array", proceeding of MEMS'00, Myasaki (Japan), 2000, pp. 662-667.
- [43] U. Simu and S. Johanson, "Fabrication of monolithic piezoelectric drive units for a miniature robot", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 12, 2002, pp. 582-589.
- [44] A. Bonvilain and N. Chaillat, "Some prototypes of silicon-based thermal actuated microlegs for an insect-like micro-robot", Proceeding of Mecatronics'01, Besançon (France), 2001, pp. 437-442.
- [45] T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kälvesten and G. Stemme, "A walking silicon micro-robot", Proceeding of Transducers'99, Sendai (Japan), 1999, pp. 1202-1205.
- [46] M. Mita, M. Arai, S. Tensaka, D. Kobayashi, P. Basset, A. Kaiser, P. Masquelier, L. Buchaillot, D. Collard and H. Fujita, "Electrostatic Impact-Drive Microactuator", Proceeding of MEMS'01, Interlaken (Suisse), 2001, pp. 590-593.
- [47] S. Hollar, A. Flynn, C. Bellew and K. S. J. Pister, "Solar Powered 10 mg silicon robot", proceeding of MEMS'03, Kyoto (Japan), 2003, pp. 706-711.
- [48] S. Hollar, A. Flynn, S. Bergreiter and K. S. J. Pister, "Robot leg motion in a planarized-SOI, 2 poly process", proceeding of Hilton Head'02, workshop, Hilton Head Island S.C., 2002.
- [49] Drake, H. Jerman, B. Lutze, and M. Stuber, "An electrostatically actuated microrelay." The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, pp. 380.
- [50] Que L, Park J, Gianchandani Y, "Bent-Beam Electrothermal Actuator", IEEE J. Micro electro mechanical systems, June 2001, Vol.10, N°2, pp 247-262.
- [51] Taylor W P, Allen M G, "Integrated magnetic microrelays: normally open, normally closed, and multi-pole devices", Transducer 97 (Chicago, IL, 1997) pp 1149-52.
- [52] J. W. Judy, D.L. Polla, and W. P. Robbins "a linear piezoelectric stepper motor with submicron step size and centimeter travel range," IEEE Trans. on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 37, No5, pp 428-437.
- [53] <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>

II. Les microsystèmes pour les télécommunications

Emmanuel Quévy¹ — Vincent Agache² — Philippe Muller³

¹*Thèse soutenue en Décembre 2002*

²*Thèse soutenue en Octobre 2003*

³*Soutenance prévue fin 2004*

ABSTRACT: This chapter presents the research activities in the RF MEMS applicative field. Studies have been supported by various European and national programs. Two components have been studied: filters and switches. Emmanuel Quévy has investigated his research on intermediate frequency range filter for mobile communication. Vincent Agache designed resonators vibrating at the vicinity of the GHz. These two thesis have been integrated within a workpackage of the European project MELODICT, and to an exploratory research of the same project, respectively. Eventually, the first work done on the RF microswitches is presented.

RÉSUMÉ : Ce chapitre présente les activités de recherche effectuées dans le thème applicatif des microsystèmes pour les télécommunications. Il s'agit de travaux soutenus par de nombreux contrats de recherche nationaux ou européens. Deux composants en particulier ont été étudiés par trois doctorants. Emmanuel Quévy a étudié des résonateurs électromécaniques destinés à une application de filtrage dans la gamme intermédiaire de fréquence de la téléphonie mobile. Vincent Agache a étudié des résonateurs dont les fréquences propres se situent au voisinage du GHz. Ces deux thèses ont été intégrées respectivement à un lot de travail du projet européen MELODICT, et à une voie exploratoire de ce même projet. Enfin, les

premières recherches effectuées à l'IEMN sur des microcommutateurs pour les signaux hyperfréquences sont également présentées.

KEY WORDS: Resonator, Filter, Nanotip, Microswitch.

MOTS-CLÉS : Résonateur, Filtre, Nanopointe, Microcommutateur.

II.1. Introduction

Depuis une dizaine d'années, les microsystèmes (MEMS) sont employés dans quelques applications industrielles dites "grand public" parmi lesquelles on peut par exemple citer les accéléromètres servant au déclenchement des coussins de sécurité gonflables, les gyroscopes destinés à la stabilisation de l'image des caméscopes.

L'intensité de la force développée par les microsystèmes étant relativement faible, les micro-actionneurs peuvent difficilement influencer ou modifier un environnement solide, ils sont particulièrement adaptés, en revanche, à la modification ou à l'interruption de la trajectoire d'une onde. Dans le domaine des télécommunications optiques, des structures MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical Systems) permettant le multiplexage de voies fait l'objet d'un transfert entre les laboratoires et le secteur industriel. Motivées par des succès industriels convaincants, les industriels impliqués dans la réalisation de systèmes de communication se montrent de plus en plus intéressés par les possibilités offertes par les microtechnologies. En effet, la demande de systèmes de communication mobiles ayant une autonomie de fonctionnement sans cesse croissante nécessite des solutions électroniques qui sont de plus en plus complexes et coûteuses à optimiser, notamment avec l'augmentation des débits de transmission. Cette complexité pousse à l'investigation de solutions alternatives. Plus précisément, pour les fonctions touchant à la commutation de lignes à très haut débit, et au filtrage très sélectif en téléphonie mobile, les microsystèmes sont potentiellement porteurs de solutions originales extrêmement attrayantes.

Les microsystèmes basés sur la co-intégration de micro-actionneurs dans des systèmes électroniques présentent des caractéristiques parfaitement adaptées aux systèmes de communication mobile; ils permettent, entre autres :

- une réduction considérable de la consommation, qui se traduit par une augmentation de l'autonomie de fonctionnement des équipements,
- un faible encombrement, un faible poids (intérêt pour les équipements mobiles et satellisés),
- des performances inatteignables avec les composants électroniques (linéarité ...)
- une grande capacité de production en série en exploitant les technologies de la micro-électronique,
- un coût de production réduit lié à la possibilité de co-intégration de ces microsystèmes avec leur électronique de commande,
- un fonctionnement sécurisé par des techniques de redondance importante rendue possible par leurs faibles dimensions.

Deux études sur le filtrage électromécanique ont été menées à l'IEMN dans le cadre de la thèse d'Emmanuel Quévy et celle de Vincent Agache, d'autres thèses, co-encadrées par le groupe CSAM, sont en cours sur la commutation de signaux hyperfréquences, notamment celle de Philippe Muller – CIFRE THALES TRT – dont les résultats sont confidentiels.

II.2. Contexte international et objectifs

Vu l'intérêt potentiel que représente l'introduction des microsystèmes dans les systèmes de communication, il est clair que plusieurs laboratoires internationaux sont actifs dans ce domaine.

Les premières études se sont attachées aux développements de microcommutateurs pour les lignes à hauts débits, aux U.S.A (Univ. Berkeley, Rockwell, UCLA, Stanford), dans certaines entreprises japonaises (OMRON, NTT) et en Europe (CSEM en Suisse, Siemens en Allemagne, IMEC en Belgique...). A ce jour, seuls des micro-commutateurs pour les lignes relativement basses fréquences sont commercialisés (Cronos, USA). Cette commercialisation confirme l'intérêt de ces microtechnologies et leur viabilité industrielle, par contre il est clair que la recherche doit être active pour étendre ces fonctionnalités vers les communications mobiles et satellitaires.

Par contre, relativement peu d'études sont tournées vers le filtrage électromécanique dans la mesure où la réalisation de filtres à hautes fréquences nécessite des moyens technologiques de tout premier ordre. La plupart des travaux sont réalisés en milieu universitaire aux USA, Berkeley (Ca.) et Ann Arbor (Michigan). Des microstructures ayant des fréquences de résonance supérieures à 100 MHz ont ainsi été démontrées.

Les recherches en cours ont pour objectif l'étude de composants microsystèmes tout à fait innovants en vue de leur introduction dans des systèmes de communication mobiles afin de leur procurer de meilleure autonomie de fonctionnement et ce, malgré l'augmentation des débits de transmission.

De nouveaux composants permettront de remplir deux fonctions indispensables aux systèmes de communication mobiles et qui sont de plus en plus complexes à réaliser avec des solutions purement électroniques ou optoélectroniques : le filtrage fréquentiel pour la sélection de canaux en téléphonie, et la commutation pour la formation de voies et la reconfiguration des systèmes de télécommunications micro-ondes et opto-microondes.

Dans les sections suivantes ne sont présentés que les faits marquants et les aspects originaux des travaux réalisés sur le filtrage et la commutation.

II.3. Filtrage électromécanique

La solution "microsystème" pour le filtrage fréquentiel en téléphonie mobile, est basée sur la réalisation de microstructures ayant des fréquences de résonance mécaniques dans la gamme des signaux à filtrer. Les premières approches ont consisté à réaliser des micropoutres en polysilicium ayant des fréquences de résonance en gamme dite intermédiaire (100-300 MHz). Ces structures sont mises en vibration par couplage électrostatique direct avec l'électrode d'entrée porteuse du signal à filtrer. Les vibrations de la structure sont alors transmises par couplage capacitif sur une électrode de sortie qui restitue donc le signal d'entrée filtré par les caractéristiques mécaniques de la microstructure (figure II.1).

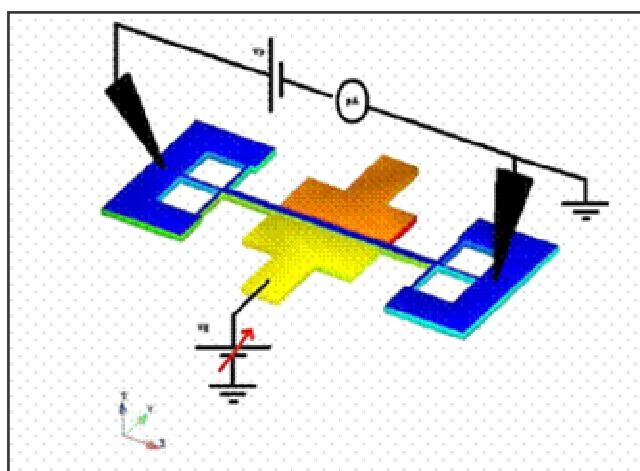


Figure II.1. Principe du filtre électromécanique.

Emmanuel Quévy a démontré que, dans le cas d'un résonateur haute fréquence dont l'espace inter-électrodes (gap) est nanométrique, un contact s'établissait entre la structure résonante et les électrodes qui jouent alors le rôle de butées mécaniques [1].

II.3.1. Microrésonateur en mode "tapping"

La structure de base utilisée pour cette étude est présentée sur la figure II.2.

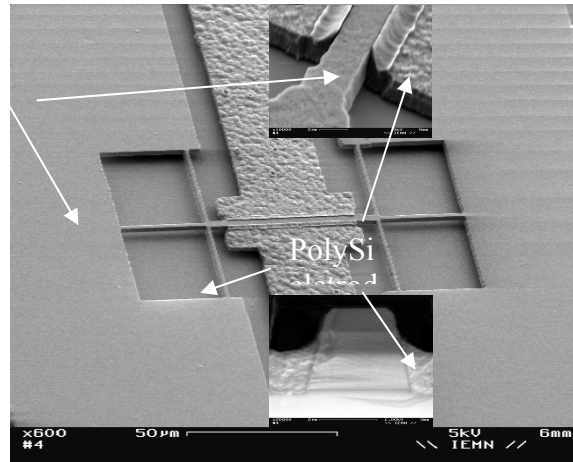
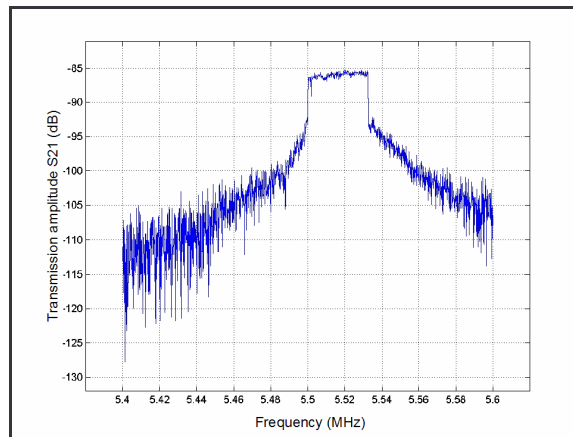
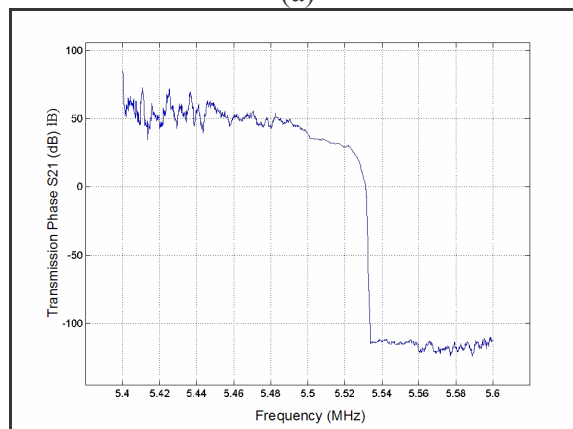


Figure II.2. Microstructure utilisée comme véhicule de test pour le mode "tapping".

Il s'agit d'une microstructure en silicium monocristallin de $60\ \mu\text{m}$ de long et $2\ \mu\text{m}$ de large, séparée des électrodes d'entrée et de sortie par un "gap" de $65\ \text{nm}$. Les électrodes sont en silicium polycristallin dopé. En appliquant une tension de $220\ \text{mV}$ sur l'électrode d'entrée, et une tension de polarisation de $45\ \text{V}$ sur la microstructure, cela engendre une force électrostatique suffisante pour établir le contact entre la poutre et les électrodes. La caractéristique spectrale correspondante est montrée sur la figure II.3, le pic de résonance est écrêté consécutivement au contact résonateur – électrode. Un modèle de contact dynamique a été établi et la figure II.4 montre la bonne concordance du modèle avec les résultats expérimentaux.



(a)



(b)

Figure II.3. Caractéristique spectrale d'un résonateur. (a) Amplitude. (b) Phase.

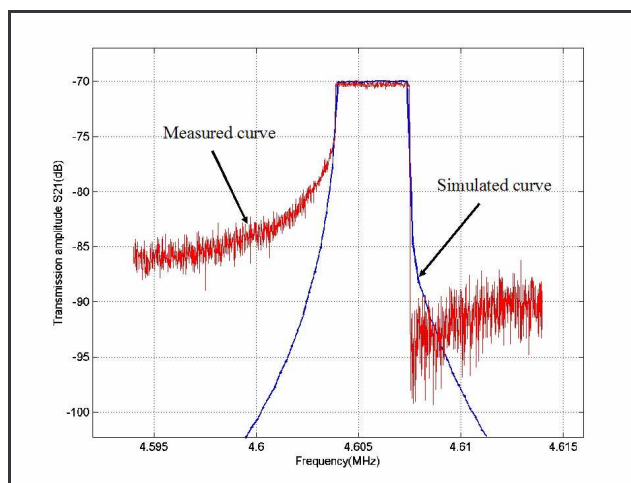


Figure II.4. Comparaison entre le modèle et la mesure en tenant compte du contact résonateur – électrode.

Bien que des fréquences de plusieurs centaines de MHz aient été visées au cours de ces travaux, il n'a pas été possible de caractériser les microrésonateurs pour de telles valeurs. En effet, des phénomènes de déplétion en porteurs libres dans la structure vibrante ont fortement dégradé l'efficacité de la transduction électromécanique, et ont rendu le protocole de mesure inopérant.

II.3.2. Recherche exploratoire sur les résonateurs haute fréquence

Des recherches ont été entreprises pour étendre le principe du filtrage électromécanique vers des fréquences encore plus hautes afin de pouvoir traiter directement la gamme RF de la téléphonie mobile et ses évolutions (0,8-2,4 GHz). C'est la thèse de Vincent Agache qui a permis de réaliser de tels microdispositifs [2]. Pour atteindre des fréquences de résonance compatible avec la gamme RF plusieurs axes d'études étaient envisageables : l'utilisation de structure microscopique sur des rangs de mode de vibration élevés ; l'augmentation de la raideur en choisissant les matériaux adéquats ; la réduction des dimensions du résonateur ou une combinaison de ces différentes voies. Compte tenu des moyens de microfabrication disponibles à l'IEMN, notamment de la possibilité d'utiliser un masqueur électronique, c'est la miniaturisation qui a été privilégiée.

II.3.2.1. Co-intégration des résonateurs

Que ce soit pour les résonateurs étudiés par Emmanuel Quévy ou ceux qui ont fait l'objet de recherches dans le cadre de la thèse de Vincent Agache, ce qui a dicté l'orientation de ces travaux c'est la perspective de co-intégrer ces résonateurs avec une électronique d'amplification et de traitement. Cette approche s'inscrivait dans le cadre d'un programme de recherche européen intitulé MELODICT qui visait la substitution de composant "off chip" par des microsystèmes dans les architectures de téléphone portable [3-5]. L'avantage de cette stratégie de conception réside dans la compatibilité entre les technologies permettant de fabriquer les circuits micro-électroniques et celles employées pour réaliser les microsystèmes [5-8].

II.3.2.2. Structure du dispositif et principe de fonctionnement

La figure II.5 montre le schéma d'un filtre nano-électromécanique dans sa configuration de fonctionnement (résonateur polarisé et signaux d'excitation).

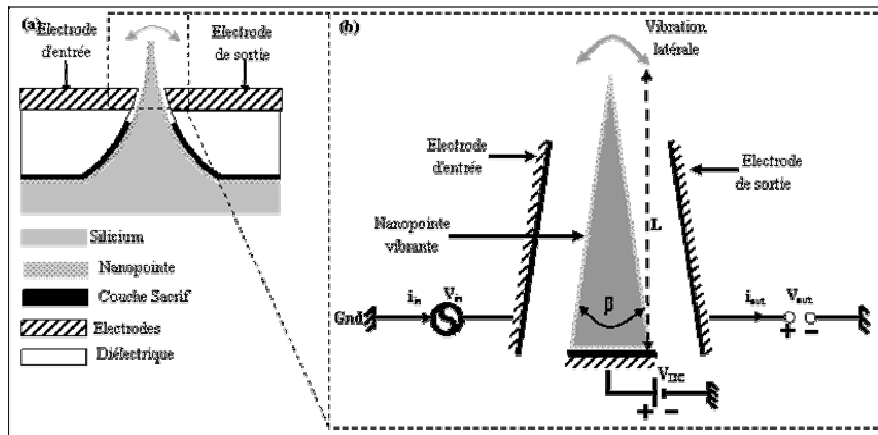


Figure II.5. (a) Représentation schématisée en section droite d'un résonateur. (b) Détail montrant la polarisation électrique.

Il s'agit d'un résonateur dont la géométrie est une nanopointe encastrée-libre, d'un plan conducteur sous un épais (plus de 1 μm) diélectrique, ce conducteur recouvre également la pointe, et de deux électrodes assurant la transduction capacitive. Le résonateur vibre selon le premier mode de flexion. Le principe de fonctionnement est le suivant : lorsque la fréquence du signal d'excitation sur l'électrode d'entrée est appariée à la fréquence propre de la nanopointe, elle entre en résonance et l'électrode de sortie "voit" un courant provenant d'une variation de capacité dans l'entrefer. Le signal électrique de sortie est modulé par la structure mécanique conductrice et polarisée. Le courant de sortie est appelé : courant motionnel.

Mode	n	λ_n	f_m / f_0
Fundamental (f_0)	1	7.1435	1
1 st Harmonic (f_{r1})	2	10.5367	2.1756
2 nd Harmonic (f_{r2})	3	13.7951	3.7293
3 rd Harmonic (f_{r3})	4	17.0053	5.6669
4 th Harmonic (f_{r4})	5	20.1923	7.99
5 th Harmonic (f_{r5})	6	23.3663	10.6994

Tableau II.1. Modes caractéristiques d'une poutre conique encastrée-libre.

Afin de déterminer la géométrie et le matériau constitutif du nanorésonateur, un modèle tenant compte de l'angle d'ouverture de la pointe β et de ses propriétés géométriques et mécaniques a permis de définir les structures avant leur fabrication. Les fréquences de résonance sont rappelées dans le tableau II.1, et il est possible de calculer leur évolution en fonction de la longueur du cône (approximation choisie pour modéliser la géométrie de la pointe) et de son angle.

II.3.2.3 Procédé de fabrication des nanopointes

Le procédé de fabrication simplifié est montré sur la figure II.6. Une couche d'oxyde PECVD de 330 nm est déposée à 300°C. Une lithographie électronique permet de définir des disques de résine sur l'oxyde qui sont transférés ensuite dans l'oxyde par gravure ionique réactive anisotrope, ils serviront de masques lors de l'étape suivante. La combinaison des gaz SF_6 et O_2 lors de la gravure ionique réactive produit une attaque isotrope du silicium et permet d'obtenir le profil du piédestal, étape préalable à l'obtention de la nanopointe (figure II.7). Les disques d'oxydes sont dissous dans de l'acide fluorhydrique. Deux cycles oxydation thermique – désoxydation sont alors nécessaires pour obtenir le profil effilé de la nanopointe (figure II.8)[9-12].

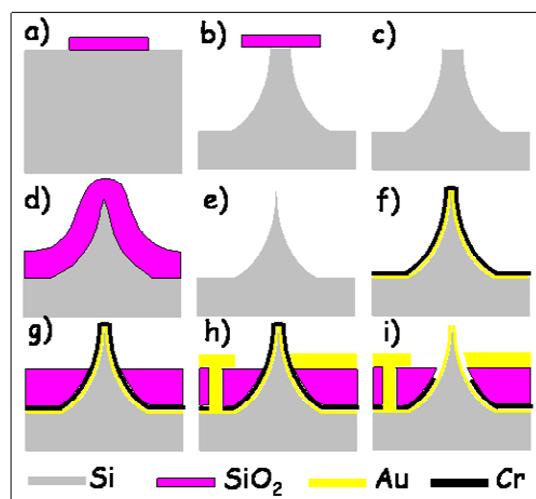


Figure II.6. Procédé de fabrication d'une nanopointe. (a) Une couche d'oxyde de silicium est déposée par PECVD, (b) elle est alors structurée sous forme de disque servant de masque lors de l'étape de gravure isotrope du silicium. (c) Cela permet d'obtenir un piédestal qui est ensuite oxydé à deux reprises (d-e) pour permettre l'obtention du profil effilé de la nanopointe. (f) Cette dernière est alors recouverte d'or et de chrome qui servira de couche sacrificielle. (g) Le diélectrique (SiO_2) est ensuite déposé, (g-h) puis les contacts et les électrodes. (i) Finalement, on grave la couche de chrome sacrificielle.

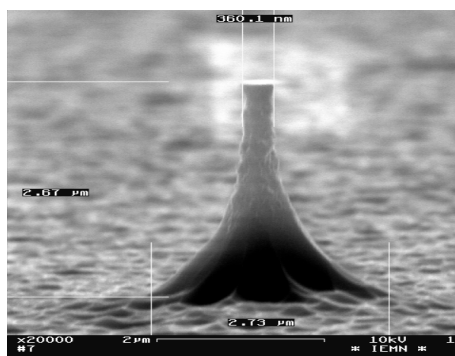


Figure II.7. Piédestal en silicium obtenu après l'étape de gravure ionique réactive.

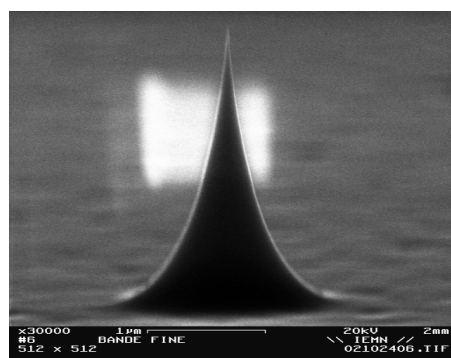


Figure II.8. Nanopointe effilée obtenue après deux étapes d'oxydation – désoxydation successives.

II.3.2.4. Expériences sur les nanopointes

L'objectif initial était de fabriquer des nanopointes censées être exploitées pour constituer l'élément résonant du filtre électromécanique. Or, ces nanostructures se sont avérées très intéressantes pour une communauté scientifique plus large que celle de l'électronique, les physiciens et les roboticiens se sont montrés très intéressés pour disposer de nouvelles sondes.

Concernant les aspects applicatifs électroniques, la figure II.9 montre un schéma représentant une cellule de filtrage.

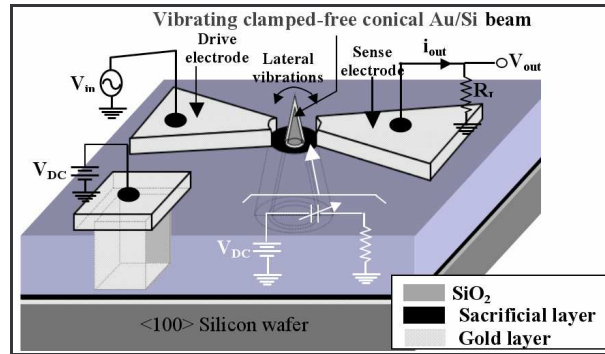


Figure II.9. Cellule de filtrage.

Compte tenu du procédé de fabrication adopté, il est envisageable et souhaitable de fabriquer plusieurs filtres en parallèle afin de disposer de signaux électriques plus facilement exploitables. En effet, les dimensions des nanopoints laissent escompter des courants motionnels très faibles, de l'ordre du pico-ampère. Un autre point positif lié à l'usinage collectif réside dans la possibilité de créer des gabarits de filtre sur un même substrat permettant ainsi la réalisation de fonctions électroniques plus complexes. Cependant, cette perspective "alléchante" doit être tempérée par la difficulté d'obtenir des structures présentant exactement la même fréquence de résonance. En effet, Emmanuel Quévy avait mis en évidence, en réalisant des structures de dimension micrométrique, la dispersion géométrique inhérente à la technologie (figure II.10).

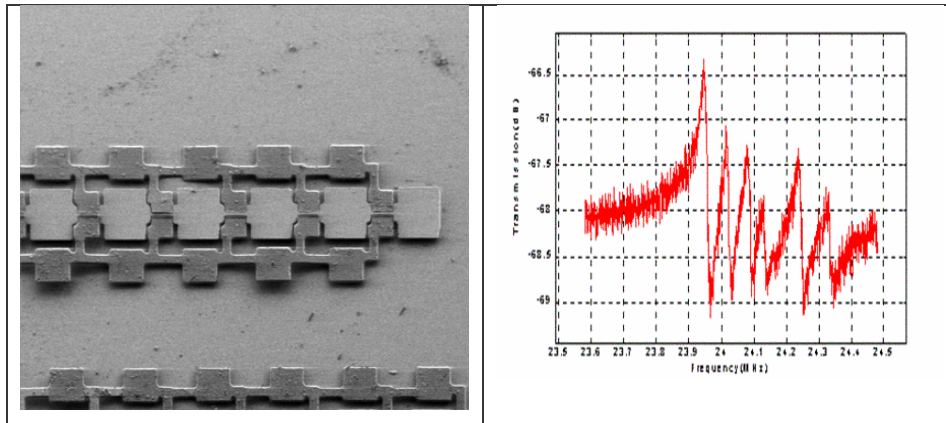


Figure II.10. Mise en évidence de la dispersion géométrique en analysant la fréquence de résonance de huit microstructures dont le dessin du masque était identique.

Dans le domaine de la microrobotique, les nanopoints trouvent également un champ d'application intéressant, non pas en tant que résonateur mais en tant qu'organe de préhension [13]. En collaboration avec le Laboratoire de Robotique de Paris, dans le cadre du projet ROB EA, les nanostructures sont intégrées à un micropréhenseur. Dans l'approche choisie, ce sont les forces de surface qui assurent la préhension d'un micro-objet [14] et les premiers dispositifs étaient des leviers AFM dépourvus de pointe à leur extrémité, la saisie et la dépose des objets se faisaient en produisant une accélération. En exploitant les nanopoints associées à un cantilever, il est possible de concevoir un micropréhenseur adaptatif où l'objet "voit" comme type d'interaction soit un contact linéique circulaire, soit un contact ponctuel (figure II.11).

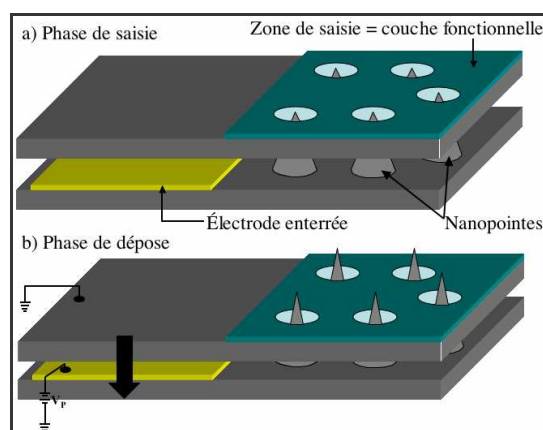


Figure II.11. Principe de fonctionnement du nanopréhenseur adaptatif.

Le premier sert lors de la saisie alors que le second est exploité au moment de la dépose du micro-objet. Ce microdispositif est en cours de réalisation, la figure II.12 montre l'état d'avancement atteint au cours de la thèse de Vincent Agache.

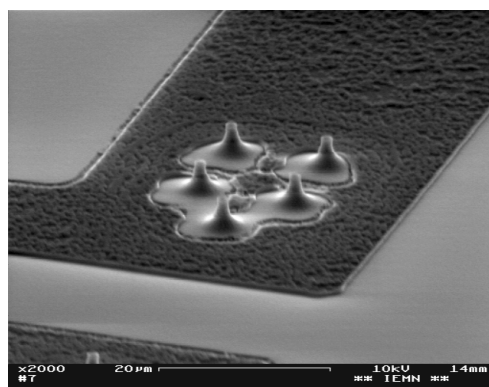


Figure II.12. Pointes du préhenseur encore recouvertes d'un oxyde thermique, après structuration des électrodes d'actionnement.

II.4. Microcommutateurs

Avec les mêmes objectifs que pour le filtrage, en terme de consommation optimisée, de nouvelles architectures de micro-interrupteurs mécaniques sont élaborées afin de commuter des lignes de transmission ayant des bandes passantes centrées sur des fréquences de plus en plus élevées. Les premières études de faisabilité ont concernées la commutation, avec des temps de réponse de l'ordre de la milliseconde, de lignes à 24-26 GHz pour les communications par satellite. Des liaisons à 38-42 GHz et 57-60 GHz sont prévues pour les réseaux terrestres et domestiques. L'augmentation de ces fréquences s'accompagne d'une réduction des dimensions des lignes et des microcommutateurs. La réduction des tailles de ces microstructures doit s'accompagner d'une conception mécanique originale afin de limiter, là aussi, les tensions et courants d'actionnement tout en gardant des fréquences de fonctionnement exploitables.

A l'IEMN, en collaboration avec le groupe CSAM, l'activité de recherche a débuté en étudiant la modélisation et la réalisation de microcommutateurs destinés à agir sur des signaux hyperfréquences de faible puissance, typiquement 100 mW. Elles sont menées dans le cadre d'un projet RNRT intitulé ARRESAT, d'un programme DGA intitulé PAMIR, d'un PEA DGA RF MEMS, d'un projet Eurofinder intitulé MEMS², d'un partenariat CNES – ST Microelectronics - IEMN et d'une convention CIFRE avec THALES TRT. Les aspects hyperfréquences étant du domaine de compétences du groupe CSAM, seule une partie des recherches sur les modélisations électromécaniques sont abordées par la suite.

II.4.1. Un exemple pionnier : le Microcommutateur Raytheon – Texas Instruments

Il s'agit d'une microstructure en métal (aluminium pour les résultats de simulation présentés) encastrée à chacune de ses extrémités (figure II.13)[15]. Du point de vue hyperfréquences, la configuration correspond à une structure de commutation parallèle. La flèche maximale du commutateur étant obtenue en son milieu, un contact s'établit entre la contre-électrode, où plus précisément le matériau diélectrique qui la protège, et la partie mobile. Cette configuration conduit à un phénomène d'hystérésis électrostatique tel qu'il est illustré sur la figure II.14. Cette caractéristique provient du fait qu'au moment de l'attraction brutale de la partie mobile vers le bas (*pull in*), le champ électrique nécessaire est plus grand que celui qui permet d'assurer son maintien en position basse (il n'y a plus de film d'air entre la partie mobile et la contre-électrode). Par conséquent, pour autoriser la restauration de la forme initiale de la microstructure, il est nécessaire de réduire la valeur du champ électrique en diminuant la tension appliquée.

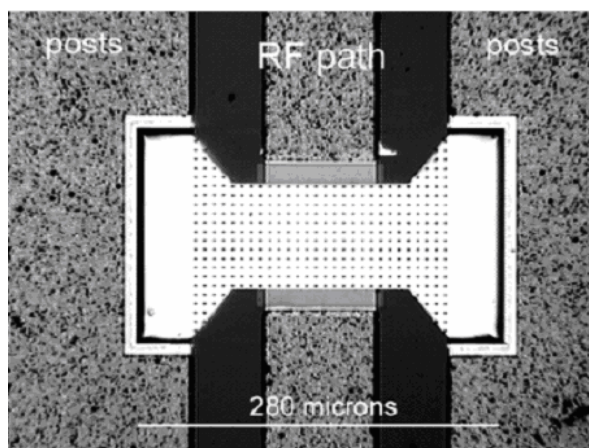


Figure II.13. Microcommutateur Raytheon/TI.

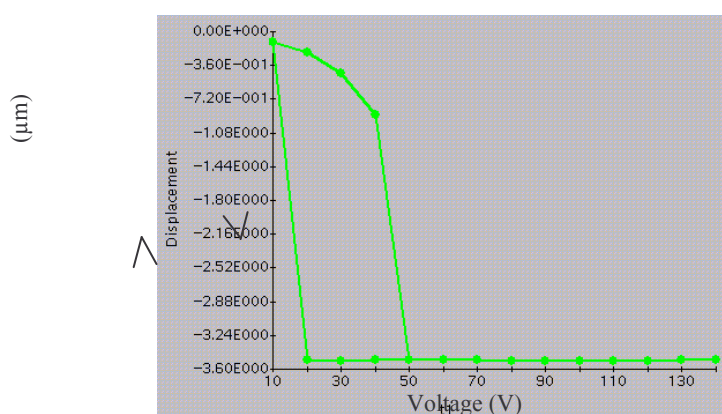


Figure II.14. Résultat de simulation montrant l'hystérésis électrostatique, typique du comportement électromécanique du microcommutateur Raytheon/TI.

II.4.2. Microcommutateur conçu à l'IEMN

Afin d'éliminer l'hystérésis électrostatique et d'éviter un comportement de *pull in*, une structure originale a été proposée (figure II.15). Il s'agit d'une poutre suspendue par l'intermédiaire de deux liaisons flexibles travaillant en torsion dans le souci de diminuer la raideur de l'ensemble de la microstructure afin de réduire les contraintes engendrées lors de l'actionnement. Les contre-électrodes sont déportées par rapport au milieu de la poutre afin d'éviter le *pull in* et l'hystérésis électrostatique [16]. La première caractéristique défavorable est annihilée par la non-linéarité des forces de contact qui s'opposent aux forces électrostatiques, elles-mêmes non linéaires ; et le second ne se produit pas car il reste toujours un film d'air entre la partie mobile et les contre-électrodes. La figure II.16 montre le résultat obtenu par simulation électromécanique couplée pour une poutre de 590 μm de long et de 1 μm d'épaisseur d'aluminium.

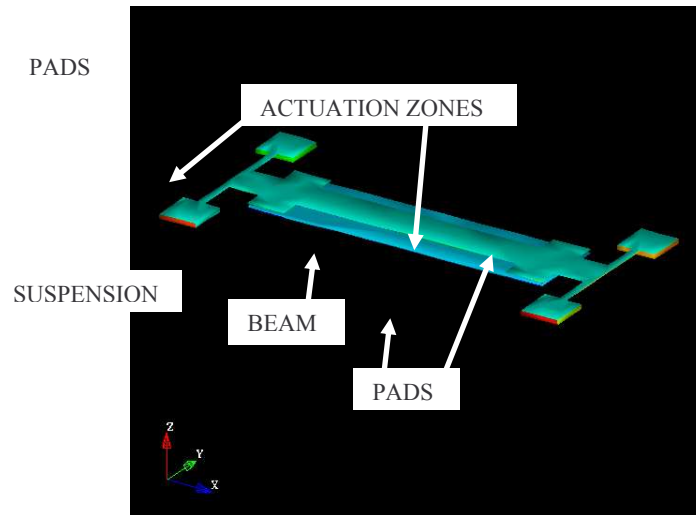


Figure II.15. Microcommutateur basse tension. Les conditions aux limites ont été modifiées pour faciliter la rotation autour de l'axe y.

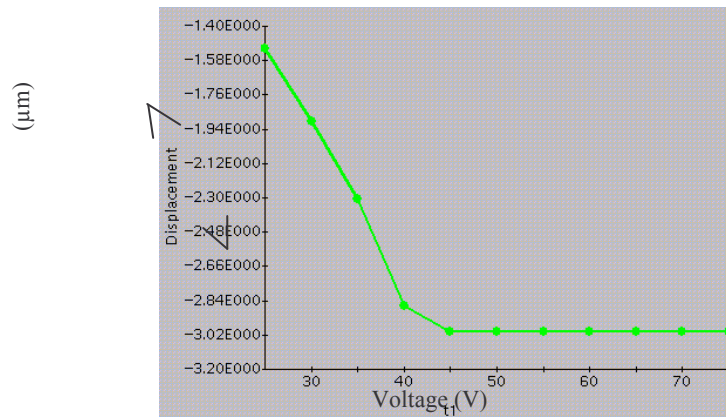


Figure II.16. Résultat de simulation montrant le comportement électromécanique du microcommutateur conçu à l'IEMN : l'absence de pull in et d'hystérésis électrostatique peut être remarquée.

La figure II.17 montre l'état de contrainte au sein de la microstructure, la contrainte maximale au sens de Von Mises est maximale dans les suspensions, mais elle reste très inférieure à la limite admissible par l'aluminium. Une structure commutateur a été fabriquée à l'IEMN, elle est représentée sur la figure II.18.

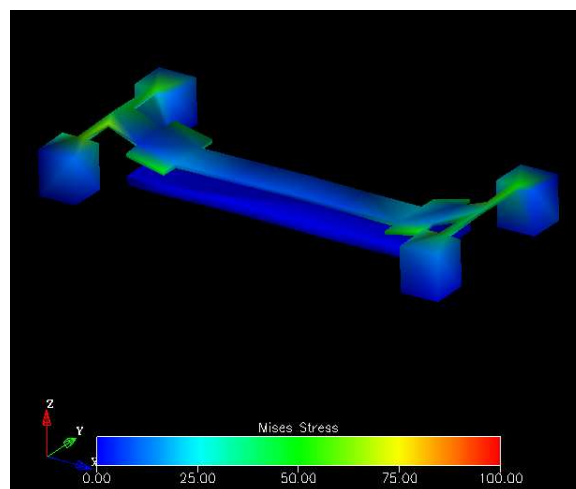


Figure II.17. Résultat de simulation montrant l'état de contrainte au sens de Von Mises dans un microcommutateur en aluminium de 1 μm d'épaisseur.

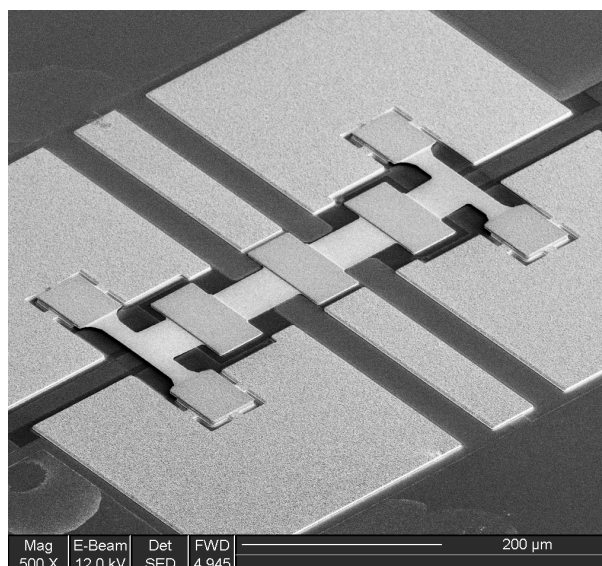


Figure II.18. Microcommutateur original réalisé à l'IEMN (collaboration groupe CSAM – groupe "Microsystèmes Silicium" – microfabrication par Michel Fryziel).

II.5. Synthèse sur les microsystèmes pour les télécommunications

De plus en plus de laboratoires s'intéressent en France à la recherche sur les RF MEMS mais les thèmes de recherche abordés sont en cours de mutation et très focalisés sur les microcommutateurs. En effet, le très fort intérêt manifesté par les industriels applicateurs pour les composants de type microcommutateur contribue à l'apparition d'une activité de recherche qui se situe davantage au niveau de systèmes intégrant ces microcommutateurs qu'au niveau du composant lui-même. La communauté scientifique des micro-ondes, et en particulier celle des concepteurs de circuits micro-ondes, est désormais très impliquée dans la recherche de systèmes intégrant ces microdispositifs pour remplir des fonctions qui intéressent les applicateurs industriels : déphaseur, antenne agile... Bien que tout ne soit pas résolu au niveau du composant lui-même, en particulier en terme de tension de fonctionnement ou de temps de commutation, on peut penser que l'implication de grands groupes industriels à fort potentiel humain conduira à des solutions intégrables dans les trois prochaines années. Les groupes de recherche purement "microsystèmes" auront sans doute à ce moment là un rôle moins important à jouer.

II.6. Bibliographie

- [1] E. Quévy Elaboration et Caractérisation de Technologies Microsystèmes Avancées: Structures d'Actionnement tridimensionnelles et Résonateurs Electromécaniques à Entrefer Latéral Nanométrique Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 2002.
- [2] V. Agache Intégration et caractérisation physique de nanostructures pour les technologies de l'information et de la communication. Application au filtrage électromécanique dans la gamme des radiofréquences (0,8-2,4 GHz) Thèse de doctorat de l'Université de Lille, 2003.
- [3] C. T-C. Nguyen, "Micromechanical Resonators for Oscillators and Filters", Proceedings of the 1995 IEEE International Ultrasonics Symposium, Seattle, WA, pp. 489-499, Nov. 7-10 (1995).
- [4] K. Wang, A-C Wong, and C. T.-C. Nguyen, "VHF Free-Free Beam High-Q Micromechanical Resonators", IEEE J. Microelectromech. Sys., 9, No. 3, pp. 347-360 (2000).
- [5] L. -J. Yang, T. -W. Huang, and P. -Z. Chang, "CMOS Microelectromechanical bandpass filter", Sensors and Actuators A, 90, pp. 148-152 (2001).
- [6] C. T.-C. Nguyen, L. P. B. Katehi and G. M. Rebeiz, "Micromachined devices for wirell communications", Proc. IEEE, 86, pp. 1756-1768 (1998).
- [7] H. Nathanson, W. E. Newell, R. A. Wickstrom, and J. R. Davis Jr., "The Resonant Gate Transistor", IEEE Trans. Electron Devices, 14, pp.117-133 (1967).

- [8] C. T.-C. Nguyen, and R. T. Howe, "An integrated CMOS Micromechanical Resonator High-Q Oscillator", IEEE Journal Of Solid-State Circuits, 34, No. 4, pp. 440-455 (1999).
- [9] K. Ken Chin, and R. B. Marcus, "Field emitter tips for vacuum microelectronics devices", J. Vac. Sci. Technol. B, 8, No.4, pp.3586-3590 (1990).
- [10] N. E. Mcgruer, K. Warner, P. Singhal, J. J. Gu, and C. Chan, "Oxidation-Sharpended Gated Field Emitter Array Process", IEEE Trans. Electron Devices, 38, No. 10, pp.2389-2391 (1991).
- [11] Z. Huang, N. E. McGruer, and K. Warner "200nm Gated Field Emitters", IEEE Electron Device Lett., 14, No. 3, pp.121-122 (1993).
- [12] H. I. Liu, D. K. Biegelsen, N. M. Johnson, F. A. Ponce, and R. F. W. Pease, "Self-limiting oxidation for fabricating sub-5nm silicon nanowires", Appl. Phys. Letters, 64, No. 11, pp. 1383-1385 (1994).
- [13] S. Halyo Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, France, 2002
- [14] Y. Rollet Micromanipulations par adhesion : modélisations dynamiques et experimentations Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, France, 2000.
- [15] E. R. Brown, RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 46 11 1998, pp. 1868-1879.
- [16] L. Buchaillot, N. Rolland-Haese, P.-A. Rolland, Reliability approach in the design of RF microswitches, Proceeding of the European Microelectronics and Packaging Conference, pp. 118-119, Strasbourg, France, 30 May-1 June, 2001

III. Etude des mécanismes de défaillance des micro-actionneurs

Vincent Agache¹ — Olivier Millet²

¹*Thèse soutenue en Octobre 2003*

²*Thèse soutenue en Décembre 2003*

ABSTRACT: This chapter presents recent experimental evidence of stiffness evolution under cyclic loading. This is part of a MEMS reliability study aiming at the modelling of the fatigue phenomenon. Dynamic response of polycrystalline structural layers during operation has been studied by using benches based on M-Test. Clamped-clamped beams have been designed and fabricated in order to serve as sample to which elementary bending solicitations have been applied. Next, cyclic actuation has been achieved and two different characterization methods have been used: pull-in voltage measurement and mechanical determination of the stiffness via the use of an Atomic Force Microscope. Then, a description of the fatigue phenomenon is proposed and, from experimental results, a predictive modelling has been developed. This phenomenological modelling allows predicting the evolution of clamped-clamped beam stiffness vs. the number of functioning cycles. Such methodology, "Reliability Aided Design" (RAD) could be applied to other couples "material-structure" leading to think already at the MEMS design stage in term of reliability.

RÉSUMÉ : Ce chapitre présente les résultats récemment obtenus par Olivier Millet sur l'évolution de la raideur de microstructures soumises à un chargement cyclique. Il s'agit d'une partie de l'étude transversale des mécanismes de défaillance des microsystèmes destinée à la modélisation du phénomène de fatigue dans les microstructures. Des échantillons de test in situ ont été conçus et l'évolution de leur raideur a été scrutée au cours d'un essai de fatigue au moyen d'une part, de la mesure de la tension de pull in, et d'autre part à l'aide d'un AFM. Une description du phénomène de fatigue a été proposée, et à partir des résultats expérimentaux, un modèle a été développé. Ce modèle pourrait être utile lors de la phase de conception de microstructures afin d'améliorer leur durée de vie.

KEY WORDS: in situ Testing, Stiffness, Reliability, Lifetime.

MOTS-CLÉS: Test in situ, Raideur, Fiabilité, Durée de vie.

III.1. Introduction

Lors d'une mission, effectuée aux Etats-Unis en mai 2000, portant sur la conjoncture de la recherche sur les microsystèmes et la diffusion de celle-ci dans les milieux industriels, le thème de la fiabilité a été régulièrement abordé avec nos interlocuteurs, qu'ils soient du monde "industriel" ou "académique". Tous sauf un, Gabriel Rebeiz de l'Université du Michigan à Ann Arbor, ont répondu qu'il s'agissait là d'une préoccupation majeure et certains laboratoires, le MicroSystems Laboratory de Cargenie Mellon University à Pittsburgh par exemple, avaient déjà débuté des études spécifiques sur le sujet. En juin 2003, lors de la conférence IEEE Transducers à Boston, de nombreux laboratoires se disent impliqués dans la recherche sur la fiabilité des microsystèmes. Sandia National Laboratories à Albuquerque considère ce thème comme indissociable de la réalisation du microdispositif. Gabriel Rebeiz, invité à parler des RF MEMS lors de cette conférence, a confié à l'auditoire "qu'en dehors de recherches sur la fiabilité des micro-interrupteurs MEMS", il ne voyait "plus grand chose à faire au niveau du composant !" Au-delà de l'anecdote, le point de vue du concepteur de circuit qu'il est, renseigne sur la difficulté qu'il y a à intégrer plusieurs microdispositifs dans un système, et de garantir que la fonction soit convenablement remplie.

A la fin de l'année 2000, nous avons entrepris des recherches sur la fiabilité des microsystèmes. Il s'agissait du sujet de thèse d'Olivier Millet, et d'une part significative de celle de Vincent Agache, mais on peut dire que tous les doctorants du groupe ont été ou sont impliqués dans cette thématique.

III.2. Motivations et contexte

Des articles traitant de la fiabilité ont récemment fait leur apparition dans la littérature scientifique consacrée aux microsystèmes. On peut se demander ce qui a motivé ce soudain intérêt : une manière "à la mode" de parler de la "démodée" caractérisation, l'intérêt des applicateurs finaux industriels pour les composants microsystèmes, ou une tout autre raison ? Dans cette section, quelques pistes sont explorées pour tenter de répondre à cette question, ou tout le moins, pour trouver une réponse, même partielle, à ce phénomène "médiatico-scientifique".

Si l'on feuillette les premières publications datant du début des années 90, il en ressort que des sujets très spécifiques sont abordés, significatifs des soucis scientifiques quotidiens des chercheurs au sujet de la conception et de la fabrication des microsystèmes. Elles traitaient de l'usure, de la friction statique (stiction), des contraintes résiduelles et trouvaient un vaste champ d'application dans tous les microdispositifs. A cette époque là, les chercheurs impliqués dans le domaine scientifique émergent que sont les microsystèmes sont des électroniciens, des physiciens, des spécialistes des matériaux, et ils publient leurs travaux dans les journaux de leur communauté scientifique. Qui plus est, à ce moment là, très peu de journaux "microsystèmes" existent.

A la fin des années 90, la situation est tout autre, la plupart des chercheurs impliqués ont une expérience dans ce domaine avec, en plus, une formation dans une autre discipline scientifique.

De nos jours, la situation évolue encore dans le sens où les chercheurs travaillant au niveau du système s'intéressent au domaine des microsystèmes. Ils viennent de sociétés privées ou d'institutions académiques. Leur demande va vers l'intégration des dispositifs microsystèmes pour créer de nouvelles fonctions ou améliorer les performances globales de systèmes existants en termes de consommation, de capacité de miniaturisation, etc... Pour y parvenir, ils ont souvent besoin de plusieurs composants microsystèmes, parfois plus d'une dizaine, fonctionnant simultanément pendant longtemps, et cela juste pour démontrer la faisabilité de leur système. Et c'est ce qui fait toute la différence !

En effet, la démonstration qu'un microdispositif unique fonctionne bien requiert une étude approfondie de ses matériaux constitutifs, des conditions environnementales dans lesquelles il est censé évoluer, étude à laquelle il faut ajouter des travaux de modélisations. Si l'expérience est reproductible à l'échelle du composant élémentaire cela peut suffire. Mais pour démontrer qu'un système, incorporant plusieurs microsystèmes, fonctionne bien demande beaucoup plus d'efforts expérimentaux, des tests de longue durée pour chaque élément à intégrer, ainsi que des caractérisations couplées pour analyser les possibles interférences entre microdispositifs. Le problème est de définir des paramètres tels que le "Mean Time Between Failure" (MTBF), le "Mean Time To Failure" (MTTF), la durée de vie et le type de spécifications requises pour n'importe quel composant. Que ce soit pour un produit microsystème industriel, un véhicule de test de laboratoire ou quoi que ce soit d'autre, le niveau "système" requiert des microsystèmes fiables.

Par conséquent, pour résumer cette première partie des motivations, on peut écrire que n'importe quelle application au niveau système intégrant des microsystèmes nécessite une étude de la fiabilité. Les

caractérisations faites au début des années 90 sont encore très utiles et vraiment pas "démodées", mais elles doivent être complétées par des tests de longue durée, *e.g.*, des procédures de fatigue et de vieillissement effectuées dans un environnement contrôlé.

Que le concepteur souhaite réaliser un microsystème pour l'optique ou pour les télécommunication fait une différence et détermine le protocole expérimental à suivre : alors que le premier nécessite des surfaces de miroir lisses et de très bons alignements ; le dernier se focalise sur la capacité à conduire la puissance hyperfréquence, la dissipation de chaleur. En revanche, les caractéristiques en transmission, les pertes, la consommation de puissance, et les considérations sur la durée de vie sont communes aux deux types de dispositif.

Cette analyse démontre qu'il y a différentes manières d'aborder la fiabilité des microsystèmes. Concernant une application spécifique, MOEMS, RF MEMS, BioMEMS ou autre, il est intéressant d'améliorer ses performances en faisant progresser un paramètre qui peut être respectivement la rugosité, l'usure ou la contamination. Si maintenant l'on considère les microsystèmes comme un assemblage de microstructures, telles que des poutres ou des membranes, soumises à des sollicitations mécaniques simples ou à une combinaison de ces sollicitations simples, il est possible à travers des protocoles expérimentaux appropriés, d'extraire des modèles "génériques". "Générique" signifiant applicable à une grande variété de microsystèmes.

Cette dernière approche a été retenue à l'IEMN afin d'améliorer les connaissances sur les mécanismes d'endommagement des microstructures soumises à des chargements cyclique..

Dans les matériaux massifs, il est généralement admis que les chargements cycliques induisent des dommages à travers un procédé de dislocation. C'est-à-dire qu'un réseau de dislocations se crée selon un processus de nucléation dans le matériau et elles se déplacent tant que leur densité reste en dessous d'un seuil qui, lorsqu'il est atteint, conduit à leur blocage mutuel. Connally et Brown ont montré que le phénomène de fatigue endommage des microstructures faites de silicium monocristallin [1, 2]. Dans le cas des matériaux polycristallins fragiles, les mécanismes d'endommagement sont différents, en partie à cause de la plus grande mobilité des dislocations à basse température, facilitant l'observation des défaillances. Il est ainsi établi que le polysilicium subit des dommages liés à la fatigue dans un environnement ordinaire (air ambiant) [3, 4]. Il a aussi été démontré que l'humidité favorisait l'apparition de microfissures sous chargement cyclique [5]. L'influence de l'oxyde natif a été étudiée par Muhlstein *et al.* [6-8] et Allameh *et al.* [4]. Plus récemment, des structures en peigne inter-digité ont été soumises à des chargements cycliques en compression et en tension, conduisant à la conclusion que la compression induit plus de dommages dans les structures en silicium [9]. Aux Sandia National Laboratories, des travaux ont porté sur la durée de vie de micromoteurs fabriqués avec plusieurs niveaux de polysilicium, et sur l'influence de différentes conditions environnementales (vibrations, humidité, etc.) sur leur probabilité de défaillance [10-13]. Avec l'étude de ces micromoteurs, on se rapproche du type de structures de test *in situ*, du M-test développé par Senturia [14, 15], et de structures de caractérisation de Najafi [16, 17].

Ce concept, basé sur la sollicitation de microbancs de test *in situ*, est celle qui a été retenue à l'IEMN pour étudier les mécanismes de défaillance, elle est développée dans les sections suivantes.

III.3. Bancs de test *in situ*

III.3.1. Structures de test

Chaque déplacement génère une combinaison de sollicitations mécaniques élémentaires (flexion, traction, torsion) ; dans le cas de microstructures fabriquées par micro-usinage de surface, la contrainte de flexion est prépondérante.

Afin d'étudier les mécanismes d'endommagement, nous avons scruté l'évolution de caractéristiques de microstructures de test, telles que la raideur ou la rugosité en fonction du nombre de cycles, lorsqu'elles sont soumises à des contraintes induites par une sollicitation de flexion. Le concept choisi, celui des M-tests de Senturia, est basé sur un réseau de structures de test de dimensions variables, fabriquées par usinage de surface. Il est adapté à l'étude de la fatigue pour plusieurs raisons : les sollicitations de flexion induisent de grands déplacements en ne requérant que des forces de faible intensité. De plus, les microsystèmes sont souvent un

assemblage de microstructures élémentaires et les M-tests formés de poutres ou de membranes peuvent donc être considérés comme des dispositifs de caractérisation représentatifs.

Avant d'entreprendre l'étude en fatigue, il est nécessaire de déterminer avec précision les conditions initiales de l'expérience, c'est-à-dire que les propriétés des matériaux constitutifs, leurs caractéristiques géométriques de forme et de surface doivent être mesurées et diverses méthodes ont été employées pour y parvenir, Elles sont succinctement décrites par la suite ainsi que les résultats obtenus.

III.3.2. Moyens de caractérisation

III.3.2.1 Microscope à force atomique

Dans le cadre de la caractérisation de microdispositifs mécaniques, le microscope à force atomique est utilisé pour l'extraction de deux types d'informations : l'état de surface et la détermination de la raideur des microstructures en analysant la déformée.

L'imagerie de surface (figure III.1(a)) permet de déterminer la rugosité d'un matériau et d'obtenir des renseignements sur la taille des grains dans le cas d'un matériau polycristallin tel que le polysilicium. Ainsi, des phénomènes tels que la densification, la recristallisation ou l'apparition de microfissures peuvent être détectés.

Les mesures mécaniques de la raideur d'une structure consistent à faire fléchir l'échantillon à l'aide de la pointe AFM. Le procédé de mesure est montré sur la figure III.1(b) [18, 19]. En raison des petites déformations qui peuvent être appliquées par le microscope AFM, le comportement de l'échantillon et de la pointe reste dans le domaine élastique, et peut être simplement décrit comme la combinaison de deux ressorts en série. Connaissant la raideur de la pointe TESP K_p (40 N/m), la raideur de la structure k est directement obtenue à partir de la pente de la déformation curviligne de la pointe δ en approche en fonction du déplacement d de la pointe TESP. Selon l'échantillon, différents types de pointes TESP (ayant différentes raideurs, 20-100 N/m) doivent être utilisés pour parvenir à des conditions de mesure optimales. Par ailleurs, le module d'Young du matériau est facilement obtenu à partir de la valeur de la raideur.

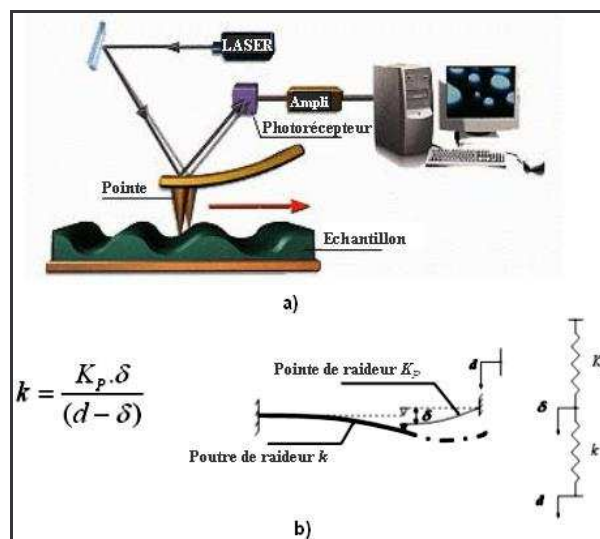


Figure III.1. Principe de fonctionnement du microscope AFM. (a) Utilisation dans le cadre d'imagerie de surface. (b) Détermination de la raideur d'une structure à partir de la déformation et du déplacement de la pointe de l'AFM en contact avec la structure.

III.3.2.2. Banc de vibrométrie

L'utilisation d'un banc de vibrométrie permet de déterminer la fréquence de résonance d'une structure mécanique. Lors de la caractérisation, le substrat sur lequel se trouve l'échantillon est collé à une céramique piézo-électrique. L'excitation de la céramique piézoélectrique - et donc du substrat - est contrôlée par un analyseur de réseau. Le module d'Young peut être calculé à partir de la valeur de la fréquence de résonance de la structure.

Deux méthodes de détection des vibrations ont été mises en œuvre à l'IEMN : la méthode OBD (optical beam deflection), et la microscopie interférométrique. La première est non destructive et exploite la déflexion d'un faisceau laser. Ainsi, un faisceau laser est focalisé sur l'échantillon par le biais d'un objectif de microscope et le faisceau réfléchi atteint une photodiode quatre cadrans servant de détecteur de vibrations ; le signal sortant est celui qui est comparé à la fréquence d'excitation (figure III.2). Cette méthode est applicable dans le cadre des structures de test car l'état de surface et la nature des matériaux utilisés (polysilicium, or) offrent un niveau de réflexion optique suffisant [20].

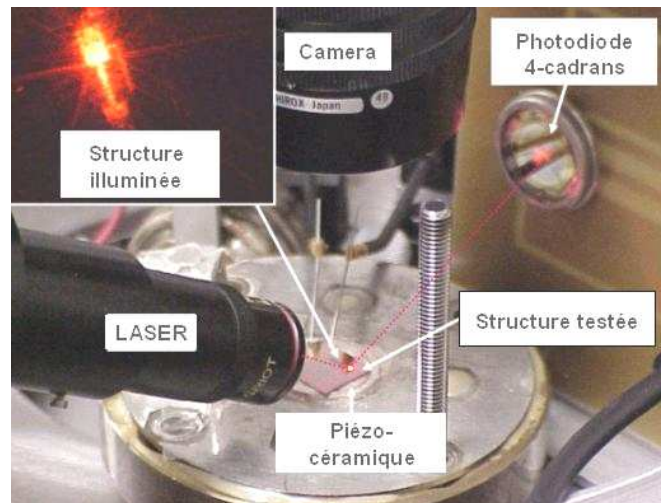


Figure III.2. Banc de caractérisation optique (OBD) pour la détection non destructive des larges amplitudes de vibration lorsque la structure illuminée est en résonance.

La deuxième méthode de détection est l'utilisation du système d'imagerie Zoomsurf 3D fabriqué par Fogale NanotechTM, combiné à un interféromètre. Cet appareillage est utilisé dans les applications de profilométrie statique et dynamique et permet la reconstruction tridimensionnelle de la surface de tous types de matériaux [21, 22]. Ainsi, cet appareil offre non seulement la possibilité d'obtenir la topographie exacte des microstructures en mode statique et dynamique, mais aussi d'observer en mode vibratoire sous lumière stroboscopique l'évolution des franges d'interférence, menant à l'identification des modes de résonance de la structure. Cette technique est non destructive.

III.3.2.3. Les mesures électriques

Les mesures électriques effectuées sont de deux types : mesure de la tension d'effondrement (*pull in*) et mesure de la résistance électrique de la structure. La première mesure aboutit à la détermination du module d'Young des structures et la seconde donne une indication sur la résistance électrique de la structure et la résistivité électrique du matériau structurel.

Pour la mesure de la tension d'effondrement [23-25], une électrode enterrée se trouve sous la structure et un film diélectrique est présent entre les deux électrodes (électrode enterrée et la structure polarisée), afin d'éviter les court-circuits lors de l'effondrement (figure III.3(a)). Ainsi, la détection de l'effondrement est obtenue par une observation visuelle directe, confortée par la variation de la capacité électrode enterrée/structure polarisée. La tension d'effondrement est mesurée sur une station sous pointes, où une rampe de tension est lentement appliquée entre les deux électrodes jusqu'à la détection de l'effondrement. Le module d'Young peut être déduit de la valeur de la tension d'effondrement.

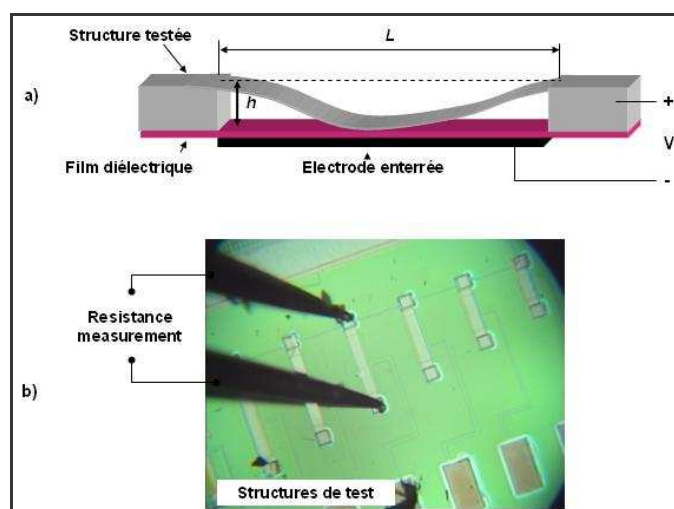


Figure III.3. Mesures électriques : (a) Détermination de la tension de pull-in. (b) Mesure de la résistance électrique aux bornes des structures de test via l'utilisation de micropointes.

Les mesures de l'évolution de la résistance aux bornes des structures de test consistent simplement à poser deux pointes aux extrémités de la structure (au niveau des contacts) et à les relier à un ohmmètre (figure III.3(b)). Les emplacements nécessaires à la réalisation de mesures "quatre pointes" n'ont pas été prévus lors de la phase de conception. Cette mesure est utile pour détecter l'apparition de fissures ou de dislocations dans la structure mobile lors de l'actionnement cyclique.

III.3.2.4. La microscopie optique et électronique

Dans le cadre de l'étude des microsystèmes, les microscopes optiques et électroniques permettent d'obtenir, comme dans le cadre des mesures interférométriques, la topographie des dispositifs et l'état de surface des matériaux.

L'avantage de la microscopie électronique est qu'il est possible, avec l'inclinaison du substrat et la finesse du faisceau, d'examiner les flancs des structures, les zones en dessous des structures (substrat/structure), les zones entre deux niveaux structurel et des structures flambées hors du plan ; ce type d'observations n'est pas disponible à l'aide des mesures par interférométrie en raison des conditions imposées (substrat non incliné, structures faiblement flambées, etc.) par la faible distance focale. On peut ainsi mettre en évidence des phénomènes tels que l'existence de débris sous une structure, l'agglomérat de polymères à certains endroits ou des fissures initiales se trouvant sur les flancs des structures.

Le microscope optique représente non seulement un instrument de contrôle sans cesse sollicité lors de la phase de fabrication, mais aussi le moyen d'accéder grâce aux variations de couleurs à des phénomènes d'endommagement que les autres méthodes d'analyse ne peuvent détecter. Ainsi, après la libération des structures, une pénétration de HF au niveau des électrodes enterrées dans le cas d'une technologie 'haute température' peut uniquement être détectée par les changements de couleur dans la visualisation des matériaux diélectriques gravés. De même, les très fins amas de résine dans le procédé de fabrication "basse température" ont été mis en évidence par le léger contraste des couleurs.

III.3.3. Caractérisations initiales des structures de test *in situ*

III.3.3.1. Etude de la topographie

Tout d'abord, les observations optiques (interféromètre et à balayage électronique) ont montré que les structures de type poutre (encastrée-libre ou bi-encastrée) en polysilicium dopé par diffusion et en or ne présentent aucune déformation hors du plan, ce qui laisse supposer que les matériaux sont en tension. Concernant les mêmes structures en polysilicium dopé *in situ*, une flèche initiale non négligeable est détectée et l'observation par interférométrie fait apparaître un état de flambement du troisième ordre ; ce fait implique que le polysilicium dopé *in situ* est en compression (figure III.4(a)), fortement contraint, et donc non caractérisable par la tension d'effondrement (détermination en mode statique du module d'Young). Par contre, les mêmes outils de caractérisation montrent que les structures en polysilicium dopé *in situ* présentant des nervures longitudinales ne

sont que très légèrement en état de flambement (figure III.4(b)), permettant ainsi une caractérisation en mode dynamique de ce matériau.

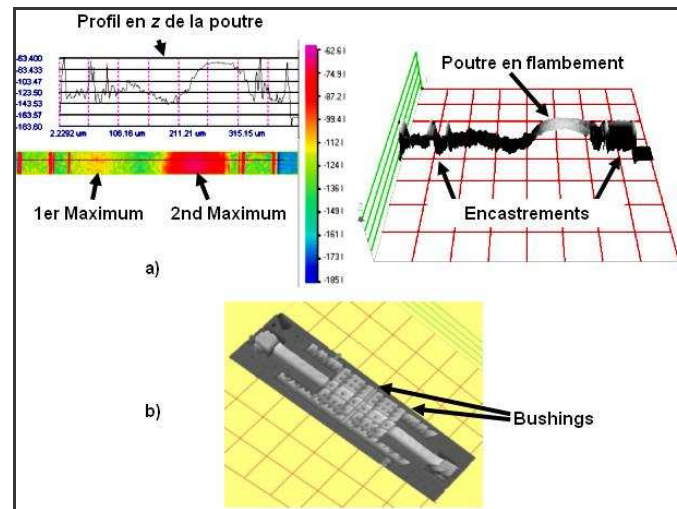


Figure III.4. Observation des topographies de structures de tests *in situ* par interférométrie : (a) poutre bi-encastree sans bushings de 300 μm de longueur en polysilicium dopé *in situ* se trouvant en état de flambement. (b) Poutre bi-encastree avec bushings de 440 μm de longueur en polysilicium dopé *in situ* ne présentant aucun flambement.

Ensuite, la visualisation de la topographie des structures a permis de détecter les bancs de test *in situ* détériorés avant tout actionnement. Les structures détectées sont : les dispositifs contaminés (présence d'un corps étranger – débris de matériau structurel- entre le niveau libéré et le substrat), les structures collées sur le substrat, les bancs de test détruits (rupture d'une poutre lors de l'étape de libération des structures) et les structures présentant un défaut initial (indentation ou fissure initiale) (figure III.5).

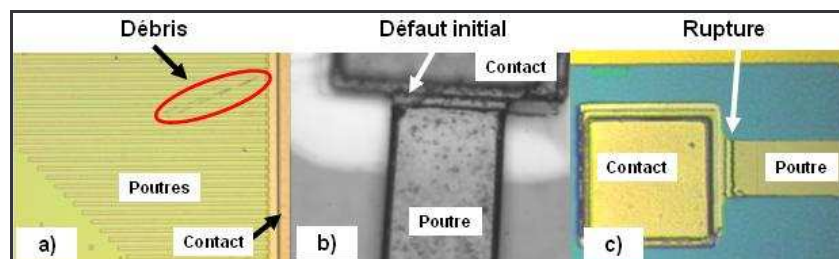


Figure III.5. Bancs de test *in situ* détériorés. (a) 'Serpentin' de polysilicium glissé sous un ensemble de poutres utilisées pour l'étude de la stiction. (b) Défaut initial proche de l'encastrement sur une structure en polysilicium. (c) Rupture d'une poutre en or durant l'étape de libération des structures en milieu liquide.

Hormis les structures présentant une fissure initiale, les bancs de tests détériorés ne peuvent être exploités lors de la phase de caractérisation. Parmi les bancs de test endommagés, seules les structures présentant un défaut initial seront exploitées lors de la phase de caractérisation. Celles-ci permettront d'étudier la propagation d'une fissure lors d'un l'actionnement cyclique.

Enfin, les observations aux microscopes optiques valident les optimisations faites sur le procédé de fabrication "haute température" des structures de tests (diminution des contraintes résiduelles du nitrure de silicium, encapsulation des électrodes enterrées dans du nitrure de silicium).

III.3.3.2. Détermination du module d'Young et de la qualité structurelle

Avec les méthodes décrites ci-dessus, un exemple de caractérisation est ici donné pour de l'or pulvérisé et du polysilicium dopé par diffusion. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.1. La caractérisation a été faite sur des structures bi-encastrees.

	Méthode mécanique AFM	Méthode de vibrométrie	Méthode de la tension d'effondrement	Bibliographie [23, 26]

Polysilicium dopé par diffusion	198 GPa	200 GPa	203 GPa	170 GPa
Or		87,5 GPa	95,5 GPa	80 GPa

Tableau III.1. Estimation du module d'Young du polysilicium dopé par diffusion et de l'or par différents moyens de caractérisation : méthode mécanique AFM, méthode de vibrométrie, méthode de la tension d'effondrement.

Pour les simulations, le module d'Young du polysilicium dopé par diffusion est fixé à 200 GPa, et à 91,5 GPa pour l'or. Les valeurs expérimentales obtenues sont supérieures à celles de la littérature [23, 26], cette différence peut s'expliquer par les conditions spécifiques aux équipements de l'IEMN lors dépôt des matériaux, et par la contrainte résiduelle en tension.

Les observations au microscope à balayage électronique du polysilicium dopé par diffusion permettent d'observer une taille de grain moyenne de 0,2-0,5 μm de diamètre (figure III.6(a)). Cette faible taille de grain induit une concentration volumique de grains accrue, donc une rigidité du matériau plus importante et une bonne qualité structurale. De la même manière, la qualité structurale de l'or est homogène (taille de grain 0,1-0,3 μm) comme le montre la figure III.6(b). Il est à spécifier qu'en plus d'une augmentation de la rigidité, une bonne qualité structurale est synonyme d'une meilleure dureté du matériau, d'une rugosité plus faible et d'une atténuation de l'intensité des forces de capillarité.

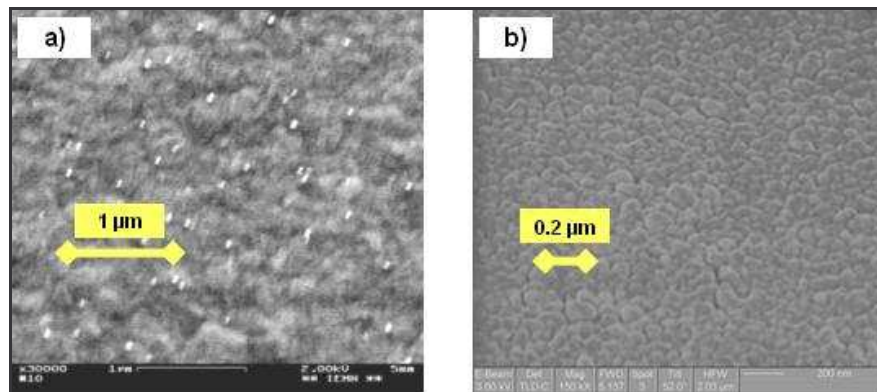


Figure III.6. Observation au microscope MEB de l'état de surface de matériaux structuraux : (a) Grains de polysilicium dopé par diffusion (diamètre de grain 0,2-0,5 μm). (b) Grains d'or déposé par pulvérisation (diamètre de grain 0,1-0,3 μm).

III.3.3.3. Résistivité des matériaux

Les mesures de résistivité des différents matériaux étudiés sont reportées dans le tableau III.2. Ces résultats expérimentaux indiquent des valeurs de résistance (pour des structures de type poutre bi-encastée de 200 μm de long) compris entre 10 Ω à 10 k Ω .

	Or	Polysilicium dopé par diffusion	Polysilicium dopé <i>in situ</i>
Résistivité	9 $\Omega/\square$	1000 $\Omega/\square$	18 $\Omega/\square$
Concentration en P ⁺ (calculée par rapport à la mobilité substrat)		3,10 ¹⁶ at/cm ³	4,10 ¹⁹ at/cm ³

Tableau III.2. Résistivité des matériaux structuraux (polysilicium dopé par diffusion, polysilicium dopé *in situ* et or).

III.3.3.4. Taux d'humidité relative

L'influence du taux d'humidité relative (RH) sur le vieillissement des microsystèmes a été étudiée par les laboratoires de Sandia, son effet peut être résumé en une augmentation de l'apparition de débris et de stagnation de ces derniers pour RH supérieur à 75%. Une caractérisation des poutres encastrée-libre en polysilicium dopé par diffusion est utilisée pour déterminer le taux d'humidité dans la salle où les tests cycliques seront réalisés.

Les poutres encastrées-libres ont été libérées et séchées en employant du CO₂ supercritique ; les structures sont alors uniquement soumises aux forces de Van Der Walls. Par la suite, les structures de test (poutres encastrées-libres) ont été introduites dans la salle de test pendant 30 min, puis observées au microscope à balayage électronique et optique (figure III.7).

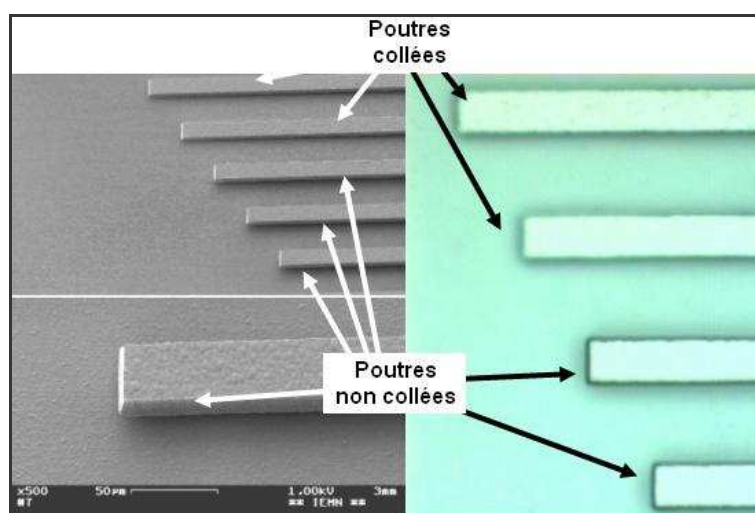


Figure III.7. Observations au microscope optique et MEB des poutres en polysilicium dopé par diffusion, collées ou non au substrat par le phénomène de stiction.

Les poutres sont collées pour une longueur supérieure ou égale 540 μm . À partir de la formulation des forces de Van Der Walls, de la géométrie exacte de la poutre et du module d'Young du matériau, il est possible de remonter à la valeur de RH. Concernant la géométrie de la poutre, son épaisseur est égale à 2 μm et la distance structure/substrat est 1,97 μm . Pour un module d'Young de 200 GPa, le taux d'humidité est déterminé à 63 % à 25°C, qui est en deçà de la valeur critique (75 %) et valide les conditions d'utilisation de micromécanismes dans la salle de test utilisée à l'IEMN.

III.3.4. Etude dynamique des structures de test

Pour mener à bien la caractérisation des structures en régime dynamique, un bâti original a été conçu [27, 28]. Il est composé de deux enceintes dans lesquelles un groupe de pompage permet de réguler la pression de 10^{-6} à 760 Torr et la température entre -100° et 200°C (figure III.8).

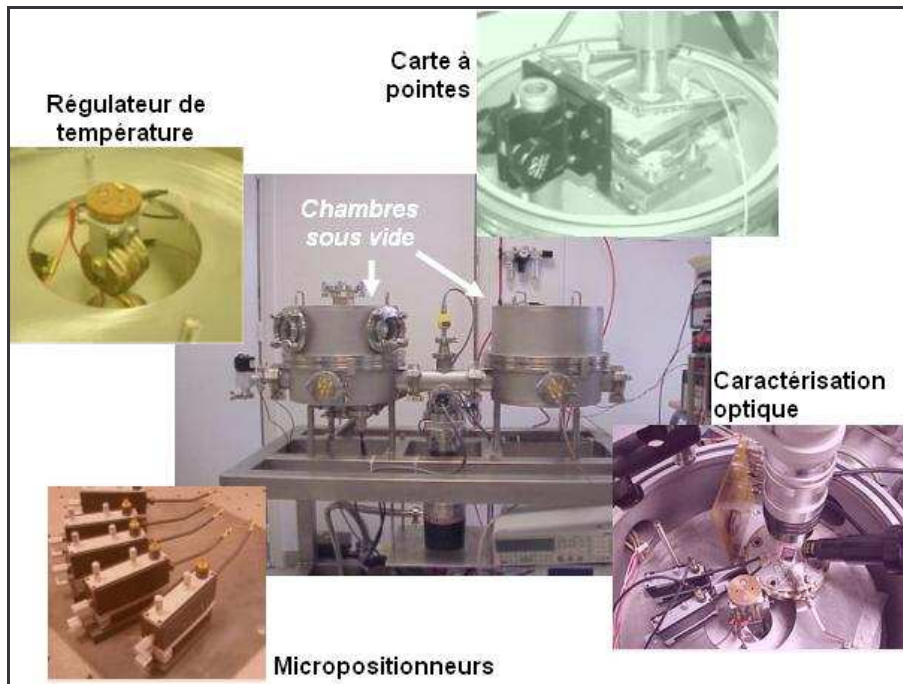


Figure III.8. Bâti de test sous vide avec deux chambres sous vide, un régulateur de température, des micropositionneurs et une carte à pointe. Des hublots sont configurés pour une caractérisation optique.

Type de mesure Moyen de contact	Mesures optiques : ¹ Faisceau Laser (OBD) ² Caméra optique	Température variable	Mesures électriques (Résistance avec micromanipulateurs)
PCB	¹ Oui ² Oui	Oui	Oui
Micromanipulateur de pointe	¹ Oui ² Oui	Oui	Oui
Carte à pointe	¹ Non ² Non	Non	Non

Tableau III.3. Type de mesures possibles dans le bâti de test sous vide suivant le type de connexion du microsystème testé.

La compatibilité avec des observations ou des mesures par des moyens optiques est assurée par les hublots dont est muni l'un des couvercles. Le tableau III.3 présente les configurations de test possibles selon le mode d'alimentation du microsystème.

III.3.4.1 Détermination de la raideur

Afin de suivre l'évolution de la raideur des structures de test *in situ*, deux méthodes ont été employées périodiquement lors des essais de fatigue : la mesure de la tension d'effondrement, et la méthode directe exploitant le microscope AFM (cf. figure III.1). Dans les deux cas, des variations peuvent être observées et des points caractéristiques peuvent être relevés, même si l'évolution est sensiblement différente dans chacun des cas. Sur la figure III.9, les valeurs de la tension de *pull in* décroissent alors que, pour les mêmes périodicités dans les relevés, celles du microscope AFM augmentent.

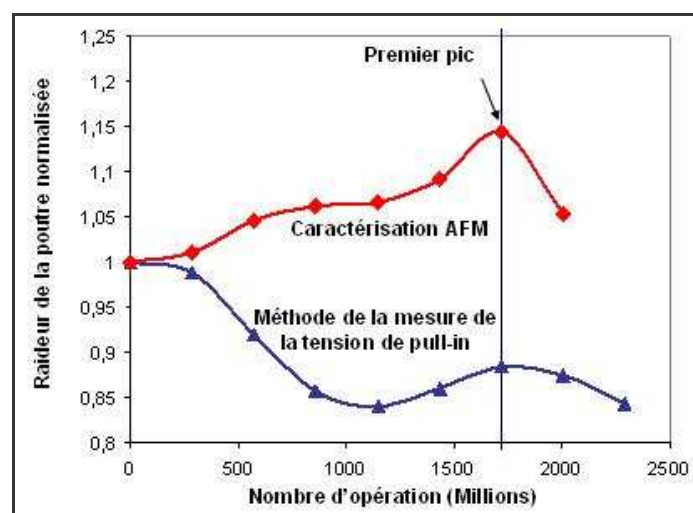


Figure III.9. Evolution de la raideur en fonction du nombre de cycles de fonctionnement, dans le cas de poutres bi-encastées de 200 μm de long soumises à un actionnement cyclique et caractérisées avec une technique électromécanique (mesure de la tension de pull-in) et une technique mécanique (AFM).

Pour les deux courbes de la figure III.9, on observe un pic correspondant au même nombre de cycles. C'est à partir de ce premier maximum que les analyses seront menées, les évolutions différentes en début d'essai peuvent s'expliquer par le fait que le diélectrique qui protège la contre-électrode (mesure de la tension de pull in) piège des charges qui s'accumulent et réduisent la tension d'effondrement. Cet effet n'est pas observable avec l'AFM dans le mode d'utilisation que nous avons choisi.

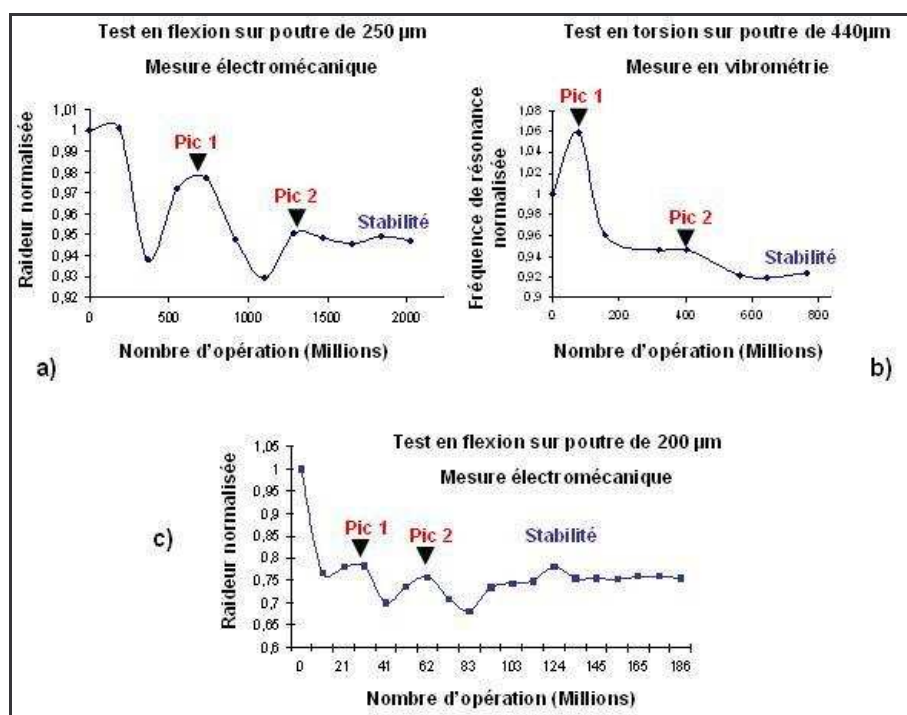


Figure III.10. Evolution des propriétés mécaniques de bancs de test in situ en fonction du nombre de cycle d'actionnement. **(a)** Evolution de la raideur normalisée dans le cas d'une poutre bi-encastée (polysilicium dopé par diffusion) de 250 μm de long, actionnée en flexion et caractérisée par une méthode électromécanique. **(b)** Evolution de la fréquence de résonance normalisée dans le cas d'une poutre (polysilicium dopé in situ) bi-encastée de 440 μm de long avec des plateaux d'actionnement proches des encastremets, actionnée en torsion et caractérisée par une méthode de vibrométrie. **(c)** Evolution de la raideur normalisée dans le cas d'une poutre bi-encastée (or) de 200 μm de long, actionnée en flexion et caractérisée par une méthode électromécanique

Les figures III.10(a-c), qui ont été obtenues pour un nombre de cycles plus important, démontrent que l'évolution de la raideur est indépendante de la longueur des microbancs de test considérés, et qu'elles ont comme caractéristiques principales de présenter deux maximum suivis d'un plateau.

III.3.4.2. Mesure de la variation de la résistance électrique

L'évolution type des mesures de la résistance électrique est donnée sur la III.11. Une première augmentation de la valeur de la résistance est suivie d'un palier auquel succède une seconde élévation avant un autre palier.

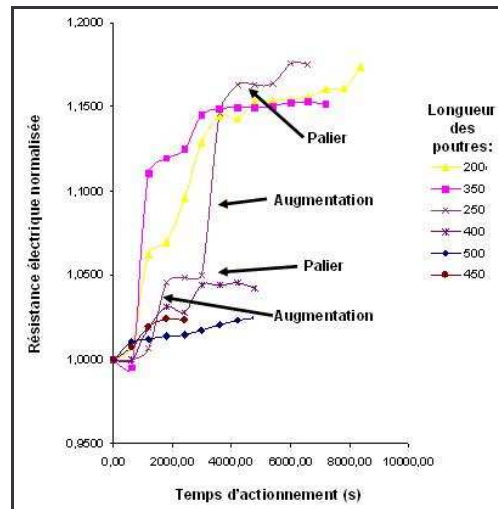


Figure III.11. Evolution de la résistance électrique de poutres bi-encastées sollicitées cycliquement en flexion en fonction du temps d'actionnement.

III.3.4.3. Etude de la topographie des échantillons

Lors des essais de fatigue, des changements d'état de la surface de certains échantillons ont été notés. Ils ont pu être corrélés à la présence ou non d'un "recouvrement de marche" aux extrémités des échantillons (figure III.12). Ce sont des observations faites au microscope AFM qui nous ont confirmé que la rugosité des échantillons était différente au voisinage des encastres, certes lieux où la contrainte exercée lors des essais est maximale, mais aussi lieux où le recouvrement de marche est le plus probable.

La combinaison de ces deux facteurs produit une variation significative de la rugosité alors qu'un seul des deux ne permet pas de le démontrer (figures III.12 et III.13). Une explication a été avancée en corrélant la différence de rugosité à une augmentation de la densité de grains de matériau au voisinage de l'encastrement, mais cette hypothèse n'a pas été validée par une analyse cristallographique fine.

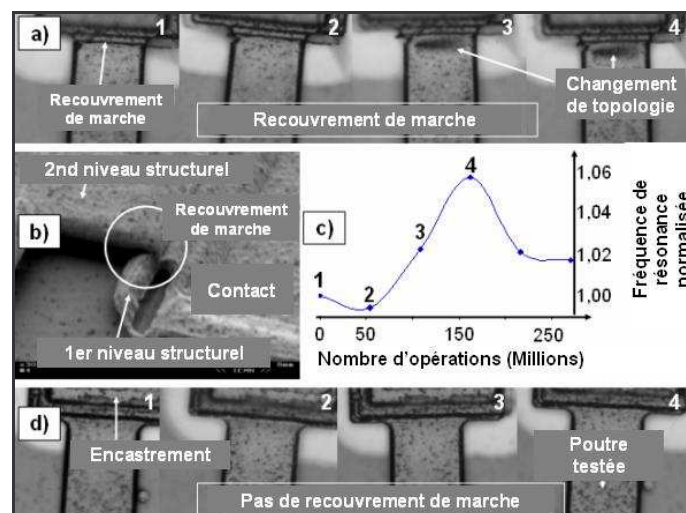


Figure III.12. Évolution de la fréquence de résonance normalisée et de l'aspect visuel d'une poutre en polysilicium dopée in situ, sollicitée en flexion (avec plateau d'actionnement au milieu), en fonction du nombre de cycles de fonctionnement, dans le cas d'une configuration où il y a du recouvrement de marche ou non.

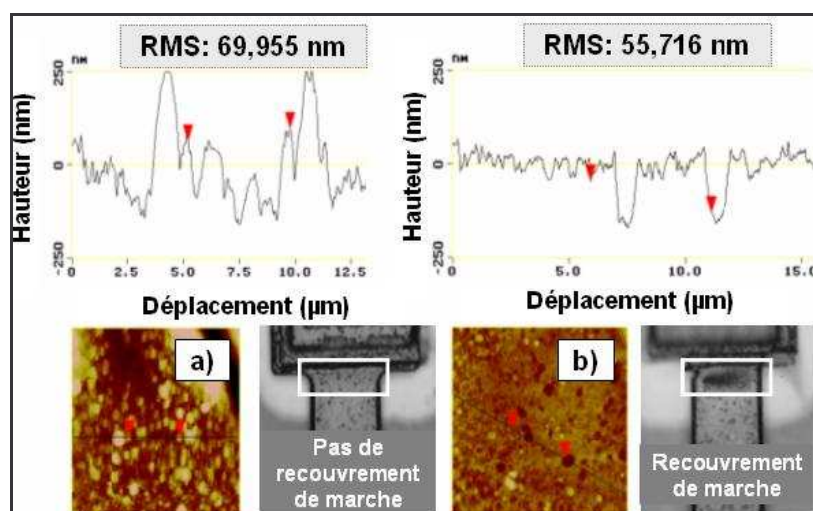


Figure III.13. Imagerie AFM de la topologie de surface après actionnement cyclique d'une poutre bi-encastrée en polysilicium dopé *in situ*, sollicitée en flexion avec un plateau d'actionnement au milieu, dans le cas d'un recouvrement de marche ou non.

III.3.5. Influence des conditions environnementales sur l'endommagement

L'influence des conditions environnementales sur les mécanismes d'endommagement d'une microstructure soumise à un chargement cyclique a été étudiée à l'IEMN. Trois paramètres ont été considérés : la pression ; les vibrations et les chocs thermiques. L'humidité, facteur important de l'accélération de l'endommagement n'a pas encore été étudiée faute de chambre de test permettant de la faire varier.

Concernant l'influence de la pression, deux structures ont été actionnées respectivement à 40 mTorr et à pression atmosphérique. La diminution de la pression implique l'accélération du phénomène de fatigue, *i.e.* le premier pic apparaît plus rapidement. D'autre part, une variation relative réduite à 1% de la rigidité (proportionnelle à la fréquence de résonance) a été observée dans l'air contre une variation de 6% sous vide (figure III.14). L'amortissement étant moins important sous vide, les amplitudes de vibration sont plus importantes et cela génère des contraintes plus élevées au sein du matériau.

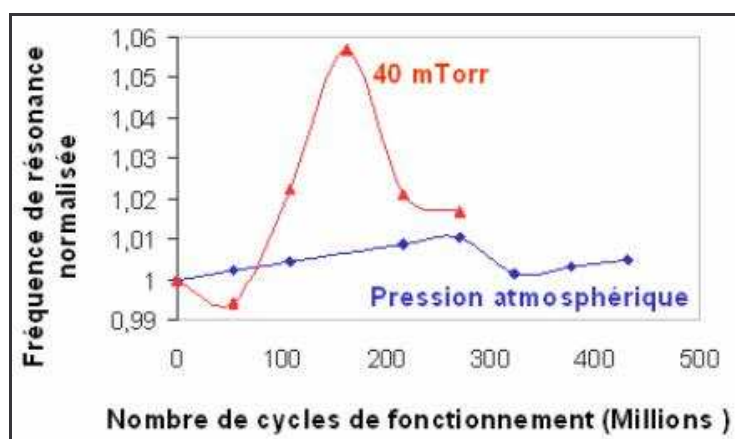


Figure III.14. Evolution de la fréquence de résonance normalisée dans le cas de poutres bi-encastrées de 440 μm de long avec des plateaux d'actionnement proches des encastrement, actionnées en torsion dans l'air ou sous vide et caractérisées par une méthode de vibrométrie.

Les vibrations extérieures sont des phénomènes qui affectent de manière importante la fiabilité des microstructures. Un banc de test *in situ* est collé sur une piézo-céramique et est actionnée par des forces électrostatiques sous vide (40 mTorr) ; durant cet actionnement, un signal d'excitation est appliqué à la piézo-

céramique à une fréquence égale à la fréquence de résonance de la structure testée. Dans ce contexte, l'augmentation de la rigidité est de 7%, en comparaison à 6% sans excitation extérieure (figure III.15).

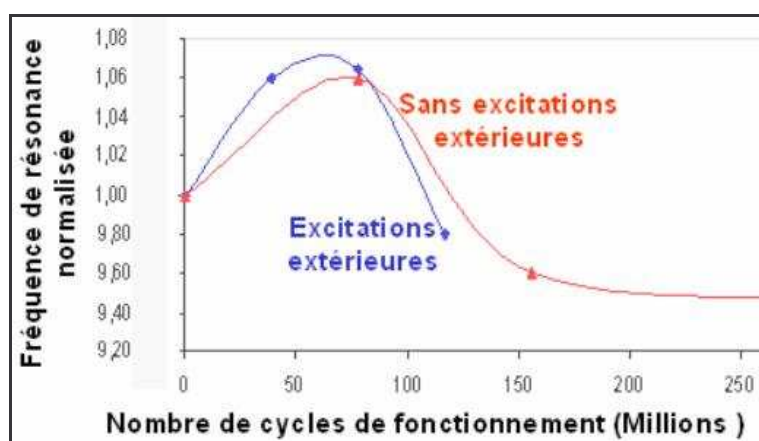


Figure III.15. Evolution de la fréquence de résonance normalisée dans le cas de poutres bi-encastées de 440 μm de long avec des plateaux d'actionnement proches des encastrements, actionnées en torsion, soumises ou non à des vibrations extérieures dont la fréquence d'excitation est égale à la fréquence de résonance des structures de test, et caractérisées par une méthode de vibrométrie.

On observe également une légère accélération du processus de fatigue si des vibrations extérieures sont appliquées.

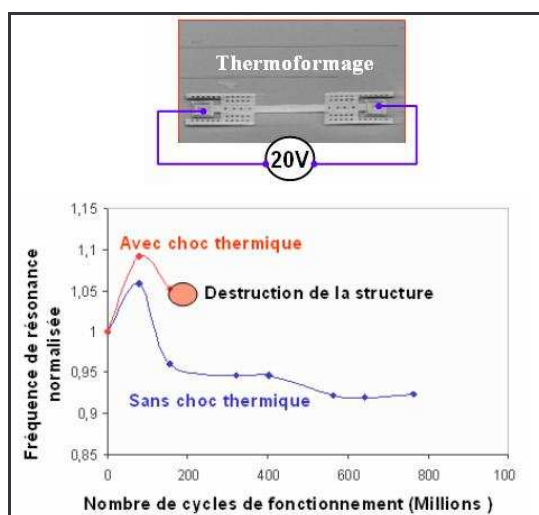


Figure III.16. Evolution de la fréquence de résonance normalisée dans le cas de poutres bi-encastées de 440 μm de long avec des plateaux d'actionnement proches des encastrements, actionnées en torsion, préalablement soumises ou non à un recuit rapide par effet Joule, et caractérisées par une méthode de vibrométrie.

Les effets des chocs thermiques sur le phénomène de fatigue ont été étudiés. Pour les analyser, on applique aux bornes de la structure un potentiel conduisant à un recuit par effet Joule (figure III.16) [29-30]. Ce recuit rapide, réalisé avant l'application de la sollicitation cyclique, peut être considéré comme un choc thermique et les tests de fatigue sont pratiqués sur les structures ainsi traitées. Le résultat est une évolution du phénomène de fatigue qui est aussi rapide que pour une structure non recuite, mais avec une augmentation du maximum de rigidité bien plus important (9% pour une structure recuite) (figure III.16). De plus, la durée de vie de la structure recuite est très réduite.

III.4. Analyse descriptive du phénomène de fatigue

La description du phénomène de fatigue proposée ci-dessous est extraite des résultats des essais qui viennent d'être présentés et en propose une synthèse. Des caractérisations complémentaires seront nécessaires pour l'étayer ou, pourquoi pas, la remettre en question, mais aujourd'hui il s'agit de l'une des premières analyses de ce genre.

En traçant simultanément sur un même graphe l'évolution de la raideur et de la résistance électrique des poutres bi-encastées en fonction du nombre de cycles d'actionnement, on peut observer chronologiquement la présence de deux pics suivis par une phase de stabilité (figure III.17) ; parallèlement, l'évolution de la résistance électrique est composée de deux phases successives de croissance et d'une phase de stabilité (figure III.17). Ainsi, le phénomène de fatigue peut être divisé en cinq phases : une phase d'adaptation, une phase d'apparition de microfissures, une seconde phase d'adaptation, une seconde phase de dégradation et une phase de stabilité (figure III.17).

La phase d'adaptation correspond à l'augmentation de la raideur (7-10%). Cette adaptation est expliquée par la création de microdéformations dues aux contraintes induites par le mouvement, bloquant les microdéplacements par la multiplication des nœuds de dislocation dans les joints de grains du matériau polycristallin (or ou polysilicium), augmentant ainsi la rigidité (figure III.18(b)); la présence de lignes de dislocation est confirmée par la légère augmentation (<5%) de la résistance électrique durant cette phase (figure III.17). Dans la phase suivante, la diminution de la raideur est la conséquence de l'apparition de microfissures facilitée par la présence de lignes de dislocation dans les joints de grains. Pour cette phase, non seulement l'observation de la résistance électrique corrobore l'explication par une seconde croissance de 10-15%, mais aussi les observations AFM montrent des changements de l'état de la surface dans les zones les plus contraintes. Par la suite, bien qu'il y ait encore des variations de la raideur, la résistance électrique reste constante (figure III.17), montrant qu'aucune dislocation significative dans les grains de joints ou microfissure n'apparaît dans la structure. De ces observations, il peut être déduit que la seconde phase d'adaptation correspond au fait que les grains de polysilicium sont comprimés à cause des contraintes cycliques (figure III.18(c)) ; les grains deviennent plus petits et ce phénomène induit une légère augmentation de la raideur (augmentation d'environ 5%).

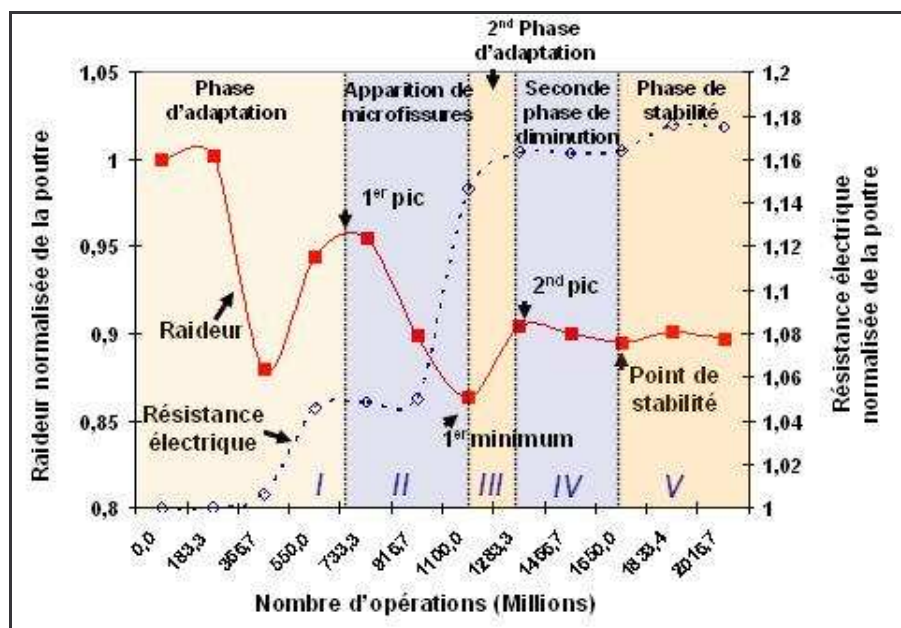


Figure III.17. Evolution de la raideur et de la résistance électrique en fonction du nombre d'opérations dans le cas d'une poutre (en polysilicium dopé par diffusion) de 250 μm de long, soumise à un actionnement cyclique et caractérisées par une méthode électromécanique (mesure de la tension de pull-in).

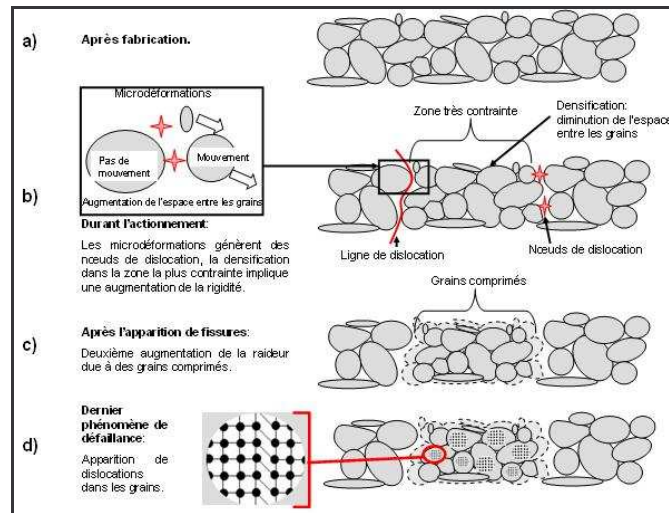


Figure III.18. Mécanismes de défaillance dans un matériau polycristallin sollicité cycliquement. a) Etat du matériau après dépôt (or) ou recuit (polysilicium) ; b) Apparition de dislocations dans les joints de grain et de microfissures dans les lignes de dislocation ; c) Grains comprimés sous l'effet de forces cycliques ; d) Dislocations dans les grains du matériau polycristallin.

La seconde phase de diminution correspond alors à la dernière étape des mécanismes de défaillance, consistant en la création de dislocations à l'intérieur des grains du matériau polycristallin (figure III.18(d)); cela implique une diminution de la rigidité (diminution de la raideur 2-4%) et aucunes conséquences sur la résistance électrique. Finalement, après l'apparition de dislocations dans les joints de grains et dans les grains de polysilicium, aucune dislocation ne peut apparaître dans le matériau polycristallin ; de ce fait, il y a une phase de stabilité.

III.5. Modélisation du phénomène de fatigue

En identifiant les caractéristiques typiques des essais de fatigue pratiqués, un modèle phénoménologique a été développé pour tenter de formaliser le mécanisme d'endommagement de micropoutres en or ou en polysilicium, mais aussi pour disposer d'un outil permettant de simuler, et donc de prévoir, l'évolution des propriétés d'un micro-actionneur soumis à une sollicitation cyclique en flexion.

Pour l'établissement du modèle, ce sont les points déjà mentionnés plus haut qui ont été employés : maximum, minimum et début de la phase de stabilité. L'objectif n'est pas de déterminer la valeur absolue de la raideur d'une structure, mais bien de prévoir pour quel nombre de cycles une phase de l'évolution de la raideur apparaît. C'est-à-dire que l'on va s'attacher à la détermination du nombre de cycles pour lequel la raideur atteint un maximum, plutôt que de tenter de définir avec précision la raideur de la microstructure. En ce sens, il s'agit davantage d'un modèle qualitatif que d'un modèle quantitatif.

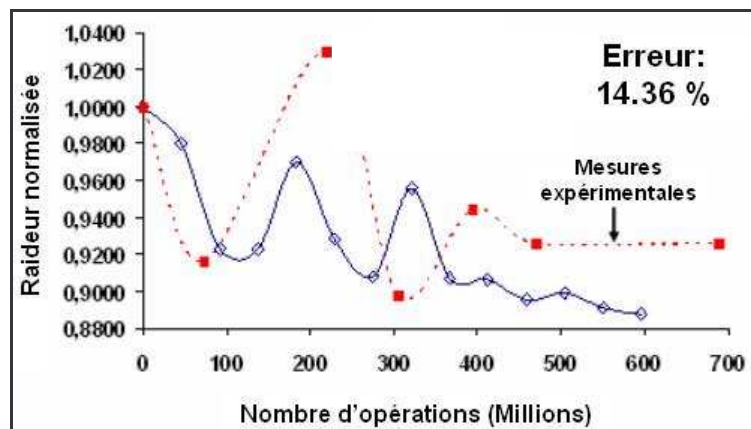


Figure III.19. Comparaison entre le modèle et les valeurs expérimentales concernant l'évolution de la raideur d'une structure bi-encastrée en fonction du nombre de cycles de fonctionnement.

Ce sont les résultats similaires, obtenus en considérant cinq longueurs de poutre différentes (200, 250, 350, 400 et 450 μm), qui ont servi de base à la construction du modèle phénoménologique, et deux autres longueurs (300 et 500 μm) ont permis de le valider. La figure III.19 montre la modélisation de l'évolution de la raideur et les points expérimentaux pour une poutre encastrée-encastrée en silicium polycristallin, l'erreur est d'environ 14% sur le nombre de cycles à considérer pour l'apparition des pics. Le même modèle a été employé pour simuler le comportement en fatigue d'une microstructure en or (figure III.20).

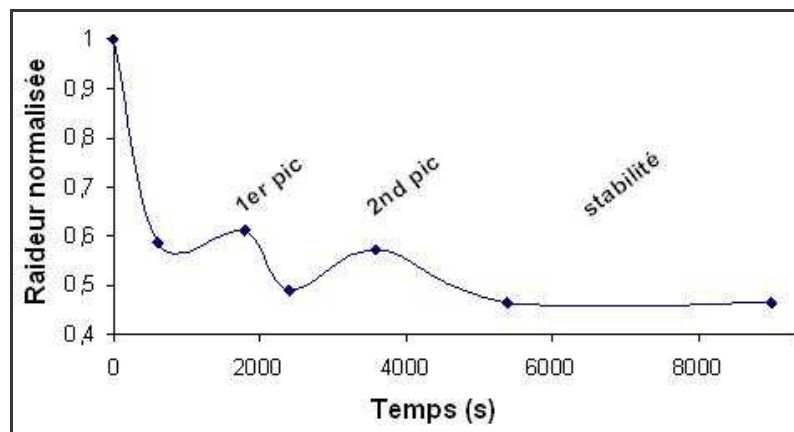


Figure III.20. "Profil initial de fatigue" de l'or, déterminé à partir des valeurs expérimentales.

III.6. Synthèse sur les mécanismes d'endommagement des micro-actionneurs

Les essais pratiqués ont montré une influence inégale des facteurs environnementaux sur la fatigue des microstructures de test *in situ*. La diminution de la pression dans l'enceinte de test conduit à un amortissement plus faible des vibrations et ne favorise pas la dissipation thermique. Le premier effet engendre des amplitudes de vibration plus importantes qu'à la pression atmosphérique et induit des niveaux de contrainte plus élevés dans la microstructure. Par conséquent, sous l'action de la contrainte appliquée à faible pression, la mobilité des dislocations est accrue et le processus d'endommagement prend place plus rapidement. Concernant la dissipation thermique, cet effet peut être considéré comme négligeable car il s'agirait en l'occurrence d'une dissipation par radiation, or des travaux publiés dans la littérature ont montré que le mécanisme de transfert thermique prépondérant dans une telle configuration est la conduction qui n'est pas, en l'espèce, empêché par le vide.

Un autre paramètre a une influence notoire sur la détérioration du microdispositif, il s'agit du choc thermique (se produisant avant l'essai de fatigue). Dans ce cas, ce sont les propriétés intrinsèques du matériau qui sont altérées conduisant à une durée de vie abrégée des structures de test. En l'absence d'analyse cristallographique, il n'est pas possible de donner une explication éclairée de ce qui se passe au sein du matériau, la possible recristallisation du matériau lors du recuit peut être avancée comme hypothèse.

D'une manière générale, les facteurs environnementaux ou intrinsèques au matériau favorisant l'apparition de contraintes élevées conduisent à l'évolution des propriétés mécaniques d'une microstructure de test sans forcément raccourcir sa durée de vie. Seul le choc thermique, produit lors d'un recuit rapide par effet Joule, appliqué aux microbancs de test a eu pour effet de diminuer sensiblement la durée de vie.

Les perspectives des recherches sur les mécanismes d'endommagement des micro-actionneurs se situent à la fois dans la poursuite de l'exploitation des microbancs de test déjà fabriqués et soumis à des facteurs environnementaux qui n'ont pas encore été étudiés tels que l'humidité, ou à des configurations existantes qui n'ont pas été testées faute de temps telles que les microbancs de test où l'influence des effets électrostatiques et mécaniques peut être décorrélée (figure III.21).

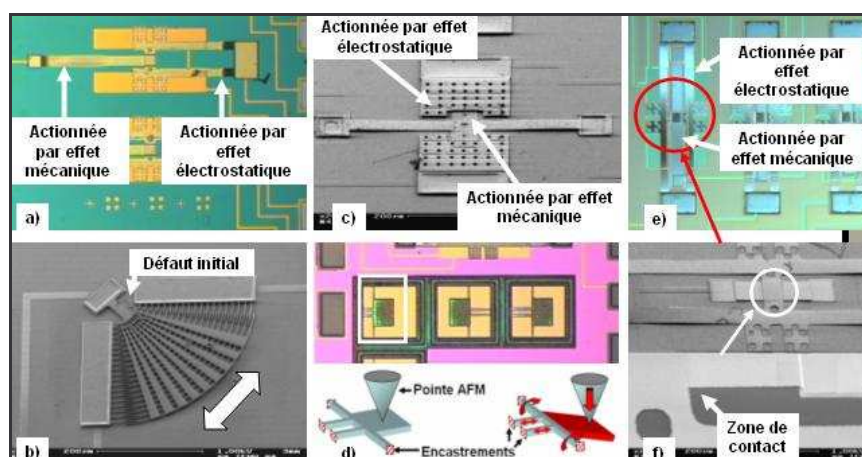


Figure III.21. (a) Poutre encastrée-libre en or actionnée mécaniquement en flexion par une structure en or elle-même actionnée électrostatiquement. (b) Structure de type « comb drive » en polysilicium pour un test de fatigue d'une poutre présentant un défaut initial. (c) Poutre bi-encastrée pour un test en torsion avec un plateau d'actionnement mû mécaniquement par d'autres plateaux eux-mêmes actionnés électrostatiquement. (d) Poutres bi-encastrées sollicitées en traction lorsque une pointe AFM vient pousser le « contre poids » via un effet en torsion. (e) Poutre bi-encastrée en polysilicium actionnée mécaniquement par une structure en polysilicium elle-même actionnée électrostatiquement. (f) Détail du recouvrement entre deux structures pour un actionnement mécanique en flexion d'une structure bi-encastrée.

En outre, un microbanc de traction a été réalisé à l'IEMN (figure III.22); des mors spécifiques aux échantillons ont été fabriqués et un programme sous LabviewTM a été développé pour commander le moteur du banc. De plus, des échantillons (plaques de 4 mm×8 mm×2 μm) ont été fabriqués, mais ils se détériorent lors des dernières étapes de technologie, en raison des contraintes intrinsèques trop importantes, et aucune caractérisation n'a pu aboutir. Le microbanc de traction permettra aussi de solliciter cycliquement l'échantillon pour des tests de fatigue et des études comparatives entre les résultats obtenus *in situ* et *ex situ* seront effectuées.

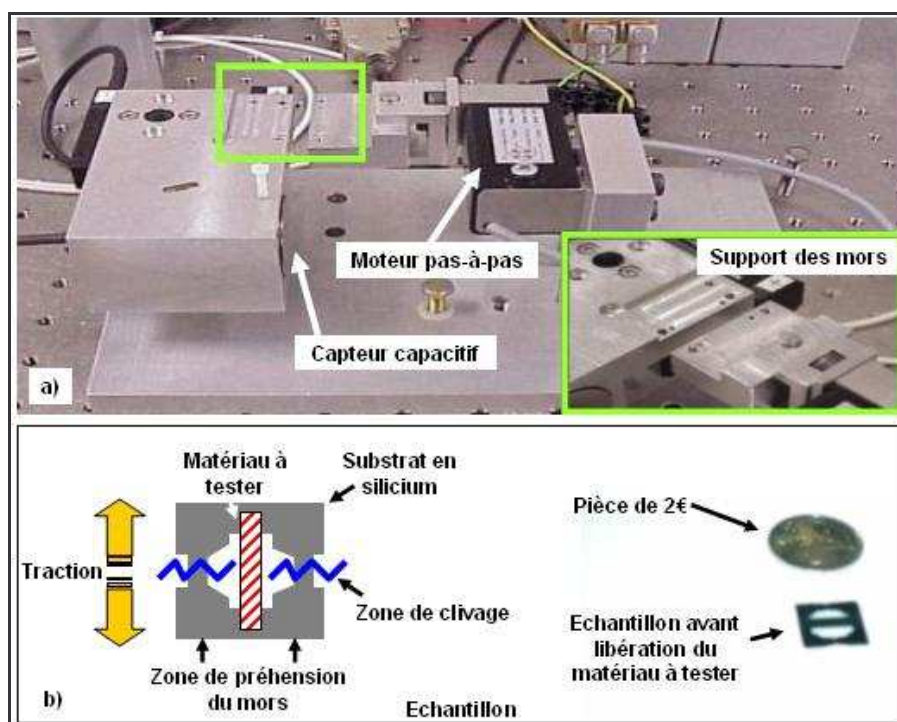


Figure III.22. (a) Microbanc de traction composé d'un moteur pas-à-pas et d'un capteur capacitif (mesure des déplacements) (b) Topologie d'un échantillon prévu pour le microbanc de traction.

III.7. Bibliographie

- [1] J. A. Connally and S. B. Brown, "Slow crack growth in single-crystal silicon", in *Science*, 1992, vol. 256, pp. 1537-1539.

- [2] J. A. Connally and S. B. Brown, "Micromechanical fatigue testing", in *Exper. Mech.*, 1993, vol. 33, pp. 81-90.
- [3] S. B. Brown, W. V. Arsdell, and C. L. Muhlstein, "Materials reliability in MEMS devices," in *Transducers 97, Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers*, Chicago, IL, 1997.
- [4] S. M. Allameh, B. Gally, S. Brown, and W. O. Soboyejo, "Surface topology and fatigue in Si MEMS structures," in *Mechanical Properties of Structural Films*, C. L. Muhlstein and S. Brown, Eds. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2001, vol. STP 1413, pp. 3-16.
- [5] C. L. Muhlstein, R. T. Howe, and R. O. Ritchie, "Fatigue of polycrystalline silicon for MEMS applications: crack growth and stability under resonant loading conditions," in *Mech. Mater.*, 2002.
- [6] C. L. Muhlstein, S. Brown, and R. O. Ritchie, "High cycle fatigue of polycrystalline silicon thin films in laboratory air," in *Proc. Materials Science Microelectromechanical System (MEMS) Devices III*, Boston, MA, 2000.
- [7] C. L. Muhlstein, E. A. Stach, and R. O. Ritchie, "High cycle fatigue in micron-scale structural films of polycrystalline silicon: a reaction-layer failure mechanism," *Acta Met. Mat.*, 2001
- [8] C. L. Muhlstein, S. Brown, and R. O. Ritchie, "High cycle fatigue of single crystal silicon thin film," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 10, pp. 593-600, 2001.
- [9] H. Kahn, N. Tayebi, R. L. Ballarini, R. Mullen, and A. H. Heuer, "Fracture toughness of polysilicon MEMS devices," in *Proc. 10th International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, Sendai, Japan, 1999.
- [10] D. M. Tanner "First reliability test of a surface micromachined microengine using SHIMMeR", *Proceedings SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication*, Vol. 3224, Austin, 1997, pp 14-23.
- [11] W. Irwin, D.L. Gregory, J.R. Stake, N. F. Smith, D. M. Tanner, J.A. Walraven et K.S. Helgesen "MEMS reliability in a vibration environment" in *Proc. the Int. Reliability Phy. Symp.*, USA, 2000, pp. 129-138.
- [12] D. M. Tanner, J.A. Walraven, K.S. Helgesen, L. W. Irwin, F. Brown, N. F. Smith et N. Masters "MEMS reliability in shock environments" *Proc. of the Int. Reliability Phy. Symp.* , 2000, pp. 139-145.
- [13] D. M. Tanner, J. A. Walraven, L. W. Irwin, M. T. Dugger, N. F. Smith, W. M. Miller et S. L. Miller "The Effect of Humidity on the Reliability of a Surface Micromachined Microengine" *Proc. of the Int. Reliability Phy. Symp.* , USA, 1999, pp. 189-197.
- [14] P. M. Osterberg and S. D. Senturia, "M-TEST: A test Chip for MEMS Material property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures", *J. of MicroElectroMechanical Systems*. Vol. 6 No.2, pp 107-118.
- [15] S. D Senturia, "Microfabricated structures for the measurement of mechanical properties and adhesion", in *Proc. Transducers 87*, Tokyo, Japan, pp. 11-16.
- [16] S. Wang, S. Crary, and K. Najafi, "Electronic determination of the modulus of elasticity and intrinsic stress of thin film using capacitive bridges", in *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1992, pp 203-208.
- [17] K. Najafi, and K. Suzuki "A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and Young's modulus of thin film" in *Proc. MEMS 1989*, Salt Lake City, UT, pp 96-97.
- [18] C. Serre, A. Perez-Rodríguez, J.R. Morante, P. Gorostiza, J. Esteve Determination of micromechanical properties of thin films by beam bending measurements with an atomic force microscope *Sensors & Actuators* 74 1999 134-138
- [19] S. Sundararajan, B. Bhushan Development of AFM-based technique to measure mechanical properties of nanoscale structures *Sensors & Actuators A*, 2002, pp 338-351
- [20] P. Petrik, L.P. Biro, M. Fried, T. Lohner, R. Berger, C. Schneider, J. Gyulai, et H. Ryssel Comparative study of surface roughness measured on polysilicon using spectroscopic ellipsometry and atomic force microscopy *Thin Solid Films* 315 1998, pp. 186-191
- [21] S. Petitgrand, R. Yahiaoui, K. Danaie, A. Bosseboeuf, J. P. Gilles 3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes with a stroboscopic interferometric microscope. *Optics and Lasers in Engineering* Vol. 36, pp.77-101, 2001
- [22] R. Yahiaoui, S. Petitgrand, A. Bosseboeuf, K. Danaie Vibrométrie interférométrique continue et stroboscopique. Application à la caractérisation des modes de vibrations de dispositifs micromécaniques. *Nano et Micro Technologies*, Vol.1 (3-4), pp.413-437, 2001
- [23] P. M. Osterberg, S. D. Senturia M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures *J. of MicroElectromechanical Systems*, juin 1997, Vol. 6, pp. 107-118
- [24] S. Wang, S. Crary, K. Najafi Electronic determination of the modulus of elasticity and intrinsic stress of thin film using capacitive bridges *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1992, pp 203-208
- [25] K. Najafi, K. Suzuki A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and Young's modulus of thin film *Proc. MEMS 1989*, Salt Lake City, UT, pp 96-97

- [26] P.J. French Polysilicon: a versatile material for microsystems Sensors & Actuators A 99 (2002), pp. 3–12
- [27] E. Quévy Elaboration et Caractérisation de Technologies Microsystèmes Avancées: Structures d’Actionnement tridimensionnelles et Résonateurs Electromécaniques à Entrefer Latéral Nanométrie Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 2002.
- [28] B. Legrand, E. Quévy, B. Stefanelli, C. Combi, D. Collard, L. Buchaillet Vacuum and cryogenic station for micro-electro-mechanical systems probing and testing Review of scientific Instruments Vol.73 4393 2002
- [29] E. H. Yang et H. Fujita Determination of the modification of the Young’s Modulus due to Joule heating of polysilicon microstructures using U-shapes beam Sensors & Actuators A (70), 1998, pp. 185-190
- [30] E. H. Yang, et H. Fujita Reshaping of single-crystal silicon microstructures Jpn. J. of. Appl. Phys. Vol (38) 1999, pp. 1580-1583

IV. Perspectives

ABSTRACT: Based on the research done on microactuators for more than eight years and on the recent development of cross-field disciplines, prospects are presented in this chapter. It turns out that microactuators are very good candidates to address fields at the interface between biology and nanotechnologies. This is due to their ability to produce controllable low intensity forces and also to their size which fits perfectly between macroscopic world and nanoscopic one.

RÉSUMÉ : Sur la base des recherches effectuées depuis huit ans sur les micro-actionneurs et en tenant compte des développements récents de disciplines connexes, les perspectives sont présentées dans ce chapitre. Il ressort que les micro-actionneurs sont d'excellents candidats pour des applications situées à l'interface avec la biologie et les nanotechnologies. Ceci est principalement dû à la capacité à produire de manière contrôlée des forces de faible intensité, ainsi qu'à leurs dimensions qui s'insèrent parfaitement entre les mondes macroscopique et nanoscopique.

KEY WORDS: Interface, Biology, Nanotechnology.

MOTS-CLÉS: Interface, Biologie, Nanotechnologie.

Les BioMEMS et les nanosciences ouvrent aux microsystèmes de nouvelles thématiques de recherche dans lesquelles l'apport conceptuel peut être significatif.

Dans le cas des BioMEMS comme pour les nanosciences, l'analyse des principales grandeurs physiques fournit des éléments de réponse. En effet, les microsystèmes sont extrêmement sensibles pour détecter les variations de leur environnement, que ce soit des changements de pression, de force, d'intensité électrique, etc... En revanche, les microdispositifs ne permettent pas d'agir sur un environnement extérieur macroscopique autre qu'un phénomène ondulatoire comme la lumière ou les micro-ondes (déviation de faisceaux lumineux, micro-interrupteur, microrelais, microcommutateur...). Cela tient principalement à leurs dimensions micrométriques et aux faibles forces qu'ils sont capables de produire. On peut alors se demander s'il existe un type d'environnement dans lequel ces faiblesses peuvent se traduire en avantages, et il vient naturellement deux domaines de recherche où les microsystèmes ont un rôle important à jouer : il s'agit de l'interface entre la physique et la biologie ; et de l'interface entre le monde macroscopique et le monde nanométrique. Dans le premier cas (BioMEMS), ce sont les dimensions mais surtout les forces développées par les microdispositifs qui sont compatibles avec ce que les objets biologiques peuvent supporter sans dommage ; alors que dans le second (nanosciences), c'est la combinaison de leur sensibilité aux forces inter-atomiques et de leurs dimensions qui leur confère un intérêt déjà bien compris des physiciens.

IV.1 Microsystèmes pour les nanotechnologies

Les microtechnologies permettent la fabrication d'objets de taille nanométrique qui doivent ensuite être intégrés dans des systèmes pour les applications. Ces nanodispositifs remplissent des fonctions assurées jusqu'alors par des composants électroniques, mais ils ouvrent également de nouveaux champs d'applications qui ne pouvaient pas être adressés faute de dispositifs adéquats, de performances suffisantes ou en raison d'un coût trop élevé.

Les nano-objets peuvent difficilement être déplacés ou se mouvoir par leurs propres moyens, c'est-à-dire en leur adjoignant un actionneur en prise directe, en revanche il est tout à fait réaliste de les faire vibrer pour réaliser par exemple des nanorésonateurs ou des nanosondes vibrantes pour la microscopie à champ proche en milieu liquide.

Typiquement, pour une nanostructure en silicium de 300 nm de long et 20 nm d'épaisseur, les premières fréquences de résonance se situent au voisinage de 1 GHz. Cette fréquence, très proche de celles employées dans les télécommunications, fait des nanorésonateurs des candidats potentiels à la fabrication de filtres électromécaniques capables de remplacer avantageusement les filtres à onde de surface.

Dans le domaine des capteurs, la miniaturisation extrême obtenue par l'intégration de nanorésonateurs devrait donner naissance à une nouvelle génération de capteurs présentant des performances très attractives :

- o Très faible puissance de fonctionnement (inférieure au femto Watts).
- o Très haute fréquence de résonance (jusqu'à GHz).
- o Faible dissipation d'énergie (facteur de qualité Q élevé).
- o Très faible masse active (femto grammes).
- o Capacité de mesure ultrarapide.
- o Très haute sensibilité.
- o Très grande résolution spatiale.

Ces détecteurs ultrasensibles permettront la mesure de très petites quantités de masse, de force, de charges,.... Ils devraient trouver des applications dans des domaines très divers et parmi les applications possibles on peut citer l'analyse cellulaire, le traitement du signal haute fréquence ou l'exploration de nano-objets.

La microscopie à force atomique qui emploie de manière unitaire des structures de taille micrométrique pourrait également bénéficier de la réduction d'échelle qui permettrait, en améliorant le facteur de qualité, d'augmenter la sensibilité des sondes en milieu liquide.

On peut aussi envisager d'intégrer le moyen d'excitation et la détection dans le même nanodispositif en utilisant des matériaux actifs. En particulier, les matériaux magnétiques déposés sur des nanorésonateurs permettraient leur télé-excitation, et l'écriture/lecture sur un support similaire à un disque dur.

Atteindre de tels objectifs requiert une activité de recherche conceptuelle autant au niveau de la définition et de la modélisation que des technologies de fabrication et de la caractérisation.

Problématique

Les dimensions mises en jeu sont telles que les amplitudes de vibration à la résonance sont de l'ordre de quelques nanomètres, et il est souvent nécessaire d'exploiter les modes de résonance les plus bas afin de maximiser cette amplitude et de la rendre détectable. En outre, compte tenu des faibles dimensions et des facteurs de qualité élevés escomptés, les vibrations peuvent être non linéaires et nécessiter de nouveaux concepts pour leur commande. Une étude approfondie des différents principes physiques d'actionnement doit permettre de déterminer leur aptitude à fonctionner efficacement à haute fréquence et dans de très petits volumes sans perturber la détection du signal issu du nanorésonateur.

Le rapport surface/volume élevé lié à la réduction d'échelle et le caractère non linéaire des vibrations modifient les mécanismes de dissipation d'énergie responsable de l'amortissement interne. Le caractère mono ou poly cristallin du matériau constitutif du nanorésonateur conditionne le type de modélisation à mettre en place pour évaluer l'amortissement interne. Actuellement, seule une étude phénoménologique à l'aide de nanostructures de test autorise la détermination du facteur de qualité des nanorésonateurs.

Fabrication et test d'un nanorésonateur

Le procédé de fabrication est conditionné par la géométrie du nanodispositif, par le mode d'actionnement choisi dans la phase de définition et par le type de vibrations engendrées (flexion hors plan ou dans le plan, torsion). Cependant, des impératifs inhérents aux dimensions encadrent la phase de fabrication, parmi ceux-ci, citons : le besoin d'aligner des structures nanométriques, la minimalisation des pertes qu'elles soient acoustiques ou électriques, etc... Cela se traduit en termes de moyens par l'utilisation de la nanolithographie, de procédés auto-alignés, d'ancrage des nanorésonateurs sur le substrat optimisés pour assurer un découplage des vibrations, et cette liste n'est pas exhaustive. Les forces de surfaces auront une influence à la fois lors de l'étape ultime de technologie qui consiste à libérer les nanostructures vibrantes, et en cours de fonctionnement en produisant un amortissement. Pour ce qui concerne la phase de fabrication des nanorésonateurs, c'est principalement les forces de capillarité qui peuvent engendrer des phénomènes de stiction et causer le collage irréversible des nanostructures lors de l'étape finale de libération.

La caractérisation de nanostructures vibrantes a déjà été évoquée dans le chapitre consacré aux "microsystèmes pour les télécommunications". La principale difficulté n'est pas véritablement de montrer que l'excitation d'un mode propre est effectivement réalisée, mais plutôt d'extraire un signal électrique utile modulé par le nanorésonateur. Compte tenu des entrefers nanométriques séparant la nanostructure vibrante des électrodes, la capacité de couplage directe entre les électrodes d'entrée et de sortie perturbe la mesure du signal utile. La microscopie à champ proche doit permettre, de par son extrême sensibilité, la détection d'amplitudes de vibration très faibles, c'est une voie que nous allons explorer dans un proche avenir.

IV.2. Étude des mécanismes d'endommagement des microstructures

Il s'agit d'un thème de recherche transversal qui est nécessairement abordé lorsqu'on étudie les micro-actionneurs.

Les perspectives des recherches sur les mécanismes d'endommagement des micro-actionneurs se situent dans la poursuite de l'exploitation des microbanques de test déjà fabriqués et soumis à des facteurs environnementaux qui n'ont pas encore été étudiés tels que l'humidité, ou à des configurations existantes qui n'ont pas été testées telles que les microbanques de test où l'influence des effets électrostatiques et mécaniques peut être décorrélée (figure IV.1).

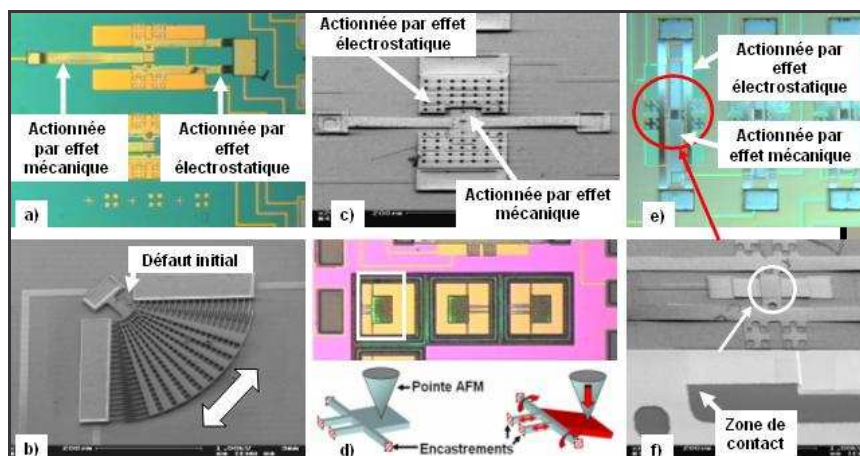


Figure IV.1 (a) Poutre encastrée-libre en or actionnée mécaniquement en flexion par une structure en or elle-même actionnée électrostatiquement. (b) Structure de type "comb drive" en polysilicium pour un test de fatigue d'une poutre présentant un défaut initial. (c) Poutre bi-encastrée pour un test en torsion avec un plateau d'actionnement mû mécaniquement par d'autres plateaux eux-mêmes actionnés électrostatiquement. (d) Poutres bi-encastrées sollicitées en traction lorsque une pointe AFM vient pousser le « contre poids » via un effet en torsion. (e) Poutre bi-encastrée en polysilicium actionnée mécaniquement par une structure en polysilicium elle-même actionnée électrostatiquement. (f) Détail du recouvrement entre deux structures pour un actionnement mécanique en flexion d'une structure bi-encastrée.

En outre, un microbanc de traction a été réalisé à l'IEMN, il permettra de solliciter cycliquement l'échantillon pour des tests de fatigue et des études comparatives entre les résultats obtenus *in situ* et *ex situ* seront effectuées.

Dans la synthèse des travaux antérieurs, des études portant sur le silicium polycristallin ont été présentées, l'or a aussi été testé. L'une des perspectives de ce domaine de recherche est le fruit d'une discussion avec S.D. Senturia (professeur émérite M.I.T.) lors de la dernière conférence TRANSDUCERS à Boston. Cela consisterait à réaliser une "éprouvette" en matériau polycristallin dont la section ne contiendrait qu'un seul grain ! En la sollicitant de manière appropriée, avec un micro-actionneurs par exemple, il serait possible d'isoler et donc de mieux identifier les mécanismes d'endommagement au niveau du joint de grain et du grain lui-même. Il s'agirait tout d'abord de maîtriser un procédé permettant la fabrication de grains suffisamment "grands" et relativement ordonnés. Le polysilicium épitaxié épais permet d'approcher ce résultat et nous collaborons déjà avec ST Microelectronics (Cornaredo, Italie) qui dispose d'une telle ligne de fabrication, mais nous devons tout d'abord caractériser les propriétés cristallographiques de leur matériau avant de savoir s'il conviendra. Ensuite, la conception du banc de test sera une phase déterminante car pour travailler sur de tels échantillons. Les bancs de test *in situ* permettront peut-être de répondre à ces impératifs. L'emploi d'un microscope à force atomique ou d'un nano-indenteur est également envisageable selon la dimension et la robustesse de l'éprouvette.

IV.3. Microsystème biomécanique

Il ne s'agit pas là de BioMEMS au sens où on l'entend aujourd'hui. Le but n'est pas de réaliser des biopuces à peptides ou à cellules, ni même de faire des microdispositifs capables de quantifier les forces de cohésion des assemblages cellulaires (cette dernière étude est le thème de recherche de Bernard Legrand dans le groupe "Microsystèmes Silicium" à l'IEMN).

L'objectif est plutôt d'utiliser le matériel biologique comme un moteur capable d'entraîner un mécanisme microscopique ! Cela a déjà été démontré avec les moteurs exploitant l'ATP-synthase, mais cette approche est semblable à celle qui consiste à faire un micromoteur électrostatique tournant dont on ne peut pas extraire le couple mécanique, donc dont on ne peut pas se servir pour entraîner un mécanisme. Le moteur à ATP-synthase présente cependant d'autres avantages et il mérite tout à fait l'attention que de nombreux groupes de recherche lui portent actuellement. Dans le cas présent, il s'agit de concevoir un micromécanisme muni d'un réservoir qui pourra accueillir le matériel biologique (cellule) qui le mettra en mouvement. Le matériel biologique en question est déjà identifié, il "fonctionne" grâce à des filaments d'*actine* et, contrairement au moteur à ATP-synthase, ses

dimensions le rendent "hybridable" avec un dispositif micrométrique puisqu'il a environ la taille d'un SDA. Ces derniers seront d'ailleurs utilisés pour la caractérisation du micromécanisme.

Un premier micromécanisme rotatif sera donc fabriqué dans un matériau biocompatible, par exemple de la résine SU-8 ou du PDMS, il sera mis en mouvement par des SDA qui permettront d'extraire la puissance nécessaire pour le déplacer. La conception sera alors validée ou bien des modifications seront apportées pour améliorer le rendement. Le frottement sec sera évité et l'axe de rotation sera porté et lubrifié par un fluide. En parallèle, la technique de culture du matériel biologique moteur sera mise en place au laboratoire et des étapes de validation seront menées sur le principe de la protrusion. On étudiera en particulier la possibilité d'orienter et donc de contrôler le déplacement sous l'influence d'un champ électrique. Après cela, l'hybridation du matériel biologique sera déterminante pour la conversion d'énergie biologique en énergie mécanique. Le transducteur biomécanique qui en résultera constituera la cellule motrice élémentaire. En cas de succès, l'exploitation de transducteurs en parallèle permettra d'aboutir à la fonction motrice recherchée.

Si ce concept est démontré, cela permettra l'étude de micro-actionneurs biomécaniques qui pourront remplir des fonctions dans différents domaines d'application. Mais surtout, cela ouvrira également de nouvelles voies de recherche sur l'apport en énergie requise par les microsystèmes.

En effet, une perspective intéressante car elle satisferait un besoin pour tous les chercheurs dans le domaine des microsystèmes est la génération d'énergie à l'échelle des microdispositifs. Il existe des travaux sur la télé-alimentation (par couplage électromagnétique) des microsystèmes, mais on atteint assez aisément les limites de telles stratégies (faible distance entre l'émission et la réception, obstacles métalliques, etc...). La recherche sur la microsource où la microgénération d'énergie est donc une voie très intéressante pour garantir l'autonomie des microsystèmes et en particulier celle des microrobots.

Ces trois voies possibles ne constituent pas une liste exhaustive des perspectives de la recherche dans le domaine des microsystèmes, mais elles seront sans doute explorées dans les dix prochaines années. Des débouchés industriels au cours de cette période sont envisageables, même à court terme, à condition toutefois de mener en parallèle des études de fiabilité et donc de compréhension des mécanismes de défaillance des microsystèmes.

En travaillant à l'interface avec d'autres disciplines scientifiques comme la biologie ou la physique, le chercheur en microsystèmes doit être vigilant afin de ne pas être réduit à un rôle de fournisseur d'outils scientifiques. Le chercheur doit être capable d'identifier une activité de recherche dans les microsystèmes et d'apporter une valeur ajoutée scientifique à ce domaine.

Conclusion

Dans ce mémoire, trois chapitres ont permis de synthétiser une partie des travaux de recherche entrepris à l'IEMN dans le groupe "Microsystèmes Silicium", et un chapitre a été consacré aux perspectives.

Le domaine des microsystèmes étant, par nature, pluridisciplinaire, la synthèse présentée dans ce rapport ne rend compte que d'une partie des travaux effectués car les compétences scientifiques de mes collègues Dominique Collard et Bernard Legrand, celles des chercheurs invités dans le groupe, Beomjoon Kim et Manabu Ataka, et celles des doctorants ont contribué de manière complémentaire et stimulante aux recherches qui ont été entreprises.

Dans le chapitre consacré aux micro-actionneurs, trois modes d'actionnement sont présentés : les alliages à mémoire de forme en film mince ; les forces électrostatiques et l'actionnement thermique. Pour chacun d'entre eux, une synthèse et des perspectives sont proposées à la lumière de l'expérience acquise. On pourrait dire qu'il s'agit du cœur de l'activité du groupe "Microsystèmes Silicium".

Le chapitre traitant des microsystèmes pour les télécommunications constitue déjà une application des micro-actionneurs et une plus large part est donnée aux résonateurs. Les micro-interrupteurs sont succinctement présentés alors qu'ils auraient pu faire l'objet de développements plus exhaustifs. Cela tient au fait que deux thèses ont déjà été soutenues sur les résonateurs alors que les thèses sur les microcommutateurs et micro-interrupteurs sont en cours.

L'étude des mécanismes de défaillance des microsystèmes et plus particulièrement de microstructures élémentaires fait l'objet d'un chapitre car elle illustre parfaitement les recherches transversales à considérer lorsque l'on désire concevoir des micro-actionneurs. Les résultats déjà obtenus au cours d'une thèse et ceux à venir seront également précieux lors de la caractérisation des microdispositifs en donnant un référentiel aux observations expérimentales.

Enfin, quelques perspectives sont proposées. Deux axes de recherche se dégagent assez nettement : les microsystèmes dont l'action se situe à l'interface avec la biologie, et les microdispositifs en interaction avec les nanotechnologies. Ces deux voies impliquent qu'une recherche de fond soit menée sur les micro-actionneurs, les concepts originaux que nous tenterons de concrétiser dans la réalisation des futurs microsystèmes nous permettrons peut-être de continuer à attirer l'attention des étudiants, de laboratoires français et étrangers, et des partenaires industriels.

Résumé : Le groupe Microsystèmes Silicium de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique du Nord (IEMN - maintenant N= Nanotechnologie) a axé sa recherche sur les micro-actionneurs et leur environnement. Cela nous permet d'étudier des problématiques amont liées au micro-actionnement, à son interaction technologique, ainsi que des voies applicatives telles que les microsystèmes pour les télécommunications, la microrobotique, entre autres...

Dans la suite de cette introduction, quelques précisions sont données sur la terminologie de notre domaine de recherche, puis un bref historique retrace le développement de la recherche sur les microsystèmes dans le monde et en France.

Outre cette introduction, ce rapport se compose principalement de trois chapitres. Le premier, consacré aux micro-actionneurs, présente une partie des travaux effectués sur des études conceptuelles exploitant le potentiel de différents modes d'actionnement : transition de phase; électrostatique et thermique.

Le second chapitre décrit les activités de recherche effectuées dans le thème applicatif des microsystèmes pour les télécommunications. Il s'agit de travaux soutenus par de nombreux contrats de recherche nationaux ou européens. Deux composants en particulier ont été étudiés par trois doctorants. Emmanuel Quévy a étudié des résonateurs électromécaniques destinés à une application de filtrage dans la gamme intermédiaire de fréquence de la téléphonie mobile. Vincent Agache a étudié des résonateurs dont les fréquences propres se situent au voisinage du GHz. Les premières recherches effectuées à l'IEMN sur des microcommutateurs pour les signaux hyperfréquences sont également présentées.

Le troisième chapitre est dédié aux résultats obtenus par Olivier Millet sur l'évolution de la raideur de microstructures soumises à un chargement cyclique. Il s'agit d'une partie de l'étude transversale des mécanismes de défaillance des microsystèmes destinée à la modélisation du phénomène de fatigue dans les microstructures.

Enfin, quelques perspectives de recherche impliquant les micro-actionneurs dans les microsystèmes seront présentées, suivies d'une conclusion.

Abstract: The report presents the research of the "Silicon Microsystems" Group. First chapter deals with conceptual studies using the potential of various actuating principles: electrostatic; thermal and phase transition. For some of them, test vehicles have been realized at the device level. Electrostatic actuation has also served as a support for the remote power supply experiment during the Ph.D. of Philippe Basset. Resonators studied within the frame of the Ph.D. of Emmanuel Quévy are presented in the chapter dedicated to "RF MEMS". Microactuators which have been used as in situ test benches by Olivier Millet are presented in the chapter entitled "Etude des mécanismes de défaillance des micro-actionneurs." Microswitches and RF MEMS are explained and shown in the next chapter. Research focusing on micro actuators is the core research activity of the "Silicon Microsystems" Group.