



HAL
open science

Contribution à la conception et la réalisation de microsystèmes électrostatiques

Henri Camon

► **To cite this version:**

Henri Camon. Contribution à la conception et la réalisation de microsystèmes électrostatiques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006. tel-00139604

HAL Id: tel-00139604

<https://theses.hal.science/tel-00139604>

Submitted on 2 Apr 2007

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

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

Rapport de synthèse

Habilitation à diriger des recherches

**CONTRIBUTION À LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE
MICROSYSTÈMES ÉLECTROSTATIQUES**

Henri Camon

Chargé de Recherche C.N.R.S.

Présenté le 9 janvier 2005 au LAAS/CNRS devant le jury composé de :

Nico DE ROOIJ	Professeur, Université de Neuchâtel <i>Rapporteur</i>
Serge VALETTE	Directeur de Recherche, CEA/LETI <i>Rapporteur</i>
Alain BRUN	Professeur, Université de Paris XI <i>Rapporteur</i>
Daniel ESTEVE	Directeur de Recherche, CNRS <i>Examineur</i>
Thierry PARRA	Professeur, Université Paul Sabatier <i>Examineur</i>
Marc LESCURE	Professeur, Institut National Polytechnique <i>Examineur</i>
Stéphane RENARD	Président du Conseil de Direction de Tronics Microsystems SA <i>Examineur</i>

L.A.A.S.
7, av. du Colonel ROCHE
31077 TOULOUSE Cedex

Décembre 2005

TABLE DES MATIERES

Curriculum Vitae	4
Présentation résumée des travaux	
i) période 1985/1990 au Laboratoire d'Optique Électronique du CNRS	8
ii) période 1990/2005 au LAAS/CNRS	9
Synthèse des travaux récents	
Introduction générale	20
Chapitre I Les micro-usinages: des technologies clefs des microsystèmes	26
I-1 Introduction	28
I-1-1 Le micro usinage de surface	29
I-1-2 Le micro usinage de volume	30
I-2 Gravure chimique anisotrope du silicium	32
I-3 Micro usinage de surface	39
I-3-1 La technologie	39
I-3-2 Conception et réalisation d'un micromoteur	40
I-3-3 Les résultats	42
I-4 Conclusion	43
Chapitre II Actionnement électrostatique pour les microsystèmes optiques	46
II-1 Introduction	48
II-2 Rappel des modes d'actionnement possibles	48
II-3 La perception 3D en robotique	50
II-4 Spécifications du système et du bloc balayage	51
II-5 Mise en œuvre et résultats	53
II-6 Conclusion	60
Chapitre III Microsystèmes optiques de commutation	62
III-1 Introduction	64
III-2 Principe de conception des miroirs digitaux	65
III-3 Les applications des miroirs digitaux	66
III-3-1 Multiplexeur d'insertion-extraction	66
III-3-2 Système de répartiteur optique fibres à fibres	68
III-3-3 Système d'amorçage optique à base de micro miroirs	72
III-4 Conclusion	74
Chapitre IV Travaux en cours et prospective	76
IV-1 Introduction	78
IV-2 Intégration des technologies sol-gel dans le concept d'optique adaptative	80
IV-2-1 Conception matricielle d'une optique adaptative	80
IV-2-2 La mise œuvre technologique	82
IV-2-3 Etat d'avancement des travaux	83
IV-3 Optique adaptative et matériaux électro-strictifs	84
IV-3-1 La problématique	84
IV-3-2 Les matériaux et leurs intégrations en microsystèmes	85
IV-4 Les microsystèmes hybrides à base de polymères	86
IV-5 Conclusions	87
Conclusion	88
Principales références bibliographiques	94
Annexes	99
Listes exhaustives des publications	100
Autres activités	110

Curriculum Vitae

NOM:	CAMON	Section du CNRS:	08
Prénom:	Henri	Grade :	CR1
Né le :	07 Avril 1959		
Age:	46 ans		

Adresse professionnelle: L.A.A.S., 7, avenue du Colonel Roche, 31077 TOULOUSE Cedex 4
 Téléphone: 05 61 33 64 67 Télécopie: 05 61 33 62 08
 Courriel: camon@laas.fr

Diplômes obtenus à l'Université Paul Sabatier de Toulouse :

1981	Maîtrise de Physique (Option électronique)
1982	D.E.A. Physique du Solide Université Paul Sabatier (Toulouse)
1984	Doctorat de 3ème cycle (Soutenance 21/11/84) Option Physique du Solide Titre: micro-lithographie par faisceaux d'électrons à haute tension (100 KeV)

Enseignements durant la thèse:

1982-84	Travaux Dirigés de Physique niveau D.E.U.G. à la Formation Internationale Aéronautique et Spatiale. (50 heures par an).
---------	---

Fonction:

04/1985-10/1985	Travailleur indépendant (profession libérale, équivalent micro entreprise) Activité d'enseignement par contrat avec la Formation Continue de l'Université Paul Sabatier pour la Formation Internationale Aéronautique et Spatiale. (Cours, Travaux Dirigés et Travaux Pratiques sur l'ensemble du programme de physique du premier cycle universitaire destinée à l'insertion d'ingénieurs de l'école de supérieure de Bandung (Indonésie) dans le cursus universitaire français). 250 Heures sur 6 mois.
10/1985	Chargé de recherche 2ème classe section 09 (actuellement 08) au Laboratoire d'Optique Electronique rattaché au département SPM
1990	Changement d'affectation (CEMES. => LAAS) Chargé de recherche 1ère classe au L.A.A.S./C.N.R.S.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

- 23 publications dans des revues internationales
- 1 chapitre d'ouvrage invité
- 47 conférences internationales à comité de lecture
- 6 conférences invitées
- 29 communications sans comité de lecture

THÉMATIQUES DÉVELOPPÉES

1985/1990

Lithographie par faisceaux d'électrons, modélisation Monte-Carlo & interactions électrons/matières.

1990/1997

Modélisation à l'échelle atomique de la gravure chimique anisotrope du silicium.

1992/1997

Développement d'une technologie de micro-usinage de surface polysilicium et micromoteur électrostatique.

1993/2005

Micro miroirs à actionnement électrostatique et applications : robotique, télécommunications et militaire.

1993/2000

Micro fluide (conception et réalisation) : micro pompe et micro diode.

2002/2005

Développement d'une technologie tout polymère appliquée à l'optique adaptative

ENCADREMENTS

(détail en annexe)

- 5 thèses de doctorat à 100% d'encadrement
- 3 thèses de doctorat en co-encadrement
- 3 stages postdoctoraux de 12 mois

ENSEIGNEMENTS

- Formation continue de l'Institut Universitaire Technologique de Toulouse
Heures: 4 (1997)
- Formation continue à l'Atelier Inter universitaire de Micro Electronique
Heures: 4 (1998), 6, (1999), 2, (2000), 2 (2001), 4 (2002), 3 (2003), 3 (2004), 3 (2005)
- Conférence à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris (ENST)
3^{ème} année, Option Electronique pour les Systèmes de Communications (EST)
Heures: 3 par an (1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002)
- Cours à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSAT)
5^{ème} année, Automatique Electronique Informatique (AEI), option électronique
Heures: 5 (2000, 2001, 2002)
- Cours à l'Ecole Nationale Supérieure Electronique Electrotechnique Informatique et Hydraulique de Toulouse (ENSEEIH) 3^{ème} année, Option Micro Electronique & Micro Ondes
Heures: 4 (1999), 6 (2000, 2001, 2002), 5 (2003), 5 (2004), 5 (2005), 5 (2006)
- Cours à l'Université de Montpellier II, Master Pro 2^{ème} année, Physique et ingénierie des matériaux pour la microélectronique et les nanotechnologies
Heures: 8 (2005)

Présentation résumée

**RÉSUMÉ DES TRAVAUX DURANT LA THÈSE ET L'AFFECTION AU LABORATOIRE
D'OPTIQUE ÉLECTRONIQUE (1985-1990)**

Il m'a été proposé, en 1982, au sein de l'équipe animée par Mr le Professeur J.L. Balladore de l'Université Paul Sabatier de Toulouse et de Mr J.P. Martinez, Maître de Conférence, d'aborder, au Laboratoire d'Optique Electronique (aujourd'hui CEMES) où les compétences dans le domaine de l'interaction électron / matière sont reconnues, le problème de la lithographie par électrons.

En effet, l'accroissement régulier de la densité d'intégration dans la fabrication de circuits intégrés passe essentiellement par la définition et la gravure de motifs de plus en plus petits; ces méthodes constituent le domaine de la lithographie. La lithographie par faisceau d'électrons est une technique performante à ce point de vue. On l'utilise, d'une part pour élaborer les masques qui serviront ensuite en photolithographie UV ou X, d'autre part en gravure directe du fait de la capacité de pilotage du faisceau d'électrons. L'idée de départ consistait à étudier les conséquences en lithographie par faisceau d'électron de la tension d'accélération dans le domaine 20-100 keV. Ce travail a comporté plusieurs aspects complémentaires qui seront développés ultérieurement:

- mise au point d'un code de simulation de Monte-Carlo décrivant les trajectoires et les dépôts d'énergie dans un ensemble résine/substrat.
- mise en place d'un dispositif expérimental de validation
- étude de résines organique et inorganique.

Au cours de ce travail, l'influence des électrons rétrodiffusés par le substrat (Si, AsGa) ainsi que l'influence des électrons secondaires a été quantifiée sur la largeur des motifs dans une résine positive (PMMA) démontrant tout l'intérêt de l'utilisation de tension plus élevées et de l'utilisation de substrat mince ou autoportés pour la réalisation de dimensions de motifs largement submicroniques pour la réalisation de dispositifs à effets quantiques. Des réalisations de lignes isolées ou groupées dans cette gamme de tension ont permis de réaliser des *largeurs de 70 nm* pour une épaisseur d'un micron sur substrat massif de silicium, expériences réalisées à l'aide d'un microscope de type SEM/TEM Philips EM400 à émission de champ.

Durant les années suivantes, le travail a consisté à développer le logiciel de simulation de ces phénomènes en incluant la génération des rayonnements X et à l'appliquer à plusieurs cas de figure comme le recuit thermique rapide par faisceaux d'électrons (collaboration avec le LAAS) ou l'introduction de charge dans des structures de type Métal Isolant Semi-conducteur (collaboration avec le CEM à Montpellier).

RÉSUMÉ DES TRAVAUX APRÈS L'AFFECTATION AU LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTÈMES

Malgré nos efforts pour élargir notre activité, il nous est apparu cependant évident que l'efficacité de notre action passait par un rapprochement avec des équipes plus directement impliquées en microélectronique.

Nous avons donc pris l'initiative de contacter, fin 89, des équipes ou nos compétences pourraient renforcer des actions lourdes et nous impliquer plus intimement dans les orientations nationales et européennes du secteur S.P.I. Nos compétences étant marquées aussi bien dans les problèmes des matériaux que dans ceux des conceptions et réalisations de composants, nous avons choisi de nous rapprocher au LAAS-CNRS du groupe «**Système Intégré de Perception**» animé par Mr D. Estève, Directeur de Recherche au C.N.R.S.

L'intitulé de ce groupe, suite à la fusion avec les activités couches minces du L.A.A.S./C.N.R.S. en 1992, est devenu «**Microstructures et Microsystèmes Intégrés**» (son animateur étant Mr A. Martinez, Professeur à l'I.N.S.A. de Toulouse), puis «**Microsystèmes et Intégration des Systèmes**» en 1999 sous la direction de Mme A. M. Gué, Directeur de Recherche au CNRS.

Mon arrivée au LAAS correspondait à l'apparition d'une nouvelle thématique de recherche en France, les microsystèmes, sous l'impulsion d'exemples marquants comme le micromoteur réalisé par R. Müller à Berkeley et le développement d'applications comme les capteurs de pression puis d'accélération au stade industriel. **Compte tenu de mes compétences en physique des matériaux, la tâche qui m'était confiée était celle de prendre en charge le développement des technologies de micro-usinage qui fondaient l'approche microsystème.** J'abordais donc cette thématique sur le double aspect de la simulation théorique et de la technologie :

- modélisation à l'échelle atomique de la gravure anisotrope du silicium
- développement d'une filière technologique de micro usinage de surface. Ce point était abordé à travers la réalisation d'un micromoteur électrostatique rotatif.

Les filières technologiques de micro usinage devenant matures et le domaine des microsystèmes ayant évolué sensiblement vers des approches systèmes et non plus composants, dans des secteurs d'application se déplaçant de la mécanique vers l'optique et la biologie, mon activité évoluait progressivement et naturellement de l'étude des matériaux et de leur procédé technologique d'usinage vers l'intégration de composants nouveaux et aujourd'hui vers l'intégration des systèmes. C'est autour des **actionneurs électrostatiques et de leur intégration dans des systèmes complets** que je construisais le cœur de mon activité en parfaite adéquation et synergie avec les objectifs stratégiques affichés par le groupe MIS : technologies d'intégration et concepts innovants, prototypage virtuel et intégration système.

Ainsi, je prenais en charge l'activité « actionneurs électrostatiques » du Groupe et injectais les compétences ainsi développées dans la dynamique générale à travers de nombreuses contributions : projet européen Barmint, micro-convertisseurs, prototypage virtuel et fiabilité, mico-diodes fluidiques et micro-miroirs à balayage et digitaux.

La présentation reprend en six points l'évolution de mon activité dont les parties A,B et C feront l'objet d'une présentation plus détaillée.

A- Travaux antérieurs: Matériaux et Technologies

Modélisation à l'échelle atomique des technologies (1990-1997)

A mon arrivée au LAAS, une action, initiée en 1988, existait sur la modélisation à l'échelle atomique des technologies et en particulier sur la croissance homo et hétéro épitaxiale de semiconducteurs. Mon activité a été de reformuler et d'étendre cette approche à l'échelle atomique vis-à-vis de la modélisation de la gravure chimique anisotrope du silicium en milieu alcalin. Ce travail fortement original dans son explication des mécanismes conduisant à l'anisotropie de la gravure a été depuis repris par une équipe suédoise et a conduit à une vingtaine de citations dans la littérature.

Ce travail, soutenu contractuellement par le MENRT et la CISI Ingénierie, s'est concrétisé par la soutenance de thèse de Z. Moktadir en janvier 1997. Par la suite, une collaboration a été mise en place avec le professeur K. Sato de l'Université de Nagoya (Japon) avec le support d'un programme Monbusho permettant un échange sur la base de deux séjours de dix jours dans nos laboratoires respectifs. L'absence d'étudiant motivé et l'atonie contractuelle sur ces sujets a motivé un arrêt de la thématique. Le contact avec la communauté internationale est néanmoins maintenu par l'organisation du deuxième workshop international (Physical Chemistry of Wet Etching of Silicon, Toulouse 14-16 mai 2000) et la participation au Steering Committee des colloques en 2002 (Nara, Japon) et en 2004 (Montréal, Canada).

B- Travaux antérieurs: Technologies de base

Micro-usinage de surface polysilicium - micromoteur électrostatique rotatif (1992-1997)

Un fait marquant essentiel de crédibilité pour les technologies microsysteme a été la réalisation à l'Université de Berkeley par R. Müller de micromoteurs sur silicium, c'est à dire des actionneurs de toutes sortes: rotatifs et linéaires. A l'évidence, la faisabilité d'une intégration totale était donc prouvée. Immédiatement, au delà des initiatives américaines, l'Allemagne avec le Programme "MICROSYSTEM TECHNOLOGY 1990" et le Japon avec "MICROMACHINE TECHNOLOGY 1991", s'engageaient dans cette voie. C'est dans ce contexte que plusieurs initiatives ont été lancées en France et en Europe sur les microcapteurs.

Il est apparu alors stratégique, quatre ans après les USA, trois ans après les allemands, deux

ans après les japonais, d'acquérir la technologie des micromoteurs intégrés sur silicium à savoir le micro-usinage de surface: il revenait aux laboratoires publics de réaliser cet effort car l'échéance était relativement long terme, trop long terme pour un engagement lourd industriel. Le L.A.A.S., en collaboration avec d'autres laboratoires français (LEEI, SATIE) et sous l'impulsion du MRT puis du programme Microsystème du CNRS, a décidé de faire cette démarche: une pré-étude a permis de se doter des outils de simulation (EFCAD, logiciel de calcul des champs par éléments finis) et de mettre au point les bases technologiques. Cet effort a conduit non seulement à la réalisation d'un micro moteur en polysilicium et à sa caractérisation en fonctionnement mais à la capacité nouvelle pour le LAAS et en France de maîtriser une filière technologique d'usinage de surface à l'image du Microelectronic Center of North Carolina, référence dans le domaine en tant que première fonderie microsystème.

Les compétences acquises dans ce travail vis-à-vis de la maîtrise technologique et de l'actionnement électrostatique constituent le premier socle pour les applications ultérieures.

C- Travaux récents et en cours: MOEMS

micro-miroirs à commande électrostatique analogiques et digitaux– (1993 - 2005)

Dès 1993, nous avons choisi de consacrer une *part plus importante de notre activité dans le domaine des actionneurs électrostatiques*.

Après avoir acquis des compétences en technologie (micro-usinage de surface polysilicium, micro-pompe, micro-diode) et en commande des actionneurs électrostatiques (micro-moteurs), j'ai décidé *d'orienter mes travaux vers des structures nouvelles (MOEMS) plus proches d'une échéance industrielle*.

Nous avons alors engagé des discussions avec le groupe Robotique et Intelligence Artificielle (RIA) du LAAS où le besoin, pour la robotique mobile, de perception 3D de l'environnement est un point crucial et où le besoin de miniaturisation est d'importance. Une approche de type microsystème était une réponse innovante correspondant bien aux spécificités de l'application. Ceci a conduit à la création d'un Projet Intergroupe pour la conception, la fabrication et le test d'une caméra laser 3D.

J'ai alors commencé une étude complète (thèse de F. Larnaudie, financement Programme microsystème du CNRS) d'un système de balayage à base de micro-miroirs suivant plusieurs aspects:

- mise au point d'un procédé de fabrication (technologie de volume double-face, assemblage CMS, calcul des contraintes et des raideurs intégrant l'anisotropie des propriétés mécaniques du silicium)
- modélisation (mécanique anisotrope, électrostatique, amortissement fluide) et simulation globale du microsystème (inclusion de la commande dans la simulation du système complet)

- développement d'une électronique de commande spécifique
- caractérisation des influences de l'environnement et examen de la fiabilité.

Cette démarche se veut globale, considérant qu'un microsysteme est avant tout un systeme.

Les interets scientifiques decoulant de ce travail ont ete:

- la demonstration de l'interet de l'actionnement electrostatique,
- la conception et l'integration microsysteme (assemblage 3D, electronique de proximite),
- la problematique de la fiabilite (identification des mecanismes de defaillance et modeles).

Au terme de cette etude, et *sur la base des acquis (modélisation, commande et savoir-faire en technologie)*, la volonte de diffusion de mon expertise *vers des applications nouvelles* s'est trouvee en synergie avec le developpement du secteur des telecommunications. Ceci devait se faire avec un *adossement à un industriel* pour la fabrication.

Les relations deja etablies avec Tronics Microsystems SA au cours des deux premiers contrats Europractice nous a alors permis:

- de participer avec cette start-up issue du CEA/LETI au developpement de leur fonderie sur SOI,
- de jouer le role d'expert en soutien à des actions contractuelles,
- d'agir en partenariat au niveau Europeen en accompagnant la position Francaise dans le secteur des microsystemes pour l'optique.

Notre participation, dans ce cadre, s'est toujours situee à trois niveaux:

- ▶ Conception et modelisation « *A partir des specifications, conception d'une structure sur la base du panier technologique de l'industriel* »,
- ▶ Commande des structures micro-miroirs
- ▶ Caracterisation (topographies, temporelle ...) des micro-miroirs.

Ces actions se sont traduites par la these de B. Estibals (Bourse Cifre avec Tronics Microsystems) dont une partie a ete consacree à la conception d'un Add-Drop (Multiplexeur d'insertion-extraction), les contrats europeens MEMSOI I & MEMSOI II, le contrat RNT ROADMAP en cours pour la conception, la commande et le test d'Optical Cross Connect (repartiteur optique).

Parallelement, j'ai engage une action sur la commutation de faisceau de tres forte energie dans le domaine de la defense avec le support de la DGA (These A. Marchese).

Tout recemment, j'ai integre le Comite de Programme du Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS ans MOEMS (DTIP).

D- Travaux en Cours: micro-convertisseur et Prototypage virtuel

Micro-convertisseur pour les microsystemes – (2000-2004)

(Actions auxquelles je participe au sein du laboratoire)

La perspective d'intégrer de façon complète les micro actionneurs et leur alimentation dans des microsystèmes nous a amené à orienter une partie de nos travaux vers la simulation de micro-inductances, de micro-sources et micro-alimentations intégrées. Les retombées attendues sur cette partie concernent le domaine de la conversion d'énergie au sens large. Nous concentrons nos efforts sur des applications de très faibles puissances comme étage d'adaptation pour microsystèmes.

Ce travail s'insère dans le cadre d'un projet coopératif interne au LAAS intitulé «micro-convertisseurs et micro-sources d'énergies intégrés appliqués aux microsystèmes»

Mon rôle dans le cadre de ce projet coopératif incluant plusieurs groupes du LAAS (CIP, CISHT, TMN et MIS) est de définir le cahier des charges pour les microsystèmes de type MEMS ou MOEMS en terme de tension, courant, forme de signaux et de simuler l'adéquation entre les systèmes de convertisseurs envisagés et les microsystèmes choisis. Les véhicules de test sont bien évidemment les micro-miroirs décrits plus haut.

La modélisation de micro bobines individuelles, la simulation de plusieurs structures de convertisseurs et la simulation globale d'un microsystème de type miroir associé à son convertisseur ont déjà été effectuées durant la thèse de B. Estibals et durant son stage postdoctoral sous ma responsabilité avant son recrutement comme Maître de Conférences à l'IUT de Toulouse et son rattachement au groupe Circuit Intégré de Puissance dirigé par J.L. Sanchez.

Prototypage virtuel et fiabilité pour les microsystèmes – (2000 – 2005)

(Actions auxquelles je participe au sein du laboratoire)

Les aspects de prototypage virtuel et de fiabilité ont été abordés durant l'étude des micro-miroirs à balayage par la mise en place d'une modélisation permettant, à partir des paramètres matériaux, des côtes des masques dans l'enchaînement technologique, de l'électronique de commande, le tout décrit dans un ensemble logiciel cohérent, de prévoir rapidement le comportement du système et de le comparer ainsi aux spécifications systèmes du cahier des charges.

Parallèlement, la création de Fonderies "Microsystèmes", qui se sont révélées viables, a profondément modifié les perspectives industrielles. Elles permettent de relever le défi de produire à coût concurrentiel des microsystèmes complexes en "petites séries". Elles ouvrent un champ d'activité de «systèmeur» aux Entreprises Moyennes sans qu'il soit nécessaire pour celles-ci de mettre en œuvre des moyens technologiques lourds.

Ce concept impose donc que soient développées des méthodologies nouvelles de Simulation et de Conception Assistées par Ordinateurs: celles-ci doivent non seulement décrire le comportement des composants élémentaires nouveaux, micro capteurs et micro actionneurs, mais aussi simuler le comportement global du microsystème en faisant appel aux ressources déjà mises en œuvre par les méthodologies de CAO des circuits intégrés.

Il faut noter que le concept de "Fonderies Microsystèmes" s'est fait jour en Europe dans le cadre des travaux des Projets Esprit "**BARMINT**" et "Demac". Simultanément les travaux financés

par l'ARPA aux Etats Unis sur la base des plates formes technologiques implantées au "Microelectronics Center of North Carolina" et au MOSIS ont aussi montré le bien fondé d'une telle approche. Par ailleurs, en Europe, le programme **EUROPRACTICE** a permis de mettre en place plusieurs fonderies de type "Microsytèmes". *J'ai depuis l'origine participé à ces programmes et en assure la responsabilité LAAS depuis la deuxième phase contractuelle (Europractice II).*

Il est à noter d'autre part que **les filières technologiques pour les microsystèmes ne sont pas génériques** à l'inverse de celles des Circuits Intégrés numériques. Il est donc primordial pour la diffusion des microsystèmes de pouvoir tester le comportement d'un micro système dans le cadre d'une application pour laquelle il n'a pas été conçu. Ceci pose immédiatement une problématique d'estimation de la fiabilité au-delà de la capacité à remplir la mission assignée.

L'un des domaines d'application où la fiabilité est un facteur primordial est le domaine spatial. En effet l'utilisation de microsystèmes dans ce domaine permet d'assurer une réduction des coûts par la réduction de poids et par l'utilisation de composants non dédiés. Nous avons donc entrepris de participer au développement d'une méthodologie de conception par Prototypage Virtuel de systèmes intégrés avec l'ambition d'introduire les aspects de fiabilité.

Un partenariat, conforté par le financement EADS/CNES de la bourse CIFRE de Mlle Petra SCHMITT (soutenance décembre 2004), accompagné d'un contrat industriel, s'est mis en place avec pour objectif de définir une méthodologie de prototypage pour «un passager technologique» à partir de MEMS non dédiés (le choix s'est porté sur les accéléromètres d'Analog Device (ADXL 50) et de Tronics Microsystems SA.

E- Travaux antérieurs: Intégration de microsystèmes

BARMINT (1993-1996)

Dès 1994, l'intérêt pour une démarche d'intégration de systèmes complets et d'ouverture des microsystèmes en dehors de la mécanique vers la manipulation de fluide ou de faisceaux optiques nous a conduits à participer à l'élaboration du programme Européen BARMINT dont le LAAS était leader (Partenaires: National Microelectronic Research Center de Cork, Universitat de Barcelona, Centro Nacional de Microelectronica de Barcelone, Technical University of Budapest, TIMA à Grenoble, Technical Hochschule de Darmstadt, Technical University of Lodz).

La finalité de ce projet était de définir les nouvelles technologies et méthodologies pour le développement des Microsystèmes. La stratégie adoptée était d'articuler le travail autour de deux démonstrateurs (l'un à vocation médicale et l'autre à vocation micro robotique). Le L.A.A.S. était impliqué dans la réalisation technologique de microstructures passives (micro valves) et actives (micro pompes) ainsi que dans l'adaptation du procédé d'assemblage 3D, CUBIC. Ce travail s'est déroulé en collaboration pour les aspects technologiques avec le C.N.M et le N.M.R.C., pour les aspects de

modélisation et simulation avec U.B. et T.U.L., pour les aspects modélisation fonctionnelle avec T.H.D.

J'étais directement en charge de deux aspects de ce projet:

- la réalisation de la *micro-pompe combinant micro-usinage de volume et micro-usinage de surface* (Thèse Z. Sbiaa)
- *l'assemblage tridimensionnel compact* du démonstrateur intégrant connexions optiques, fluidiques et électriques avec l'actionneur (micro-pompe), les capteurs (ISFET et Pression) et les capacités de gestion interne (commande et traitement de l'information) par adaptation du procédé CUBIC (Thèse. A. Val)

Il est apparu clairement à la suite de ce projet que:

- l'extension des applications en dehors *des applications mécaniques serait l'enjeu futur des microsystèmes* ouvrant ainsi de larges domaines d'application où l'innovation est importante
- la nécessité d'envisager une *approche système* et de concevoir globalement un objet avec toute la pluridisciplinarité nécessaire.

A ce titre, le programme BARMINT a été à l'origine de plusieurs développements thématiques au LAAS et à l'extérieur de ce laboratoire.

F- Travaux antérieurs: micro-fluidique – (1993 - 2000)

Micro-pompe & micro-diode

La micro fluidique est un champ d'investigation important et nouveau pour les microsystèmes dont les applications sont potentiellement nombreuses. Nous ne citerons pour exemple que le domaine médical avec l'injection de médicament nécessitant la manipulation contrôlée de petites quantités de liquide pouvant être complexes et plus récemment les applications à la biologie, et pour les applications à la microélectronique, les microsystèmes de refroidissement et le pompage de gaz pour le maintien hors pollution des plaquettes de silicium entre les étapes de fabrication.

Un premier travail, sur la conception et la réalisation d'une micro-pompe, et les assemblages fonctionnels a été le point de départ du démonstrateur développé avec le support du CNRS par l'intermédiaire du programme MICROMED.

Rapidement, il est apparu qu'au-delà de l'aspect démonstratif de la capacité des microsystèmes à adresser des domaines innovants, un point clé de l'avenir des microsystèmes porterait sur la fiabilité.

Dans le cadre des systèmes fluidiques les micro-valves, éléments des micro-pompes, ont un rôle essentiel dans tous les phénomènes de transport et de contrôle de fluide, liquide ou gazeux. La majorité des micro-valves, qu'elles soient actives (commandées) ou passives (réagissant à l'écoulement), comportent des parties mécaniques mobiles. Il en résulte des difficultés de réalisation

technologique et une fiabilité limitée par des risques de rupture ou d'encrassement, particulièrement avec des fluides complexes, tels que ceux utilisés dans les domaines biologique et médical.

Nous avons donc développé une étude sur les diodes fluidiques en partenariat avec des spécialistes de la mécanique des fluides.

Cette collaboration s'est formalisée par des réalisations conjointes (micro diodes, micro canalisations, micro tuyères) et des études de dimensionnement et d'évaluation (micro pompage par transpiration thermique ou par actionnement électrostatique).

D'autre part j'ai participé et participe encore à plusieurs initiatives au niveau national:

- le groupement au sein de la Société des Hydrauliciens de France
- animation de l'AS micro fluide
- membre du comité scientifique du PIR micro fluide du CNRS.
- Membre du comité d'organisation des colloques μ Flu'02 et μ Flu'04 à Toulouse

SYNTHÈSE DES TRAVAUX RÉCENTS:

**CONTRIBUTION À LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE
MICROSYSTÈMES ÉLECTROSTATIQUES**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Mon activité s'inscrit, depuis 1990, dans le cadre des recherches engagées au LAAS/CNRS sur le développement des microsystèmes. Les principes et les orientations de ce champ d'activités sont nés aux USA dans les années 80, plus précisément à l'Université de BERKELEY. Il s'agissait de créer, sur silicium, de véritables systèmes très miniaturisés comportant des capteurs, des actionneurs et du traitement du signal. L'idée mise en avant était celle du micro usinage du silicium permettant de créer à côté des fonctions électroniques, des fonctions mécaniques ; c'est ainsi qu'est apparu le concept de MEMS (Micro Electro Mechanical System).

Il faut inscrire cette émergence des microsystèmes dans l'histoire de la microélectronique. Il serait vain de vouloir retranscrire cet historique exhaustivement, historique largement développé dans la littérature. On peut cependant poser des marqueurs illustrant cette évolution, soit en termes techniques soit en termes de réalité industrielle [Judy 01].

1947	Invention du transistor
1954	Effet piézorésistif dans le Ge et le Si (Smith)
1967	Micro usinage de surface (Nathanson)
1970	Démonstration de premier accéléromètre (Kulite)
1977	Démonstration d'un capteur de pression (Stanford)
1980	Miroir silicium en torsion (Petersen)
1984	Micro Electro Mechanical Systems en polysilicium (Howe, Müller)
1988	Micromoteur (Müller)
1989	Peigne électrostatique (Howe)
1992	Atténuateur de lumière Procédé Multi Users MEMS Process Service
1993	ADXL50 d'Analog Device
1998	Première de Star Wars (utilisation des Digital Micromirror Device de Texas Instruments)

On peut constater que très tôt les chercheurs ont exploré différentes facettes dans l'intégration microsysteme : par la voie des procédés (micro usinage de surface) ou par la voie des dispositifs (pression, accélérations...) sans pour autant déclencher un mécanisme d'entraînement au niveau industriel.

L'analyse que nous faisons de cet historique est qu'une mobilisation importante s'est effectuée sur la démonstration d'une capacité d'actionnement très flexible par effet des forces électrostatiques : l'élément décisif est sûrement la conception et la réalisation d'un moteur électrostatique, de la taille d'un cheveu pouvait-on lire dans la presse. Cet exemple, avec d'autres, apportait la preuve d'une ouverture vers l'intégration système à une échelle microscopique. Un colloque sous l'égide de la NSF rassemblait les meilleurs experts du moment pour évaluer la portée du nouveau concept. Plus de cinquante applications en technologie avancée furent identifiées, suffisamment stratégiques pour motiver une action d'envergure. Très vite le Japon (Micromachine Center) et l'Europe (Micro Systems Technologies) se joignirent à cet effort.

Notre laboratoire a été très actif dans cette mobilisation en Europe, en sensibilisant la communauté Européenne et le gouvernement Français à ces technologies émergentes. Avec le LETI et quelques laboratoires et entreprises, nous avons été les fondateurs du Réseau NEXUS et de l'association ADEMIS. Pour ma part, j'ai participé à l'organisation à Toulouse d'un colloque : Des capteurs aux microsystemes Intelligents [ESTEVE 91].

La problématique microsysteme pose cependant deux grandes questions :

- une première question est la distinction à faire entre la microélectronique et les micro technologies: peut-on dire que les microsystemes se situent dans le prolongement de la microélectronique ? Dans les années 90, les objectifs apparaissaient très différents. La microélectronique visant un objectif de réduction des dimensions (loi de Moore) et les microsystemes s'inscrivant clairement dans la perspective d'intégration hétérogène et pluridisciplinaire. Aujourd'hui l'analyse doit être plus mesurée avec le concept de «Systems On Chip» où la microélectronique rejoint très vite des motivations microsystemes.
- Une deuxième question est justement de bien comprendre les motivations microsystemes : quels sont les avantages et les limites du concept ? L'argument d'origine était double : accroître les fonctionnalités et réduire les coûts. Très vite les limites sont apparues dans l'exploitation industrielle car peu de dispositifs multi fonctionnels peuvent faire l'objet de production de masse (dizaine de millions de pièces). Les exemples qui ont fait le succès des microsystemes sont dans l'industrie

automobile comme l'airbag et dans l'industrie de la péri informatique : les jets d'encre, les matrices pour la projection. Il était donc nécessaire de chercher une autre stratégie pour ouvrir les champs d'application : la recherche et les chercheurs étaient invités à réduire les coûts des développements en ouvrant un accès plus facile à la conception des microsystèmes et au prototypage. C'est ainsi que le LAAS-CNRS est devenu, dans le cadre du projet IMPACT, infrastructure d'accès au niveau Européen. Nous-même avons participé très activement dans l'action Europractice comme « Design House » (société de conception) et en tant qu'expert pour la mise en place d'une filière microsystème à vocation industrielle et d'enseignement en « Multi Project Wafer ». De cette manière, de très nombreuses idées ont pu être expérimentées dont l'intérêt majeur est d'avoir exploré de nombreux procédés compatibles qu'il reste encore à valider sur des applications spécifiques.

Deux grands domaines de composants se sont développés dans les années récentes :

- les MEMS RF fondés sur l'utilisation en circuits hyperfréquences d'interrupteurs électrostatiques
- les MOEMS fondés sur l'actionnement électrostatique des micro miroirs, pour des applications à la projection d'image et à l'ingénierie des longueurs d'ondes pour les télécommunications.

On remarquera le rôle central des actionneurs électrostatiques dans ces deux axes de développement. Notre activité s'est surtout développée sur les dispositifs micro miroirs et les systèmes associés (un autre groupe du LAAS s'occupe des MEMS RF).

Ces domaines d'application sont déjà très importants et porteurs de dispositifs produits en masse comme on peut le souhaiter. Plus récemment (1997), de nouvelles perspectives sont venues renforcer encore le potentiel de développement des microsystèmes. Ce sont les bio- puces et les laboratoires sur puces. L'avenir des microsystèmes est donc bien assuré: ils prendront sûrement des formes et des compositions diverses selon les fonctions embarquées : mécanique, optique, RF, chimique et biochimique.... L'axe fort devrait être l'introduction de technologies et le développement des outils de conception associés. On devrait trouver des réalisations couvrant :

- d'un côté, les systèmes réalisés sur silicium : Systems On Chip (SOC),
- d'un autre côté, les systèmes assemblés comportant des puces en silicium mais aussi d'autres matériaux actifs ou de conditionnement. L'histoire récente milite en faveur des polymères : nous y reviendrons dans notre dernier chapitre.

Ce bref résumé de l'histoire des microsystèmes depuis leur émergence fin des années 80, montre que **l'actionnement électrostatique a joué et continue de jouer un rôle majeur dans les fonctions embarquées**. Comme nous l'avons fait remarquer, cette importance était visible dès l'origine avec l'exemple des moteurs électrostatiques. Notre décision d'explorer cette voie a été confirmée par une étude conduite en collaboration (1993), avec le LEEI puis avec le SATIE après que le ministère de la Recherche ait sollicité le LAAS et le LEEI pour réaliser une version française du moteur électrostatique de Berkeley. Dans cette étude étaient comparés les potentiels respectifs de l'actionnement électromagnétique et électrostatique. Sur l'essentiel, on peut affirmer que dans les actionneurs à courtes distances (quelques microns), l'électrostatique est plus compacte, plus simple et plus efficace.

Nous avons construit notre travail sur la base d'exemples d'application qui ont été choisis pour leur pertinence en termes de dispositif, pour leur support à la compréhension et à la maîtrise des mécanismes physiques mis en jeu et des technologies.

Notre présentation comporte quatre chapitres qui tentent d'illustrer l'évolution des microsystèmes vers la complexité et une hétérogénéité croissante.

Dans un premier chapitre, nous introduirons très brièvement les principes et les lois des mécanismes de base ainsi que les procédés de réalisations les plus classiques permettant la mise en œuvre : micro usinage de volume et micro usinage de surface. Ce sont des procédés qui sont aujourd'hui bien développés dans les centrales technologiques. Nous reviendrons toutefois sur la modélisation des mécanismes physico-chimiques de la gravure chimique anisotrope : même si le procédé est aujourd'hui remplacé dans beaucoup de cas par la RIE profonde (ou DRIE : Deep Reactive Ion Etching), le travail de modélisation réalisé garde toute sa valeur. Quelques exemples tirés dès l'origine du concept microsystème illustreront les premières idées d'application. Nous présenterons bien sûr nos travaux sur la conception et la réalisation d'un micromoteur électrostatique : c'est un travail de commande qui a l'avantage d'introduire les problématiques des MEMS qui ont constitués notre domaine de travail pendant plus de 15 ans : micro usinage, libération des pièces mobiles, effets de collage des matériaux, effets électrostatiques parasites, contraintes des couches libérées, modélisations associées...

Le deuxième chapitre présentera donc la conception et la réalisation d'un miroir à commande électrostatique pour les grandes amplitudes de mouvement. La motivation de ce travail tient à la collaboration avec le groupe RIA (Robotique et Intelligence Artificielle), sur la conception d'un système de perception 3D de l'environnement. En 1997, la robotique mobile nécessitait

le développement d'un capteur embarqué. L'intérêt industriel étant établi et un microsystème à base de miroir pouvait apporter une solution élégante et compétitive. Nous verrons les résultats obtenus et les éléments d'une filière que nous avons apportés et qui ont été repris par ailleurs depuis lors.

Le troisième chapitre propose une extension vers les miroirs utilisés en mode digital. Nous situerons le moment venu, précisément, les origines de ces travaux liés à l'explosion de l'intérêt porté aux microsystèmes pour les télécommunications optiques. Nous avons pu, par des projets industriels, apporter notre savoir faire et bénéficier d'un enrichissement intéressant vers les systèmes intégrés complexes. Dans ce projet nous avons contribué à la définition et à la modélisation des dispositifs et avons bénéficié des technologies de la société TRONICS Microsystems pour les réalisations. Nous discuterons les résultats et essayerons d'évaluer leurs portées à plus long terme.

Après avoir traité des miroirs à la résonance ou en commutation, nous chercherons, dans le chapitre 4, à franchir de nouvelles étapes vers des microsystèmes plus complexes et nous présenterons une prospective de recherche. La question est venue initialement de nos collègues astrophysiciens : il s'agit de corriger les aberrations liées aux perturbations atmosphériques pour l'observation depuis le sol d'objets lointains et peu lumineux. L'approche que nous avons développée avec notre collègue F. Zamkotsian du LAM est un microsystème corrigeant les différences de phase reconfigurant l'onde reçue en onde plane par le biais d'un actionnement vertical commandé en position et à surface continue. Nous avons pour ce faire, utilisé de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. Cette ouverture correspond à une évolution de l'ensemble du groupe de recherche auquel je participe et à une évolution du secteur. Elle vise à introduire, dans les microsystèmes, la richesse des polymères pour y puiser des nouvelles fonctionnalités et des nouvelles baisses des coûts. C'est un dossier que nous ouvrirons dans notre prospective.

Le travail que nous tentons ici de présenter de manière très construite et très logique s'est déroulé de manière plus chaotique compte tenu du caractère finalisé de certaines études. Toutefois, nous avons tenté d'appliquer des principes de travail rigoureux :

- nous avons conduit nos projets applicatifs selon une approche systématique de modélisation et de construction de prototypage virtuel avant d'engager les étapes technologiques
- nous avons toujours communiqué nos résultats dans une perspective de réutilisation tant en technologie qu'en analyse physique.

Ce travail n'aurait pas pu se faire sans l'environnement dont nous avons bénéficié au laboratoire, notamment des collègues des services TEAM (Techniques et Equipements Appliqués à la Microélectronique) en premier lieu et 2I (Informatique et Instrumentation) mais également des collègues du laboratoire en particulier au sein du groupe MIS (Microsystèmes et Intégration des Systèmes).

Chapitre I

Les micro-usinages : des technologies clefs des microsystèmes

I-1 Introduction

Dès les années 60, la gravure du silicium était un sujet d'étude à la fois pour la mise en évidence des défauts dans un cristal de silicium et pour la possibilité de graver un cristal de manière isotrope [ROBBINS 59, ROBBINS 76]. Ce n'est que dans les années 75 que la mise en évidence du caractère anisotrope est apparue comme un élément permettant la réalisation de formes tridimensionnelles par l'usinage sélectif du substrat. Il était dorénavant possible de créer des membranes, des trous, des cavités et bien d'autres formes, de bénéficier de la remarquable qualité mécanique du silicium et ceci en utilisant des procédés chimiques qui bien qu'agressifs peuvent être compatibles avec les technologies du circuit intégré. Créer une membrane donnait la possibilité de mesurer par différence de capacité une variation de pression, réaliser une masse suspendue par des bras de mesurer l'accélération... [Rudolf 91]. La voie était ouverte pour la fabrication de capteurs et de microsystèmes dès que l'électronique est associée, en bénéficiant de l'aspect collectif, du moindre coût, de la miniaturisation et de la simplicité du procédé de gravure chimique anisotrope.

Nous commencerons notre présentation par un rappel du mécanisme d'actionnement électrostatique, de la façon dont on peut l'appliquer et citerons à partir de la littérature quelques cas d'application qui mettront très vite en évidence les technologies qui peuvent permettre de les mettre en œuvre et entrerons ensuite dans le détail de nos propres orientations :

- la gravure chimique anisotrope par KOH
- l'usinage de surface

Nous analyserons pour terminer les avantages et inconvénients de ce type d'actionnement avant de passer aux applications.

Cet actionnement a pour origine l'interaction électrostatique créée entre 2 armatures conductrices polarisées à des potentiels différents. La répartition du champ électrique entre les armatures est calculée en tenant compte de la géométrie du système. Ainsi, on peut déduire la pression électrostatique s'exerçant à la surface du conducteur grâce à l'équation suivante :

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \vec{n} \text{ avec } \vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \vec{n}$$

où ε est la permittivité du milieu inter-électrode, \vec{E} le champ électrique à la surface du conducteur, σ la densité surfacique de charge et \vec{n} la direction normale au conducteur. C'est cette pression appliquée à la partie mobile du dispositif qui va créer le déplacement. L'utilisation est généralement réalisée par le biais des potentiels et le cheminement de calcul général est : Potentiel électrostatique \rightarrow Champ électrostatique \rightarrow Densité de charge surfacique \rightarrow Pression électrostatique \rightarrow Force ou moment électrostatique.

L'analyse que nous avons menée nous a permis de montrer qu'il existe 2 types de structure silicium à actionnement électrostatique : celles obtenues par micro usinage de *surface* et celles obtenues par

micro usinage de *volume*. Cette analyse est effectuée à travers le filtre des applications à l'optique qui constituera un axe important de notre activité.

I-1-1 Le micro usinage de surface

Ce type de procédé est en fait dédié à l'usinage des couches minces déposées sur un substrat de silicium (polysilicium, oxyde de silicium, nitrures...). Il est clair que le déplacement mécanique de la structure utile pour le fonctionnement de tout actionneur, nécessite un, voire plusieurs, degrés de liberté. Pour cela, des couches sacrificielles (oxyde de silicium, polymère...) sont dans un premier temps déposées entre les différentes couches minces puis dissoutes en fin de fabrication à l'aide d'un solvant sélectif. Des mouvements d'une couche par rapport à une autre deviennent alors possibles.

Cette technique a été démontrée par Nathanson *et al.* qui réalisent en 1967 le Resonant Gate Transistor (RGT) [Nathanson 67]. Ce sont les premiers à utiliser une couche sacrificielle pour suspendre leurs bras de levier.

Kiang *et al.* du Berkeley Sensors and Actuators Center de l'Université de Californie utilisent 4 couches de polysilicium de 2 μm d'épaisseur pour réaliser leur micro miroir [Kiang 96]. Les degrés de liberté sont obtenus à l'aide d'une couche sacrificielle d'oxyde de silicium de 5000 Å (Figure I-1). La structure est surélevée grâce à un guide placé derrière celle-ci. Le mouvement est engendré par un ensemble de doigts interdigités communément appelé peigne électrostatique. Une tension sinusoïdale d'amplitude 9,5 Volts superposée à une tension continue de 30 Volts permet des angles de balayage de 28° à une fréquence de 3kHz.

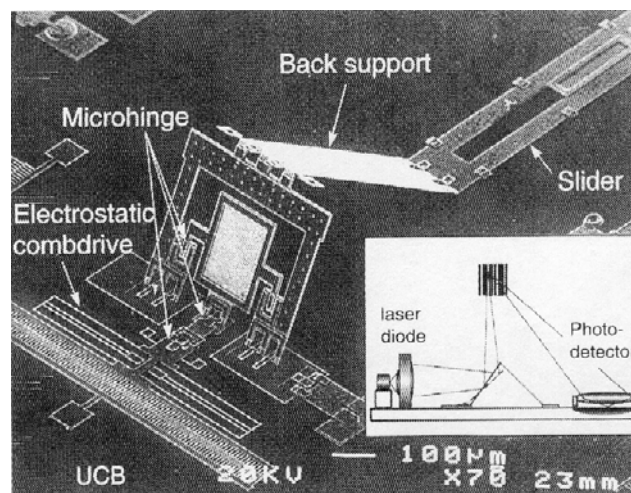


Figure I-1: Le scanner pour code barres de Berkeley

Le scanner 2D de Fan *et al.* [Fan 98] d'un des premiers fondeurs américains, le Microelectronics Center of North Carolina, reprend l'idée du guide précédemment évoqué et l'applique à la technologie 3 couches de polysilicium du célèbre programme MUMPs (Multi-User MEMS Processes). Quatre de

ces éléments placés au milieu des quatre côtés du dispositif surélèvent ainsi l'ensemble du dispositif (Figure I-2). Des électrodes placées sous le miroir de $400\ \mu\text{m}$ par $400\ \mu\text{m}$ créent des angles optiques de 28° pour une tension de 70 Volts et une fréquence de 1,5 kHz.

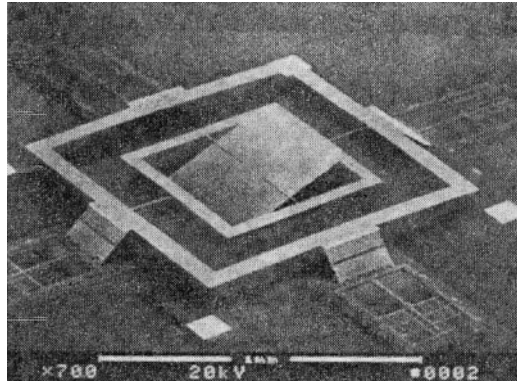


Figure I-2: Le miroir 2D de Fan

Le dispositif développé par le LETI en 1998 [Petroz 98] est original par le fait qu'il utilise un système de lentilles en SiO_2 de $30\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. Le déplacement latéral d'une d'entre elles entraîne la déviation du faisceau laser traversant la lentille. Conçu dans un premier temps pour fonctionner en mode statique, ce composant offre des angles de débattement de $26,4^\circ$ à 440 Hz sous une excitation de 67 Volts.

I-1-2 Le micro usinage de volume

À la différence de l'usinage de surface, ce procédé technologique utilise non plus la gravure des couches minces de surface mais celle du substrat de silicium lui-même. En effet, on peut, par des gravures appropriées, obtenir la partie mobile de l'actionneur (1^{ère} armature) à partir du silicium massif du wafer. Il existe deux raisons pour lesquelles cet usinage en volume est une solution viable pour les microsystèmes :

- le silicium peut être gravé de manière anisotrope en utilisant des produits spécifiques tels l'hydroxyde de potassium KOH, le tétraméthyl ammonium hydroxyde (TMAH), l'éthylène diamine pyrocatecholé (EDP) ou l'hydrazine N_2H_4 . La forme finale du système est alors fixée par les plans cristallographiques du silicium,
- des couches minces comme les nitrures de silicium ou son oxyde peuvent servir de couches de masquage pendant l'étape de gravure et ainsi protéger certaines régions du substrat.

Dans la plupart des cas, la 2^{ème} armature est localisée sur un autre substrat. Il devient alors nécessaire d'assembler les deux composantes (collage, soudure anodique ou wafer bonding...).

L'un des premiers micro déflecteurs électrostatiques réalisés par usinage de volume est celui de Petersen [Petersen 80]. La structure suspendue est reportée sur une plaque de verre support des électrodes évaporées (Figure I-3).

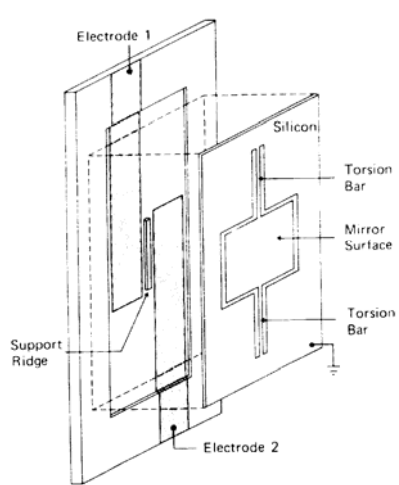


Figure I-3: Le dispositif de Petersen

Dötzel *et al.* de l'Université de Chemnitz soudent également des miroirs de torsion de 3 mm par 3 mm sur un substrat de verre [Dötzel 97]. L'épaisseur des barres de torsion est de 30 μm pour un entrefer de 370 μm . Des angles optiques de 40° sont atteints pour des fréquences dans la gamme 100 Hz à quelques kHz et des tensions jusqu'à 1000 Volts.

Le scanner de Lang [Lang 99] est plus classique avec la structure suspendue et les électrodes réalisées sur des plaquettes séparées puis reportées sur un support de verre (Figure I-4). À l'aide de barres de section 10 μm par 4 μm , des déflexions optiques de 22° sont obtenues à 80 Hz et pour une tension de 25 Volts.

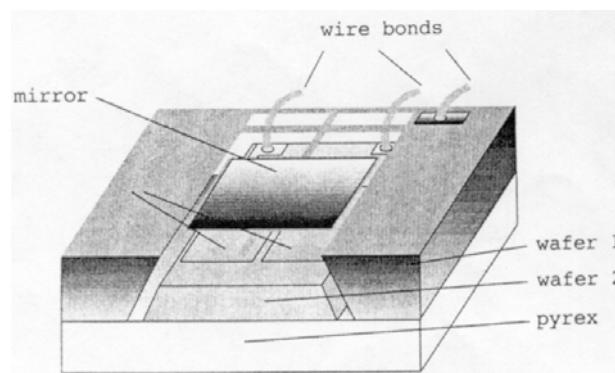


Figure I-4: La structure de Lang

Plus récemment est apparue une nouvelle technique d'actionnement électrostatique. Si le système est toujours un miroir de torsion, le procédé d'activation de la structure change. Ce sont les peignes électrostatiques placés sur les côtés du miroir qui génèrent le mouvement de torsion. De par les petites

dissymétries parasites dues au procédé technologique, les positions d'équilibres mécaniques et électrostatiques ne sont pas identiques. Si bien qu'une tension appliquée au niveau des doigts du peigne va initier puis maintenir la rotation. Schenk *et al.* [Schenk 00] développent un tel micro scanner à 2 axes (Figure I-5). Les caractéristiques fonctionnelles sont les suivantes : 22° pour la rotation du miroir central (1,5 mm par 1,5 mm) à 1,45 kHz sous 16 Volts et 8° pour la rotation du cadre extérieur à 1,8 kHz sous 22 Volts.

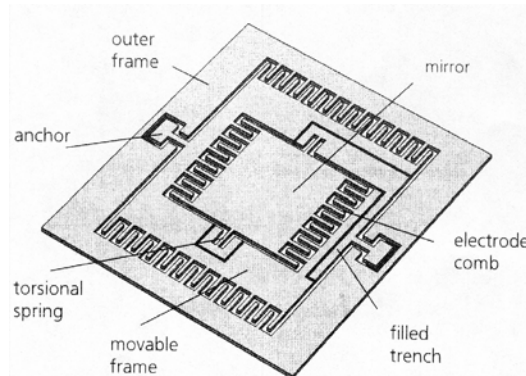


Figure I-5: Le scanner de Schenk

L'actionneur développé par Dhuler *et al.* du MCNC [Dhuler 97] utilise à la fois le micro usinage de surface et de volume. En effet, le dispositif est réalisé, d'une part, grâce à l'usinage des couches de polysilicium sur la face avant et, d'autre part, grâce à une gravure anisotrope face arrière. Des angles de balayage de 27° sous environ 100 Volts sont atteints à des fréquences de l'ordre de 10kHz.

I-2 Gravure chimique anisotrope du silicium

La gravure chimique anisotrope du silicium est très vite devenue une technique très répandue pour la réalisation de formes 3D dans les matériaux cristallins tels que le silicium mais également l'arséniure de gallium ou le quartz, et ceci aussi bien dans les laboratoires que dans l'industrie, pour la réalisation de capteurs, ou plus généralement de systèmes micro électromécaniques. Le procédé consiste à graver le silicium dans des solutions aqueuses alcalines à fort pH (EDP, KOH, NH₄OH, TMAH) à travers un masque de nitrure de silicium ou d'oxyde de silicium. Les vitesses de gravure sont dépendantes de l'orientation cristalline générant ainsi une forme 3D limitée par des plans du cristal. Le résultat obtenu dépend de plusieurs paramètres tels que : orientation du substrat, du masque, température, concentration, nature de la solution de gravure... Les mécanismes mis en jeu sont multiples et appartiennent à plusieurs domaines tels que la chimie, l'électrochimie et les mécanismes de surface.

En dehors de la reproductibilité d'un procédé à la fois chimique et électrochimique dépendant d'un grand nombre de paramètres, la prédétermination des formes est un des problèmes majeurs pour la conception de structures. Quelques outils de CAO (Intellicad, SIMODE, MicroCAD) permettent de

définir à partir des masques et des conditions opératoires (température, nature de la solution, concentration) la forme gravée au cours du temps [Senturia 92]. La simulation est effectuée en utilisant une méthode géométrique considérant chaque plan comme évoluant suivant sa normale avec une vitesse constante [Jaccodine 62, Danel 92]. Les règles consistent alors à une formation des formes gravées par les plans lents pour les angles fermés et pour les angles ouverts par les plans rapides. Ceci conduit, en dehors des cas de propagation des facettes existantes, soit à la disparition de facettes, soit à l'apparition de nouvelles facettes. Il est donc indispensable de connaître avec le plus grand détail l'ensemble des vitesses (diagramme polaire) pour toutes les directions cristallographiques afin de prévoir l'instant de disparition d'une facette pour adapter le pas de temps du simulateur, ou de déterminer sans exclusive la nouvelle facette émergente ce qui oblige à avoir une description continue (sans rupture) du diagramme polaire des vitesses.

Bien que faisant l'objet de nombreuses publications, les données expérimentales disponibles sur les vitesses de gravure couvrent rarement l'ensemble des directions cristallographiques. D'autre part les données sur les vitesses de gravure lorsqu'elles sont fournies, sont souvent considérées comme stratégiques et l'accès en est difficile. Nous avons pu cependant utiliser les données de C. Tellier [Tellier 89, Bounab 92]] obtenues en variation d'épaisseur à partir de tranches découpées suivant différentes orientations et celles de K. Sato [Sato 89, Sato 00] travaillant sur la variation de rayon d'une sphère usinée.

Si le mécanisme chimique de base est décrit par Seidel dès 1990 [Seidel 87 & 90], la modélisation des vitesses est soit le résultat d'une description analogique tirée de l'expérience et uniquement sur les deux orientations principales (<100> et <110>), soit la compilation de données souvent dispersées.

La littérature donne la formule suivante, liant la vitesse de gravure R à la concentration des espèces chimiques H₂O et KOH dans le bain, à la température T, à l'énergie d'activation de la réaction E_a et à un certain coefficient k₀ :

$$R = k_0 [H_2O]^4 \cdot [KOH]^{1/4} \cdot e^{-\frac{E_a}{k.T}}$$

où k est la constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³ J.K⁻¹).

Cette formule est semi-empirique, car, si son expression générale tire son origine dans les théories de la cinématique de réaction, en revanche, le coefficient k₀ et l'énergie d'activation E_a sont issus des données expérimentales, et, en plus, dépendent de l'orientation du cristal de silicium à la surface (Tableau I-1).

orientation	K ₀ (μm.h ⁻¹ .(mol.L ⁻¹) ^{-4.25})	E _A (EV)
<100>	2480	0,595
<110>	4500	0,600

Tableau I-1 : les paramètres de la représentation de Seidel

L'influence du cristal sur le mécanisme de gravure n'est pas prise en compte et les considérations de densités de liaisons en surface ne peuvent pas rendre compte de la réalité du phénomène en particulier du rapport d'anisotropie des plans $\langle 111 \rangle$.

À partir de l'expérience acquise dans le Groupe sur la simulation de la croissance hétéroépitaxiale par modélisation à l'échelle atomique, nous avons entrepris le développement d'un simulateur de la gravure chimique anisotrope appliqué au couple silicium/KOH dont l'objectif était de déterminer les vitesses de gravure et les énergies macroscopiques d'activation pour l'ensemble des directions cristallographiques.

Une première originalité de ce travail réside donc dans le choix du mécanisme élémentaire de la gravure, ce mécanisme étant cohérent vis-à-vis d'une approche électrochimique [Allongue 93]. Après fixation d'un radical OH^\cdot sur les liaisons libres de surfaces, pour chaque liaison Si-Si, la probabilité de cassure est calculée en fonction du nombre de radicaux OH^\cdot attachés aux deux atomes de silicium entourant la liaison par une loi de type Arrhénius dont l'énergie d'activation dépend du nombre de radicaux OH^\cdot . La fragilité de la liaison Si-Si est d'autant plus grande que le nombre de radicaux OH^\cdot est grand. Ceci permettra une première classification a priori des énergies d'activation microscopiques. L'ensemble des configurations de surface peut alors se décrire à partir d'un jeu de huit énergies microscopiques d'activation.

Ce mécanisme permet de prendre en compte toutes les possibilités de cassure des liaisons des atomes superficiels et de prévoir, selon une procédure de Monte Carlo, la "date" de la cassure. La probabilité de cassure par unité de temps est définie par :

$$P(i,j) = \nu \exp(-\Delta E(i,j)/kT)$$

avec ν la fréquence de vibration du réseau dont la valeur est comprise entre 10^{-12} et 10^{-14} .

La durée de vie de cette liaison est définie par :

$$t(i,j) = -\text{Ln}(z)/P(i,j)$$

avec z un nombre aléatoire équiréparti entre 0 et 1.

Le programme de calcul se construira suivant la représentation indiquée dans le tableau I-2 et suivra les étapes suivantes :

- *Étape préalable* : Création d'un cristal orienté ($\langle hkl \rangle$), tabulation des voisins et mise en place des conditions de périodicité sur les faces latérales,

- *Étapes de calcul* (Module de gravure):

- 1) calcul des $t(i,j)$,
- 2) choix du $t(i,j)$ le plus proche dans le temps définissant la liaison à casser,
- 3) modification des configurations environnantes suite à la cassure,
- 4) calcul des nouvelles dates pour les liaisons modifiées,

5) test d'arrêt général (lorsque la variation de vitesse est inférieure à une limite fixée 0,1 %)

Si non, bouclage sur 2, si oui arrêt du module de gravure,

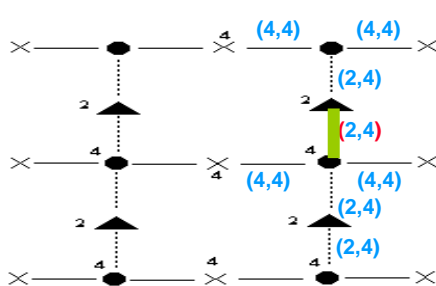
- *Étapes de post-traitement* : analyse des surfaces en termes de population de configuration, de relief,

.....

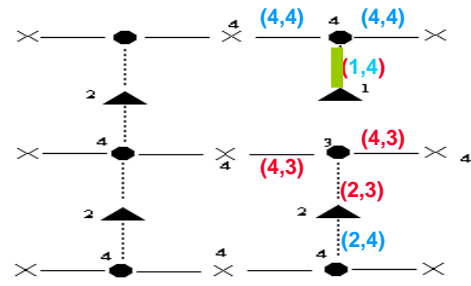
Nombre Hydroxyde	Probabilité	Configurations	Energies associées	Classement relatif initial
1	$P(4,3) = P(3,4)$	Si-Si(OH)	$\Delta E(3,4)$	+++++
2	$P(3,3)$	(OH)Si-Si(OH)	$\Delta E(3,3)$	++++
	$P(4,2) = P(2,4)$	Si-Si-(OH) ₂	$\Delta E(2,4)$	++++
3	$P(3,2) = P(3,2)$	(OH)Si-Si-(OH) ₂	$\Delta E(2,3)$	+++
	$P(4,1) = P(1,4)$	Si-Si-(OH) ₃	$\Delta E(1,4)$	+++
4	$P(3,1) = P(1,3)$	(OH)Si-Si-(OH) ₃	$\Delta E(1,3)$	++
	$P(2,2)$	(OH) ₂ Si-Si-(OH) ₂	$\Delta E(2,2)$	++
5	$P(1,2) = P(2,1)$	(OH) ₃ Si-Si-(OH) ₂	$\Delta E(1,2)$	+

Tableau I-2 : les différentes configurations prises en compte et les énergies et probabilités associées (à ce stade aucune valeur numérique n'est fixée)

La figure I-6 ci-dessous donne un exemple simple de dégradation de la surface dans le cas d'une surface initiale de type <100>. La population initiale présente est celle des (2,4), puisque les (4,4) correspondent à des atomes du substrat situés sous la surface. La cassure d'une liaison (2,4) (en vert en i) entraîne l'apparition d'une liaison (1,4) et la modification de deux liaisons (4,4) en (2,3) et d'une (2,4) en (2,3) (voir en ii). La répartition des populations en surface est donc modifiée ainsi que leur pourcentage relatif. Suivant notre classement énergétique initial, la liaison (1,4), bien que récente, aura une durée de vie limitée et donc une forte probabilité d'être cassée avant les autres. C'est ce cas de figure, fortement probable mais non certain, qui est considéré dans l'étape suivante (voir iii). Il en résulte une nouvelle répartition de configuration et le départ par détachement d'un atome de silicium.



(i) Situation initiale <100>



(ii) après un événement (cassure d'une liaison (2,4))

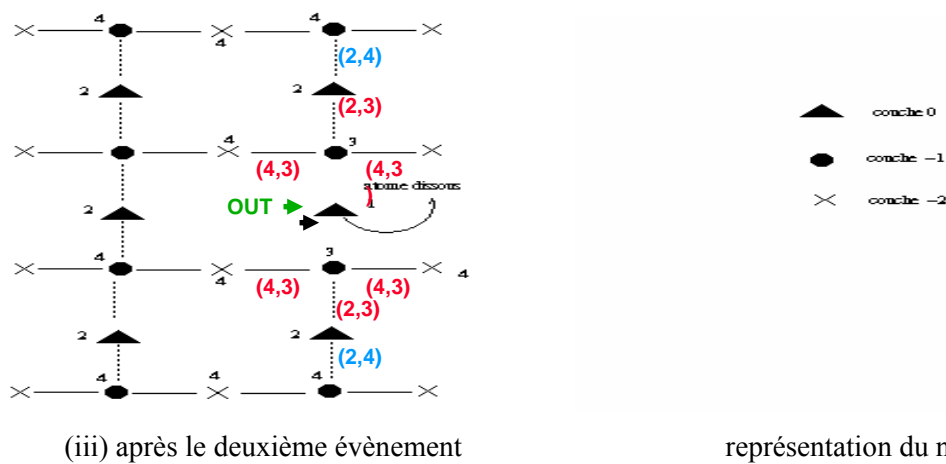


Figure I-6 : Illustration de l'enlèvement d'un atome de silicium tel que réalisé par le programme

Ainsi de proche en proche, apparaissent les particularités de comportement en fonction de chaque orientation cristalline. En utilisant une partie des données expérimentales, on en déduit les valeurs énergétiques pour chaque configuration de surface des liaisons Si-Si, en permettant ainsi de simuler pour les autres orientations les vitesses de gravure ainsi que les énergies d'activation microscopiques. La figure I-7 ci-dessous illustre l'évolution des populations des configurations en cours de gravure pour deux orientations. Il apparaît nettement que la configuration (2,4) joue un rôle prépondérant dans l'axe de gravure $\langle 100 \rangle$. Il apparaît donc réaliste d'attribuer l'énergie d'activation macroscopique comme valeur à l'échelle microscopique. Une fois l'énergie choisie, on effectue la gravure suivant un axe cristallin mettant en évidence le rôle des autres configurations.

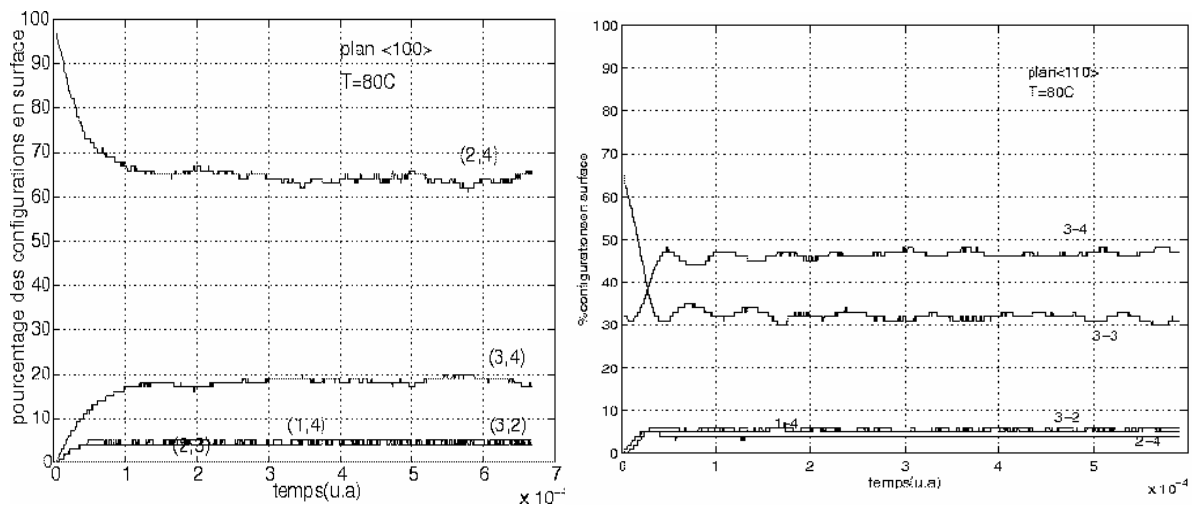


Figure I-7 : Exemple d'évolution des populations en surface pour deux orientations ($\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$)

Progressivement, par simulations successives, il est possible de converger vers un jeu de valeurs efficaces. Cette étape de calcul a été faite pour les orientations principales pour lesquelles les données expérimentales sont largement disponibles. Une fois le jeu de valeurs défini, nous avons simulé les vitesses de gravure pour l'ensemble des orientations sans modification des valeurs énergétiques.

Le tableau I-3 donne les valeurs déduites lors de cette première phase. Le nombre de configurations

utiles se réduit en fait à quatre valeurs car les vitesses de gravure sont essentiellement déterminées par les événements les plus lents correspondant à un petit nombre de radicaux OH⁻. Le tableau I-4 illustre les résultats obtenus pour les extrema avec le KOH par simulation en comparaison des valeurs expérimentales de la littérature. Les valeurs indiquées sont normalisées par rapport à la vitesse de gravure pour l'orientation <100>. En effet, les valeurs obtenues en simulation ne sont pas absolues mais relatives, permettant néanmoins de rendre compte parfaitement de l'anisotropie de la gravure. L'ensemble des vitesses simulées permet alors de décrire le diagramme polaire des vitesses avec la dépendance en température de manière analytique. La figure I-8 illustre les résultats issus de la simulation à l'aide d'une représentation angulaire continue pour trois coupes du diagramme polaire.

Configuration	1 OH ⁻ Si-Si(OH)	2 OH ⁻ asymétriques Si-Si-(OH) ₂	2 OH ⁻ symétriques (OH)Si-Si(OH)	3 OH ⁻ indifférencié (OH)Si-Si-(OH) ₂ Si-Si-(OH) ₃
Energie associée	0,95 eV	0,68 eV	0,65 eV	0,56 eV

Tableau I-3 : valeurs déduites des énergies d'activation microscopiques

Axe de zone		Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
<100>	θ exp		0	26°	45°	63°	90°
	θ sim		0	27°	45°	62°	90°
	Vexp		1	1,68	1,51	1,80	1
	Vsim		1	1,64	1,38	1,66	1
<110>	θ exp	0°	36°		63°		90°
	θ sim	0°	36°		70°		90°
	Vexp	1,66	0,43		1,39		1
	Vsim	1,52	0,36		1,40		1
<140>	θ exp	0°	10°	27°	43°	64°	90°
	θ sim	0°	14°	31°	44°	63°	90°
	Vexp	1,40		1,64	1,48	1,77	1
	Vsim	1,45	1,15	1,55	1,40	1,75	1

Tableau I-4 : Comparaisons des valeurs expérimentales et simulées pour les extrema suivant trois axes de zone

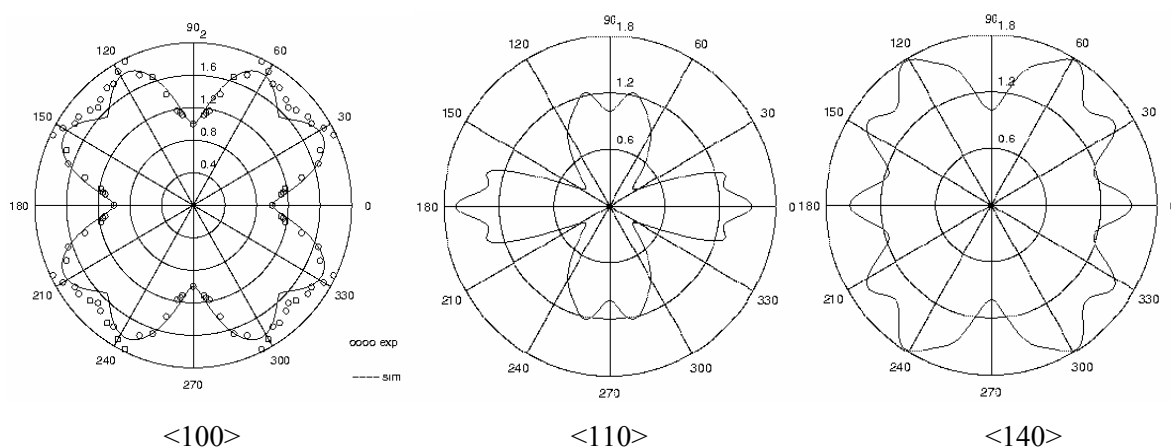


Figure I-8 : Coupe du diagramme polaire des vitesses normalisé à $V_{\langle 100 \rangle}$ pour trois axes de zones : $\langle 100 \rangle$ axe ayant servi à la définition des énergies microscopiques, $\langle 110 \rangle$ et $\langle 140 \rangle$ étant calculé à partir des valeurs définies avec $\langle 100 \rangle$

Un travail similaire a été entrepris pour le TMAH et est illustré par la figure I-9. Ce résultat est obtenu par une légère modification des énergies microscopiques permettant de mettre en évidence la configuration hexagonale autour de l'axe $\langle 111 \rangle$ dans le cas du TMAH

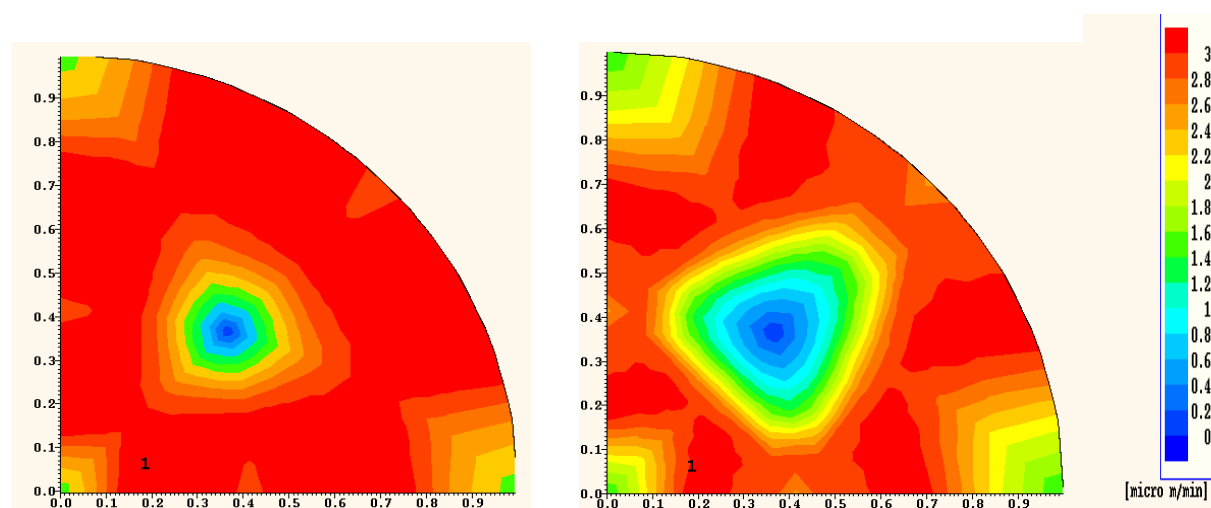


Figure I-9 : Diagramme polaire à 25% en poids pour le TMAH et le KOH

Ce travail a donné lieu à un doctorat de l'université Paul Sabatier (*Simulation de la gravure chimique anisotrope du silicium par une solution alcaline*, Z. Moktadir, Doctorat Université Paul Sabatier, N° 2544) et a ouvert des collaborations avec le laboratoire du Professeur K. Sato de l'Université de Nagoya (Japon), du professeur C. Tellier de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (Besançon) et le professeur P. Allongue du Laboratoire de Physique des Liquides et Electrochimie (Paris).

Parallèlement, une étude expérimentale de l'orientation $\langle 111 \rangle$ portant sur les conséquences des nettoyages de surfaces utilisés dans les procédés de fabrication et l'ajout de surfactant a été abordée. Le rôle des impuretés résiduelles, essentiellement les métaux lourds, a été mis en évidence par des modifications de la vitesse de gravure et de la rugosité. De même l'évolution des surfaces vers une rugosité spécifique de l'orientation a été mise en évidence expérimentalement et par simulation. Ceci confirme la justesse du modèle au niveau de la dégradation des surfaces. Ce travail a été mené avec deux chercheurs invités, N. Moldovan et D. Ralu, aujourd'hui à l'Argonne National Laboratory (États-Unis), lors de deux séjours au laboratoire, sous ma responsabilité.

I-3 Micro usinage de surface

Un fait marquant essentiel pour la crédibilité des microsystèmes a été la réalisation à l'Université de Berkeley par R. Müller des micromoteurs sur silicium, c'est-à-dire des actionneurs de toutes sortes: rotatifs, linéaires [Müller 89, Tai 89]. À l'évidence, la faisabilité d'une intégration totale était donc prouvée. Immédiatement, au delà des initiatives américaines, l'Allemagne avec le Programme "MICROSYSTEM TECHNOLOGY 1990" et le Japon avec "MICROMACHINE TECHNOLOGY 1991", s'engageaient dans cette voie. C'est dans ce contexte que plusieurs initiatives ont été lancées en France et en Europe sur les micro capteurs.

Il est apparu alors stratégique, quatre ans après les USA, trois ans après les allemands, deux ans après les japonais, d'acquérir la technologie des micromoteurs intégrés sur silicium à savoir le micro-usinage de surface : il revenait aux laboratoires publics de réaliser cet effort car l'échéance était relativement long terme, trop long terme pour un engagement lourd industriel. Le L.A.A.S., en collaboration avec d'autres laboratoires français (LEEI, SATIE) et sous l'impulsion du MRT puis du programme Microsystème du CNRS, a décidé de faire cette démarche : une pré-étude a permis de se doter des outils de simulation (EFCAD, logiciel de calcul des champs par éléments finis) et de mettre au point les bases technologiques. Cet effort, conduit au L.A.A.S. sous ma responsabilité, a aboutit non seulement à la réalisation d'un micromoteur en polysilicium et à sa caractérisation en fonctionnement mais aussi à la capacité nouvelle pour le LAAS et en France de maîtriser une filière technologique d'usinage de surface à l'image du Microelectronic Center of North Carolina, référence dans le domaine en tant que première fonderie microsystème [Sniegowski 97 A, Sniegowski 97 B].

Les compétences acquises dans ce travail vis-à-vis de la maîtrise technologique et de l'actionnement électrostatique constituent le premier socle pour les applications ultérieures.

I-3-1 La technologie

Le micro usinage de surface est caractérisé par la fabrication de structures à partir de films minces. Il consiste à superposer alternativement des couches sacrificielles et structurales. Chaque couche peut être gravée pour lui donner une forme. Une fois l'empilement terminé, les couches dites sacrificielles sont dissoutes sélectivement vis-à-vis des couches dites structurales qui constituent alors la structure auto assemblée. Originellement employés pour la fabrication de circuits intégrés, les matériaux utilisés sont du polysilicium LPCVD, des oxydes et nitrure de silicium. En utilisant la sélectivité de gravure entre ces matériaux, une libération de couches peut être réalisée, permettant la fabrication de structures tridimensionnelles auto assemblées (Figure I-12). La figure I-10 illustre un exemple de peigne interdigité réalisé en technologie BiCmos (polysilicium, aluminium, oxyde de silicium) et la figure I-11 un autre peigne mais en technologie SOI (Silicon On Insulator). Cette dernière technologie, plus récente, présentant l'avantage d'utiliser du silicium monocristallin (silicium, oxyde de silicium).

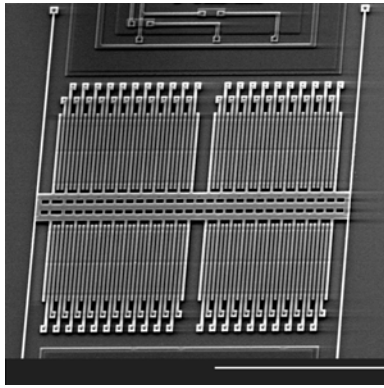


Figure I-10 : peigne en technologie BiCMOS

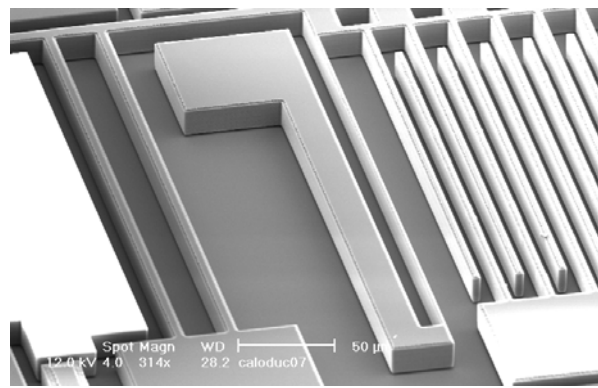


Figure I-11 : peigne en technologie SOI

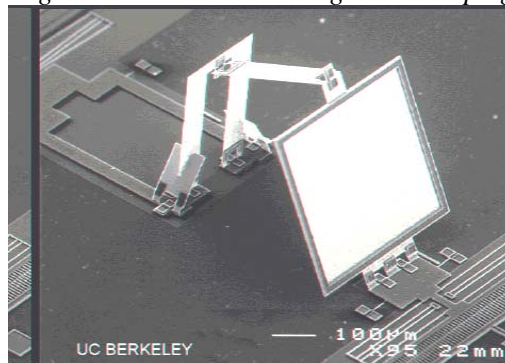


Figure I-12 : microdéflecteur polysilicium UC Berkeley

I-3-2 Conception et réalisation d'un micromoteur

La réalisation d'un micromoteur électrostatique vers la fin des années 80 a été un événement qui illustra spectaculairement les potentialités de cette technologie. Nous pouvons d'ailleurs remarquer, qu'aujourd'hui, la majorité des fonderies industrielles ou académiques offrant du Multi Project Wafer propose du micro usinage de surface.

Nous avons donc entrepris en 1993 une démarche de développement de cette technologie au sein du LAAS. Le micromoteur électrostatique à entrefer radial a été le démonstrateur choisi comme référence de la maîtrise du procédé technologique. Les difficultés nouvelles vis-à-vis des procédés de la microélectronique sont de trois ordres : le contrôle des contraintes mécaniques conduisant à une déformation des couches structurales après l'étape de libération, la réalisation de couches sacrificées et la libération des couches structurales par dissolution sélective des couches sacrificées. Parallèlement au développement technologique, une collaboration a été établie avec divers laboratoires français (LESIR, LEEI) pour la modélisation électrique des structures.

Une structure telle que le micromoteur comprend trois couches structurales et deux couches sacrificées, le nombre de masques nécessaire à sa fabrication est de sept.

Le procédé de fabrication comporte 16 étapes dont le détail est donné dans le tableau I-5 :

Oxydation	Dépôt		Gravure		Dopage
Si	Si ₃ N ₄	PolySi	RIE	humide	Phosphore
3	1	3 ou 4 suivant procédé	3	2	3

Tableau I- 5 : dénombrement des étapes pour la fabrication d'un micromoteur

Détails des étapes de réalisation :

- oxydation et dépôt de nitrure de silicium pleine plaque,
- dépôt, gravure et dopage de la couche de polysilicium 0 (Masque 1),
- dépôt, oxydation et gravure de la première couche sacrificiée (Masque 2),
- dépôt, gravure et dopage de la deuxième couche structurale (Masque 3),
- sous gravure du verrou (Masque 4),
- dépôt et oxydation de la deuxième couche sacrificiée,
- ouverture de l'axe central (Masque 5),
- dépôt, gravure et dopage de la troisième couche structurale (Masque 6),
- libération de la structure,
- greffage de la couche anti-frottement et anti-collage,
- réalisation des plots métalliques de contacts (Masque 7).

Comme indiqué plus haut, de nombreuses difficultés ont dû être levées pour amener cette réalisation à terme.

La première est la fabrication de couches de polysilicium sans contraintes. Une contrainte résiduelle entraînerait une déformation spontanée du rotor après la phase de libération par dissolution des couches sacrificiées. Les techniques de dépôt du polysilicium ont donc été modifiées et optimisées dans ce but, en particulier sur la température permettant de régler les contraintes internes aux couches. Ce travail a suscité une collaboration avec le groupe TMN du L.A.A.S..

Le deuxième verrou à lever est le choix et la réalisation de couches sacrificielles performantes : bonne sélectivité et rapidité de dissolution, épaisseur de dépôt suffisante (> 1 µm), propriétés de planarisation, tenue au recuit. Une solution séduisante est l'utilisation de « Spin On Glass » ou de « Spin On Dopant ». Il s'agit là d'oxydes de silicium déposés en couche mince par centrifugation. Ces matériaux présentent des caractéristiques intéressantes de dissolution rapide dans l'acide fluorhydrique (HF), d'autant plus rapide qu'ils contiennent du phosphore (SOD). Plus de dix produits différents ont été testés pour leurs propriétés de planarisation, de tenue au recuit et de vitesse de dissolution. Nous avons rencontré de nombreuses difficultés à l'utilisation dans le cadre de notre réalisation : épaisseurs des dépôts individuels insuffisantes nécessitant plusieurs dépôts successifs, apparition de craquelures à partir de la deuxième couche lors des recuits, sensibilité et dérive des conditions d'utilisation à l'humidité et au stockage, difficultés de fourniture, mauvaise performance de planarisation du fait de la

complexité des géométries. Cette technique bien que potentiellement intéressante par la simplicité apparente d'utilisation ne permet pas d'obtenir dans le cadre de notre réalisation, les caractéristiques dimensionnelles suffisantes. L'épaisseur de la première couche sacrificielle joue en effet un rôle important pour une structure de micromoteur en éloignant verticalement les parties suspendues des électrodes du stator du plan de masse afin de minimiser la capacité verticale et éviter ainsi leur flexion sous l'action du champ électrostatique. Une deuxième voie a donc été explorée, l'oxydation de polysilicium. Nous avons alors développé une méthode alternative originale consistant à oxyder des couches de polysilicium. Ceci permet l'obtention d'épaisseurs calibrées de plus fortes valeurs qu'avec les Spin On Glass et de résoudre le problème de recouvrement de marche car les dépôts sont conformes (épaisseur déposée égale sur les parties horizontales et verticales). Cette même technique est également utilisée pour la définition du jeu entre le rotor et l'axe central. Dans ce cas, il s'agit par contre de définir des épaisseurs faibles et contrôlées car ce jeu vient en variation de l'entrefer, déséquilibrant ainsi le rotor, et doit avoir une valeur adaptée à l'entrefer final. La valeur de ce jeu est dans notre cas de 0,3 microns.

I-3-3 Les résultats

Enfin, la réalisation des premières structures a montré que le collage des pièces de polysilicium s'effectuait très rapidement interdisant leur utilisation quelques jours après leur fabrication [Srinivasan 97, Deng 95, Houston 96, Henck 97]. À cette fin, nous avons utilisé une technique de dépôt tridimensionnel d'une couche de lubrification par dépôts (greffage moléculaire par la Méthode de Kovacs). Le dépôt consiste en une mono couche moléculaire d'un silane fluoré, l'OTS. Les coefficients de frottements, estimés sur des surfaces planes, sont inférieurs à 0,1 au lieu de 0,55 pour un contact polysilicium/polysilicium. Ceci permet d'effectuer une lubrification des paliers du micromoteur. D'autre part, cette couche constitue un écran efficace vis-à-vis de l'oxygène de l'air et empêche la formation d'oxyde natif, source de collage physique entre les pièces mobiles et fixes. Un essai comparatif permet de garantir une protection au collage pendant une durée au moins égale à 36 mois. Cette étape a été réalisée en collaboration avec C. Martelet du LPCI de l'Ecole Centrale de Lyon. Le développement de cette technologie a permis par la suite des utilisations inattendues : couches anti adhésives dans les moulages d'élastomères, couches hydrophobes dans les microsystèmes fluidiques. Si les premières structures réalisées étaient libres mécaniquement, nous avons dû attendre de maîtriser le procédé de fabrication dans le détail avant d'obtenir des rotations sous alimentation électrique. Il est à noter que seules les structures greffées (figure I-13) ont pu être actionnées électriquement. À ce jour, nous avons mesuré des rotations sous alimentation électrique à l'air ambiant et dans de l'huile (figure I-14). Dans l'air, le démarrage a été obtenu pour des tensions de l'ordre de 60 à 80 Volts pour une faible vitesse de rotation (20 tr/mn) et avec des vitesses de rotation maximales de 2000 tr/mn. Dans l'huile où la viscosité et la permittivité sont plus importantes ($\epsilon_r=1,8$), les vitesses de rotation sont forcément moins grandes. L'observation du fonctionnement pas à pas en vidéo nous a permis

d'émettre des hypothèses sur l'écart existant entre les vitesses observées expérimentalement (2000 tr/mn dans notre cas et plusieurs milliers de tours par minute pour les meilleures structures dans la littérature) et les vitesses déduites par les modélisations (jusqu'à 200 000 tr/mn). Le positionnement initial du rotor, après l'étape de libération, dans une position parfaitement centrée, comme supposée dans les modélisations, est illusoire car le rotor est libre de mouvement. La mise sous tension attire le rotor radialement avec une force très supérieure aux forces de rotation. Il s'ensuit un comportement discontinu et hiératique de la rotation : attraction radiale vers les électrodes statoriques les plus proches, rotation autour d'un point de l'axe sans glissement puis avec glissement lors de l'excitation des électrodes suivantes. Les pertes subies par impact et frottement dans ce mécanisme de rotation expliquent les écarts de vitesses entre expériences et simulations. Nous avons donc souhaité compléter les simulations existantes par l'introduction de modèles décrivant la trajectoire du rotor. Ce travail engagé par nos partenaires du L.E.E.I. n'a pas dépassé le stade formel.

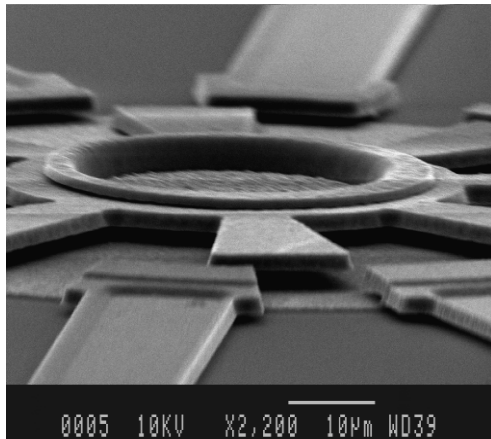


Figure I-13: Image MEB d'une structure de test

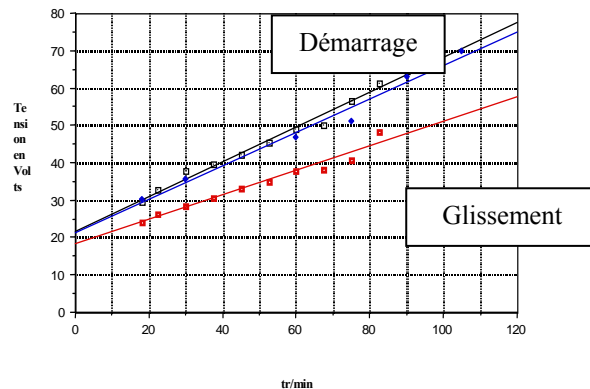


Figure I-14 : Exemple de caractéristiques tension (V) / vitesse de rotation (tr/mn)

Ce moteur a servi de véhicule test au professeur B. Bhushan pour des études de tribologie dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Columbus (Ohio, États-Unis).

I-4 Conclusion

Nous avons brièvement évoqué les problématiques microsystemes et les premières démonstrations de l'actionnement électrostatique. Les technologies clefs sont celles des micro usinages. Une de nos premières contributions porte sur la modélisation de l'usinage chimique anisotrope.

Notre proposition d'introduire le cristal de silicium au niveau microscopique et d'associer un mécanisme de dégradation liaison par liaison a permis d'explicitier l'influence du cristal et les rapports d'anisotropie. Elle permet également à partir d'un petit nombre de données expérimentales de calculer les vitesses pour toutes les orientations en tenant compte de la dépendance en température.

Le modèle reste cependant limité dans la mesure où :

- le lien à la concentration n'a pas été établi clairement,
- le changement de solution de gravure a été abordé sans être explicité génériquement,
- il est très coûteux de prédire les formes gravées finales à partir d'un masque. Cette méthode ne peut rendre compte des formes gravées en dehors de petit volume. Ceci a été montré par des équipes ayant poursuivi cette voie de la description atomistique en réussissant à simuler des apparitions et disparitions de facettes mais en restant dans le cadre de petits volumes.

D'une manière plus générale, le micro usinage en volume est limité quant aux formes stables possibles du fait de sa sensibilité à l'orientation cristalline. En utilisant uniquement ces cas de figures, elle reste néanmoins performante par son faible coût de mise en œuvre. Complémentairement, l'apparition des techniques de DRIE a permis de s'affranchir de cette dépendance et de pouvoir générer des formes plus variées dans le plan et surtout contrôlables dans le temps.

Relativement au micro usinage de surface, les études menées dans ce cadre nous ont permis de mettre en place, de tester et d'améliorer une technologie de micro usinage de surface à trois couches structurales (Poly Silicium LPCVD) équivalente à celle proposée par le Microelectronic Center of North Carolina dont les dépôts de couches sacrificielles sont effectués par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Le savoir-faire acquis lors de ce travail a également été largement réutilisé pour d'autres projets du laboratoire. Le savoir-faire est ici illustré par la conception et la réalisation d'un micromoteur utilisant l'actionnement électrostatique. Ce travail a été extrêmement formateur pour nous-mêmes et bon nombre de nos collègues et a permis de lever les premiers verrous technologiques liés aux collages, aux contraintes et à la fiabilité des microsystèmes.

Ce travail de longue haleine, qui a nécessité l'acquisition d'un savoir-faire nouveau pour le laboratoire, ne nous a pas paru toutefois pouvoir aboutir à des réalisations ayant un fort impact dans le domaine applicatif, pour plusieurs raisons (faible couple moteur, mouvement du centre de type cycloïde, vieillissement rapide). L'ensemble de ces raisons nous a amené à nous intéresser à des structures dont l'intérêt applicatif est plus marqué.

Chapitre II

ACTIONNEMENT ÉLECTROSTATIQUE POUR LES MICROSYSTÈMES OPTIQUES

II-1 Introduction

L'actionnement électrostatique est particulièrement efficace aux très courtes distances et pour de petits déplacements. Toutefois, compte tenu des dimensions, les forces et les couples sont très faibles. On comprend que les premiers développements se soient tournés vers l'optique et l'actionnement de miroir. C'est ce que nous allons voir dans les premiers paragraphes de ce chapitre.

Ensuite nous verrons une première application issue de notre proximité des activités robotiques : il s'agit d'un système de balayage à base de micro miroirs pour la perception des distances en robotique mobile [Briot 98, Arana 00, Reboul 98, Lescure 99].

II-2 Rappel des modes d'actionnement possibles

Le développement des micro actionneurs est plus tardif historiquement que celui des capteurs dans le monde des microsystemes. À l'inverse des capteurs qui transforment une information généralement non électrique en une grandeur électrique, donnée d'entrée du traitement du signal réalisé en circuit intégré, les micro actionneurs effectuent l'opération inverse et transforment une grandeur électrique en déplacement. Le cas du micromoteur est démonstratif de ce point de vue bien que, comme nous l'avons vu, la récupération de l'énergie mécanique ne soit pas efficace.

Il se pose donc là le problème du choix de l'actionnement, choix guidé par un ensemble de paramètres (compatibilité technologique, capacité d'intégration, rendement, simplicité de la mise en œuvre...)

La littérature donne de nombreux exemples que l'on peut classer en fonction du type d'actionnement choisi (piézoélectrique, magnétique, thermique, électrostatique) (Tableau II-1).

L'actionnement piézoélectrique [Schroth 98, Ohtuka 95, Kawabata 97, Ikeda 99, Yamada 98, Tsugai 99] utilise l'effet piézoélectrique inverse, à savoir que lorsqu'on applique un champ électrique variant on obtient une déformation mécanique du matériau. Ces déformations de faible amplitude nécessitent de réaliser des amplifications mécaniques pour obtenir des déplacements raisonnables. Les couches utilisées sont rarement compatibles avec un procédé microélectronique intégré.

Les microactionneurs thermiques [Buser 92, Bülher 95] utilisent la différence de dilatation de deux matériaux en fonction de la température. La superposition des deux couches permet un déplacement hors plan, l'introduction d'une dissymétrie par conception permet d'obtenir un déplacement dans le plan. La réalisation de tels systèmes est simple et peut utiliser des couches intégrables (SiO_2 , Al, Au). L'utilisation de courant induit cependant une consommation importante et l'utilisation de la chaleur favorise l'évolution des caractéristiques matériaux et de commande dans le temps.

Les microactionneurs magnétiques [Asada 99, Miyajima 99, Ferreira 99] peuvent utiliser soit la force de Lorentz, soit la magnétostriction. Pour ceux utilisant la force de Lorentz, la diminution des dimensions n'est pas favorable à ce type d'actionnement ce qui les limite aux dimensions millimétriques. Toutefois des travaux récents ont montré qu'il est possible d'augmenter les densités de

courant sans préjudice pour les caractéristiques des matériaux. Cette voie présente un avantage certain (sens de la force variant avec le sens du courant) mais reste encore peu miniaturisable et technologiquement peu compatible. Une solution classique est de rajouter des aimants permanents. Quant à la magnétostriction [Garnier 00], si les matériaux évoluent vers de meilleures caractéristiques, il faut néanmoins créer le champ magnétique local ce qui nuit à la miniaturisation.

Actionnement	Avantages	Inconvénients
Piézoélectrique	fort couplage bonne sensibilité	Peu compatible microélectronique
Magnétique	sans fil	Peu miniaturisable (aimant permanent) Peu compatible en couches minces Phénomène de saturation
Thermique	Compatible microélectronique	Forte consommation, pilotage en courant, vieillesse accéléré
Electrostatique	Faible consommation Compatible microélectronique Simplicité de mise en oeuvre	Interaction non linéaire Forte tension pour les grands entrefers

Tableau II-1 : avantages et inconvénients pour des actionnements

L'actionnement électrostatique est le plus répandu de tous [Kiang 96, Fan 98, Petroz 98, Chauvel 97, Lang 99, Schenk 00]. On le retrouve pour les accéléromètres (Figure II-1) et capteurs de pression, les dispositifs de balayage et de commutation ou de positionnement.

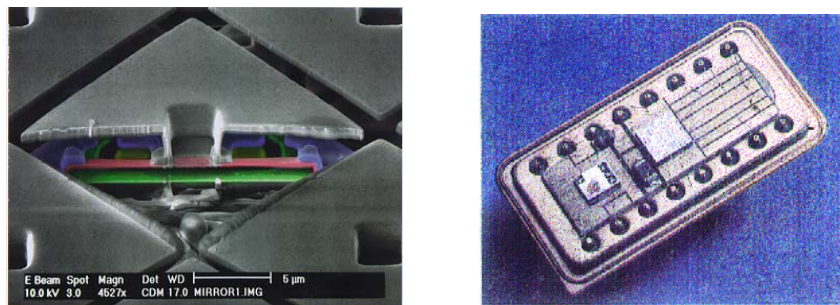


Figure II-1 : Micromiroir Texas Instruments (gauche) ; Accéléromètre Automobile (droite)

Les avantages sont nombreux : performances intéressantes, faible consommation, simplicité de mise en œuvre. Il suffit de deux couches portées à des potentiels différents pour obtenir une force d'attraction entre elles. Les matériaux à mettre en œuvre sont ceux de la microélectronique permettant ainsi la fabrication collective et le bas coût. Ses inconvénients majeurs sont : la dépendance de l'interaction en $1/r$ ou $1/r^2$ suivant la configuration, tout ce qui est lié à l'utilisation de charges (claquages, injection de charges si contact) et le fait que seule une attraction est possible à l'inverse de l'actionnement magnétique. Ce dernier point oblige à l'utilisation d'une force de rappel mécanique par

des ressorts facilement réalisables ou de points d'appui évitant le contact entre les électrodes comme c'est le cas pour un micromoteur ou de la réalisation d'une couche d'isolation évitant le court circuit si contact il y a.

Les types de configurations spatiales les plus courants sont (Fig. II-1*):

- les configurations plates types condensateurs plans pour le débattement hors plan (force orientée perpendiculairement aux surfaces, proportionnelle à la surface en regard et inversement proportionnelle au carré de la distance entre les plaques (en $1/r^2$))
- les peignes inter digités à débattement dans le plan (force latérale en $1/r$ variant avec ΔC qui s'annule quand la surface en regard est maximale).

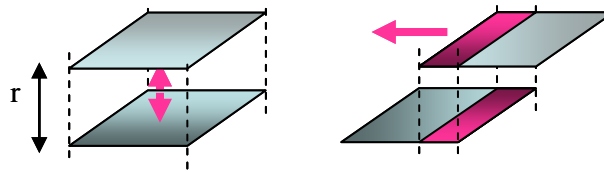


Figure II – 1*: schéma des forces entre électrodes

L'alternative entre ces deux principes est essentiellement guidée par la capacité à obtenir la fonction recherchée.

II-3 La perception 3D en robotique

Dès 1993, après avoir choisi de consacrer une *part importante de notre activité dans le domaine des actionneurs électrostatiques pour les microsystèmes appliqués à l'optique*, nous avons engagé des discussions avec le groupe Robotique et Intelligence Artificielle (RIA) du LAAS où le besoin, pour la robotique mobile, de perception 3D de l'environnement est un point crucial et où le besoin de miniaturisation est d'importance.

Des années de recherche ont conduit le LAAS à développer une famille de robots autonomes: les robots HILARE. Ceux-ci, destinés à évoluer dans un environnement variable et inconnu (environnement non coopératif), doivent :

- acquérir des informations sur l'environnement au moyen de systèmes de perception basés sur l'emploi de multiples capteurs,
- traiter les données délivrées par ces capteurs de manière à obtenir des modèles perceptuels suffisamment riches,
- prendre les décisions nécessaires à l'accomplissement de la tâche spécifiée par l'utilisateur,
- exécuter les décisions prises en agissant sur leurs propres actionneurs.

Ainsi, il est évident que les tâches exécutables par le robot dépendent du nombre et de la nature des capteurs/actionneurs qui sont employés dans son architecture matérielle (Figure II-2).



Figure II - 2 : Les robots HILARE

Pour les robots HILARE, la conception du système de perception a été guidée par l'intégration du plus grand nombre de capteurs embarqués (critère quantitatif) et par la diversification de leur nature (critère qualitatif). Ce choix se justifie par le fait que l'augmentation de l'autonomie du robot passe nécessairement par un enrichissement de ses capacités d'acquisition de données perceptuelles. Parmi l'ensemble de ces capteurs (infra rouge, ultrasonores, caméra vidéo...), celui qui nous intéresse est le système de vision tridimensionnelle qui est à l'origine du projet TRIDICAM. Une approche de type microsystème était une réponse innovante et performante correspondant bien aux spécificités de l'application. C'est donc avec l'ambition de réaliser une caméra laser 3D à base de micromiroirs silicium, qu'un projet intergroupe s'est mis en place. Nous avons eu la charge, dans ce cadre, de concevoir et de réaliser les micromiroirs aux spécifications du système de vision.

II-4 Spécifications du système et du bloc balayage

Le mode d'utilisation de la micro caméra laser induit des lignes directrices dans l'établissement du cahier des charges :

- elle sera utilisée dans le domaine de la robotique mobile afin de permettre aux robots la modélisation de l'environnement. Par conséquent, la caméra devra assurer des performances temporelles et métrologiques quantifiées,
- une des caractéristiques mises en valeur dans ce projet est le faible volume du système. C'est pourquoi l'ensemble des blocs fonctionnels qui constituent la caméra est envisagé dans une optique de miniaturisation, en utilisant une approche type microsystèmes.

Le cahier des charges suivant reprend ces caractéristiques.

Au niveau des caractéristiques temporelles et métrologique, la micro caméra fait partie d'un système de perception complet grâce auquel le robot pourra acquérir des informations sur son environnement. La connaissance de cet environnement est importante dans la mesure où le robot devra évoluer en effectuant certaines tâches : d'une part modéliser l'environnement à partir des mesures effectuées (ceci répond à des problèmes de navigation, de recalages ainsi qu'à des problèmes de positionnement

d'objets plus ou moins identifiés dans la scène), et d'autre part, en fonctionnant en boucle fermée, il pourra détecter des objets qui peuvent se trouver sur son chemin (la détection et le changement de direction du mouvement du robot réalisent ce que l'on appelle « l'évitement d'obstacle »). Dans ce dernier cas, le plus important n'est pas de connaître la distance exacte à laquelle se trouve l'obstacle mais plutôt le temps dont le système a besoin pour fournir l'information. D'une manière générale, un compromis est à trouver entre le temps d'acquisition et la précision de mesure.

L'ensemble de ces éléments conduit aux spécifications suivantes pour le système global:

- précision de la mesure : quelques centimètres. Cette précision est induite par le compromis précédent,
- portée : environ 10 m car le robot devra évoluer dans un environnement d'intérieur,
- temps d'acquisition de données : c'est le temps pour obtenir la mesure de la distance à partir de l'émission du signal laser, en passant par sa réception et son traitement. Il doit être le plus petit possible afin de se rapprocher le plus possible du « temps réel ». Au niveau électronique, il sera nécessaire de traiter chaque point de l'image toutes les 10 μ s environ. Au niveau du dispositif de déviation du faisceau laser, la dynamique dépend du mode de balayage utilisé et des caractéristiques des micro miroirs,
- résolution : 100x100 soit 10 000 points par image. En considérant le temps d'acquisition précédent, cela correspond à une formation d'image tous les dixièmes de seconde.
- type de balayage : le balayage 2D sous forme de spirales a été choisi. Il doit permettre l'acquisition rapide de la carte de profondeur de la scène observée. Cette technique a l'avantage d'utiliser des dispositifs mécaniques à la résonance; on bénéficie ainsi d'angles de balayage importants. Les spirales sont obtenues à partir d'un balayage circulaire dont on module l'amplitude d'excitation.
- ouverture angulaire : 30°. Cette caractéristique rend compte de la zone dans laquelle une cible pourra être détectée et est en accord avec le champ de vision nécessaire à la navigation.
- fréquence de balayage : afin d'atteindre les 10 images par seconde, il est clair que le système de balayage ne doit pas être utilisé en dessous d'une fréquence minimale. Si l'on considère que 50 cercles concentriques sont nécessaires pour que chacun des 10 000 points de l'image 100x100 soit atteint par le faisceau laser, la fréquence de balayage ne devra pas être inférieure à 10x50 soit 500 Hz,
- sécurité : elle impose le type de laser à utiliser et par conséquent la puissance émise

Nous avons alors engagé l'étude complète du système de balayage à base de micromiroirs. Cette étude a recouvert de nombreux aspects :

- mise au point d'un procédé de fabrication (technologie de volume double-face, assemblage CMS (Composants Montés en Surface), calcul des raideurs et contraintes),
- modélisation (mécanique anisotrope, électrostatique, amortissement fluide) et simulation globale du microsysteme (inclusion de la commande dans la simulation du système complet),
- développement d'une électronique de commande spécifique,

- caractérisation des influences de l'environnement et examen de la fiabilité.

Cette démarche se veut globale, considérant qu'un microsysteme est avant tout un systeme. Ce travail a donné lieu à la thèse de F. Larnaudie et a été soutenue par le programme Microsystemes du C.N.R.S.

Les résultats scientifiques découlant de ce travail ont été:

- la démonstration de l'intérêt de l'actionnement électrostatique,
- la conception et l'intégration du microsysteme complet (assemblage 3D, électronique de proximité),
- la première mise en évidence de la problématique de la fiabilité (identification des mécanismes de défaillance et modèles).

II-5 Mise en œuvre et résultats

Le développement des microtechnologies, comme le micro usinage de volume ou de surface, a permis de réaliser des structures électromécaniques de petites dimensions en bénéficiant des avantages de la fabrication collective et des caractéristiques mécaniques du matériau silicium. Ceci a été largement démontré par tout un ensemble de réalisations, essentiellement dans le domaine des capteurs physiques. Puis, un effort intense de développement de structures électromécaniques pour des applications optiques a été fait dont la matrice de micro miroirs digitaux (DMD) de Texas Instruments est l'exemple le plus frappant et achevé [Yoder 96, Hornbeck 93].

Le système de balayage à micro miroirs silicium présenté ici fait parti du projet TRIDICAM dont l'objectif est le développement d'une caméra laser 3D fournissant une image vidéo couplée à une mesure de profondeur de manière à attribuer à tous les points de l'espace observé les coordonnées spatiales. Dans ce cas, des possibilités de fonctionnement en pointage ou en balayage doivent être envisagées ainsi que les aspects de miniaturisation, d'intégration de l'ensemble des éléments mécaniques et de leurs commandes. L'approche se veut globale en intégrant la technologie, l'assemblage et la commande autant au niveau de la réalisation que de la modélisation.

Notre choix s'est porté, pour la réalisation des micromiroirs, sur des structures en silicium monocristallin actionnées électrostatiquement comprenant: le miroir proprement dit, des ressorts de rappel mécanique sur une plaque (Figure II-3-a) et des électrodes d'actionnement inclinées sur une deuxième plaque (Figure II-3-b). La structure finale est obtenue par assemblage suivant le procédé CMS (Composant Montés en Surface) (Figure II-3-c) avec des connexions face arrière pour minimiser l'encombrement.

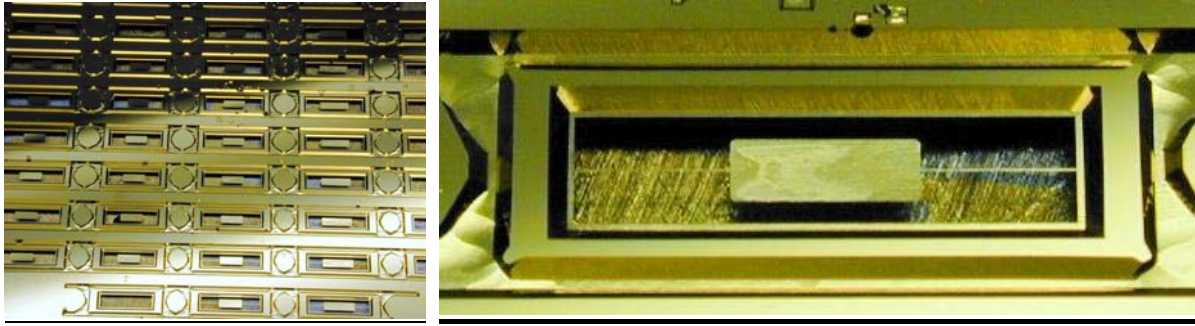


Figure II-3-a : réalisation des miroirs (plaquette complète, détail avant clivage)

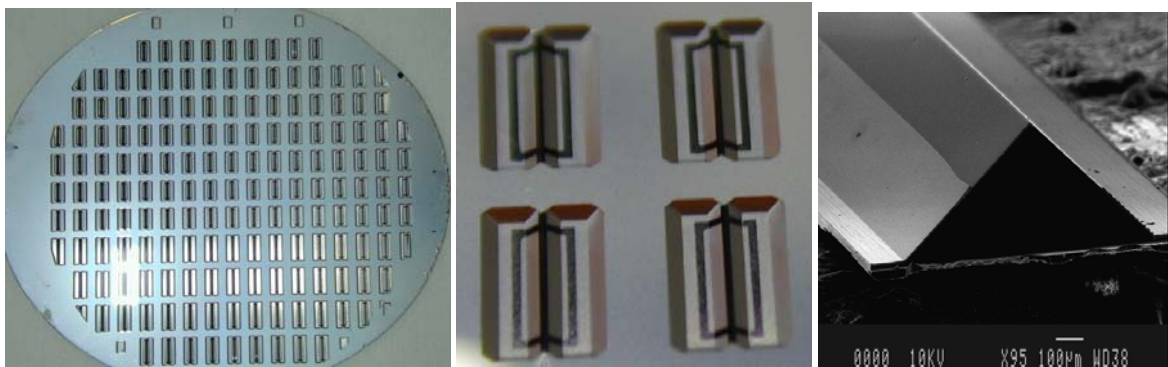


Figure II-3-b : réalisation des électrodes (wafer complet, détail avant et après sciage)

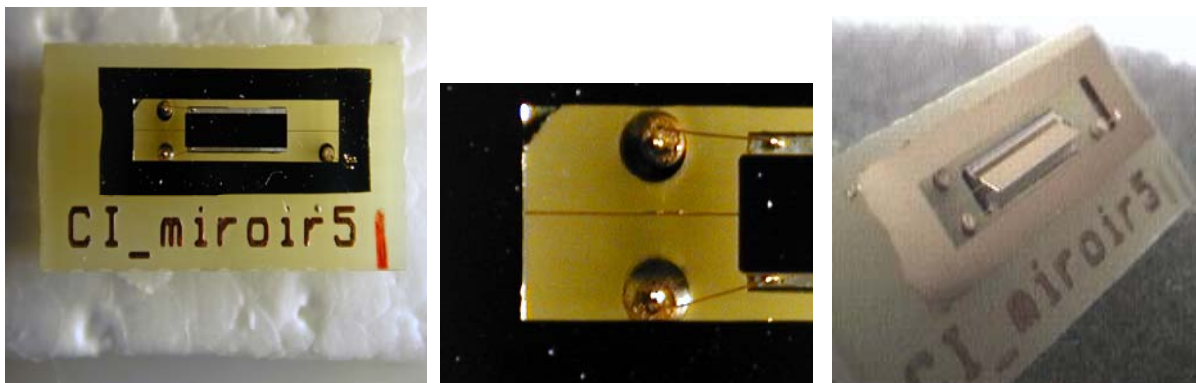


Figure II-3-c: structure après assemblage (vue d'ensemble, détail des connexions) et miroir incliné à 35°

Cette réalisation est originale à plus d'un égard :

- par le choix des électrodes inclinées qui permettent d'atteindre des angles de déflexion très supérieurs à l'option choisie dans les DMD,
- par le choix des technologies, d'assemblage en particulier.

Le système ainsi réalisé est assimilable à un système du deuxième ordre représenté par l'équation suivante. Il présente une résonance qui sera exploitée en mode balayage

$$I\ddot{\theta} = M_e(\theta) - M_f(\theta) - M_K(\theta)$$

où I représente l'inertie du système, $M_e(\theta)$ le moment actif, $M_f(\theta)$ et $M_K(\theta)$ les moments passifs de l'amortissement d'origine fluïdique et de rappel mécanique de la structure miroir.

Afin de définir le jeu des dimensions du dispositif, nous avons développé un modèle physique rendant compte de toute la complexité du problème : inertie, moment électrostatique, raideur des ressorts en silicium en tenant compte de l'anisotropie des propriétés mécaniques du silicium [Larnaudi 00] et des sections trapézoïdales induites par la technique de gravure utilisée. A l'opposé, le coefficient d'amortissement est issu de l'expérience (Tableau II-2). Des expériences menées sous vide, permettant de négliger le coefficient d'amortissement, ont permis de valider les modèles développés. Les mêmes expériences menées à différentes pressions ont permis de déduire les valeurs des coefficients d'amortissement.

Eléments du modèle	Résolution
Paramètres d'entrée	
Inertie de rotation	
densité du matériau ρ	$I = \frac{M}{12}(D^2 + e^2)$
longueur du miroir L	
largeur du miroir D	
épaisseur du miroir e	
Moment mécanique	
constantes mécaniques C_{ij}	$C_{44} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + (C_{45} + C_{54}) \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y} + C_{55} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} = 2C_{45}C_{54} - 2C_{44}C_{55}$
section des barres S	
longueur des barres l	
$M_m(\theta) = 2 \left(\frac{2}{l} \iint_{(S)} \Omega(x, y) dx dy \right) \theta$	
Moment électrostatique	
longueur du miroir L	$M_e(\theta) = \frac{\epsilon_0 V_0^2 L}{2(\alpha - \theta)^2} \ln \left(\frac{d_0}{h \sin \theta} \right)$
distance inter armatures d_0	
angle des électrodes α	
distance métallisation-pointe h	
tension appliquée V_0	
Amortissement	
coefficient de frottement $F(P, T, \dots)$	déduit expérimentalement

Tableau II - 2: Les composantes du modèle électromécanique

Toutefois la modélisation physique ne pouvant expliquer le comportement du système complet, nous avons prolongé l'effort de modélisation vers une simulation de plus haut niveau intégrant ces modèles

physiques dans une simulation fonctionnelle utilisant le logiciel SABER (Figure II-4). Ceci nous a permis de développer un outil de conception rapide des structures à partir des dimensions ‘layout’ des masques et de prévoir le comportement des structures avant leur réalisation. Ce premier pas constituait les premiers pas d’une démarche plus globale identifiée aujourd’hui sous le nom de prototypage virtuel et qui représente un des axes stratégiques du groupe MIS (Microsystèmes et Intégration des Systèmes).

Simulations et expériences nous permettaient d’obtenir les caractéristiques fonctionnelles du système, à savoir, la réponse statique (figure II-5-a), la réponse dynamique (figure II-5-b) et à un échelon de tension. En mode de pointage (statique) les angles de rotation sont plus faibles (jusqu’à 10 degrés) et les temps de positionnement sont typiquement de quelques dizaines de millisecondes (40-50 ms) en boucle ouverte. Ce temps d’établissement a pu être ramené à 5 ms dans un fonctionnement en boucle fermée. L’insertion dans cette modélisation de l’électronique d’amplification existante sur le banc de mesure et l’accord avec l’expérience à faible pression, nous ont permis ainsi de valider la modélisation et de déduire les coefficients d’amortissement à plus haute pression.

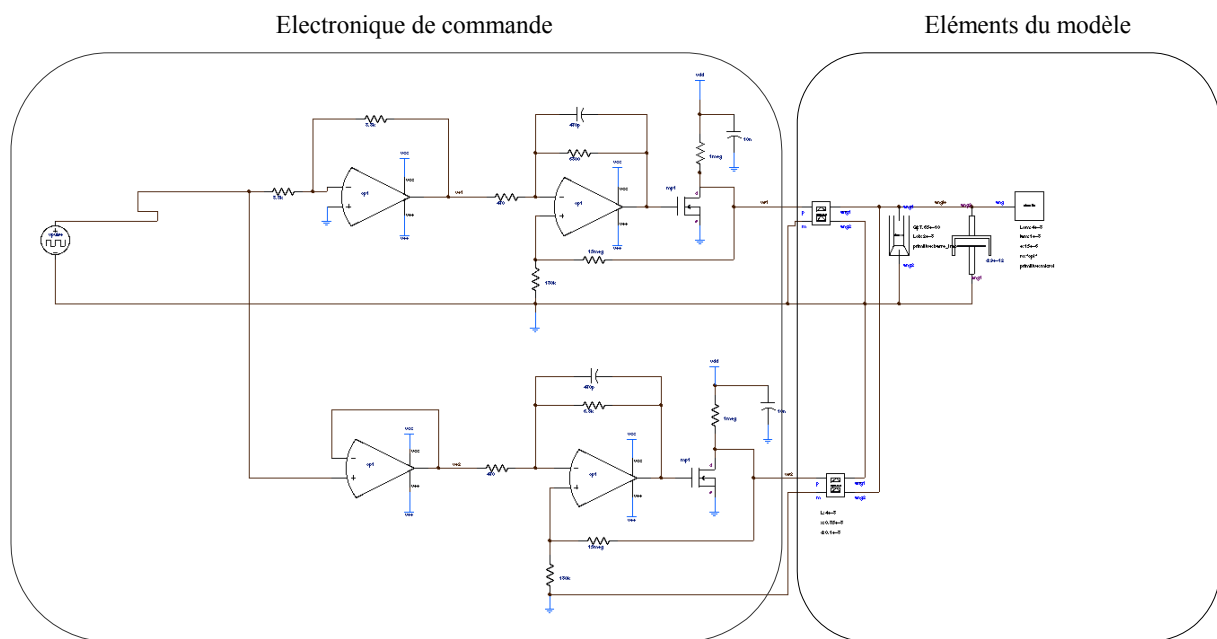


Figure II-4 : schématique sous SABER comprenant la structure et sa commande

Les structures réalisées à ce jour ont permis d’obtenir des fréquences de résonance de 400 Hz à 1 kHz, des déflexions optiques du faisceau jusqu’à 80 degrés sous 250 Volts à 950 kHz.

Au-delà de 80 degrés optiques, la structure rentre dans une zone d’instabilité et le miroir décroche pour se plaquer sur les électrodes (35°) sans destruction des ressorts et cela même si l’opération est répétée (Figure II-3-c). On peut donc imaginer utiliser ces structures en mode basculement pour des grands angles de déflexion. Le temps de basculement reste néanmoins important mais peut être réduit à condition d’utiliser des créneaux de fortes tensions (800 V dans notre cas).

Ces résultats ont montré clairement que la structure imaginée permettaient d'atteindre des performances répondant parfaitement aux exigences de l'application TRIDICAM et, de plus, ouvert de nombreuses possibilités d'utilisation que la solution DMD ne pouvait pas adresser.

Toutefois, afin de conforter notre approche et de pousser les performances, nous avons entrepris plusieurs études complémentaires.

Une des difficultés de l'actionnement électrostatique est que pour communiquer de l'énergie à une structure qui est en fait une capacité de faible valeur (souvent inférieure au pF), il faut utiliser de fortes tensions. Une alternative est de modifier l'environnement par la mise sous vide de la structure. Ainsi, les caractérisations sous vide ont montré que les facteurs de qualité, qui sont de quelques dizaines à la pression atmosphérique, augmentent drastiquement quand la pression diminue (figure II-6-b) permettant de réduire d'autant les tensions d'actionnement à angle de déflexion fixé. Parallèlement la mise sous vide s'accompagne d'une augmentation de la fréquence propre du fait de la diminution de l'amortissement (Figure II-6-a).

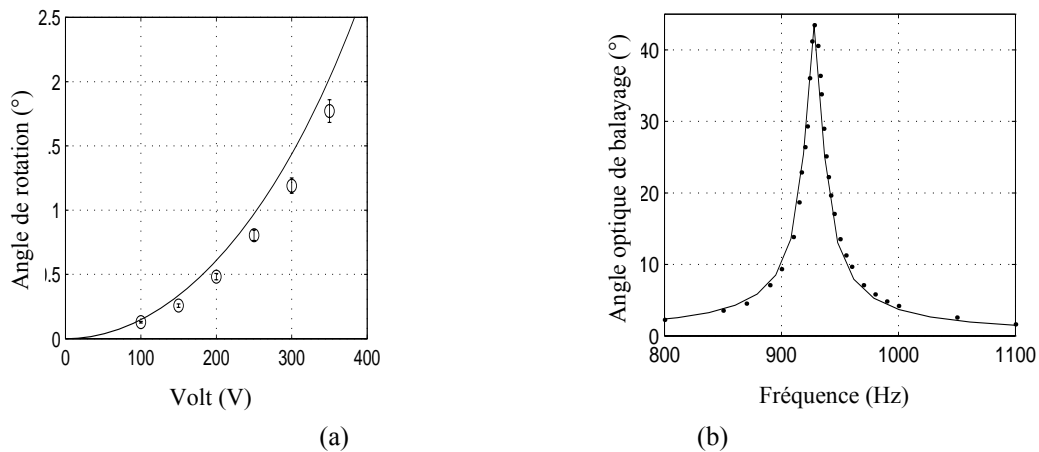


Figure II-5: (a) comparaison expérience / simulation en mode pointage ou statique, b) comparaison expérience / simulation en mode dynamique

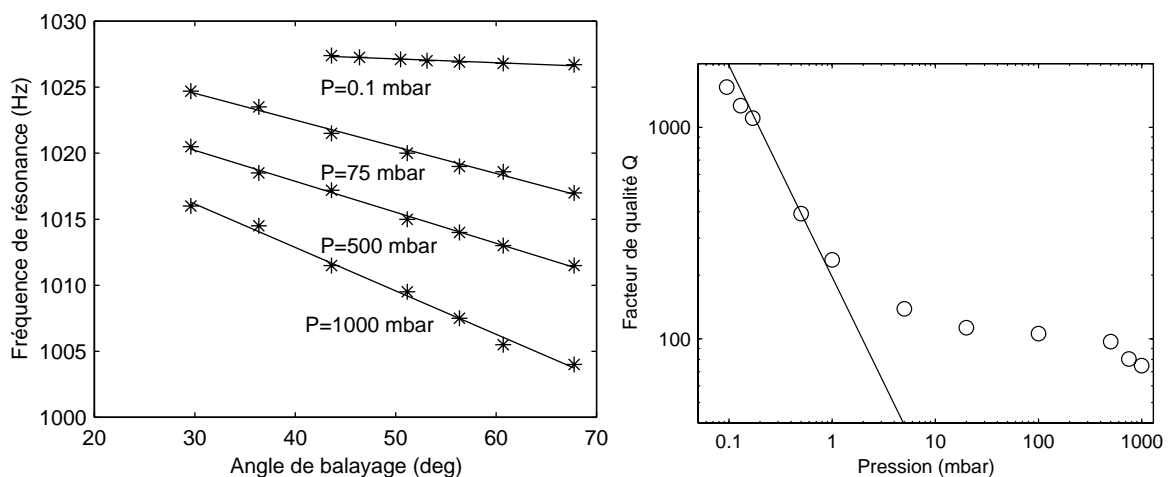


Figure II-6 a: Évolution des fréquences propres pour divers angles de balayage à plusieurs pressions, b: Évolution du facteur de qualité en fonction de la pression (la droite indiquée les valeurs en régime moléculaire)

La fiabilité mécanique des structures est un élément important dans la mesure où elle conditionne les performances long terme du système de vision et la crédibilité de l'approche dans le domaine applicatif. Nous avons donc choisi d'évaluer expérimentalement le vieillissement des structures lors de cycles de fonctionnement prolongés. Les structures ont été testées sous actionnement continu à grand angle et en relevant périodiquement les caractéristiques fréquentielles pour des angles de débattements moindres (Figure II-7). Le miroir est mis en vibration à la résonance avec des amplitudes de balayage de 40° correspondant à une contrainte de 60 Mpa soit 1% de la contrainte de rupture calculée. Le premier enseignement à retenir est l'absence d'évolution des caractéristiques mécaniques du silicium monocristallin tant qu'il est actionné dans le domaine élastique. On peut cependant noter une légère diminution de la fréquence propre au cours de ce test sur quelques hertz.

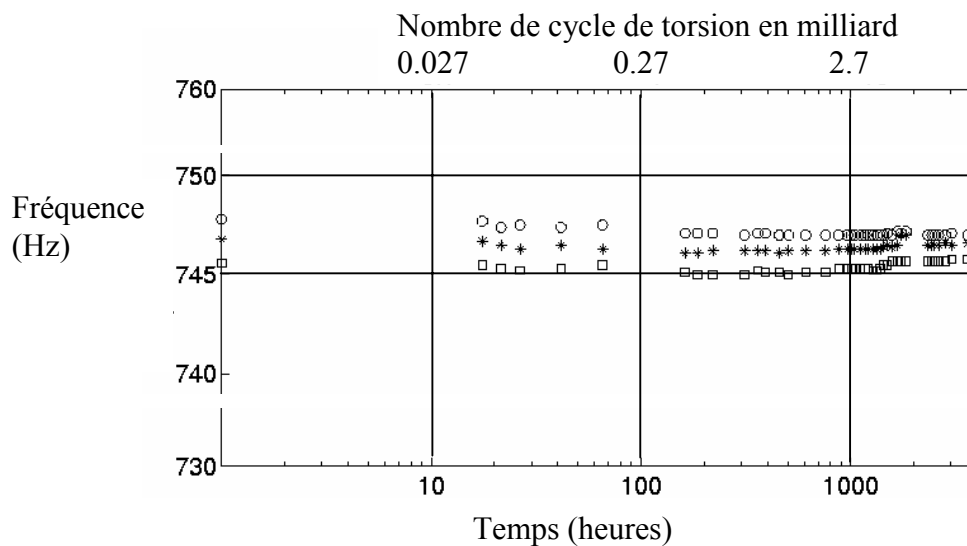


Figure II-7: évolution de la fréquence propre expérimentale pour trois angles de débattement pendant 4000 heures à la résonance.

Cette étude permet actuellement un prolongement contractuel dans le cadre du contrat ARCOS . Ce contrat dont les partenaires sont un groupement de laboratoires et d'industriels a pour mission de faire une veille technologique sur les méthodes et mises en œuvre techniques pour la mesure de distance. À ce titre nous avons été amenés à faire la démonstration d'un scanner 1D compact (balayage sur 40° optique à 800 Hz avec 5 Volt en entrée ou 90° optique à la même fréquence en suralimentation). L'élévation de tension est effectuée par transformateur. Le signal est mis en forme via un micro contrôleur. Le principe est le suivant: on envoie en entrée du transformateur un signal haute fréquence adapté au maximum du rendement de conversion, ce signal étant mis en forme par une enveloppe dont la fréquence est adaptée à celle du micro miroir. Le micro miroir agit comme un filtre: il n'est sensible qu'aux variations du signal de plus basse fréquence. Le système est commandé via une RS 232 sur les deux fréquences et les amplitudes permettent par ce biais de piloter l'amplitude de balayage du scanner.

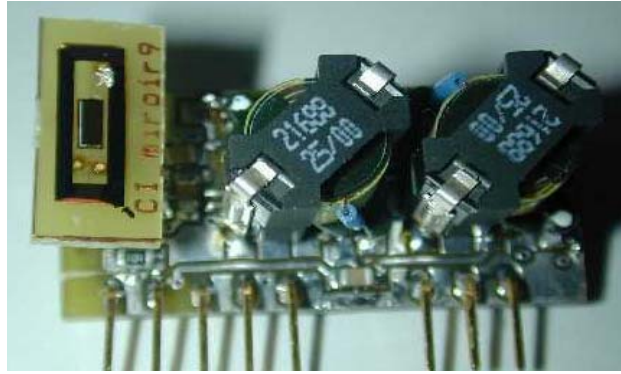


Figure II-9 Photographie du système complet

Les caractéristiques fonctionnelles (fréquence propre, tension d’actionnement, angles de rotation) sont compatibles pour de nombreuses autres applications mais nécessiteront une adaptation au cas par cas du fait de leurs interdépendances.

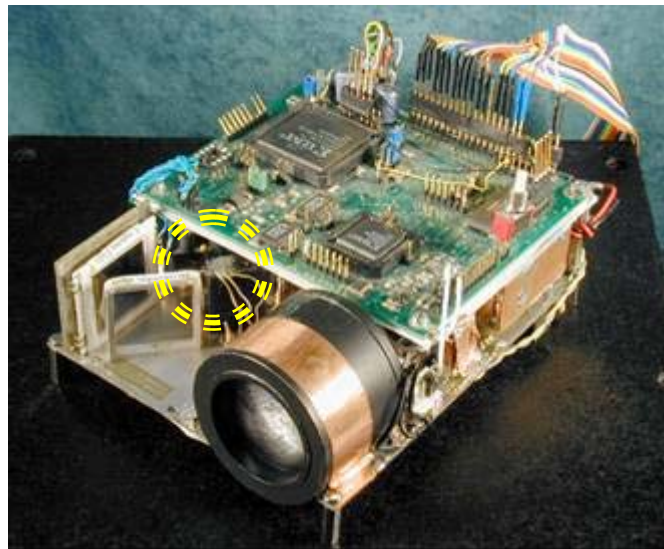


Figure II-8: photographie de la caméra en test (projet TRIDICAM en collaboration avec les groupes Robotique et Intelligence Artificielle, Contrôle des Systèmes Continus du LAAS).

(Le système de balayage biaxe est localisé dans le cercle jaune).

Au final, ces travaux ont conduit à la réalisation d’une maquette de la caméra laser 3D opérationnelle pour la partie balayage de scène et en phase de test pour la partie télémétrie par le groupe Robotique et Intelligence Artificielle du LAAS (Figure II-8). Ils ont donné lieu en particulier à une conférence invitée dans l’une des plus importantes manifestations internationales de robotique.

Au delà de ces travaux, l’expertise acquise tant au niveau des technologies de réalisation que du prototypage des microsystèmes nous permettait de participer à l’initiative européenne Europractice dès 1997. Ce projet regroupant les principaux acteurs microsysteme français (LETI, SAGEM, SEXTANT, TRONICS Microsystems) et le L.A.A.S. pour le quel nous avons assuré la coordination.

II-6 Conclusion

L'optique à miroir peut bénéficier pleinement de l'actionnement électrostatique : on trouve dans la littérature une grande variété d'approches que nous avons rappelées au début de ce chapitre. Nos intérêts, confortés par les besoins de la robotique, se sont portés sur la réalisation d'un micro miroir effectuant le balayage unidirectionnel d'un faisceau et s'intégrant dans une caméra laser 3D. Cette approche microsysteme touche à la fois les aspects de réalisation technologique et d'assemblage, de la commande, de la modélisation physique des diverses parties de la structure, de leur insertion dans une modélisation globale couvrant du dessin des masques à l'électronique de commande, de l'influence de l'environnement sur le comportement sans oublier d'aborder la fiabilité mécanique des MEMS.

L'application robotique que nous avons explorée reste encore une application relativement ponctuelle pour l'instant et se trouve concurrencée par d'autres approches (Projet PICASSO interne au LAAS) portant sur la vision 3D stéréoscopique.

Néanmoins, d'autres applications utilisant le balayage d'un faisceau laser sont possibles par exemple dans la détection d'obstacle pour l'automobile. Un autre champ moins conventionnel peut s'ouvrir à l'heure actuelle dans le domaine médical de la chirurgie invasive ou le traitement des tumeurs in-vivo [Keith 05]. Des réflexions sont en cours où les contraintes sanitaires pourraient enrichir encore le concept et la technologie des miroirs analogiques.

Chapitre III

MICROSYSTÈMES OPTIQUES DE COMMUTATION

III-1 Introduction

Compte tenu de nos acquis (*modélisation, commande et savoir-faire en technologie*) sur les systèmes optiques de balayage par miroirs notre choix a été de prolonger nos travaux vers des applications nouvelles, en synergie avec le développement du secteur des télécommunications. La montée en puissance des échanges numériques ne s'est jamais démentie dans nos sociétés nécessitant des débits de plus en plus importants. La fibre optique véhiculant des ondes sur des dizaines de kilomètres sans détérioration notable a été une première réponse à ce besoin. Le passage du monolambda au multilambda permet également une augmentation notable des débits. Cette croissance en débit se poursuit et tend à s'étendre jusqu'aux plus petites ramifications du réseau, induisant des besoins de plus en plus forts en commutation. Le routage optique a fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années en particulier aux États-Unis du fait de la pénétration plus avancée des systèmes de multiplexage en longueurs d'ondes dense (DWDM); les démonstrations se situant au niveau d'essais sur le terrain de quelques prototypes aussi bien en optique planaire qu'en optique espace libre.

En optique guidée, les acteurs du réseau font principalement appel à divers types de commutateurs électromécaniques (ATT, Nortel, JDS, Corning, ...) ou à des systèmes à déplacement de bulles (essentiellement Agilent et NTT) [MA 03]. En optique espace libre, les systèmes à micro miroirs constituent aujourd'hui l'option privilégiée par l'ensemble des fabricants de systèmes ou sous-systèmes pour les télécommunications et ceci pour plusieurs raisons: l'insensibilité aux longueurs d'onde et à la polarisation ainsi qu'une très faible diaphotie, un temps de réponse typique de la milliseconde et une faible consommation électrique (Figure III-1).

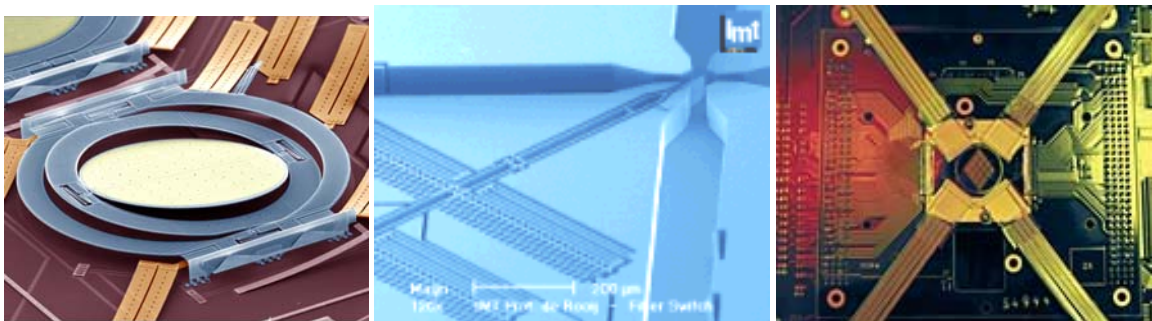


Figure III-1 : Système à miroir biaxe (Lucent), système à miroir vertical (IMT), système à bulles (Agilent)

L'enjeu économique est important et il nous a semblé stratégique d'appuyer cette évolution de notre activité par une collaboration industrielle directe. C'est la société TRONICS Microsystems qui a été notre partenaire privilégié. Notre implication s'est établie sous plusieurs formes :

- une participation à des projets de recherche et développement (Nous reviendrons sur ce point en détail ultérieurement),

- une participation au développement de leur fonderie sur SOI,
- un rôle d'expert en soutien à des actions contractuelles,
- un accompagnement récurrent, dans le cadre du programme Europractice, dans le secteur des microsystèmes pour l'optique.
- une ouverture à la formation des ingénieurs via des bureaux d'études de conception et de caractérisations pour les étudiants de l'INSA de Toulouse.

III-2 Principe de conception des miroirs digitaux

Lors du développement des micromiroirs, nous avons pu constater que lors de l'établissement d'un créneau de tension et tant que l'amplitude du créneau est inférieure à une certaine valeur, le miroir se positionne angulairement avec un amortissement oscillant à la fréquence propre du système. Pour assurer un positionnement angulaire, il est alors nécessaire de travailler en boucle fermée pour, d'une part, réduire le temps d'oscillation et atteindre la position angulaire plus rapidement et, d'autre part, assurer le maintien une fois la position angulaire atteinte. Au delà d'une valeur limite du créneau de tension, le miroir va directement au contact de l'électrode inclinée. Nous avons pu ainsi obtenir une commutation de 70° optique dans notre cas avec un créneau de 800 V d'amplitude. Dans ce cas, la contrainte de précision de pointage est transférée de la commande à la construction de la structure. Nous pouvons remarquer que la précision sur l'épaisseur des couches en microtechnologie permet de définir un angle à la butée avec une très grande précision. Ceci est un avantage indéniable.

Ce phénomène de basculement, connu sous le terme de pull-in, se produit donc lorsque l'amplitude du créneau de tension de commande amène le miroir à dépasser l'angle au delà duquel le moment électrostatique est toujours supérieur au moment de rappel mécanique (Figure III). Cet angle correspond à 50% de l'angle de butée mécanique dans le cas d'électrodes plates dont la largeur est au moins égale à la demi largeur du micro miroir. Une fois le miroir basculé, la tension peut être réduite jusqu'à une valeur dite de maintien sans que le miroir ne quitte sa position commutée. En deçà de cette valeur, le miroir revient sur la position statique correspondante.

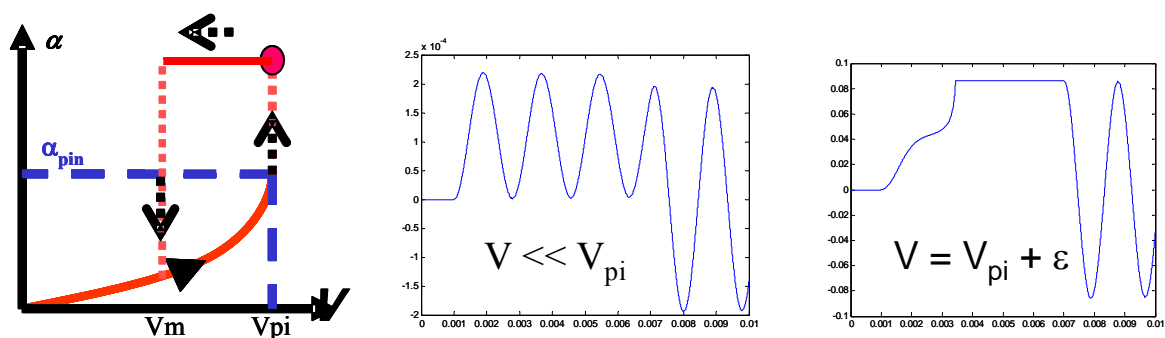


Figure III-2a : Courbes de comportement du miroir ; b : Réponse à un échelon faible ; c : Réponse à un échelon fort

Abcisse : Amplitude de la tension de commande ; en ordonnées : angle de rotation du micro miroir.

La figure III-2a indique donc le comportement générique de la structure micro miroir. La trace rouge indique la zone où il est possible d'obtenir un positionnement statique (à une tension de commande correspond un angle de rotation dans la gamme $[0, V_{pi}]$). Au delà de V_{pi} (flèche noire verticale orientée vers le haut), le micro miroir part sans position intermédiaire à l'angle total α . Si l'on diminue alors la tension de commande, le micro miroir (flèche horizontale noire orientée à gauche et trait rouge horizontal) reste à la valeur α jusqu'à la valeur V_m de la tension appelée tension de maintien. En dessous V_m , le miroir quitte la position α pour revenir sur le point correspondant de la courbe de positionnement statique. Le tout forme un comportement de type hystérésis.

Cette caractéristique intéressante des systèmes à micro miroirs électrostatiques n'avait pas été alors exploitée, notre système devant travailler en balayage. Toutefois les approches à micro miroirs à positionnement statique développées par LUCENT pour les routeurs MEMS permettaient d'entrevoir tous les bénéfices et les potentiels d'applications que nous pouvions tirer de l'utilisation de nos micromiroirs en mode de basculement. Le travail a donc été engagé selon trois types d'application :

- la commutation de longueur d'onde (ingénierie des longueurs d'onde),
- la commutation de faisceau pour les télécommunications,
- la commutation de faisceau pour le militaire.

III-3 Les applications des miroirs digitaux

III-3-1 Multiplexeur d'insertion-extraction (Add and Drop)

Le multiplexage est une notion essentielle de la construction d'un réseau de distribution, celui de l'information dans notre cas, car il permet la fluidité du transport, la reconfiguration du réseau et par voie de conséquence son adaptabilité. Il permet d'aiguiller le flux d'information d'un émetteur vers son destinataire au sein d'un réseau. L'utilisation de plusieurs longueurs d'onde dans une fibre optique implique la nécessité d'extraire une longueur d'onde d'une fibre et de l'insérer dans une autre fibre. C'est la fonction d'un multiplexeur d'insertion-extraction (Add and Drop). L'enjeu est à l'échelle du réseau. Ce composant constitue un élément clé car il se situe à l'échelon le plus bas de la commutation.

Il ne s'agira pas de balayer un faisceau, comme dans l'utilisation précédente, mais de le diriger vers une ou plusieurs positions fixes avec une grande précision angulaire. Le schéma de principe général d'un Add and Drop est le suivant (Figure III-3) :

- un faisceau multi longueur d'onde est positionné en entrée,
- un réseau disperse angulairement les longueurs d'ondes,
- une barrette de micro miroirs dont chaque miroir renvoie soit le faisceau dans la fibre d'entrée (tracé jaune) ou l'oriente en position d'insertion pour une fibre différente (tracé rouge).

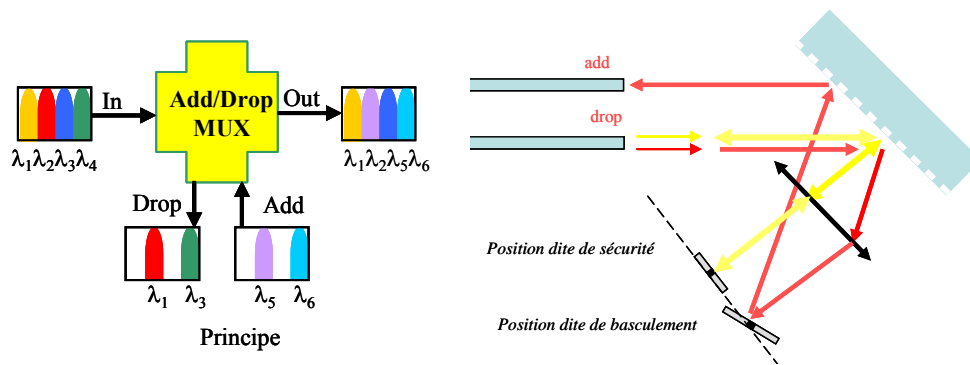


Figure III-3 : Schémas des principes utilisés pour le multiplexeur d'insertion extraction.

Plusieurs contraintes ont dû être prises en compte (nécessité d'une position de sécurité commandée, grand nombre de micro miroirs adjacents...), pour concevoir un objet à vocation commerciale. Des détails (miroirs et électrodes) ainsi qu'une vue globale est illustrée par la Figure III-4.



Figure III-4 : Image d'une partie du composant: structure miroir (gauche), implantation des électrodes (milieu), et image globale de la barrette de 40 miroirs (droite)

La réalisation d'électrodes inclinées, favorable à la diminution de tension ne peut pas être mise en œuvre ici au vu des angles demandés. Nous avons alors développé les modèles "électrodes planes" permettant de caractériser la relation entre position de l'électrode, le domaine angulaire adressable en positionnement, les tensions caractéristiques de basculement et de maintien. Il apparaît que plus l'électrode est proche de l'axe de rotation, plus la valeur de l'angle de basculement (angle au delà duquel le miroir part irrémédiablement vers l'électrode) se rapproche de l'angle géométrique (angle du miroir en position commuté). Il est donc possible de commander la totalité des angles de positionnement mécaniquement possibles mais au détriment d'une augmentation de tension [Estibals 02]. Un compromis a été mis en œuvre lors de la définition des côtes des structures en fonction des contraintes technologiques liées aux procédés disponibles.

L'architecture proposée présente, de plus, de nombreux avantages. Elle a permis la suppression de l'asservissement électronique de position, par un asservissement mécanique du miroir incliné. Deux positions stables sont ainsi garanties: une à 0 degré bloquée par commande et une à 2,2° (miroir

incliné). Ce composant utilise donc des micro-miroirs digitaux, réclamant une excellente uniformité et un excellent contrôle des caractéristiques mis en jeu, à savoir par exemple l'excursion angulaire des micro-miroirs. La tension de basculement est de l'ordre de 100V et la tension de position de sécurité à 0 degré est de 10V.

La technologie utilisée a mis en jeu des substrats de type SOI (*Silicon On Insulator*), permettant de répondre aux exigences ci-dessus dans le cas des matrices de micro-miroirs, sans pénalisation sur les rendements de fabrication. Le tout a permis d'offrir une très bonne qualité optique, en particulier sur la planéité. Cependant, à notre initiative, la couche d'isolation a été changée (Si_3N_4 par SiO_2) relativement au piégeage de charges particulièrement important dans le nitrure de silicium en comparaison de l'oxyde de silicium.

Ce travail a donné lieu à la thèse de B. Estivals dans le cadre d'une convention CIFRE et à la mise sur le marché du composant par la société Nettek.

III-3-2 Système de répartiteur optique – Projet ROADMAP

Cette action est destinée à la conception et à la fabrication d'un routeur fibre à fibre à propagation libre. Notre travail a consisté à concevoir la structure de base dans le cadre d'un procédé de fabrication discuté avec Tronics Microsystems et de l'électronique de commande du répartiteur complet. Les caractérisations fonctionnelles électromécaniques des barrettes étaient à notre charge également.

L'objectif du projet ROADMAP est de réaliser des routeurs tout optique de 16 et 64 entrées-sorties à partir d'une architecture originale qui permette d'allier les avantages des structures de routage optique espace libre à micro-miroirs tout en évitant la réalisation de micro-miroirs multi-positions à commande analogique, difficiles à maîtriser sur le plan technologique et coûteux en termes d'encombrement pour l'électronique de commande.

Le routage tout optique présente un fort intérêt pour le développement des télécommunications optiques du fait de la transparence qu'il offre en termes de fréquence de modulation et de longueurs d'onde des porteuses optiques tout en permettant une faible perte optique entre les fibres d'entrée et de sortie ($<0,5$ dB de fibre à fibre dans notre configuration). Il autorise également très aisément une augmentation des débits d'information sans modification de la structure du routeur et présente une diaphotie typiquement inférieure à 50 dB.

Ce projet a été soutenu par le RNRT (Réseau National de Recherche en Télécommunications). Il est actuellement réalisé en collaboration avec ALCATEL, TRONIC'S, et le CEA-LETI en remplacement de Teem Photonic qui a subi des plans sociaux sévères fin 2002.

Le principe de l'amplification angulaire qui a été adopté (par miroirs digitaux) est de provoquer une incrémentation du nombre de directions d'un faisceau par passage en cascade sur une série de miroirs à mouvements quantifiés (par exemple binaire) (Figure III-5). Un faisceau optique rencontre un premier miroir acceptant un nombre discret de positions angulaires, le faisceau s'en trouve dévié suivant un nombre discret de directions angulaires (deux dans notre exemple). Le principe de

l'amplification angulaire repose sur l'utilisation d'une optique de grandissement G donné qui permet de collecter les différentes directions angulaires générées sur le faisceau et de les faire converger vers un autre miroir, second étage de l'amplificateur. Avec un choix judicieux de G et des positions angulaires du second miroir, les positions angulaires du faisceau sont à nouveau incrémentées au passage du second étage (dans l'exemple si $G = 2$, un miroir dont les positions angulaires sont égales à celles du précédent générera 4 directions angulaires). En plus de la collecte des directions angulaires, l'optique intermédiaire permet de corriger la divergence intrinsèque au faisceau.

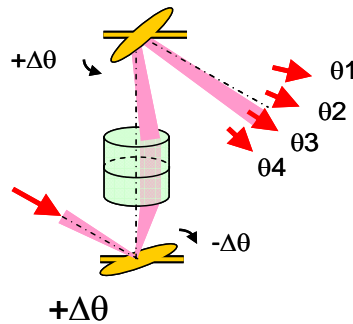


Figure III-5 : Principe de base de l'augmentation d'angle par micromiroirs digitaux

Ce principe peut être utilisé pour des applications de commutation de faisceaux optiques, particulièrement dans le domaine des télécommunications. Un faisceau entrant dans le système par une voie peut en effet être réorienté angulairement vers une voie de sortie quelconque. L'intérêt d'une configuration digitale est de simplifier la gestion de la distribution des faisceaux. Cet ensemble constitue le Module d'Amplification de Position Angulaire (MAPA). L'architecture globale comprend un MAPA, un module de liaison et un autre MAPA pour remettre le faisceau en position d'insertion vers la fibre de sortie choisie. La figure III-6 illustre un cas de commutation de signaux issus de fibres.

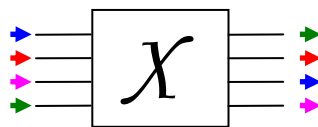


Figure III-6 : exemple de commutation

Chaque fibre est un canal de transmission à commuter. Le temps de commutation est de l'ordre de la milliseconde

L'élément de base actif du routeur est le micro-miroir à actionnement électrostatique, qui a été conçu et modélisé:

- à l'aide d'un modèle comportemental qui à partir des paramètres géométriques, permet de connaître les tensions et l'angle de pull-in, ainsi que la tension de maintien
- par la résolution des équations dynamiques permettant de connaître le temps de commutation d'un seul côté puis d'un côté à l'autre,

- à l'aide de simulations aux éléments finis (utilisation des logiciels de l'environnement COVENTOR WARE), en tenant compte des principaux paramètres technologiques de fabrication pour évaluer les contraintes mécaniques et pour assurer un bon fonctionnement.

Des barrettes de 4 miroirs (Figure III-7) ont été mises à notre disposition en septembre 2003. Elles ont été fabriquées par Tronics Microsystems par assemblage de deux plaquettes de silicium : l'une conventionnelle pour les supports et les électrodes de commande, l'autre SOI pour les ressorts et la plaque du miroir. Ces structures correspondant aux dimensionnement fournis par le LAAS.

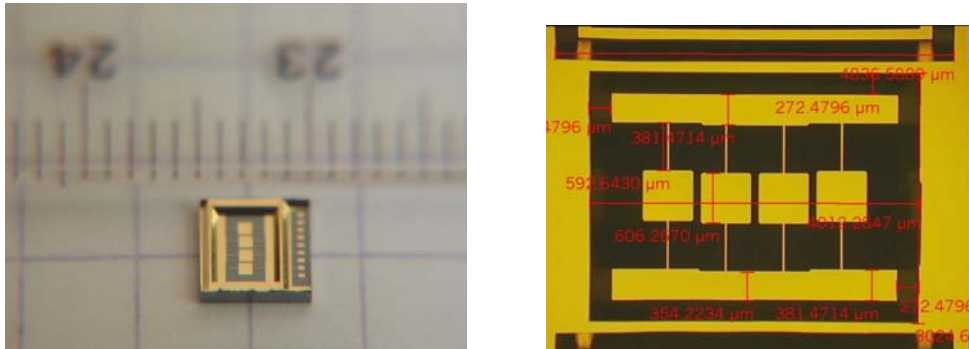


Figure III-7 : Barrette ROADMAP pour démonstrateur 4X4

La réalisation de deux électroniques de commande (Figure III-8) pour le démonstrateur 4x4 (simple et avec liaison PC) a été effectuée: Il s'agit de pouvoir piloter la commutation d'un ou plusieurs micro-miroirs (voire tous ensemble) en moins de 1 ms. Or, l'actionnement électrostatique de ces structures impose, d'après les modèles, des tensions d'activation de l'ordre de 50V à 80V. En conséquence, un module de conversion DC/DC est inclus, laissant pour seules entrées une tension de 5V et une liaison RS232 pour la communication avec un PC. Cet ensemble a été livré à Alcatel et testé démontrant la faisabilité opérationnelle d'une telle structure.

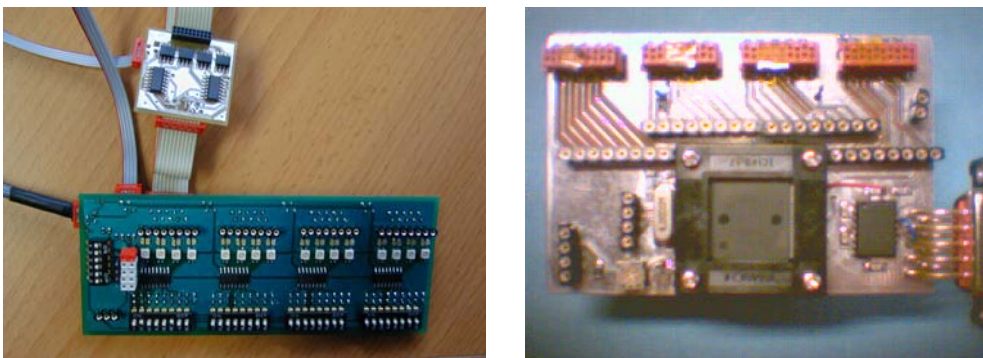


Figure III-8 : Électronique de commande pour des systèmes de 4X4 et jusqu'à 16X16

L'application dans les réseaux d'infrastructures (backbone et métropolitain impose une condition de fonctionnement très particulière: à savoir que les miroirs peuvent être commutés uniquement une à deux fois par an et donc maintenus en position commutée sous tension entre temps. Le piégeage de

charges devient alors le point dur pour de telles structures dans ce type de fonctionnement. L'utilisation de signaux de commande continus finit, malgré les précautions de séparation des contacts miroir-électrode, par entraîner néanmoins des injections de charges conduisant à une augmentation de la tension de commutation comme l'illustre la figure III-9-A ci-dessous, voire au blocage en position commutée en absence d'alimentation. Ceci est rédhibitoire vis à vis de la fiabilité. Plusieurs solutions étaient possibles dont la séparation des électrodes de réception du miroir et de commande pour fixer les potentiels de ces électrodes indépendamment. Cette solution était impossible pour des contraintes de distance minimale à respecter entre les miroirs montés en barrette. Nous avons donc pris le parti d'utiliser des signaux HF bipolaires permettant d'effectuer des cycles de renversement du champ électrique dans les isolants. L'efficacité d'un tel système de commande a été testée en comparant la dynamique lors de l'arrêt d'alimentation d'un miroir à l'origine de son utilisation avec celle obtenue après 24 heures de maintien en position commutée sous actionnement permanent à la tension de basculement, donc à la plus forte contrainte de fonctionnement. Ceci a été répété jusqu'à obtenir des tests à 450 heures sans voir la moindre modification de la dynamique de retour du miroir à sa position angulaire sans alimentation (position neutre). La figure III-9-B ci-dessous illustre un relevé à 450 heures. A la position neutre, aucune tension n'est appliquée, seul le moment de rappel mécanique (les barres de torsion en silicium) guide le comportement mécanique. Une charge résiduelle se matérialiserait par une modification en termes de temps de retour à la position neutre ou de variation de la dérivée du signal, ce qui n'est pas le cas.

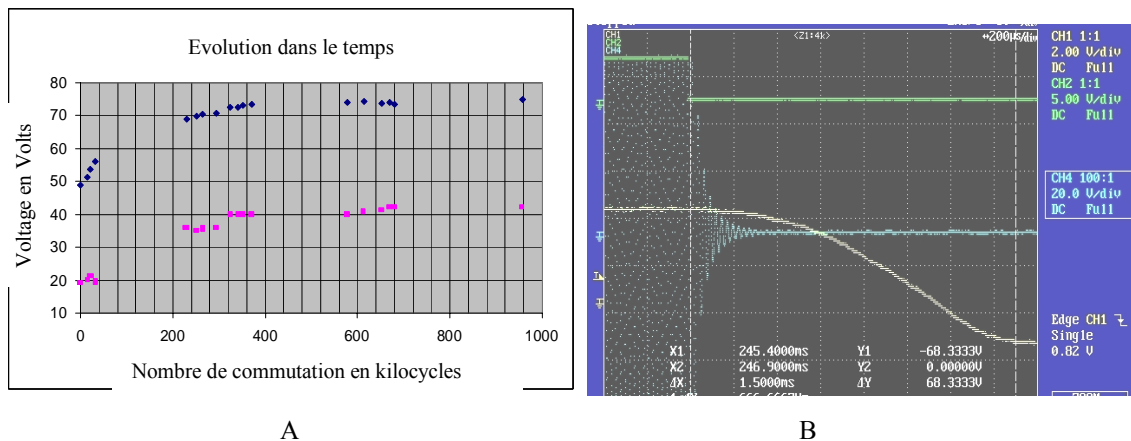


Figure III-9

- A) évolution des tensions de commutation et retour à la position neutre en fonction du nombre de cycles avec un actionnement à base de signaux continus (abscisse : nombre de commutations en kilocycles, ordonnée : tension de basculement pour le basculement, en rose : tension de maintien)
- B) exemple de retour à la position neutre (sans injection de charge) après 450 heures de maintien en position commutée sous alimentation HF. Légende : signal vert ⇔ TTL de déclenchement, signal bleu ⇔ mesure de la tension aux électrodes du miroir, signal blanc ⇔ trace sur le capteur de la position du spot laser réfléchi que le miroir, échelle horizontale ⇔ 200 µs par carreau

Ceci nous amène à développer un étage de commande particulier devant manipuler des signaux de tensions de 70 kHz bipolaires (+/- 100V) obtenus à partir du secteur. Ce développement est en cours par une étude sur l'architecture du système de pilotage et la disponibilité des composants (commande type LCD, opto MOS, triac. etc....).

D'autre part des tests longue durée sont en cours pour valider la fiabilité d'un tel actionnement sur le long terme. La figure III-10 illustre un test de passage du miroir entre les deux positions commutées (passage à la position $+\Delta\theta$ et retour à la position $-\Delta\theta$) 250 fois par seconde durant 30 jours, soit 648 millions de double commutations, le temps de basculement d'une position à l'autre étant de 1 ms.

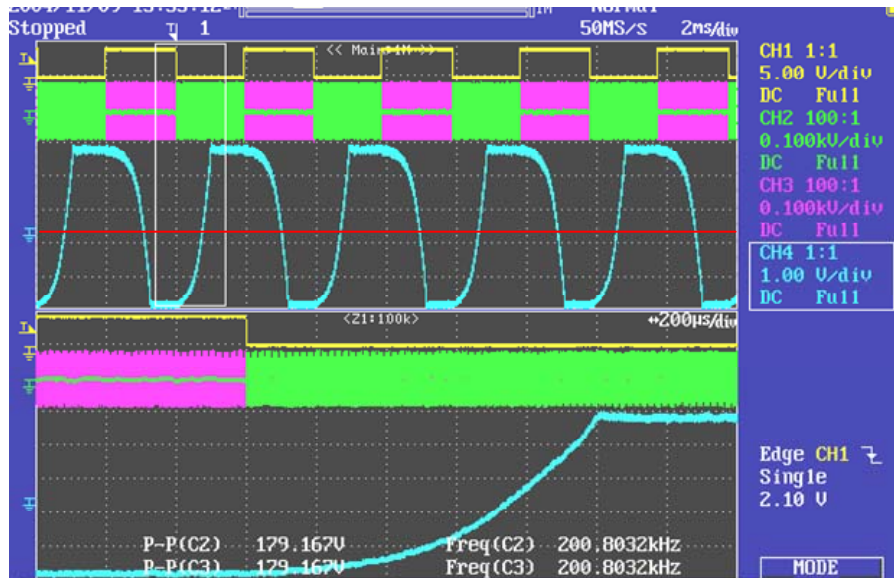


Figure III-10 :

Partie haute de la fenêtre :

- Signal jaune Signal TTL de déclenchement
- Signal vert Tension HF d'une électrode
- Signal Violet Tension HF de l'autre électrode
- Signal Bleu Mesure du PSD de la position du faisceau laser réfléchi
- Ligne rouge position neutre (inclinaison nulle)

Partie basse de la fenêtre :

Zoom issue de la partie haute (fenêtre blanche) pour une commutation, échelle de temps \Leftrightarrow 200 μ s/carreau

III-3-3 Système d'amorçage optique à base de micro miroirs

La dernière voie d'application que nous avons considérée est celle de l'amorçage optique des munitions.

L'étude consiste à concevoir et fabriquer un système de commutation optique à base de micro-miroirs permettant d'adresser deux sorties parmi quatre. Le temps de commutation depuis l'ordre extérieur au système jusqu'au basculement (+/- 5°, +/- 10°) doit être inférieur à la milliseconde. Les faisceaux

commutés ont une très forte énergie exigeant un traitement particulier des surfaces. Le rôle du LAAS a été de concevoir le système complet, incluant la commande.

Pour mémoire, les spécifications imposées étaient :

- dimensions externes du miroir : 6 mm x 6 mm;
- angles de positionnement du miroir en degrés : ± 5 , ± 10 , ± 15 ; le choix final étant de $\pm 10^\circ$ avec des performances dynamiques et de commande suivantes :
 - temps de positionnement global : ≤ 1 ms,
 - tension d'actionnement : ≤ 2 kV,
 - doit supporter un tir laser de très forte puissance.

Ces spécifications sont très contraignantes et laissent peu de marge de manœuvre. De plus l'encombrement final ne doit pas excéder quelques cm^3 ($2 \times 2 \times 4 \text{ cm}^3$, électronique incluse).

Du fait des dimensions du miroir, très importantes pour des MOEMS, les structures doivent être optimisées à leur maximum. Néanmoins les tensions à mettre en œuvre peuvent dépasser 1,5 kV. De même les supports de miroir sont réalisés par usinage conventionnel d'une céramique (Figure III-11), le nombre de pièces à réaliser étant faible.

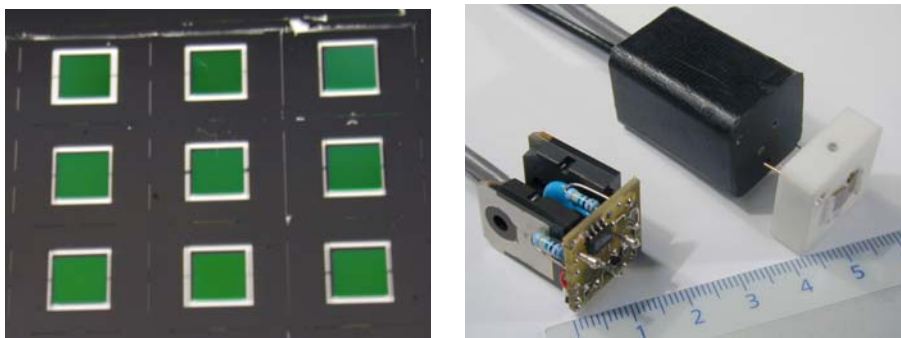


Figure III-11 : Images (gauche) Vue des miroirs au travers du cache utilisé après les dépôts haute réflectivité; (droite): Système comprenant l'électronique nue, l'électronique potée et le support miroir

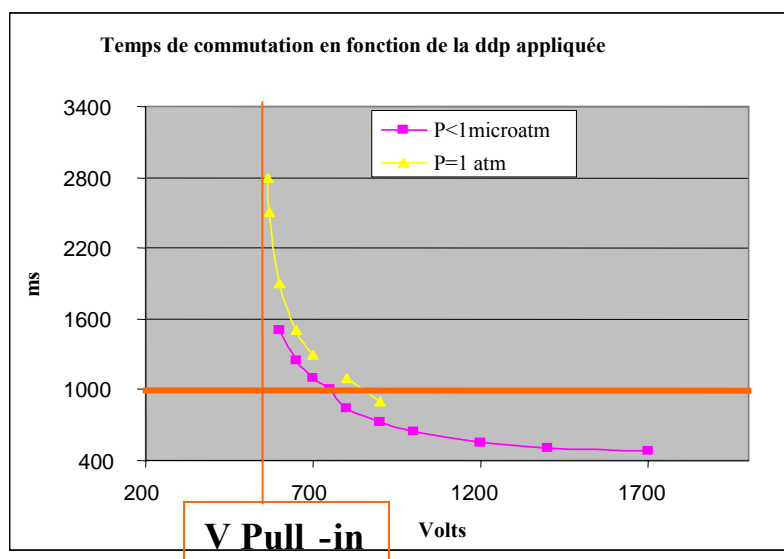


Figure III-12 : Relevé expérimental du temps de commutation en fonction de la tension

*En jaune à la pression atmosphérique, en rouge dans le vide
Abscisse: tension crête en volt, Ordonnée: temps de commutation en μ s*

La figure III-12 ci-dessus donne un exemple de résultats expérimentaux sur une structure basculant à 10° mécanique (ou 20° optique) obtenus avec le système complet.

Plusieurs difficultés spécifiques à ces «grosses» structures ont dû être résolues :

- i) du fait de l'inertie, le temps de commutation n'est atteint qu'avec des tensions importantes induisant des problèmes de claquages électrostatiques. Ceci a été corrigé par l'utilisation de parylène en couche mince (10 μ m) sur les électrodes, la tenue à la tension de ce matériau étant remarquable ($>250\text{V}/\mu\text{m}$). Une fois la structure commutée, le parylène est soumis à un champ de 1 MV/cm. Une injection de charge se produit empêchant le retour du miroir à sa position neutre. Bien que l'application finale soit mono coup, il faut être capable de ramener le miroir à la position neutre pour assurer le positionnement et le contrôle optique lors du montage de l'ensemble du système de commutation pour la vérification de l'alignement optique. Ceci s'obtient en envoyant une salve unique de tension polarisée en inverse. Les premiers résultats sont encourageants quant à la possibilité de maintenir hors alimentation un miroir en position commutée, et de le ramener à sa position neutre à la demande. Des tests ont montré la possibilité de tenir le miroir commuté durant plus de trois mois hors alimentation,
- ii) la vitesse du miroir en fin de course provoque un rebond à l'impact empêchant le respect de la tenue de l'angle dans l'instant suivant l'impact. Afin de ne pas trop augmenter les tensions mises en œuvre, et donc d'augmenter encore les vitesses à l'impact, nous avons choisi de développer une électronique de commande plus sophistiquée à base d'opto coupleur HT permettant de contrôler le profil de tension durant la première milliseconde d'actuation. Les vitesses d'impact ont été diminuées d'un facteur 10 assurant ainsi l'absence de rebond. Nous avons alors pu obtenir 100 % de tirs permettant une injection totale dans la cible jusqu'à 15 cm avec le temps de commutation requis.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un contrat d'étude pour la DGA, en partenariat avec la société Thales EADS Deutschland GmbH et le CEA/DAM, intitulé Initiateurs Opto Détonants par Éléments Projetés (IODEP). Il a donné lieu à une thèse BDI (A. Marchese) cofinancé par le CNRS.

III-4 Conclusion

Nous considérons à l'issue de ces travaux et en l'état des technologies que l'actionnement électrostatique des miroirs isolés ou en matrice est une fonction bien maîtrisée. Cette compétence a donné lieu à 22 publications ou communications dans des conférences internationales, à un brevet Européen et à une large valorisation applicative. Cette constatation nous a amené à retrouver une perspective à moyen terme tout en continuant, dans les applications, à apporter nos acquis.

Il s'agit de concrétiser les efforts engagés et d'élargir les compétences sur l'actionnement électrostatique en particulier sur les commandes de MOEMS garantissant une fiabilité vis-à-vis des charges injectées.

L'évolution de ces deux dernières années a surtout été guidée par les projets contractuels auxquels nous avons eu la chance de participer. Ces actions ont encore une année devant elles. Les contraintes contractuelles, et en particulier de fourniture pour le contrat IOSEP, nous ont obligés, cette année, à nous focaliser sur la réalisation technique. Néanmoins plusieurs points nouveaux ont été abordés comme la modélisation dynamique de structure à grandes dimensions, mais également:

- les aspects de commande des structures de type MEMS et/ou MOEMS,
- l'étude du comportement du micro miroir une fois basculé. En effet des phénomènes d'injection de charges dans les isolants bloquent le relâchement de la structure (retour à une position non basculée après remise à zéro des tensions de commande), ce qui est incompatible avec des modifications d'adressage, rapides en elle-même ($< 1\text{ms}$), mais requises après des longs temps de basculement (typiquement toutes les semaines voire tous les mois). Une solution de commande a été mise en place ouvrant des perspectives pour les réalisations dans le cadre du contrat ROADMAP et nécessite des tests en continu sur de grandes périodes,
- l'étude complémentaire cherchant à utiliser l'injection de charges volontairement pour réaliser des structures à blocage de charges. Ce travail fait l'objet de la thèse de G. Ricard en co-encadrement avec G. Sarrabayrouse du groupe TMN du LAAS depuis septembre 2003, thèse financée par une bourse du Ministère.

Ces travaux donnent une orientation non seulement innovante pour le fonctionnement des structures électrostatiques mais permettent également d'aborder une problématique liée à la fiabilité des microsystèmes rarement abordée sous cet aspect là. Nous allons voir dans le chapitre suivant les domaines précis sur lesquels nous pensons pouvoir travailler dans le futur.

Chapitre IV

Travaux en cours et prospective

IV-1 Introduction

Avec les concepts et les exemples présentés dans les trois chapitres précédents, nous avons apporté une contribution au développement de l'actionnement électrostatique tel qu'il est apparu dans les années 90.

En résumé nous pouvons synthétiser les actions entreprises par le tableau ci-dessous qui indique par le biais des objets réalisés, les thématiques abordées et l'évolution scientifique jusqu'à aujourd'hui.

		Répartition temporelle par thématique					
	Modélisation atomistique de la gravure chimique du silicium	micromoteur électrostatique	MOEMS : micromiroirs		Micro fluidique		
1990	Modélisation atomistique de la gravure chimique du silicium	Micro usinage de surface polysilicium	Balayage : Caméra laser 3D pour la Robotique mobile		micro pompe		
1991							
1992							
1993							
1994			Micro usinage de surface polysilicium	Balayage : Caméra laser 3D pour la Robotique mobile		micro pompe	
1995							
1996					Balayage : Caméra laser 3D pour la Robotique mobile		micro pompe
1997							
1998	Digital : Add Drop				Micro usinage de surface tout polymère : optique adaptative	micro diode vortex	
1999							
2000	Micro moteur : objet de test pour la fiabilité	Digital : routeur pour les télécom.			Digital : Routeur pour faisceaux de forte puissance	Micro usinage de surface tout polymère : optique adaptative	micro tuyères (soutien)
2001							
2002							
2003							
2004							

Tableau IV-1 : Synthèse des actions entreprises au travers du filtre des objets

Au cours de ces études, nous avons proposé des solutions originales à des applications spécifiques :

- système de balayage de scène par micro miroir résonnant pour la robotique mobile,
- système Multiplexeur d'insertion-extraction (Add-Drop) et un répartiteur optique pour les télécommunications à base de micro miroir digitaux
- système de commutation de faisceau laser de forte puissance pour les applications militaires.

Nous considérons aujourd'hui que la conception et la réalisation de tels systèmes constitue une compétence scientifique et technologique bien maîtrisée. Ce sont maintenant les marchés qui décideront de l'ampleur des développements industriels: nous considérons que la commutation optique par miroir s'intègre dorénavant dans les technologies microsystèmes pour piloter des faisceaux de communication ou de puissance ;

Ce dernier point, que nous avons rapidement présenté au chapitre III, présente une attractivité très particulière dans les applications civiles. Nous pensons en particulier aux applications médicales in vivo. Il y a d'un côté la chirurgie mini invasive qui se développe et, en parallèle, la nécessité, plus générale, de miniaturiser des outils performants d'intervention ou pour le traitement localisé. Dans ce cadre, le contrôle d'un faisceau laser de puissance est sûrement une des applications potentielles de notre travail qu'il faut continuer à approfondir compte tenu de l'impact potentiel de cette innovation. Mais si l'on considère la perspective de notre travail, elle se situe plus dans une démarche d'intégration système et des technologies, c'est-à-dire dans une démarche de mariage de nos acquis avec d'autres acquis extérieurs. Au fond, nous pensons qu'il faut faire le pari d'une intégration des technologies compatibles conduisant à des systèmes multifonctionnels. C'est notre analyse et elle est en cohérence avec les orientations du groupe de recherche dans lequel nous travaillons.

Cette analyse ouvre des voies multiples pour les MOEMS au carrefour du silicium, des polymères et des dispositifs plus conventionnels de l'optique.

Une de ces voies est l'association des propriétés du silicium et des matériaux III-V mais c'est une option bien identifiée qui se heurte dans son développement au verrou de la technologie de l'hétéroépitaxie entre des matériaux trop différents.

Une autre voie est l'exploitation d'une association silicium/polymères. C'est cette voie que nous nous préparons à explorer :

- 1) on trouve parmi les polymères de nombreuses potentialités optiques de génération, de transmission, de détection et de transformation de la lumière,
- 2) on trouve aussi plusieurs mécanismes électroactifs qui sont des solutions potentielles à l'actionnement mécanique [Lee 02],
- 3) mais également des perspectives d'intégration : des polymères pour une intégration sous formes de SOP (Systems On Package) sont en cours de validation et notamment dans notre laboratoire pour des applications à la fluidique.

La conception des microsystèmes, impliquant des fonctions de MOEMS à base de silicium et/ou de polymère, nous paraît donc une bonne orientation sur un travail à dix ans pour le développement de microsystèmes multifonctionnels à bas coût.

Une première opportunité de rentrer dans cette dynamique nouvelle est le mariage des technologies électrostatique et sol-gel et/ou résine épaisse qui servira le domaine de l'optique adaptative. Nous le prendrons comme un exemple d'autant plus que nous avons déjà sur le sujet quelques premiers résultats encourageants.

Une deuxième opportunité prolonge ces premiers travaux, toujours dans la voie de l'optique adaptative. Mais ici on quitte l'actionnement électrostatique tel que nous l'avons considéré précédemment, pour entrer dans l'actionnement par propriétés moléculaires électromécaniques.

Ces deux exemples nous permettront de revenir sur la réflexion prospective et de nous projeter dans un avenir d'approfondissement vis-à-vis de l'utilisation des polymères comme constituants actifs et

passifs pour de nouvelles générations de microsystèmes.

IV-2 Intégration des technologies sol-gel dans le concept d'optique adaptative

Le domaine d'application des MOEMS s'élargit ici vers l'observation astronomique. En effet l'évolution des dernières années dans les sciences de l'univers est de rechercher des objets de plus en plus lointains et de petites tailles. Le front d'onde émis par ces objets peut être considéré, au vu de leur éloignement, comme plan. Malheureusement, cette onde plane est détériorée par la traversée des couches atmosphériques ceinturant la terre. Une réponse a été le télescope Hubble, mis en orbite en 1990, qui va bientôt atteindre sa limite d'âge et sera prochainement remplacé par le JWST (James Webb Space Telescope). Parallèlement, se développent des télescopes au sol dont les tailles de miroirs équivalents ne cessent d'augmenter (NG-CFHT et CELT: 20-30 m, OWL : 100 m) devant atteindre la limite de diffraction.

Différents groupes de recherches dans le monde sont donc aujourd'hui impliqués dans la conception de grands télescopes optiques, allant de 20 à 100 mètres. Cette nouvelle génération de télescopes repose sur la maîtrise de techniques avancées d'optique adaptative. En effet, pour obtenir des images uniquement limitées par la diffraction, des systèmes de correction de perturbations d'ordre élevé sont indispensables. Les systèmes existants à base de piézo actionneurs ne peuvent atteindre un niveau d'intégration suffisant et sont donc limités en nombre [Vdovin 95, Vdovin 97, Bifano 00, Perreault 02].

Les micro-miroirs déformables (MMD), qui font parties de la famille des MOEMS, peuvent remplir cette mission avec succès.

IV-2-1 Conception matricielle d'une optique adaptative

Ainsi, nous avons engagé depuis 3 ans une collaboration active avec le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille pour la conception et la réalisation de prototypes de micro-miroirs déformables basés sur la technologie MOEMS.

Notre approche permet une haute densité d'actionneurs qui sont toujours pilotés par des champs électrostatiques. Leurs paramètres principaux sont la qualité de surface du miroir, la taille du composant, le nombre d'actionneurs réalisables, les effets de couplage inter-actionneurs, la course des actionneurs (déflexion maximale) et la tension de commande.

La structure choisie se compose de trois parties élémentaires (Figure IV-1) :

- le niveau supérieur, c'est-à-dire le miroir continu,
- le niveau intermédiaire, le réseau d'actionneurs électrostatiques,
- le niveau inférieur, l'électronique de commande essentiellement un réseau d'électrode.

Chaque élément de la matrice d'actionneur est donc constitué de son électrode de commande sur la plaquette de base, d'une contre électrode au niveau intermédiaire surélevée par des piliers et tenue à ces dernier par des ressorts. Le niveau supérieur (le miroir continue) est constituée d'une couche liée au niveau intermédiaire par un réseau de pilier venant s'ancrer au centre de chaque contre-électrode. Une différence de potentiel appliquée entre l'électrode et sa contre-électrode permet un mouvement de translation vertical de type piston qui déforme la couche supérieure. Il en résulte une variation de chemin optique à chaque emplacement des piliers joignant la couche supérieure à la couche intermédiaire. D'un point de vue plus général, une partie de la lumière incidente (le front d'onde perturbé) est prélevée, analysée par un analyseur de front d'onde, puis les tableaux de commande permettant de corriger le front d'onde sont envoyés à l'actionneur que nous concevons.

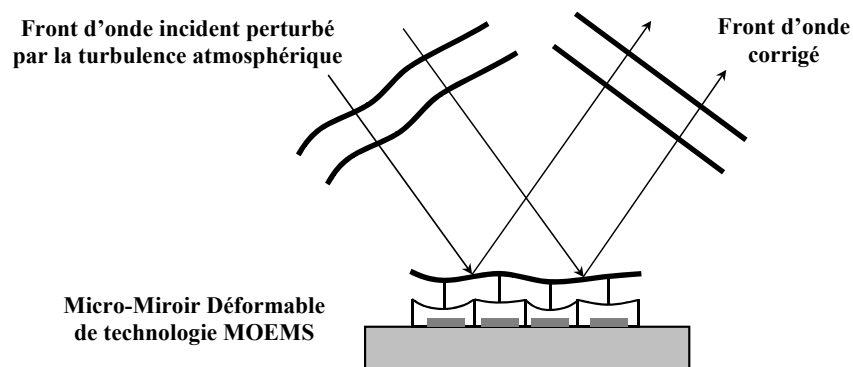


Figure IV-1 : Principe de la correction de front d'onde

Le choix du procédé de fabrication est consécutif aux spécificités de l'application:

- *vis-à-vis du miroir*: très grande planéité, surface continue (sans trous), absence de rugosité supérieure à $\lambda/10$
- *vis-à-vis de l'actionnement*: actionnement visant le plus grand débattement statique tout en restant compatible avec les tensions générées par les circuits intégrés (quelques dizaines de volts), facilement pilotable,
- *vis-à-vis du nombre d'actionneurs*: permettre une grande densité d'actionneurs avec un procédé de fabrication visant à être compatible avec les technologies des circuits intégrés.

Pour toutes ces raisons, j'ai choisi un procédé de micro usinage de surface utilisant les polymères et leurs caractéristiques malgré le défi représenté par le développement technologique:

➔ Pour des raisons optiques

- potentiel de planarisation de couche à couche: planéité du miroir,
- faible rugosité de surface: absence de diffusion optique.

➔ En rapport avec le comportement des actionneurs

- faible module d'Young: tension d'actionnement basse,
- possibilité d'avoir des fortes épaisseurs: plage d'utilisation importante.

➔ En termes de compatibilité de procédé

- procédé basse température: compatible microélectronique.

IV-2-2 La mise œuvre technologique

Deux types de procédé de fabrication ont été mis en place:

- un premier procédé utilisant des sol-gel comme couche sacrificielle
- un deuxième procédé uniquement à base de SU-8.

Procédé sol-gel/SU-8:

Le sol-gel est une solution contenant un composant organique (MAPTMS : 3-(triméthoxysilyl) propyl méthacrylate) et un composant inorganique (ZrO). Il présente l'avantage d'être photolithographique jusqu'à des largeurs de traits de 10 μm pour des épaisseurs allant jusqu'à 12 μm . Après dépôt à la tournette, il subit un recuit thermique pour le transformer en un matériau similaire à l'oxyde de silicium. La deuxième couche (SU-8) est alors déposée, photolithographiée et subit un recuit pour obtenir sa réticulation. La libération se fait par une dissolution dans une solution de HF-éthanol.

Procédé SU-8/SU-8:

La caractéristique principale de ce procédé est d'être entièrement en SU-8. Afin de ne pas insoler certaines parties de la structure, un film de magnésium, jouant le rôle de masque, est déposé et gravé directement sur une première couche de SU-8 pleine plaque. La deuxième couche de SU-8 est alors déposée et insolée. La suite est similaire au procédé précédent, et la couche sacrificielle est dissoute dans une solution de type PGMEA après le recuit de réticulation.

Ce deuxième procédé présente l'avantage de pouvoir utiliser les capacités de la SU-8 à faire des très fortes épaisseurs. Ceci est important car cela règle l'entrefer entre la partie mobile et la partie fixe de l'actionneur sachant que seulement un tiers de la course est utilisable en positionnement statique.

Le développement de ces procédés a nécessité la résolution de nombreuses difficultés dont en particulier la minimisation des contraintes dans la couche de SU-8 qui tend à déformer les structures, l'optimisation de l'adhérence des films métalliques, l'optimisation du procédé de photolithographie de la SU-8.

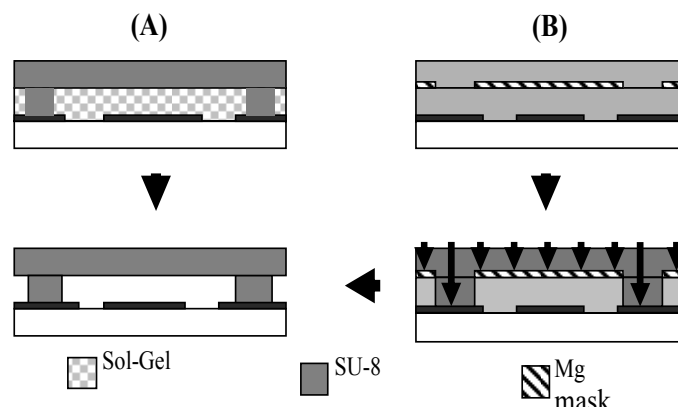


Figure IV-2 : procédé de micro-usinage de surface SU8.

- (A) Le sol-gel est déposé à la tournette et photolithographié. La seconde couche (SU-8) est déposée puis photolithographiée avant l'étape de libération par dissolution du sol-gel.
- (B) Un masque en magnésium est déposé sur la première couche de Su-8 non réticulée. Une seconde couche de SU-8 est déposée sur l'ensemble de la structure et photolithographiée. Ensuite les parties non exposées de SU-8 sont dissoutes par un procédé PGMEA conventionnel.

Pour le procédé sol-gel/SU-8, les mesures actuelles ont montré un résidu d'empreinte de $0,5 \mu\text{m}$ pour des marches de $9 \mu\text{m}$ démontrant ainsi la potentialité de planarisation des polymères utilisés et une rugosité inférieure à 15 nm , valeur sans doute un peu juste. La valeur de l'entrefer de $9 \mu\text{m}$, est néanmoins insuffisante pour un grand débattement vertical.

IV-2-3 État d'avancement des travaux

Les développements en cours se concentrent sur l'amélioration de la qualité de surface du miroir (en particulier sur l'augmentation des surfaces libérées) mais surtout sur la réalisation d'un deuxième niveau. Ceci est envisagé soit par répétition du procédé de premier niveau, soit par préparation d'une couche sur un autre support et report sur le niveau d'actionnement avant l'étape de libération.

Les figures IV-3 illustrent des exemples de réalisations issues du procédé sol-gel/SU8 qui constituent un des éléments de base du futur système. La figure IV-4 illustre une structure similaire réalisée par le procédé SU8/SU8. Elle a été caractérisée en fonctionnement par nos collègues du LAM (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille) jusqu'à un débattement de $2 \mu\text{m}$.

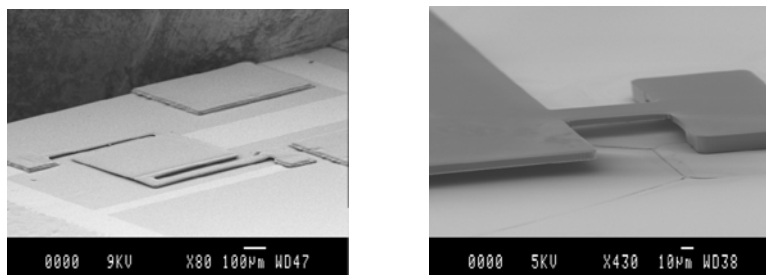


Figure IV-3 : Procédé Sol-Gel/ SU-8 : Rigidité et qualité de surface des matériaux utilisés dans nos composants. La largeur de la surface suspendue est de $500 \mu\text{m}$.

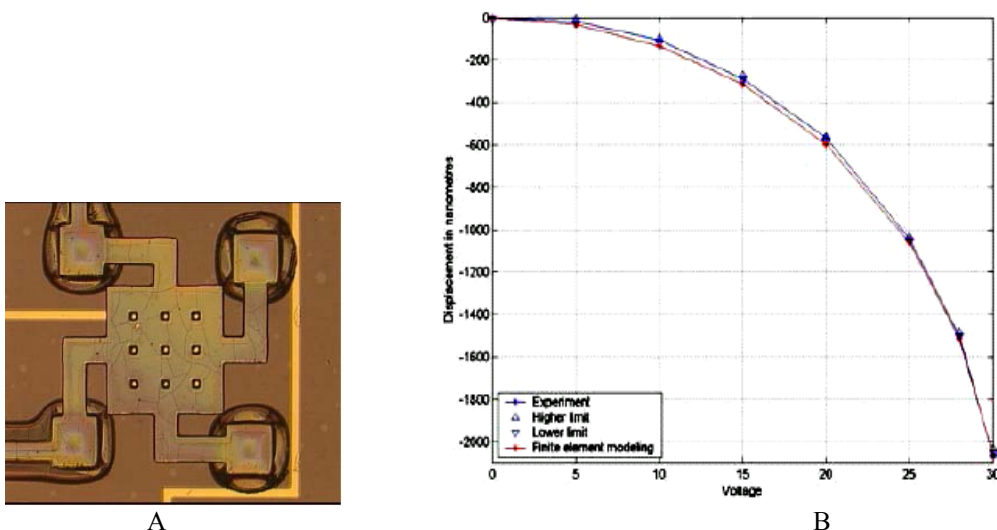


Figure IV-4 : (Procédé SU8/SU8)

- A) Exemple d'une structure
- B) caractérisation du déplacement sous actionnement (caractérisation effectuée au LAM par F. Zamkotsian).

Le CNRS, le Ministère de la Recherche, le CNES, l'ESA, la Communauté Européenne, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le Conseil Général des Bouches-du-Rhône soutiennent financièrement ces études.

IV-3 Optique adaptative et matériaux électrostrictifs

Il s'agit ici d'évaluer les potentialités des technologies microsystemes classiques ou nouvelles pour la correction optique. Un premier pas est en cours d'étude dans le cadre du laboratoire commun avec ESSILOR regroupant plusieurs laboratoires toulousains.

IV-3-1 La problématique

L'implémentation d'une fonction d'optique corrective active peut être abordée selon deux chemins différents :

- soit par variations locales de l'indice de réfraction du milieu,
- soit par variations locales de son épaisseur.

Les solutions envisagées jusqu'à présent n'ont pas exploré la variation d'épaisseur comme moyen d'obtenir des changements de chemin optique. Les variations d'indice des matériaux restent généralement faibles voire très faibles. En revanche les variations d'épaisseur peuvent être importantes en proportion de l'épaisseur et permettent dans l'absolu d'obtenir de grandes variations de chemin optique.

C'est donc cette dernière voie que nous nous proposons d'évaluer et de mettre en œuvre. Parmi les récents progrès et évolutions des microsystemes, deux possibilités semblent pouvoir ouvrir des solutions intéressantes en termes de performances, de flexibilité et de fabrication collective:

- l'utilisation de matériaux électrostrictifs et compliant (ESSP, Electro Statically Stricted Polymer) [Bar-Cohen, 01],
- l'intégration de fluides dans des dispositifs microstructurés.

Les deux voies ne sont d'ailleurs pas exclusives l'une de l'autre et adressent des technologies similaires.

Ma prospective de travail concerne, dans un premier temps, essentiellement le premier point.

Il s'agira :

- de dresser l'état de l'art dans le domaine
- de définir les principes opérationnels et les structures susceptibles de remplir la fonction recherchée
- de mettre en place les technologies indispensables à l'intégration de ces nouvelles fonctions

- de valider l'approche par la simulation et la réalisation

IV-3-2 Les matériaux et leurs intégrations en microsystèmes

Dans le cas des polymères électrostrictifs ou compliants, également dénommés ESSP pour Electro Statically Stricted Polymer, l'actionnement est électrostatique. Une différence de potentiel crée une force qui vient comprimer un milieu souple. De grandes forces sont obtenues quand il est synthétisé avec une forte permittivité. Ces matériaux peuvent servir comme actuateur longitudinal ou transverse et l'utilisation d'électrodes déformables permet d'augmenter la déformation. Les champs requis sont de 100 V/ μm mais induisent des déformations relatives jusqu'à 60% de l'épaisseur initiale. Récemment, Pelrine [Pelrine 00] a utilisé un élastomère acrylique (constante diélectrique relative variant de 2,5 à 15) démontrant un surplus de pression d'un facteur 5 à 30 si l'on compare par rapport à une structure similaire à entrefer d'air. Ces matériaux restent des matériaux passifs. Ils sont considérés comme des EAP (Electro Active Polymer) car la réponse est proportionnelle au carré du potentiel [Beslimane 02].

Similairement aux actionneurs électrostatiques conventionnels (pour lesquels l'entrefer est de l'air), le comportement en première analyse est celui d'un système du deuxième ordre avec une force active proportionnelle au carré du potentiel et une force de rappel passive proportionnelle à la diminution d'épaisseur du milieu et à la rigidité du milieu comprimé. Il en résulte une modification progressive de l'épaisseur avec la tension et une limite mécanique à la compression. Ceci définit la gamme maximale d'utilisation d'un tel système. La déformation mécanique peut s'appréhender en raisonnant à volume constant (en effet pour les polymères compliants le coefficient de Poisson avoisine 0,5) considérant qu'une contraction dans l'épaisseur résulte en une expansion latérale [Liu, 99]. Ce raisonnement ne vaut que si les flancs sont libres. A titre d'exemple, pour une pastille de diamètre D_0 , la relation liant le diamètre et l'épaisseur t est égale à :

$$\Delta D/D_0 = -0,5 \Delta t/t_0$$

Dans le cas d'une couche continue le problème est à analyser plus en détail. Il n'y a pas de solution idéale et le meilleur résultat est celui du compromis entre tension d'actionnement acceptable et épaisseur pour obtenir le déphasage souhaité.

Le tableau IV-2 ci-dessous résume les propriétés générales connues des ESSP et le tableau IV-2 donne des performances de matériaux commercialement disponibles.

Avantages	Inconvénients
- fonctionne à température ambiante sans détérioration des propriétés	- utilisation de fortes tensions (150 V/ μm)
- réponse rapide (ms)	- nécessite de gérer les contraintes
- fonctionnement statique sous champ constant	- inopérant à basse température
- génère une force relativement importante	

<ul style="list-style-type: none"> - force en V^2 - ϵ en 1/Module d'Young - ϵ de 2 à 15 	
---	--

Tableau IV-2 : balance avantages inconvénients des ESSP

Malgré des avantages certains en termes de propriétés et de disponibilité (nombre d'entre eux sont commercialement disponibles : VHB 4910, C19-2186, HS3, Elastosil RT 625) il reste encore des efforts à faire pour mieux comprendre les paramètres contrôlant les forces d'activation et les déformations ainsi que pour les procédés de synthèse, fabrication, dépôt électrochimique ou en phase vapeur et de mise en forme par moulage, empreinte. Il paraît clair que les techniques d'empreintes et de report à l'étude dans les groupe MIS et NANO sont d'un grand intérêt pour cette prospective. La figure IV-5 montre un exemple parmi les tout premiers MEMS, réalisé à base de polymère.

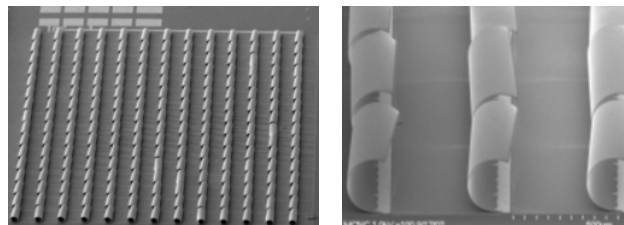


Figure IV-5 : Paupières artificielles

IV-4 Les microsystèmes hybrides à base de polymères

Sur les deux exemples précédents, nous venons d'illustrer les possibilités nouvelles d'introduire dans les procédés et dans les dispositifs microsystèmes des polymères à propriétés spécifiques. L'évolution que nous venons d'illustrer met en évidence la perspective de nouvelles filières où le silicium ne serait plus le matériau support : il ne serait utilisé que pour des fonctions d'électroniques actives : capteurs, traitement du signal, actionnement... et serait intégré dans des environnements polymères complexes portant des fonctions plus pauvres de communication : fluide, optique, électrique...et potentiellement d'actionnement.

Par exemple, notre groupe travaille sur une génération fluide de SOP. La conception qui est mise en avant comporte des dépôts de planarisation pour réaliser une intégration des puces de silicium dans un environnement polymère. Une fois positionnées, une nouvelle planarisation est pratiquée et les puces sont mises en communication fluide par des canalisations réalisées, par dessin, grâce à des couches polymères micro usinées et empilées. Une première évidence est de viser, sur des approches analogues, à celles mises en œuvre pour les interconnexions optiques. On voit que, dans cette approche très hybride de l'intégration, la nature des puces actives n'est pas un obstacle et qu'elles peuvent être très diverses permettant l'association de matériaux Si, III-V, II-VI et autres. De plus les technologies permettent d'envisager aussi des productions de masse à moindre coût.

Notre ambition est d'accompagner cette évolution à partir des acquis que sont l'actionnement mécanique et son application à l'optique.

Dans le plan de travail, que l'on peut imaginer, des questions précises sont d'ores et déjà posées:

- Quel est l'intérêt et quelles sont les performances de l'actionnement à base de polymères électroactifs et quelle est la compatibilité avec les technologies microsystemes ?
- Quelles propriétés optiques des polymères pouvons nous exploiter dans une intégration multifonctionnelle ?

Pour les traiter, de nombreux travaux devront être engagés dans cette direction. De notre côté nous l'envisageons:

- au travers de l'optique adaptative en réflexion ou en transmission,
- de l'orientation micro fluide du groupe MIS où nous trouvons une convergence technologique.

IV-5 Conclusions

Ce chapitre mêle une réflexion prospective et les premiers travaux spécifiques qui la guident. Un premier élément de cette réflexion est que l'actionnement électrostatique est incontournable par son potentiel d'intégration. Un deuxième élément est l'hétérogénéité croissante des matériaux intégrés dans un microsysteme: un point d'intérêt émergent est celui de l'intégration des polymères qui peuvent contribuer à résoudre des objectifs de surfaces et de coût.

L'idée que nous dégageons est de prolonger dans la direction des polymères et des actionnements électrostrictifs. Les arguments sont :

- structurables par procédés basse température,
- disponibles,
- domaines émergents,
- grandes déformations,
- permittivité élevée,
- épaisseur importante.

Cette tendance est illustrée sur deux cas d'introduction des ces matériaux nouveaux :

- les sol-gels où nous montrons qu'ils sont attractifs par leur utilisation en couche sacrificielle de forte épaisseur, en couche de planarisation tout en étant compatibles vis-à-vis des technologies microsystemes,
- les matériaux électro actifs où nous montrons qu'ils sont attractifs par leurs caractéristiques mécaniques et de bons candidats en termes d'intégration dans des dispositifs plus complexes.

CONCLUSION

En introduction de ce mémoire nous avons décrit brièvement les faits qui ont conduit progressivement à l'apparition d'un domaine nouveau : les microsystemes. Issus de la microélectronique, ils s'en distinguent néanmoins par plusieurs aspects.

D'une part :

- la finalité n'est plus seulement de traiter l'information mais de l'acquérir (capteurs) ou d'agir sur l'environnement (actionneur),
- les méthodes d'élaboration ne s'attachent plus qu'au seul contrôle des propriétés électriques.

D'autre part :

- les domaines de compétences requis s'élargissent à de nouveaux domaines de la physique comme, par exemple, ceux de la mécanique des solides ou des fluides, de la chimie et de la biologie. Il y a intégration horizontale des compétences,
- les domaines d'application sont, par voie de conséquence, multiples et touchent tous les secteurs de la société

Notre thématique de recherche est centrée principalement autour de l'actionnement électrostatique dans les microsystemes, thématique abordée suivant trois aspects :

- par les technologies de mises en forme. L'actionnement électrostatique exploite les forces générées par les charges électriques en regard, forces uniquement attractives nécessitant la réalisation de ressort de rappel mécanique dans notre cas. Ces deux raisons ont conduit à s'intéresser aux deux méthodes de mises en forme que sont la gravure chimique anisotrope qui réalise des formes par enlèvement de matière et au micro usinage de surface permettant de réaliser des structures auto assemblées par addition de couches supplémentaires,
- par la modélisation physique et la représentation des microsystemes. En s'appuyant sur des modélisations physiques des forces électrostatiques et mécaniques, il a été possible de dimensionner les structures, puis en intégrant l'électronique de commande, de créer une représentation du microsysteme complet dans un environnement unifié,
- par les dispositifs, dans un premier temps supports de démonstration de la maîtrise des procédés technologiques, de la modélisation et de la commande puis dans un deuxième temps supports d'intérêts applicatifs.

L'examen point par point de nos contributions suivant ces trois axes de développement sont :

➔ La mise en place d'une modélisation à l'échelle atomique de la gravure chimique anisotrope : procédé de gravure générant des formes 3D dans le silicium monocristallin qui exploite l'anisotropie des vitesses de gravure en fonction des orientations cristallines des facettes présentes en surface. Cette anisotropie était observée, quantifiée pour les directions principales mais pas expliquée dans son coeur. Conscient de l'importance du cristal nous avons fait le choix de la modélisation à l'échelle atomique en développant un modèle où chaque liaison du cristal est associée à une énergie dépendante

de l'environnement, dans notre cas les OH fixés. Il est alors possible par un processus de Monte Carlo de dégrader le silicium et de calculer les vitesses. Le principal résultat est qu'à partir de la connaissance de quelques vitesses issues des directions principales, il est possible de calculer le diagramme polaire complet. C'est important pour la prévision des formes car on peut alors déterminer les apparitions de facettes. C'est un excellent résultat sur la compréhension des mécanismes de base qui sont à l'origine de l'anisotropie. L'impact n'a pas été à la mesure du résultat avec des techniques de gravure profonde (Deep Reaction Ion Etching), procédé où la gravure est affranchie de l'orientation cristalline.

→ Sur le micro-usinage de surface. Suite à la réalisation par le Prof. RS Müller à l'Université de Berkeley, d'un micromoteur électrostatique il était important d'un point de vue stratégique d'en acquérir la maîtrise technologique.

Plusieurs verrous ont dû être levés dans cette optique :

- l'obtention de couches sans contraintes,
- la réalisation de couches sacrificielles,
- le contrôle des frottements et collages par un procédé nouveau : le greffage moléculaire.

Il s'agit d'une réalisation qui est exemplaire du potentiel des technologies et de l'actionnement électrostatique.

→ En modélisation, notre apport a été :

- la modélisation électrostatique des couples moteurs mais surtout nous avons développé une modélisation prenant en compte l'anisotropie mécanique du silicium monocristallin. Ceci est important pour réaliser une conception réaliste. Les modèles préexistants (formulation analytique isotrope) donnent des erreurs jusqu'à 40 % dans la gamme des dimensions qui nous concernent (quelques dizaines de μm en section),

- sur la base de cette modélisation, une représentation du système complet avec l'électronique correspondante. Ceci a été implémenté sous SABER et permet de partir des dimensions des masques et de prédéterminer les caractéristiques principales.

→ En dispositifs.

Les résultats marquants sont la réalisation de plusieurs démonstrateurs dédiés, exploitant deux modes de fonctionnement :

- en mode analogique ou résonnant : un micro système de balayage de deux micro miroirs croisés à commande bas niveau pour un projet interne relié à la robotique mobile,

- en mode digital ou de basculement : plusieurs systèmes à vocation industrielle dont le micro miroir et sa commande sont les points clés :

- (i) un système multiplexeur d'insertion-extraction (Add-Drop) pour ingénierie des longueurs d'onde

- (ii) un système répartiteur optique (Optical Cross Connect) pour la commutation de faisceau optique en propagation libre de fibre à fibre,

(iii) un commutateur de faisceau laser de puissance.

Au terme de cette phase, nous considérons que le travail accompli a permis la mise en place d'une compétence globale, mature et réutilisable rapidement si le besoin se manifeste.

Néanmoins, nous avons décidé de redéfinir les pourtours de notre action selon une nouvelle orientation qui, tout en bénéficiant des acquis antérieurs, intègre les évolutions des problématiques scientifiques et technologiques relatives aux microsystèmes et les évolutions du groupe auquel nous participons. Dans ce contexte, notre programme de recherche peut être résumé en deux points :

- le premier point est de renforcer les acquis pour de nouvelles sollicitations, par exemple en relation avec les phénomènes d'injection de charges :

(i) par son utilisation qui permet de positionner un miroir, d'arrêter l'alimentation tout en conservant la position puis de le ramener à la position initiale au besoin (ce travail fait l'objet de la thèse de G. Ricard sur l'utilisation du parylène comme matériau de stockage),

(ii) par annulation des phénomènes d'injection de charges lors des contacts par utilisation d'un signal HF bipolaire,

- le deuxième point est l'intégration silicium / polymère dont le premier exemple est le développement d'actionneurs réalisés par un procédé de type micro usinage de surface entièrement organique pour des applications à l'optique adaptative. Ce développement comprend la mise œuvre de deux procédés (Sol Gel/SU8 et SU8/SU8). Une deuxième voie plus prospective s'ouvre également par l'utilisation des polymères électroactifs qui présentent des intérêts vis-à-vis de l'actionnement comme un très faible module d'Young et une permittivité importante.

Principales Références bibliographiques

- ALLONGUE**, 93, J. Electrochem. Soc. Vol. 140, p. 1009, 1993.
- ARANA**, 00, 3^{ème} Journées du Pôle Micro-Robotique, Cachan, 27-28 Juin, 2000.
- ASADA**, 99, The 10th Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Sendai, Japan, June 7-10, 1999.
- BAR-COHEN**, 01, 42th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conf. (SDM), Gossamer Spacecraft Forum (GSF), Seattle, USA, April 16-19, 2001.
- BENSLIMANE**, 02, Smart Structures and Materials, San Diego, USA, March 18-21, pp. 150-157, 2002.
- BIFANO**, 00, Optical Engineering, 9(4), 2000.
- BOUNAB**, 92, Thèse de Doctorat de l'Université de Franche Comté, 1992.
- BRIOT**, 98, 1^{ère} Journées du Pôle Micro-Robotique, Besançon, 13-14 Juin, 1998.
- BÜLHER**, 95, Sensors & Actuators, Vol. A46-47, pp. 572-575, 1995.
- BUSER**, 92, Sensors & Actuators, Vol. A31, pp. 29-34, 1992.
- DANEL**, 92, Sensors & Actuators, A 31, pp. 267-274.
- DENG**, 95, IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Amsterdam, jan. 29 – Feb. 2, 1995, pp. 368-373.
- DHULER**, 97, Transducers 97, 1997 Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, USA, June 16-19, 1997.
- DÖTZEL**, 97, Transducers 97, 1997 Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, USA, June 16-19, 1997.
- ESTEVE**, 91, « Des capteurs aux microsystemes intelligents », SITEF 91, Toulouse (France), 24-25 Octobre 1991, p. 170, Cépaduès Editions.
- ESTIBALS**, 02, Conception, réalisation et caractérisation de micro-miroirs à déflexion localisée appliqués aux télécommunications optiques, Doctorat de l'Institut National Polytechnique, Toulouse, 184p.
- FAN**, 98, Broadband Optical Networks and Technologies: an emerging reality, IEEE/LEOS Summer Topical Meeting, pp. 107-108, 1998.
- FERREIRA**, 99, Sensors & Actuators, Vol. A73, pp. 252-260, 1999.
- GARNIER**, 00, The 13th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Miyazaki, Japan, January 23-27, 2000.
- HENCK**, 97, Tribology Letters, Vol. 3, N° 3, pp. 239-247, 1997.

HORNBECK, 93, IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington, USA, Dec. 1993, pp. 381-384.

HOUSTON, 96, IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, USA, June 3-6, 1996, pp.42-47.

HOWE, 98, Proc. of the IEEE, Vol. 86, N° 8, 1998, pp. 1552-1574.

IKEDA 99, SPIE Milestone Series, Vol. 153, pp. 392-403, 1999.

JACCODINE, 62, J. Appl. Phys, 33 (1962), p. 2643.

JUDY, 01, Smart Mat. Struct. 10, 2001, pp. 1115-1134.

KAWABATA 97, Transducers 97, 1997 Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Chicago, USA, June 16-19, 1997.

KIANG, 96, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, N° 12, pp. 1707-1709, 1996.

LANG, 99, Sensors & Actuators, Vol. A74, pp. 216-218, 1999.

LARNAUDI, 00, Micromiroir rotatif à actionnement électrostatique réalisé en technologie silicium : de la conception à la caractérisation, Doctorat de l'Université Paul Sabatier N°00605, 156 p.

LEE, 02, Smart Structures and Materials, San Diego, USA, March 18-21, pp. 8-17, 2002.

LESCURE, 99, 2^{ème} Journées du Pôle Micro-Robotique, Poitiers, 4-5 Février, 1999.

LIU, 99, 6th Annual Int. Conf, on Smart Structures and Materials, 1-5 March, 1999, Newport Beach, USA, Paper N°. 3669-41.

MA, 03, IEEE Optical Communications, nov. 2003, pp. 50-56.

MARCHESE, 05, Conception, modélisation et fabrication d'un système de commutation grand angle, Doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, Date de soutenance (**2005 ?**)

MIYAJIMA, 99, The 10th Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, Sendai, Japan, June 7-10, 1999.

MOKTADIR, 97, Simulation de la gravure chimique anisotrope du silicium par une solution alcaline, Doctorat Université Paul Sabatier, N° 2544, 133 p.

MÜLLER, 89, "IC-processed electrostatic micromotors", Sensors & Actuators, 20 41-7.

NATHANSON, 67, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 23, N° 3, pp. 117-133, 1967.

OHTUKA 95, The 8th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Amsterdam, The Netherlands, January 29 – February 2, 1995.

PELRINE, 00, Science, 2000, Vol. 287, pp. 836-839

PERREAULT, Optical Engineering, 41 (3), pp. 561-566, 2002.

PETERSEN, 80, IBM J. Res. Developp., Vol. 24, pp. 631, 1980.

- PETERSEN**, 82, "Silicon as a mechanical material", Proc. IEEE, Vol. 70, pp. 420-457, May 1982.
- PETROZ**, 98, The 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998.
- REBELLO**, 05, Sensors & Actuators, 2005, (in Press)
- REBOUL** 98, Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Toulouse, 1998.
- ROBBINS**, 59, "Chemical etching of silicon", J. Electrochem. Soc., Vol. 106, no6, pp.505-508, 1959.
- ROBBINS**, 76, "Chemical etching of silicon: etching technologies", J. Electrochem. Soc., Vol. 123, no 12, pp.1903-1909, 1976.
- RUDOLF**, 91, Microelectronic Engineering, Vol. 15, 1991, pp. 399-406.
- SATO**, 89, Proc. J. F. F. F., Symposium, Japan, 1989
- SATO**, 00, J. Micromech. Microeng., 10 (2000), pp. 522-527.
- SCHENK**, 00, The 13th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Miyazaki, Japan, January 23-27, 2000.
- SCHROTH** 98, The 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998.
- SEIDEL**, 90, "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I: Orientation dependence and behaviour of passivation layers", J. Electrochem. Soc. Vol. 137, no11, pp. 3612-3626, Nov. 90.
- SEIDEL**., 87, "The mechanism of anisotropic silicon etching and its relevance for micromachining", Proc. Transducers 87, Rec. 4th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators, Tokyo, Japan, June 2-5, pp. 120-125.
- SENDURIA**, 92, J. Micromech. Systems, Vol. 1, pp. 3-13, March 1992.
- SNIEGOWSKI** 97 A, Tech. Dig. IEEE Int. Conf. Optical MEMS and their Applications, Nara, Japan, Nov. 18-21, 1997, pp. 209-214.
- SNIEGOWSKI** 97 B, IEEE Int. Electron Devices Meeting, IEDM, Washington, USA, Dec. 7-10, 1997, pp. 903-906.
- SRINIVASAN**, 97, Transducer 97, Chicago, USA, June 16-19, pp. 1399-1402.
- TAI**, 89, Sensors & Actuators, Vol. 20, pp. 48-56, 1989.
- TELLIER**, 89, J. Crystall Growth, 96, 1989, p. 450.
- TSUGAI**, 99, Third Int. Conf. on Micro Opto Mechanical Systems, Mainz, Germany, August 30 – September 1, 1999.
- VDOVIN**, 95, Applied Optics, Vol. 34, p. 2968, 1995.
- VDOVIN**, 97, Optical Engineering, Vol. 36, N° 5, 1997, pp. 1382-1390.

YAMADA 98, The 11th Int. Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998

YODER, 96, Texas Instruments-DLP™ product literature, May.1996.

ANNEXES

Listes exhaustives des publications

1/ revues à comité de lecture

1984

1- Cristallographie et sensibilité aux électrons de 2 MeV d'une résine positive PMMA utilisée en microlithographie, J. P. Martinez, **H. Camon**, J.L. Balladore, J. Micr. & Spectr., 1984, vol. 9, p.31.

1986

2- Répartition énergétique et angulaire d'un faisceau d'électrons rétrodiffusés par du Si et de l'AsGa, **H. Camon**, J.P. Martinez, J.L. Balladore, J. de Micr. & Spectr. 1986, vol. 11, P.1.

1988

3- Nanolithography by high energy electronbeam, **H. Camon**, J.P. Martinez, J.L. Balladore, Rev. Phys. Appl., 1988, vol. 23, p. 1317.

1989

4- Analysis by electron energy loss spectroscopy of PMMA electron beam resist, J.P. Martinez, **H. Camon**, Y. Khin, J. Sevely, J.L. Balladore, J. Vac. Sci., 1989, B7, 1.

5- Caractérisation de couches minces de chalcogénure préparée par PECVD, B. Cros, **H. Camon**, Y. Brocheton, J.P. Gonchond, A. Tissier, J.L. Balladore, M. Ribes, J. de Phys., Colloque CS, suppl. au N° 5, tome 50, mai 1989.

1992

6- Modelling of anisotropic etching in silicon-based sensor application, H.CAMON, A.M.GUE, J.S.DANEL, M.DJAFARI ROUHANI, Sensors & Actuators A, Vol. 33, pp. 103-105, 1992, RL 92517

1993

7- Atomic scale simulation of silicon anisotropic chemical etching, H.CAMON, A.M.GUE, Z.MOKTADIR, D.ESTEVE, M.DJAFARI ROUHANI, 3rd IUMRS Int. Conf. on Advanced Materials, Tokyo (Japon), 31 Août- 4 Septembre 1993, 4p., Advanced Materials'93, III/A: Computations, Glassy Materials, Microgravity and Non-Destructive Testing, Eds. T. Matsumoto and al., Transactions of the Materials Research Society of Japan, Vol. 16A, Elsevier Sciences B.V. ISBN 0-444-81993-2, 1994, pp. 525-528, RL 93330.

1994

8- Atomic scale simulation of silicon etched in aqueous KOH solution, H.CAMON, Z.MOKTADIR, EUROSENSORS VIII, Toulouse (France), 25-28 Septembre 1994, 11p., Sensors & Actuators A, Vol. A46, pp. 25-29, 1995, RL 94336.

9- Simulated data of etching diagram (Si:KOH), H.CAMON, M.DJAFARI-ROUHANI, D.ESTEVE, A.M.GUE, Z.MOKTADIR, 4th Int. Conf. on Micro Electro, Opto, Mechanical, Systems and Components, Berlin (Allemagne), 19-21 Octobre 1994, Micro System Technologies'94, Eds Reichl, A. Heuberger, ISBN 3-8007-2058-2, vde-verlag GmbH, 1994, pp. 355-363., RL94346.

10- First steps towards design, simulation, modelling and fabrication of electrostatic micromotors, Y.LEFEVRE, M.LAJOIE MAZENC, E.SARRAUTE, H.CAMON, EUROSENSORS VIII, Toulouse (France), 26-28 Septembre 1994, 5p., Sensors & Actuators A, Vol. A46/47, N°1/3, pp. 645-648, Avril 1995, RL 94465.

11- First steps towards the fabrication of electrostatic micromotors using SOG, V.CONEDERA, N.FABRE, H.CAMON, B.ROUSSET, H.H.PHAM, C.SOLANO, EUROSENSORS VIII, Toulouse (France), 26-28 Septembre 1994, 13p., Sensors & Actuators A, Vol. A46, pp. 82-84, 1995, RL 94466.

1995

12- New trends in atomic scale simulation of wet chemical etching of silicon with KOH, H.CAMON, Z.MOKTADIR, M.DJAFARI ROUHANI, EMRS 1995 Spring Meeting Symposium Atomic Scale Simulation of Materials and Processes, Strasbourg (France), 22-26 Mai 1995, 11p., Materials Sciences and Engineering B, Vol. B37, pp. 142-145, 1995, RL 95195.

1997

13- Simulation of silicon etching with KOH, H.CAMON, Z.MOKTADIR, Microelectronics Journal, Vol. 28, N°4, pp. 509-517, 1997, RL 97148. (**Papier invité**)

1998

14- From layout to system simulation: an example of an oxygen sensor, H.CAMON, M.DJAFARI ROUHANI, A.M.GUE, M.DILHAN, C.ALONSO, B.JAMMES, 1st Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, Semi-Conductors, Sensors and Actuators (MSM'98), Santa-Clara (USA), 6-8 Avril 1998, pp. x,x+6, RL 98142

2000

15- 3D packaging methodologies for microsystems, G.KELLY, A.MORRISSEY, J.ALDERMAN, H.CAMON, IEEE CPMT Transactions on Advanced Packaging, Symposium Microsystems Design and Packaging, RL 00047, IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol.23, N°4, pp.623-630, Novembre 2000

2001

16- Analysis and testing of a fluidic vortex microdiode, M. Anduze, S. Colin, R. Caen, H. Camon, V. Conedera, and T. D. Conto, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 11, N° 2, pp. 108-112, 2001.

17- Les microdiodes fluidiques : une solution alternative aux microvalves, Anduze, M., Camon, H., and Colin, S., *Mécanique et Industries*, 2(4), 349-354, 2001.

2003

18- un chapitre d'ouvrage (édition Hermes), *Microsystèmes opto-électromécaniques MOEMS (Traité EGEM, Série Microsystèmes)*, Direction P. Viktorovitch, 01/2003, ISBN 2-7462-0585-8.

19- Hacia la alimentacion integrada de microsistema (I) : actuadores, generadores y motores, *Automatica e Instrumentacion*, B. Estibals, C. Alonso, H. Camon, H. Valderrama-Blavi, L. Martinez-Salamero, N°344, pp.50-59, Octobre 2003, Rapport LAAS No03434.

20- VHDL-AMS modelling and simulation of a planar electrostatic micromotor, A. Endemano, J.Y. Fourniols, H. Camon, A. MArchese, S. MURatet, F. Bony, M. Dunnigan, M. Desmulliez, G. Overton, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.13, N°5, pp.580-590, Septembre 2003, Rapport LAAS No02365

21- Application of MEMS behavioral simulation to physics of failure (PoF) modelling, P. Schmitt, F. Pressecq, X. Lafontan, Q.H. Duong, P.Pons, J.M. Nicot, C. Oudéa, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, 14th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF'2003), Bordeaux (France), 6-10 Octobre 2003, *Microelectronics Reliability*, Vol.43, N°9-11, pp.1957-1962, Septembre-Novembre 2003, Rapport LAAS 03554.

2004

22- Hacia la alimentacion integrada de microsistemas (II): condensadores, inductores y componentes, B. Estibals, C. Alonso, H. Camon, J.L. Sanchez, L.P. Laur, H. Valderrama-Blavi, L. Martinez-Salamero, *Automatica e Instrumentacion*, N°347, pp.67-72, 2004, Rapport LAAS No03506.

23- Impact of the space environmental conditions on the reliability of the MEMS COTS based systems, P. Schmitt, X. Lafontan, F. Pressecq, B. Kurz, C. Oudéa, D. Estève, J-Y. Fourniols, H. Camon, 15th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF'2004), Zurich (Suisse), 4-8 Octobre 2004, 6p., *Microelectronics Reliability*, Issues 9-11, Vol.44, pp.1739-1744, Septembre-Novembre 2004, Rapport LAAS 04594

2/ conférences invitées dans des congrès

1992

24- A review of chemical etching mechanisms, H. Camon, A.M. Gué, M. Djafari-Rouhani, *Int. Symp. on Modelling of Devices and Technological Processes in Microelectronics*, Novossibirsk (Russia), mai 1992.

1993

25- Electrostatic micromotor and millimetric systems, H.CAMON, N.FABRE, D.ESTEVE, E.SARRAUTE, Y.LEFEVRE, *IARP 1st Int. Workshop on Micro Robotics and Systems*, Karlsruhe (Allemagne), 15-16 Juin 1993, pp. 169-179, RL 93221.

1998

26- An integrated 3D camera: a microsystem for robotic application, H.CAMON, F.LARNAUDIE, N.ARANA, V.REBOUL, M.BRIOT, *IARP Int. 2nd Workshop on Micro robotics and Systems*, Beijing (China), 22-23 Octobre 1998, pp. 199-215, RL 98344

27- Atomic scale modelling applied to wet chemical etching, 1st Workshop on Physical Chemistry of Wet Etching of Silicon, 20-24 may 1998, Holten (Netherlands), pp. 1-10.

2003

28- H. Camon, F. Zamkotsian, *MOEMS pour l'astronomie : spectroscopie et optique adaptative*, Septembre 2003, 2p (*Horizons de l'optique*, Toulouse septembre 2003), Rapport LAAS N°03307

2004

29- P. Schmitt, J.M. Nicot, F. Pressecq, X. Lafontan, C. Oudéa, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, *Space microsystems and reliability: the contribution of the behavioral modeling*, CANEUS'04. Conference on Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications, Monterey (USA), 1-5 Novembre 2004, pp.95-100, Rapport LAAS 04557.

3/ proceedings à comité de lecture

1985

30- Electron beam lithography using an electron field emission gun at 100 keV, H.Camon, J.L. Balladore, J.P. Martinez, *Int. Conf on Microelectronics and Fiber Optics*, Chandigarh (India), 1985.

1986

31- Pulsed alloying thermal modelling of Metal/silicium systems, L.M. Dilhac, C. Séguélas, H.Camon, G. Soum, A. Martinez, *E-MRS*, Strasbourg, June 1986, p. 203.

32- Use of an electron microscope with a field emission gun at 100 keV in microlithography, H. Pinna, J.L.

- Balladore, J.P. Martinez, H.Camon, XIth Int. Cong. on Electr. Micr., Kyoto (Japan), 1986, p. 663.
- 33-** Influence of incident electron beam voltage in microlithography, J.L. Balladore, J.P. Martinez, H.Camon, N. Sekkaki, XIth Int. Cong. on Electr. Micr., Kyoto (Japan), 1986, p. 665
- 34-** Nanometer scale electron lithography in PMMA, J.L. Balladore, J.P. Martinez, H.Camon, Int. Symp. on Electr. Optics, Beijing (China), 1986.
- 1987**
- 35-** Two methods for reaching electron nanolithography domain, J.L. Balladore, M. Oyee, H.Camon, E. Bourdel, J.P. Martinez, N. Sekkaki, Microcircuit Engineering, Paris (France), 1987, N° 6, p. 201.
- 1988**
- 36-** Analysis by EELS of polymer evolution during irradiation, J.L. Balladore, H.Camon, R. Fourmeaux, Y. Khin, J.P. Martinez, J. Sevely, IVth Asia Pacific Conf. on Electr. Micr., Bangkok (Thaïlande), 1988, p. 119.
- 37-** Elaboration, characterization and lithographic process for an inorganic resist GeSe₃, H.Camon, B. Cros, W. Pereira, M. Ribes, M. Pyee, J.L. Balladore, Microcircuit Engineering, Vienne (Austria), 1988, P. 52.
- 38-** Application du calcul de Monte-Carlo à l'étude de la diffusion des électrons par des échantillons polycristallins, G. Soum, H.Camon, P. Verdier, J.L. Balladore, Trabadores científicos de la Mediterranea, Minorca (Spain), 1988.
- 39-** Analysis by electron energy loss spectroscopy of electron beam resists, J.P. Martinez, **H. Camon**, Y. Khin, J. Sevely, J.L. Balladore, 32nd Int. Symp. on Electron Ion and Photon Beams, Fort Lauderdale (USA), 1988, S.5., J. Vac. Sci. Technol., B.6. (6), Nov./Déc. 1988, p. 2254.
- 1989**
- 40-** Simulation de l'interaction électron-matière à haute énergie par une méthode de Monte-Carlo, G. Soum, **H.Camon**, A. Mousselli, P. Verdier, J.L. Balladore, Collecio Actes de la Generalitat de Catalunya, 1989.
- 41-** Application à l'étude énergétique des électrons dans les échantillons polycristallins, G. Soum, H.Camon, Xth Int. Congress for Statistics, Computer sci., Social and Demographic Research, Ain Sham University, Le Caire (Egypt), April 1989.
- 42-** Elaboration, characterization and lithographic process for a GeSe₃ inorganic resist, H.Camon, B. Cros, W.N.A. Pereira, M. Pyee, J.L. Balladore, NSB MICRO, IVth Cong. de sociedade brasileira de micro electronica, Rio (Brasil), July 1989.
- 1990**
- 43-** Micromachining: first development of an atomic scale chemical etching simulator, H.CAMON, D.ESTEVE, M.DJAFARI ROUHANI, A.M.GUE, Micro Mechanics Europe 90 (MME'90), Berlin (Allemagne), 26-27 Novembre 1990, 6p., RL 90436.
- 1995**
- 44-** Design and fabrication of a chemical analysing system for medical application, Z.SBIAA, A.VAL, S.AOUBA, H.CAMON, D.ESTEVE, 6th Micro Mechanics Europe Workshop (MME'95), Copenhagen (danemark), 3-9 Septembre 1995, pp. 196-200, RL 95366.
- 1996**
- 45-** Microtechnologies for space: access to technologies and analysis of mechanical microsystem reliability, D.ESTEVE, J.P.BECONNE, H.CAMON, A.M.GUE, Z.SBIAA, A.VAL, J.SIMONNE, Future Satellite Concepts and Technologies (ESTEC-ESA), Noorwivk (Pays-Bas), 24-25 Janvier 1996, 10p., RL 96033.
- 46-** New way for 3D integration of a micropump and microvalves, Z.SBIAA, A.VAL, S.AOUBA, H.CAMON, D.ESTEVE, 3rd Training Courses: Mixed Design of Integrated Circuits and Systemes (MIXDES'96), Lodz (Pologne), 30 Mai- 1 Juin 1996, pp. 500-505, RL 96206.
- 47-** Thermopneumatical micropump and microvalves for a medical analyzing system, Z.SBIAA, H.CAMON, D.ESTEVE, SPIE's 1996 Symposium on Micromachining and Microfabrication, Austin (USA), 14-16 Octobre 1996, pp. 53-58, RL 96309.
- 48-** Non sticking layer for silicon micromotors, H.CAMON, V.CONEDERA, N.FABRE, J.M.CHOVELON, C.MARTELET, M.BELIN, 7th Micro Mechanics Europe Workshop (MME'96), Barcelona (Espagne), 21-22 Octobre 1996, pp. 105-108, RL 96405.
- 49-** Packaging a thermally actuated micromachined silicon membrane pump, G.KELLY, J.ALDERMAN, C.LYDEN, J.BARRETT, A.VAL, Z.SBIAA, H.CAMON, 2nd Int. Workshop on Thermal Investigations of Ics and Microstructures (THERMINIC), Budapest (Hongrie), 25-27 Septembre 1996, pp. 213-218, RL 96445.
- 1997**
- 50-** 3D packaging solutions for a silicon micropump, G.KELLY, J.ALDERMAN, C.LYDEN, J.BARRETT, A.MORRISSEY, A.VAL, Z.SBIAA, H.CAMON, 47th IEEE Electronic Component Technology Conf., San-José (USA), 18-21 Mai 1997, pp. 1227-1234, RL 97061.
- 51-** Some applications of the new generation of CAD tools to micro and nanosystems, M.DJAFARI ROUHANI, R.MALEK, A.M.GUE, A.ESTEVE, H.IDRISSI SABA, Z.MOKTADIR, H.CAMON, 2nd Int. Conf. on Simulation and Design of Microsystems (MICROSIM'97), Lausanne (Suisse), 17-19 Septembre 1997, pp. 251-260, RL 97220.

52- Limiting roughness in anisotropic etching, R.DIVAN, H.CAMON, N.MOLDOVAN, M.DILHAN, Int. Semi Conductor Conf. (CAS'97), Sinaia (Roumanie), 7-11 Octobre 1997, pp. 553-556, RL 97390.

53- An atomic-scale derived continuous approach for the anisotropic etching, N.MOLDOVAN, S.NEDELUCU, H.CAMON, MRS Fall Meeting Symposium E: Power Semi-Conductor Power and Devices, Boston (USA), 1-5 Décembre 1997, 6p., RL 97513

1998

54- Modelisation and simulation of the radial field electrostatic micromotors with a variable air gap, O.REBIERE, Y.LEFEVRE, N.BOUKARI, H.CAMON, P.GERARD, 4th Int. Workshop on Electric and Magnetic Fields, Marseille (France), 12-15 Mai 1998, pp. 33-38, RL 98225

55- Roughness in Silicon anisotropic Etching: The Influence of Cleaning Conditions, R.DIVAN, H.CAMON, E.MANEA, M.AVRAM, N.MOLDOVAN, M.DILHAN, Int. Conf. for Semi Conductors (CAS'98), Sinaia (Roumanie), 7-11 Octobre 1998, pp. 349-352

56- The Influence of Cleaning Conditions over the Si Roughning during Anisotropic Etching, R. Divan, E. Manea, H. Camon, N. Moldovan, 10-th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-10), Birmingham (Angleterre), p.58, 1998

1999

57- Roughning and smoothing dynamics during KOH silicon etching, R. DIVAN, N. MOLDOVAN, H. CAMON, E-MRS'98 (European-Material Research Science), Strasbourg (France), H-10, 1998, Sensors & Actuators A, Vol. 74, N° 1/3, pp. 18-23, 1999.

58- Design and fabrication of an electrostatic micromirror, F.LARNAUDIE, P.TEMPLE BOYER, **H.CAMON**, 10th Micro Mechanics Europe Workshop (MME'99), Gif-sur-Yvette (France), 27-28 Septembre 1999, pp. 227-230, RL99204.

59- Analytical simulation of a 1D single crystal silicon electrostatic micromirror, **H.CAMON**, F.LARNAUDIE, F.RIVOIRARD, B.JAMMES, 2nd Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, Semi-Conductors, Sensors and Actuators (MSM'99), San-José (USA), 19-21 Avril 1999, pp. 628-631, RL 99086

2000

60- Fabrication, simulation and experiment of a rotating electrostatic silicon mirror with large angular deflection, H.CAMON, F.LARNAUDIE, 13th Int. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000), Miyazaki (japon), 23-27 janvier 2000, pp. 645-650, RL 99488.

2001

61- Design of a micromachined planar inductor on silicon wafers for photovoltaic static micro-converters applications, C. ALONSO, B. ESTIBALS, H. CAMON, A. MARTINEZ, 12th Micromechanics Europe Workshop (MME'2001), Cork (Irlande), 16-18 Septembre 2001, 4p, Rapport LAAS No01310

62- Scanning system using an 1D silicon micro-mirror, H. CAMON, F. LARNAUDIE, C. GANIBAL, B. ESTIBALS, 3rd Topical Meeting on Optoelectronic Distance Measurement and Applications (ODIMAP III), Pavia (Italie), 20-22 Septembre 2001, pp.76-81, Rapport LAAS No01298

63- Design, realisation and characterisation of an electro-thermal actuator: application in a training approach; B. Estibals H. Camon , 12th Micromechanics Europe Workshop (MME'2001), Cork (Irlande), 15-18 Septembre 2001, 5p. Rapport LAAS No01275

2002

64- F. Zamkotsian, H. Camon, N. Fabre, V. Conédéra, G. Moreaux, Micro-deformable mirror for next generation adaptive optical systems, Rapport LAAS No02463, Conference on Adaptive Optical System Technologies II, Waikoloa (USA), 22-28 Août 2002, 10p.

65- B. Estibals, C. Alonso, M.F. Shraif, T. Ricart, H. Valdéraama-Blavi, H. Camon, A. Martinez, Design and integration of photovoltaic switching conversion chains, Rapport LAAS No01609, 6th European Space Power Conference (ESPC), Porto (Portugal), 6-10 Mai 2002, pp.35-40

66- C. Alonso, B. Estibals, T. Ricart, C. Vieu, F. Carcenac, L. Malaquin, M. Dilhan, H. Camon, A. Martinez, New design for magnetic storage elements of micro power supplies, Rapport LAAS No01515, 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'2002), Phoenix (USA), 26-29 Mai 2002, pp.II.576-II.579

2003

67- B. Estibals, H. Camon, C. Pisella, F. Verluise, Design and Realisation of an Add-Drop Multiplexer using digital micromirror, International Forum on MicroNano Integration (MINIT), Potsdam (Allemagne), 3-4 Décembre 2003, pp.111-112. Rapport LAAS N° 03403.

68- W. Chichalewski, A. Napieralski, H. Camon, B. Estibals, Study of MEMS micro mirror pull-in voltage and angle, for inclined and combined (inclined/flat) electrode structure, Rapport LAAS No03306 , 10th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES'2003), Lodz (Pologne), 26-28 Juin 2003, pp.466-469

69- A. Endémano, J.Y. Fourniols, H. Camon, A. Marchese, S. Muratet, F. Bony, M. Desmulliez, VHDL-AMS modelling, simulation and testing of electrostatic micromotors, Rapport LAAS No03044, Symposium on Design,

Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'2003), Mandelieu-La-Napoule (France), 5-7 Mai 2003, 8p

70- S. Colin, T.G. Elizarova, Y.V. Sheretov, J.C. Lengrand, H. Camon, Micro-écoulements gazeux : validation expérimentale de modèles QHD et de Navier-Stokes avec conditions aux limites de glissement, 6p., CFM, Nice 1-5 septembre 2003, Rapport LAAS N°03129, Mars 2003

71- S. Tardu, S. Colin, H. Camon, Effets interfaciaux sur la stabilité linéaire des écoulements dans les microcanaux , Rapport LAAS N°03128, Mars 2003, 6p (Accepté), CFM, Nice 1-5 septembre 2003

72- W. Chichalewski, A. Napieralski, H. Camon, B. Estibals, An analytical modelling and simulations of a MEMS micro-mirror - MATLAB implementation, Rapport LAAS No03004, 7th International Conference on the The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2003), Slavske (Ukraine), 18-22 Février 2003, pp.360-365

2004

73- P. Schmitt, F. Presseccq, G. Perez, X. Lafontan, J.M. Nicot, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, C. Oudéa, Reliability issues of an accelerometer under environmental stresses, CANEUS'04. Conference on Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications, Monterey (USA), 1-5 Novembre 2004, 9p. , Rapport LAAS 04593

74- P. Schmitt, X. Lafontan, F. Presseccq, C. Oudéa, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, Modeling of humidity induced failures: application to polysilicon structures, Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'2004), Montreux (Suisse), 12-14 Mai 2004, 5p., Rapport LAAS 04592.

75- B. Estibals, C. Alonso, A. Salles, A. Cid-Pastor, H. Camon, L. Martinez-Salamero, Toward the integration of microsystems supply, 2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'2004), Vancouver (Canada), 23-26 Mai 2004, pp.V.564-V.567, Rapport LAAS No03435.

2005

76- A. Marchese, H. Camon, C. Ganibal, Large silicon micromirror modelling and fabrication, Photonics West , SPIE Int. Conf. on MOEMSMEMS Micro & Nano Fabrication, 22-27 January 2005, San Jose, EU, Rapport LAAS N°04644, Novembre 2004, 9p

77- F. Zamkotsian, V. Conedera, A. Schroeder, N. Fabre, A. Liotard, H. Camon, Polymer-based microdeformable mirror for adaptive optics applications, Photonics West , SPIE Int. Conf. on MOEMSMEMS Micro & Nano Fabrication, 22-27 January 2005, San Jose, EU

4/ publications dans des revues sans comité

1994

78- La simulation à l'échelle atomique des microtechnologies, M.DJAFARI ROUHANI, A.M.GUE, H.CAMON, G.COHEN SOLAL, L'Onde Electrique, Vol. 74, N°2, pp.14-20, Mars-Avril 1994, RL 94019

79- Le micro-usinage du silicium, J.S.DANEL, H.CAMON, L'Onde Electrique, Vol. 74, N°2, pp. 21-27, Mai-Avril 1994, RL 94493.

5/ publications à des congrès, symposiums

1990

80- Micro usinage: premiers développements d'un logiciel de simulation de la gravure chimique, H. CAMON, D. ESTEVE, A.M. GUE, M. DJAFARI-ROUHANI, Colloque SFP, Journées de la Matière Condensée, Montpellier (France), 4-6 Septembre 1990.

81- Les capteurs, un objectif stratégique pour le développement européen, D.ESTEVE, A.M.GUE, G.BLASQUEZ, J.SIMONNE, H.CAMON, D.SIFFERT, Working Group ESPRIT, Bruxelles (Belgique), 17-18 Octobre 1990, 10p., RL 90378.

1991

82- Etude prospective sur les microactionneurs intégrés sur silicium, E.SARRAUTE, Y.LEFEVRE, H.CAMON, J.L.SANCHEZ, Colloque Bilan MRT 'Génie Electrique 91', Paris (France), 5-6 Novembre 1991, pp. 447-456, RL 91424.

1992

83- Micromoteurs électromagnétiques et électrostatiques. Simulations numériques. Comparaison des performances, E.SARRAUTE, Y.LEFEVRE, B.TRANNOY, H.CAMON, M.LAJOIE MAZENC, SITEF 91, Toulouse (France), 24-25 Octobre 1991, pp. 105-108, Cépadues Editions., RL 92170.

1993

84- Simulation de la gravure chimique anisotrope des monocristaux : niveau microscopique, H.CAMON, D.ESTEVE, Journées d'Electronique 93, Saclay (France), 2-4 Février 1993, pp. 17-27., RL 93051.

1995

85- Méthodes et procédés d'intégration des microsystèmes en silicium, A.VAL, Z.SBIAA, S.AOUBA, H.CAMON, D.ESTEVE, Colloque 'Les Microsystèmes sur la voie de l'industrialisation', Paris (France), 15 Juin 1995, 15p., RL 95237.

1996

86- Le programme BARMINT : intégration verticale (MCM-V) d'un microsystème, A.VAL, Z.SBIAA, S.AOUBA, H.CAMON, G.KELLY, J.ALDERMAN, 7th Forum Microélectronique, Paris (France), 2-4 Avril 1996, 8p., RL 96122.

1997

87- Un exemple de conception pour la microrobotique : un système intégré de déflexion à micromiroirs silicium, C.BRICOUT, M.BRIOT, H.CAMON, A.FERRAND, C.LEMAIRE, G.VIALARET, Colloque CAO Circuits Intégrés et Systèmes, Grenoble (France), 15-17 Janvier 1997, 4p., RL 97026

88- Développement technologique pour la réalisation d'un micromoteur électrostatique rotatif, H.CAMON, P.GERARD, N.FABRE, V.CONEDERA, GDR Microsystèmes Opération 2: composants électromagnétique pour la micro robotique, Octobre 1997, 8p., RL 97468.

1998

89- Présentation du projet TRIDICAM (une microcaméra à vision 3D), M.BRIOT, H.CAMON, F.LARNAUDIE, G.VIALARET, 1^{ère} Journées du Pôle Micro Robotique, Besançon (France), 13-14 Janvier 1998, pp. x,x+6, RL 98014

2000

90- Microdiodes: an alternate solution for microvalves, M. Anduze, H. Camon, and S. Colin, 1st International Colloquium on Microhydrodynamics, Courbevoie, pp. 1-9, 2000

2001

91- Caméra laser 3D à large champ de vision pour la robotique, C. GANNIBAL, M. LESCURE, C. LEMAIRE, R. PARJOUX, H. CAMON, 2^{ème} Colloque Francophone "Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie", Trégastel (France), 20-23 Novembre 2001, Vol.1, pp.242-247, Rapport LAAS No01434

2002

92- F. Zamkotsian, K.Dohlen, L. Lanzoni, G. Moreaux, H. Camon, N. Fabre, V. Conédéra, MOEMS devices for future astronomical instrumentation, Rapport LAAS No02573, Semaine de l'Astrophysique Française (SF2A'2002), Paris (France), 24-29 Juin 2002, pp.237-240

93- B. Estibals, C. Alonso, T. Ricart, J.L. Schanen, R. Perret, H. Camon, Validation d'outils de simulation d'éléments inductifs pour convertisseurs statique intégré, Rapport LAAS No02115, 9^{ème} Colloque "Electronique de Puissance du Futur", Montpellier (France), 13-15 Novembre 2002, pp.227-232

94- B. Estibals, C. Alonso, J.Y. Fourniols, J.L. Noullet, C. Vieu, H. Camon, A. Cazarre, A. Martinez, Approche éducative de la simulation des microsystèmes dans leur environnement, Rapport LAAS No02579, 7^{èmes} Journées Pédagogiques du C.N.F.M., Saint-Malo (France), 27-29 Novembre 2002, pp.115-120

95- B. Estibals, H. Camon, Etude théorique d'une "porte optique" micro-usinée sur silicium, Rapport LAAS No02011, Vèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM'2002), Grenoble (France), 23-25 Avril 2002, pp.89-90

2003

96- B. Estibals, J.L. Sanchez, C. Alonso, H. Camon, J.P. Laur, Vers l'intégration de convertisseurs pour l'alimentation des microsystèmes, Rapport LAAS No03063, Journées Electrotechnique du Club EEA, Amiens (France), 12-13 Mars 2003, 6p.

97- H. Camon, J.Y. Fourniols, S. Muratet, B. Estibals, Microsystèmes à actionnement électrostatique : conception, modélisation et caractérisation, Rapport LAAS No03059, Journées Electrotechnique du Club EEA, Amiens (France), 12-13 Mars 2003, 6p

98- J.C. Hamon, P. Schmitt, D. Estève, H. Camon, J.Y. Fourniols, Mise en place d'outils de conception de microsystèmes : application à la conception d'un accéléromètre, Rapport LAAS, No03203, VIèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral Microélectronique, Micro et Nanotechnologies (JNRDM 2003), Toulouse (France), 14-16 Mai 2003, pp.37-40

2004

99- P. Schmitt, M. Dardalhon, F. Presseccq, G. Perez, J. Garnier, J.M. Nicot, C. Oudéa, D. Estève, J.Y. Fourniols, H. Camon, The use of MEMS COTS accelerometer for space applications, Colloque International CONVERGENCE'03, Paris (France), 1-3 Décembre 2003, 3p, Rapport LAAS No03655.

6/ séminaires, workshops

1991

100- Simulations des technologies à l'échelle atomique : intérêts et limites, J.SIMONNE, V.V.PHAM, A.M.GUE, D.ESTEVE, M.DJAFARI ROUHANI, H.CAMON, Journées GCIS, Toulouse (France), 7-8 Juin 1991, 9p., RL 91252

1995

101- Conférence invitée aux "Journées d'études ENSIEG/SEE/UDIMEC sur les Micromoteurs et Microactionneurs", 9 février 1995

2001

102- J.Y.FOURNIOLS , A.MARTINEZ , C.VIEU , B.PRADIN , F.VOILLOT , J.P.ULMET , P.GERARD , J.L.NOULLET , B.ESTIBALS, Microsystems-Microtechnologies: design, test and characterisation in educational context at INSA Toulouse, Colloque sur l'Enseignement des Technologies, des Sciences de l'Information et des Systèmes en Electronique, Electrotechnique et Automatique (CETIS-EEA'2001), Clermont-Ferrand (France), 29-30 Octobre 2001, pp.153-156, Rapport LAAS No01328.

2002

103- B. Estibals, C. Alonso, J.Y. Fourniols, J.L. Noullet, C. Vieu, H. Camon, A. Cazarre, A. Martinez, Approche éducative de la simulation des microsystèmes dans leur environnement, Rapport LAAS No02579, 7èmes Journées Pédagogiques du C.N.F.M., Saint-Malo (France), 27-29 Novembre 2002, pp.115-120

104- B. Estibals, H. Camon, Etude théorique d'une "porte optique" micro-usinée sur silicium, Rapport LAAS No02011, Vèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM'2002), Grenoble (France), 23-25 Avril 2002, pp.89-90

2003

105- J.C. Hamon, P. Schmitt, D. Estève, H. Camon, J.Y. Fourniols , Mise en place d'outils de conception de microsystèmes : application à la conception d'un accéléromètre, Rapport LAAS, No03203, VIèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral Microélectronique, Micro et Nanotechnologies (JNRDM 2003), Toulouse (France), 14-16 Mai 2003, pp.37-40

106- S.MURATET , J.Y.FOURNIOLS , J.L.NOULLET , C.VIEU , A.MARCHESE , L.MALAQUIN, Les microsystèmes : conception, simulation, tests et caractérisations. Enseignement des microsystèmes, Journal de l'Enseignement des Sciences et des Technologies de l'Information et des Systèmes (J3eA), Vol.2, N°16, 2003, Rapport LAAS No03196.

7/ chapitres dans les ouvrages

107- un chapitre d'ouvrage (édition Hermes), Microsystèmes opto-électromécaniques MOEMS (Traité EGEM, Série Microsystèmes), Direction P. Viktorovitch

8/ livres et ouvrages

1992

108- Coéditeur Cépadues Editions du livre 'des capteurs aux microsystèmes intelligents'

2001

109- Responsable scientifique pour l'édition de deux numéros de Sensors and Materials, Vol. 13, N° 5 & 6, 2001.

9/ brevets

110- Brevet avec TDA sur les commutateurs optiques à vocation militaire. Ce brevet porte sur l'architecture d'un commutateur à base de MEMS pour la distribution de faisceau pour le déclenchement de munition (Brevet confidentiel européen)

10/ Rapports de contrats

1990

>Capteurs et actionneurs microniques, H.CAMON, Y.LEFEVRE, C.PLANTIER, G.BLASQUEZ, A.M.GUE, D.ESTEVE, B.TRANNOY, M.LAJOIE MAZENC, Contrat MRT-INPT-LAAS N° 89-F-0542, Juin 1990, 19p., RL 90232.

>Micro-usinages et gravures : mise en place d'un outil de CAO pour le microusinage, H.CAMON, D.ESTEVE, A.M.GUE, G.BLASQUEZ, C.PLANTIER, M.DJAFARI ROUHANI, Convention MRT-LAAS N° 89-M-0458, Juillet 1990, 3p., RL 90332.

1991

>Assemblages moléculaires intégrés. Capteurs associés, A.M.GUE, H.CAMON, M.DJAFARI ROUHANI, N.FABRE, A.LAAMOURI, D.ESTEVE, Programme Interdisciplinaire CNRS ULTIMATECH, Février 1991, 20p., RL 91084.

>Etude de problèmes de compatibilité entre les filières "Capteurs microniques" et les filières de "Circuits intégrés", D.ESTEVE, H.CAMON, J.PISTRE, R.FOULLAT, A.CHOVET, J.VUILLOD, Contrat MRE N° 90-S-0242, Septembre 1991, 34p., RL 91310.

1992

>Etude prospective sur les microactionneurs intégrés sur silicium, E.SARRAUTE, Y.LEFEVRE, H.CAMON, B.TRANNOY, D.ESTEVE, M.LAJOIE MAZENC, Contrat MRT-LAAS-INPT N° 89-F-0542, Février 1992, 34p., RL 92133.

>Etude de problèmes de compatibilité entre les filières "Capteurs Microniques" et les filières des circuits intégrés, D.ESTEVE, H.CAMON, J.PISTRE, P.FOULLAT, A.CHOVET, J.VUILLOD, N.MATHIEU, S.RENARD, P.REY, Contrat MRE N° 90-S-0242, Mai 1992, 62p., RL 92250.

>Mise au point d'un simulateur moléculaire pour la conception des capteurs microélectroniques intégrés : croissance hétéroépitaxiale et gravure chimique anisotrope, H.CAMON, A.M.GUE, N.FAZOUAN, Contrat Région 9007837, Juillet 1992, 34p., RL 92288.

>Réduction des dimensions dans les microcapteurs et microactionneurs intégrés, H.CAMON, D.ESTEVE, G.BLASQUEZ, J.P.BERRY, Contrat SAGEM, Octobre 1992, 9p., RL 92449.

Etude d'une filière capteurs silicium bas coût-grande diffusion, J.P.BERRY, G.BLASQUEZ, H.CAMON, Contrat MRE-SAGEM-LAAS, Novembre 1992, 8p., RL 92481.

>Simulation tools (92497), J.P.BERRY, G.BLASQUEZ, H.CAMON, Contrat ESPRIT N° 6505, Décembre 1992, 12p., RL 92497

1993

>Outil de simulation de la gravure chimique anisotrope de mono-cristaux pour micro-capteurs, H.CAMON, P.SCHEIBLIN, J.B.LINOSSIER, A.BOURG, Contrat CISI Ingeerie/LAAS N° 91/B/0318, Juin 1993, 39p., RL 93019.

>Simulation and modelling of AMIS devices, J.P.BERRY, G.BLASQUEZ, X.CHAUFFLEUR, H.CAMON, Contrat ESPRIT N° 6505, Avril 1993, 20p., RL 93136.

>Mise au point d'un simulateur moléculaire pour la conception des capteurs micro-électroniques intégrés : croissance hétéroépitaxiale et gravure chimique anisotrope, H.CAMON, A.M.GUE, N.FAZOUAN, V.JONCQUEL, F.BRUNNETTI, M.MALBERT, Convention Recherche MRT N° 91/R/03-CNRS 509221, Décembre 1993, 21p., RL 93525.

1994

>Mise au point d'un démonstrateur de micro-actionneurs intégrés tout silicium, Y.LEFEVRE, H.CAMON, E.SARRAUTE, V.CONEDERA, N.FABRE, C.SOLANO, B.ROUSSET, H.H.PHAM, Contrat MRT N°92-T-0439, Janvier 1994, 28p., RL 94045.

1995

>Simulation statique et modale d'un micro-miroir, D.ESTEVE, M.BRIOT, G.VIALARET, H.CAMON, J.P.BECONNE, A.FERRAND, C.BRICOUT, W.DOTZEL, J.MARKET, J.MEHNER, Septembre 1995, 40p., RL95384.

>Micro actionneur tout silicium, H.CAMON, V.CONEDERA, B.ROUSSET, H.H.PHAM, N.FABRE, Y.LEFEVRE, Contrat Région 9307926, Novembre 1995, 11p., RL 95483.

1996

>Progress report of Barmint project, A.VAL, H.CAMON, Contrat ESPRIT 8173 BARMINT, Février 1996, 16p., RL 96050.

1997

>Conception et réalisation d'une maquette sur table d'un microsystème de perception 3D qui intègre une microcaméra laser 3D et une microcaméra vidéo pour former un véritable système multicapteur intelligent, N.ARANA, M.BRIOT, H.CAMON, C.GANIBAL, G.GARCIA, F.LARNAUDIE, V.REBOUL, G.VIALARET, Contrat Région 9508111, Décembre 1997, 13p., RL 97512

>Micro-actionneur tout silicium, H.CAMON, V.CONEDERA, B.ROUSSET, H.H.PHAM, N.FABRE, Y.LEFEVRE, O.RIBERE, N.BOUKARI, Contrat Régional 9307926, Décembre 1997, 13p., RL 97538.

1998

>Technologie d'assemblage multi puce pour la réalisation de microsystèmes intégrés, D.ESTEVE, H.CAMON, J.TASSELLI, Contrat Région 9307929, 44 p., RL 98262

1999

>Projet TRIDICAM : le système de déflexion électromécanique, H.CAMON, F.LARNAUDIE, N.ARANA, O.PAULET, 2^{ème} Journées du Pôle Micro Robotique, Poitiers (France), 4-5 Février 1999, pp. 35-42, RL 99029

>Expérimentation of an electrostatically actuated monochip micropump for drug delivery, M.DILHAN, J.TASSELLI, D.ESTEVE, P.TEMPLE BOYER, H.CAMON, M.ANDUZE, S.COLIN, RL 99022, Janvier 1999, 11p.

2000

>Conception et réalisation d'une maquette sur table d'un microsystème de perception 3D (Projet TRIDICAM), N.ARANA, M.BRIOT, H.CAMON, C.GANIBAL, F.LARNAUDIE, C.LEMAIRE, M.LESCURE, P.MARCOUL, D.MEDALE, Contrat Région N° 95-08-111, Janvier 2000, 26p., RL 00040.(accepté)

>B.ESTIBALS, H.CAMON, MEMSOI report on simulations and tests results, Contrat TRONIC'S MICROSYSTEMS N°11840, Décembre 2000, 36p, Rapport LAAS No00600.

2001

>A.MARCHESE, J.Y.FOURNIOLS, H.CAMON, Test de micromoteurs électrostatiques, Commande CNES, Janvier 2001, 21p, Rapport LAAS No01030.

>B.ESTIBALS, H.CAMON, Pictures and technical description of two test components, Contrat TRONIC'S MICROSYSTEMS N°11840, Juin 2001, 22p, Rapport LAAS No01283

>T.RICART, C.ALONSO, B.ESTIBALS, L.MALAQUIN, P.MAURY, M.DILHAN, F.CARCENAC, C.VIEU, H.CAMON, A.MARTINEZ, Conception et réalisation d'éléments de stockage électro-magnétique en vue de réaliser des micro-convertisseurs intégrés, Rapport LAAS N°01309, Juin 2001, 37p

>B.ESTIBALS, H.CAMON, C.ALONSO, Comparison of theoretical and simulated static behaviour of a micromachined micromirror for switching applications, Rapport LAAS N°01503, Novembre 2001, 4p.

2002

>P. Schmitt, D. Estève, H. Camon J.Y. Fourniols, J.M. Nicot, Evaluation de la fiabilité par une approche "descendante" : application du prototypage virtuel à la conception d'un système miniaturisé à base de MEMS COTS (MOTS), Rapport LAAS No02615, Contrat CNES, Octobre 2002, 80p

>M. Lescure, T. Bosch, D. Dupuy, H. Camon, J. Lonnoy, Etat de l'art en télémétrie laser, Rapport LAAS N°02271, Projet ARCOS, Juin 2002, 114p.

>S. Muratet, J.Y. Fourniols, A. Marchese, F. Bony, H. Camon, B. Estibals, D. Estève, Descriptif du RUN MPW en technologie SOI : design et cartographie de MEMS. Analyse des structures et du process technologique, Rapport LAAS N°02239, Mai 2002, 34p.

>V. Conédéra, N. Fabre, H. Camon, Les matériaux élaborés par sol gel et leur utilisation en micro technologies, Rapport LAAS N°02217, Mai 2002, 36p

>S. Muratet, J.Y. Fourniols, A. Marchese, F. Bony, H. Camon, D. Estève, Descriptif du RUN 45 en technologie CRONOS : design et cartographie de MEMS. Présentation des différents sous-systèmes, Rapport LAAS N°02143, Contrat CNES, Avril 2002, 152p.

2003

S. Valette, G. Soto-Roméro, J-Y. Fourniols, H. Camon, Commutateur optique "espace libre" par micro-miroirs digitaux, Rapport LAAS N°03235, Contrat RNRT, Mai 2003, 65p

B.ESTIBALS, H.CAMON, Design and realisation of a wavelength add-drop switching using tilting micromirrors, Contrat MEMSOI, Novembre 2003, 12p, Rapport LAAS No03507.

2004

>H. Camon, C. Ganibal, Micromiroir : caractéristiques mécaniques en fonctionnement et influence des formes de signaux, Contrat ROADMAP, Septembre 2004, 14p, Rapport LAAS N°04534

>H.Camon, B.Estibals, MEMSOI: Progress report 3 and 4 T0+24, Contrat MEMSOI N° IST 2001-33443, Mai 2004, 66p, Rapport LAAS N°04183

>H.Camon, J.Y.Fourniols, G. Soto-Roméro, C. Pisella, N. Raphoz, C. Artigues, D. Barbier, F. Bertrand, L. Fulbert, C. Lerminaux, C. Martinez, B. Mourey, S. Valette, L. Baratier, Routeur optique adapté à des modules d'amplification de positions angulaires, Contrat LETI/DOPT/STCO/04-277/CM, Mars 2004, 42p, Rapport LAAS N°04175.

2005

H.Camon, C.Ganibal, T.Zami, M.Prunaire, S.Valette, C.Martinez, K.Gilbert, N.Raphoz, M.Trzmiel, C.Pisella, Routeur Optique Adapté à Des Modules d'Amplification de Positions angulaires, Rapport LAAS No05107, Contrat ROADMAP, Février 2005, 77p

AUTRES ACTIVITES

>Activités d'encadrement, d'animation et d'administration de la recherche

Responsabilité dans l'animation de programmes et/ou de projets français, européens et/ou internationaux

Animateur AS Fluidique	Terminé
Membre du comité de pilotage de la RTP DETECOM	Terminé
Membre du comité « Microfluidique » de la Société des Hydrauliciens de France	En cours
Membre du comité scientifique du PIR Microfluidique	En cours

Responsabilité dans la direction d'équipes

L'organisation du groupe n'est pas en équipe mais collective

Administration de la recherche et/ou fonction d'intérêt général

Membre élu (collège B) à la section 08	Terminé
Membre élu du conseil de laboratoire depuis janvier 2003	En cours

>Actions d'enseignement et de diffusion

Sujets de thèse dirigés et co-dirigés

I Etude de la technologie d'interconnexion verticale "MCM-V" appliquée aux microsystèmes

A. Val

Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, , N°2529, 189p.

Soutenue le 9 Décembre 1996 devant le jury :

Président : A.Martinez, - Examinateurs : Y.Danto, G.Crean, A.Coello Vera, M.Depeursinge, J.Grageuil, Directeurs de thèse : D. Estève, H. Camon

Encadrement à 30%

Résumé:

Le début des années quatre vingt dix voit l'avènement des microsystèmes comme le prolongement de la micro-électronique. La réduction du volume, du poids et l'augmentation de la densité d'interconnexion sont les critères déterminant pour un conditionnement de circuits intégrés à moindre coût et de haute performance. La technologie d'interconnexion verticale répond à ces objectifs. L'objet de la thèse est d'établir les fondements du conditionnement des microsystèmes et de les valider par la réalisation d'un démonstrateur. Par définition, un microsysteme est constitué par un module capteur, un module de traitement du signal et un module actionneur. Dès lors, le conditionnement concerne des composants multifonctionnels, de dimensions différentes et constitués par un ou plusieurs matériaux. Le projet européen Barmint nous sert de support dans la conception et la réalisation d'un démonstrateur intégrant notamment une micropompe et un multicapteur. Pour cela, nous allons adapter la technique d'interconnexion verticale MCM-V en développant deux filières de substrats (silicium et circuit imprimé). Cette technique utilise un conditionnement plastique. Dans cet environnement, les contraintes thermo-mécaniques induites dans les différents matériaux constituent la cause principale des dysfonctionnements. L'étude de la répartition de ces contraintes et leur optimisation sur certains éléments du microsysteme sont réalisées par la méthode des éléments finis. Ceci nous permettra de présenter des règles d'assemblage et la réalisation d'un démonstrateur. Ce travail ouvre des perspectives quant à la conception et la réalisation de futurs microsystèmes pour des applications spatiales, médicales et automobile.

II Simulation de la gravure chimique anisotrope du silicium par une solution alcaline

Z. Moktadir

Doctorat Université Paul Sabatier, N° 2544, 133p.

Soutenue le 16 janvier 1997 devant le jury:

Président : D. Estève, Rapporteurs : C. Tellier, N. Moldovan, Examinateurs : M. Djafari-Rouhani, J.S. Danel, P. Allongue, Directeur de thèse :H. Camon

Encadrement à 100 %

Bourse Marocaine complétée sur fond propre

Résumé:

Nous avons réalisé une modélisation et une simulation à l'échelle atomique de la gravure chimique anisotrope du silicium. Pour cela, nous avons mis au point deux modèles atomiques. Le premier fait l'hypothèse que la

désorption d'un atome s'opère en cassant simultanément toutes ses liaisons par excitation thermique. Ce modèle ne rend pas totalement compte des observations expérimentales car les rapports d'anisotropie $\langle 100 \rangle : \langle 110 \rangle$ sont inversés. Cependant, le modèle donne une explication formelle de l'anisotropie de la dissolution. Le second est fondé sur l'idée de casser liaison par liaison en considérant que l'énergie nécessaire pour en casser une dépend de sa configuration, c'est à dire le nombre d'ions hydroxydes qui l'entourent. L'aspect dynamique temporel est assuré dans les deux cas par la mise en oeuvre d'un algorithme Monte Carlo. La simulation nous permet de calculer les vitesses d'attaque suivant n'importe quelle direction. On peut donc construire un diagramme complet des vitesses d'attaque. Les résultats obtenus sont en accord avec l'expérience. Notre analyse concerne les énergies d'activation, les rapports d'anisotropies et une analyse qualitative de la rugosité microscopique

III *Etude et réalisation d'une micro pompe et des micro valves intégrées tout silicium*

Z. Sbiaa

Doctorat Université Paul Sabatier, N° 2585, 147p.

Soutenue le 30 janvier 1997 devant le jury:

Président: A. Martinez, Rapporteurs: J. Samitier, A. Napieralski, Examineurs : R. Caen, M. Djafari-Rouhani, E. Teillaud, D. Estève, Directeur de thèse : H. Camon

Encadrement à 100 %

Bourse Marocaine complétée sur fond propre

Résumé:

Les domaines du génie biologique et médical sont considérés, à terme, comme l'un des secteurs privilégiés d'application des microsystèmes. Le sujet de thèse consiste en la conception et la réalisation d'une unité d'analyse chimique comprenant une micropompe actionnée par une résistance thermique dont le rôle est de permettre l'acheminement d'un fluide vers un multi-capteur d'analyse physico-chimique (pression, ISFET, température,...). Le projet européen Barmint (1) nous sert de support dans la conception et la réalisation d'un démonstrateur intégrant notamment les composants ci-dessus. L'originalité d'un tel procédé est de réaliser, sur un même substrat de silicium poli double face, une membrane (micro usinée grâce à une solution chimique) et de deux micro valves à sens unique qui contrôlent l'entrée et la sortie du fluide. Ces valves sont obtenues après dépôts LPCVD et gravures par plasma du silicium polycristallin. Nous aborderons en détails toutes les étapes technologiques de réalisation de la micropompe et des microvalves. Nous nous intéresserons surtout aux problèmes de compatibilités de ces technologies avec les techniques VLSI. La réalisation d'un démonstrateur sera présentée. Les aspects simulations et modélisations thermiques et mécaniques de la micropompe seront abordés pour l'optimisation. Ce travail ouvre des perspectives quant à la conception et la réalisation de futurs microsystèmes pour des applications spatiales, médicales.

IV *Micromiroir rotatif à actionnement électrostatique réalisé en technologie silicium : de la conception à la caractérisation*

F. Larnaudie

Doctorat de l'Université Paul Sabatier

Soutenue le 10 Novembre 2000 devant le jury : Président: J.GRAFFEUIL, Rapporteurs: M.DE

LABACHELERIE, D.PLACKO, Examineurs: T.BOSCH, P.NERIN, Directeurs de thèse: M.BRIOT, H.CAMON

Encadrement à 95%

Bourse Programme Microsystèmes du CNRS

Résumé:

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet TRIDICAM (TRIDIimensionnel CAMERA). Il vise l'étude et le développement d'un système de balayage laser destiné à la perception télémétrique appliquée à la robotique mobile. Nous montrons tout d'abord qu'une telle fonction peut être réalisée par l'association de deux actionneurs électrostatiques uniaxes micro usinés sur silicium : les micromiroirs. Ensuite, nous développons un modèle comportemental de ces microdispositifs qui prend en compte à la fois l'anisotropie cristalline du silicium ainsi qu'une inclinaison particulière des électrodes de commande. Ce modèle est implémenté sous le logiciel SABER dans le but de fournir au final un outil de conception. En ce qui concerne la fabrication, un procédé technologique complet a été mis au point et appliqué à la réalisation collective de micromiroirs. Ce procédé repose sur la réalisation séparée des électrodes de commande et des structures suspendues, qui sont par la suite assemblées par collage. Dans le but de réaliser un microsystème complet, nous discutons également du développement des circuits de commande numérique intégrés sur le même support que l'actionneur. Les résultats sont très encourageants : des angles de balayage de 30° à des fréquences proches de 1000 Hz sont ainsi obtenus. L'étude se termine par la caractérisation expérimentale des actionneurs réalisés. Cette étape montre la faisabilité des concepts et des principes technologiques qui ont été proposés. La fiabilité

est également étudiée par l'intermédiaire de tests d'endurance de 4000 heures dont les résultats semblent tout à fait concluants. Enfin, des études de fonctionnement sous vide ont été effectuées et montrent l'avantage indéniable d'assembler le micromiroir dans un boîtier sous vide afin de diminuer les tensions de commande

V Conception, réalisation et caractérisation de micro-miroirs à déflexion localisée appliqués aux télécommunications optiques

B. Estivals

Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, soutenue le 19 Décembre **2002**, 184p.

Président: Y.CHERON, Rapporteurs: A.POVEDA-LOPES, G.REYNE, Examineurs: C.PISELLA, F.VERLUISE, Directeurs de thèse: AM.GUE, H.CAMON

Encadrement à 95%

Bourse Ciffre avec Tronics Microsystems SA

Résumé:

La demande d'accroissement des capacités des réseaux de transmission de données a fait naître un besoin en composants tout optique. Le principal objectif de cette thèse a été de mettre au point une nouvelle architecture de micro-miroir et d'en faire l'évaluation de ses performances. Celle-ci était destinée à être implantée dans des multiplexeurs-démultiplexeurs en longueurs d'ondes ou dans des routeurs optiques. Deux approches comparatives ont été menées, une analytique et une par simulation. Elles ont permis la réalisation puis la caractérisation de micro-miroirs qui sont aujourd'hui commercialisables. Pour des raisons de miniaturisation, nous nous sommes intéressés aux alimentations intégrées spécifiques nécessaires à ce type d'application. Après un état de l'art des solutions existantes pour en déduire des solutions compatibles en taille avec notre application, nous présentons notre contribution à l'avancement des travaux permettant l'obtention d'éléments passifs de stockage

VI Une recherche de méthodologie pour l'évaluation prédictive de la fiabilité des microsystèmes en ambiance spatiale.

P. Schmitt

Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, soutenue le 20 décembre **2004**.

Président : J.M. Dorkel, Rapporteurs : P. Nouet, C. Pellet, Examineurs : F. Presseccq, Invités : D.

Estève, F. Presseccq, C. Oudéa, X. Lafontan, Directeurs de thèse : J.Y. Fourniols, H. Camon

Encadrement à 20%.

Bourse EADS/CNES

Résumé:

Les microsystèmes sont extrêmement prometteurs pour l'industrie spatiale. Mais, dans toute application spatiale, ils doivent répondre à des exigences sévères de fiabilité. Or, il s'avère que leur niveau d'intégration, leur complexité et la multidisciplinarité des fonctions intégrés introduisent de nouvelles inconnues dans la maîtrise de la fiabilité qui conduit au développement de nouvelles approches de fiabilisation. L'objectif de nos travaux est de définir et de mettre en place une nouvelle approche pour évaluer la fiabilité d'un microsystème et vérifier son aptitude à remplir une mission donnée. Nos propositions ont été inspirées de la physique des défaillances (Physics of Failure - PoF) utilisée depuis longtemps dans d'autres domaines techniques. Appliqué aux microsystèmes, nous montrons comment la physique des défaillances doit être introduite dans le cycle de conception. Notre méthodologie propre se fonde sur l'existence d'un prototype virtuel obtenu par une démarche de conception du microsystème et sur l'analyse technologique. Basée sur la connaissance des contraintes d'utilisation et d'environnement auxquelles le système sera exposé pendant sa vie, une analyse de sensibilité est effectuée et les paramètres pertinents sont identifiés. Ensuite, on associe les modèles de défaillances qui affectent ces paramètres dans le prototype virtuel pour obtenir un prototypage spécialisé en fiabilité. Le comportement de celui-ci est finalement simulé en fonction du temps et des contraintes spécifiques de la mission. On obtient donc la réaction du système à ces contraintes et l'on en déduit les performances probables en fiabilité. Cette méthodologie est finalement illustrée par une étude de cas: un accéléromètre ADXL150 inséré dans le système de mesure du lanceur Ariane V.

VII Conception, modélisation et fabrication d'un système de commutation grand angle

A. Marchese

Doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Toulouse (Bourse docteur Ingénieur CNRS/Industrie)

Date de soutenance (fin février **2005**)

Encadrement à 95%
BDI cofinancé CNRS / industrie

Résumé:

Les technologies des microsystèmes offrent de grandes possibilités en ce qui concerne l'intégration des fonctions préexistantes ou la création de fonctions nouvelles. Nos travaux sont une illustration de ce fait : nous avons eu à développer un commutateur digital pour faisceau optique de grand diamètre qui comporte une spécification concernant le volume. Par ailleurs, la commutation doit intervenir en temps limité. Après une analyse de l'état de l'art, qui expose les opportunités offertes par la filière technologique du silicium, nous définissons une architecture susceptible d'obtenir un dispositif répondant au cahier des charges. Afin de dimensionner correctement l'objet mécanique et l'électronique de commande associée, nous développons le modèle mathématique et son implémentation sous simulateur numérique. Le système étant dimensionné, nous optimisons un procédé de fabrication mettant en œuvre le micro-usinage de volume du silicium, par voie humide et par gravure ionique réactive profonde. En parallèle, nous définissons les caractéristiques nécessaires du support mécanique recevant le miroir et nous en faisons la réalisation, par usinage traditionnel d'un bloc de céramique spécifique. Enfin, après assemblage, nous étudions les propriétés dynamiques des objets obtenus par la simulation et l'expérience sur un banc optique spécifique

VIII Conception de micromiroir à blocage de charges

G. Ricard

Début en Octobre 2003

Encadrement à 75% avec G. Sarrahayrouse (25%, groupe Technologie Micro Nano), bourse MNRT

Les encadrements de stage DEA et DESS ne sont pas indiqués dans le rapport. (Un par an est la moyenne)

Encadrement de trois post-doctorants

septembre 2002-septembre 2003 (B. Estibal), janvier 2003 - septembre 2004 (G. Soto-Roméro) et octobre 2003-octobre 2004 (A. Schröder)

Organisation de colloque:

- Coorganisateur avec D. Estève et A.M. Gué du Colloque du SITEF 1992, "**Des capteurs aux micro systèmes Intelligents**", Toulouse (France), 160 participants
- Organisateur du 2nd International Workshop on **Physical Chemistry of Wet Etching of Silicon** (PCWES), Toulouse (France), 14-16 mai 2000, (120 participants)
- Organisateur **Europpractice Workshop**, mai 2001, Toulouse (130 participants)
- Membre du comité d'organisation:
 - **μFlu'02** (décembre 2002, Toulouse) et **μFlu'04** (décembre 2004, INSA, Toulouse)
 - **SAAEI-EPF 2004**
Annual Seminar on Automatic Control, Industrial Electronics and Instrumentation
Electronique de Puissance du Futur
September 15-17, 2004, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France
- Membre du comité de programme :
 - **PCWES 2002** (Nara, Japan) et **2004** (Québec, Canada)
 - **DTIP06**, International Conference on Microfabrication, Integration and Packaging

Presse écrite et audiovisuelle

- Fourniture d'échantillons pour l'exposition "Zoom sur les miniatures" du Musée de la civilisation au Québec (Canada), durée 1 an.
- Exposition au SITEF 1996 et 1998 des structures micromoteur silicium en fonctionnement
- Exposition au SITEF 2000 et 2002 des structures micro-miroirs en fonctionnement
- Chairman session 2B3 «Micromachining and etching» de Transducers 01 / Euroensors, München, Allemagne
- Chairman SAAEI, session Sensors & Actuators
- membre du comité scientifique des Workshop PCWES (2000, 2002, 2004)
- fourniture et aide pour la rédaction d'un article à Sciences & Avenirs sur les microtechnologies

Autres:

- referee pour Sensors & Actuators A, JMM (10 articles en tout)

>Actions de valorisation

Contrats auxquels vous avez participé

Européen

AMIS	Programme ESPRIT	
BARMINT	Programme ESPRIT III / Basic Research	
Europractice I	Programme IST	
Europractice II	Programme IST	responsable LAAS
Europractice III / MEMSOI I	Programme IST	responsable LAAS
MEMSOI II	Programme IST	responsable LAAS

National

- Contrat CISI Ingénierie/LAAS N° 91/B/0318
- GDR Microsystèmes Opération 2: composants électromagnétiques pour la micro robotique
Programme Microsystèmes du C.N.R.S. (2 contrats: MICROMED et Système de déflexion à micro miroir)
- Responsabilité de l'AS MOEMS
- ROADMAP RNRT, partenaires: Alcatel, Teem Photonic puis CEA/LETI, Tronics, LAAS
- Sous contractant contrat DGA avec Thomson Direction Armement, Thalès RT, CEA/DAM
- Participation ACI Jeune chercheur F. Zamkotsian
- Participation ACI Dissolution électrochimique a l'échelle atomique
- Contrat R&T CNES (2001: Conception et tests de micromoteurs électrostatiques, 2002: Design et cartographie de MEMS. Présentation des différents sous-systèmes)

Région

- Contrat Région N° 93-07-929
- Contrat Région N 93-07-926
- Contrat Région N° 95-08-111
- Contrat Région N 99-09-567

Consulting

- Consulting (5jours) pour Tronic's Microsystems SA (Grenoble) en 2003