

**Microsystèmes (MST/MEMS) :**  
**de la simulation à la réalisation technologique et à la caractérisation**

L. Montès<sup>1</sup>, D. Tsamados<sup>1</sup>, N. Mathieu<sup>1</sup>, P. Morfouli<sup>1</sup>, B. Charlot<sup>2</sup> et C. Schaeffer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Microélectronique, Électromagnétisme et Photonique  
Institut National Polytechnique de Grenoble  
23 rue des martyrs  
F-38016 Grenoble, France

<sup>2</sup> TIMA, Institut National Polytechnique de Grenoble  
46 avenue Félix Viallet, F-38031 Grenoble, France

<sup>3</sup> Centre interuniversitaire de Microélectronique  
Centre National de Formation en Microélectronique  
46 avenue Félix Viallet, F-38031 Grenoble, France

# MICROSYSTEMES (MST/MEMS) : DE LA SIMULATION A LA REALISATION TECHNOLOGIQUE ET A LA CARACTERISATION

L. Montès\*, D. Tsamados, N. Mathieu, P. Morfouli, Institut de Microélectronique, Electromagnétisme et Photonique, Institut National Polytechnique de Grenoble, 23 rue des martyrs, 38016 Grenoble. montes@enserg.fr

B. Charlot, TIMA, Institut National Polytechnique de Grenoble, 46 avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble.

C. Schaeffer, Centre Interuniversitaire de MicroElectronique, Centre National de Formation en Microélectronique, 46 avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble.

## Résumé :

Dans cet article, nous décrivons des travaux pratiques de niveau Master dédiés à un domaine en pleine expansion tant dans les laboratoires de recherche que dans l'industrie : les microsystèmes. Ils ont été récemment mis en place au Centre Interuniversitaire de MicroElectronique de Grenoble et sont actuellement dispensés à un public étudiant très varié, issus de trois différentes écoles d'ingénieur : en électronique (ENSERG), en physique (ENSPG) et en électrochimie (ENSEEG). Très complète et quasi-exhaustive, cette formation comporte des aspects de simulation, technologie et caractérisation à la fois dans les domaines de la physique, de la mécanique et de l'électronique. La filière technologique utilisée est simple mais a été mise en place avec le soucis de pouvoir réaliser des composants élémentaires très variés à la fois en microsystèmes et en microélectronique, tout en mettant en évidence la particularité des microsystèmes. L'approche multidisciplinaire, l'enchaînement des séances, depuis la simulation jusqu'à la réalisation et la caractérisation des dispositifs qu'ils ont eux-mêmes réalisés sont autant de facteurs de motivation pour les étudiants. Enfin, nous abordons les évolutions actuelles et à venir concernant cette plateforme d'enseignement.

**Mots clés :** microsystèmes, simulation, technologie, salle blanche, caractérisation électrique, travaux pratiques.

## 1 Introduction

Face au constat de la montée en puissance des microsystèmes (MEMS) tant dans les laboratoires de recherche que dans l'industrie, de nouveaux travaux pratiques (TP) spécifiques ont été mis en place au Centre Inter-universitaire de Micro-Electronique (CIME) de Grenoble. Ces TP s'adressent aux étudiants de dernière année d'école d'ingénieur (Master-2) et aux doctorants. Cette formation a été mise en place en 2001. Elle concerne, pour la rentrée 2003-2004, 21 étudiants à Grenoble issus des écoles d'électronique (ENSERG), de physique (ENSPG) et d'électrochimie (ENSEEG). Cette initiation pratique aux MEMS est en parfaite adéquation avec les cours de l'option commune 'Dispositifs et Microsystèmes', qui est la seule formation française complète dans ce domaine [1].

Nous avons choisi d'illustrer les spécificités des MEMS dans les domaines de la simulation, de la technologie et de la caractérisation. Les TP sont très complets et prennent en compte ces trois aspects.

## 2 Description des TP

Un capteur de pression à jauges piezorésistives et un déflecteur thermique sont les principaux MEMS étudiés. Le process technologique mis au point est

simple[2], puisqu'il ne comporte que 4 niveaux de masques (fig 1). Cependant il permet d'appréhender les différents processus technologiques, notamment ceux qui sont spécifiques aux MEMS. La série de TP MEMS est composée de 10 séances de 4 heures, dont le détail est donné fig 2.

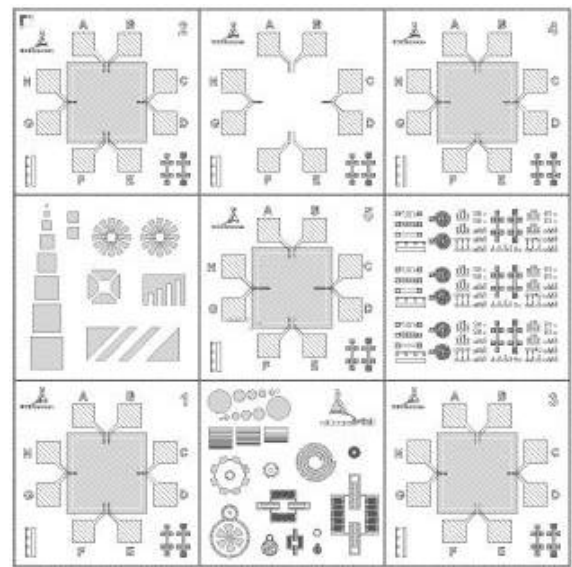


fig 1 : layout des dispositifs MEMS avec 4 niveaux de masques.

**Séance A1 ANSYS**

- Présentation de la FEM et d'ANSYS
- Modélisation d'un capteur de pression

**Séance A2 ANSYS**

- Modélisation d'un déflecteur thermique

**Séance T1 Technologie**

- Présentation de la salle blanche et des TP
- Oxyde épais (sous-traité au CIME)
- Photolithographie : simple face , masque 1 : Via (oxyde épais)
- Gravure humide : oxyde épais
- Gravure sèche (RIE) : résine
- Profilomètre : oxyde épais
- Mesure de Resistance carrée (Si-P)
- Ellipsométrie : oxyde épais (et oxyde mince)

**Séance T2 Technologie**

- Nettoyage des plaquettes (*sous-traité au CIME*)
- Oxydation sèche (450A) (*sous-traité au CIME*)
- Dépôt de Silicium polycristallin (*sous-traité au CIME*)
- Photolithographie : simple face, masque 2 : poly (silicium polycristallin)
- Gravure sèche (RIE) : silicium polycristallin puis résine
- Implantation ionique
- Recuit rapide d'activation (RTA)
- Micro-usinage de surface
- MEB

**Séance T3 Technologie**

- Lithographie double face : oxyde mince, masque 3 : backside
- Gravure humide : oxyde épais face arrière
- Gravure sèche (RIE) : résine
- Caméra IR

**Séance T4 Technologie**

- Dépôt par pulvérisation cathodique : aluminium, 1 $\mu$ m
- Photolithographie simple face : aluminium, masque 4 : aluminium
- Gravure humide : aluminium
- Profilomètre : aluminium
- Micro-usinage de volume : DeepRIE ou KOH
- MEB
- Caméra IR

**Séance S1 Simulation**

- Simulateur Athéna (technologique), Tonyplot
  - Layout, coupe et maillage
  - Procédés (oxydation, photolithographie, gravure, dépôt)
  - Application au capteur de pression et cantilever
- Séance S2 Simulation
- Simulateur Atlas (électrique)
  - Coupe, maillage
  - Capacité MOS : C-V haute fréquence
  - Transistor NMOS : Id(Vd), Id(Vg), régimes ohmique et saturé, structure (courant, champ, diagramme de bande, ...)
  - Influence de Qss

**Séance C1 Caractérisation**

- Observations au MEB et à la caméra IR
- Détermination de l'épaisseur de la membrane (profilomètre, absorption optique)
- Caractérisation électrique de capteurs de pression (épaisseur, sensibilité, ...) avec des jauges en mono- et poly- silicium
- Caractérisation I-V de transistors (submicroniques)

**Séance C2 Caractérisation**

- Caractérisation Profilométrie-Vibrométrie Optique
- Découpe, montage en boîtier ...

fig 2 : contenu des séances.

## 2.1 Simulations

La simulation est réalisée à l'aide de logiciels commerciaux. Une première approche de la simulation par éléments finis (FEM) de microsystèmes est donnée avec le logiciel ANSYS. Après construction du modèle en trois dimensions, des simulations mécaniques sont effectuées afin d'extraire la sensibilité du capteur ( $\Delta R/R$  en fonction de la pression appliquée) suivant la positionnement des jauges [3]. Les fréquences de résonances propres (étude de la résistance mécanique face aux vibrations, domaine de mesures) sont aussi extraites (fig 3). Les étudiants doivent ensuite réaliser des simulations thermiques statiques et dynamiques d'un actuateur thermique. Le travail demandé est de réaliser le programme de construction du modèle ainsi que celui correspondant à la solution statique. ANSYS apporte une approche multi-physique qui est bien adaptée aux étudiants de cette formation.

La modélisation des étapes technologiques est obtenue par ATHENA. Ce simulateur est particulièrement bien adapté aux processus de la microélectronique, mais il n'est pas conçu pour les MEMS. Ainsi la photolithographie double face n'est pas possible à priori. Toutefois, il suffit de tourner le substrat pour pouvoir réaliser les différentes étapes sur les deux faces (fig 4). En revanche l'accent est mis sur le choix approprié du maillage. En effet dans

le cas particulier des MEMS, le maillage de la structure doit être particulièrement étudié, sous peine de requérir trop de temps de calculs, ou une mauvaise résolution des variables extraites, notamment le dopage et la diffusion-oxydation.

La simulation électrique des capacités et transistors est obtenue à partir d'ATLAS. Bien qu'il ne s'agisse pas de simuler directement le comportement électrique des MEMS, cette étape est importante car elle permet de mettre en évidence la nécessaire complémentarité avec la microélectronique, où les transistors apportent une plus valeur au système par un traitement efficace du signal issu des capteurs.

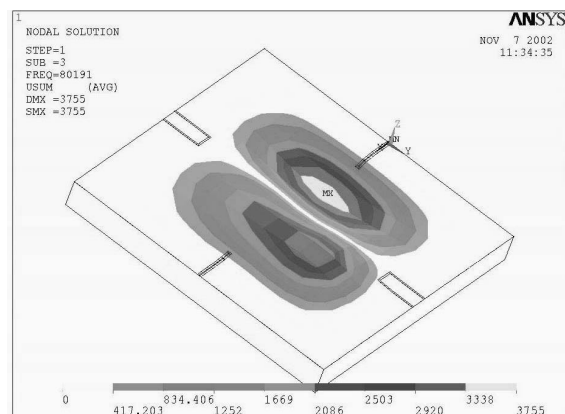


fig 3 : simulation ANSYS de la réponse en fréquence du troisième mode d'un capteur de pression.

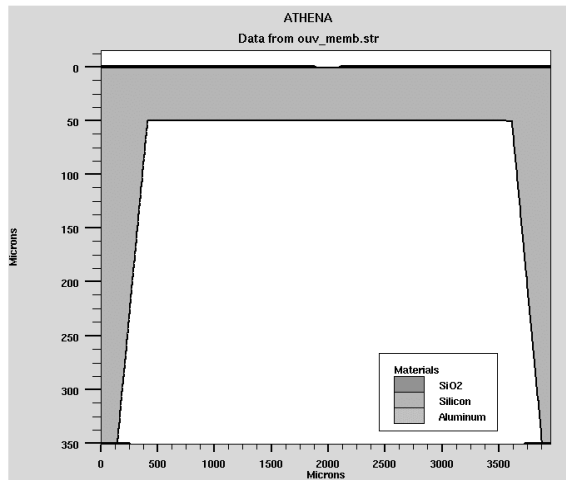


fig 4 : simulation avec ATHENA du capteur de pression.

## 2.2 Réalisation en salle blanche

La filière technologique silicium utilisée est simple ; elle ne nécessite que 3 ou 4 niveaux de masque (fig 1). Elle a été mise en place avec le souci de pouvoir réaliser des composants élémentaires très variés, tout en maintenant un budget d'investissement limité en adaptant des techniques de microélectronique. Pendant les TP, l'accent est mis sur la spécificité de la technologie des MEMS en comparaison avec la microélectronique. Ceci est d'autant plus facile que le process intègre la réalisation de composants élémentaires en technologie MOS. L'utilisation de substrats avec les deux faces polies, la lithographie sur les deux faces (fig 5) sont quelques exemples de la spécificité de la technologie MEMS.



fig 5 : machine d'alignement double face en salle blanche.

Le process (fig 6) abouti à la réalisation de capteurs et d'actuateurs de surface (poutres, déflecteurs thermiques, ...) et de volume (capteur de pression). Ceci permet de mettre en évidence la variété des techniques de micro-usinage, telles que la gravure KOH ou DeepRIE, et des notions telles que l'utilisation de couches sacrificielles.

Sous-traité	Nettoyage		
	Oxyde Epais (1,5 µm)		
Séance T1	Litho-gravure face avant (masque Via)		
Sous-traité	Oxyde Mince (500 Å) Dépôt CVD de Polysilicium (0,55µm)		
	Séance T2	Lithographie du Poly-Silicium (masque Poly)	
Implantation Ionique 40keV 2.10 <sup>16</sup> cm <sup>-2</sup>			
Séance T3	Recuit rapide RTA 1020° C 20s		
	Dégagement SiO <sub>2</sub>		
Séance T4	Lithographie double face Gravure SiO <sub>2</sub>		
	Dépôt Aluminium (1 µm)		
	Litho-gravure Aluminium (masque Métal)		
Sous-traité	Amorce du micro-usinage face arrière (KOH)		
	Micro-usinage de volume (KOH) e = 30 µm		

fig 6 : Process flow utilisé pour la réalisation simultanée de capteurs de pression à jauges en poly- et mono-silicium (à gauche) et d'actuateurs (déflecteur thermique, à droite) sur une même plaquette.

## 2.3 Caractérisations

Durant tout le déroulement des étapes technologiques, de nombreuses caractérisations physiques (ellipsométrie, absorption optique dans le visible et l'infra-rouge,) et structurales (profilométrie mécanique et optique, microscopie optique et électronique) sont réalisées. Une séance de caractérisations électriques porte sur mesure de la sensibilité des capteurs de pression obtenus (fig 7), ainsi qu'une étude de composants MOS.

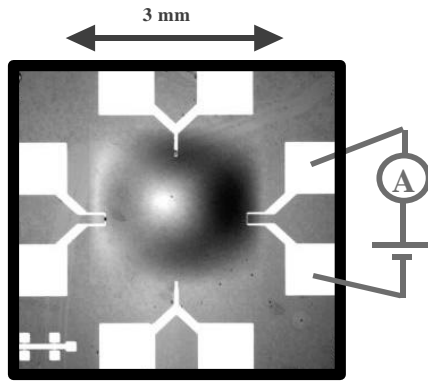


fig 7 : déformation de la membrane du capteur de pression avec une dépression de 1 atm. et circuit de mesure de la sensibilité des jauges.

Enfin, une séance est dédiée à l'utilisation d'un microscope-vibromètre interférentiel optique (fig 8) qui est un outil particulièrement bien adapté à la caractérisation des MEMS.



fig 8 : profilomètre / vibromètre optique.

Là encore les étudiants peuvent comparer différentes techniques de mesures, avec l'utilisation de plusieurs types de profilomètres disponibles : optique, mécanique, en champ proche (AFM).

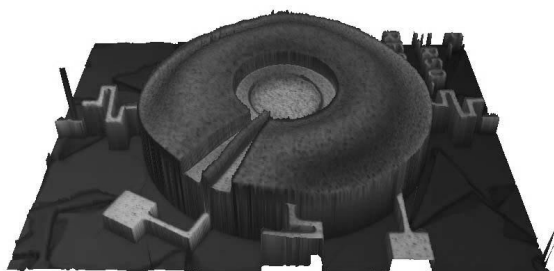


fig 9 : vue 3D d'un capteur circulaire obtenue par profilométrie optique. (hauteur Z : 8 $\mu$ m ; côté XxY : 640x480 $\mu$ m).

L'aspect vibrométrie est aussi très important, surtout pour l'étude des MEMS. Il est possible d'effectuer une analyse spectrale sur une structure vibrante, d'extraire les différents modes de résonance et leurs fréquences correspondantes (fig 10). De plus, cela permet de coupler cette analyse avec l'étude sous

ANSYS, pour en déduire différents paramètres liés au fonctionnement du microsystème comme le facteur d'amortissement, les contraintes et leur distribution, etc. Cette expérience peut considérablement aider l'étude de la fiabilité des microsystèmes. En combinant ces analyses avec les mesures électriques, il est possible d'obtenir une image assez complète du comportement électromécanique du MEMS.

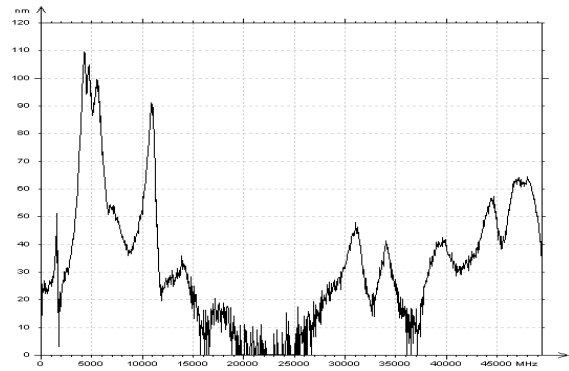


fig 10 : spectre de vibration d'un capteur de pression mesuré par vibrométrie optique.

### 3 Evolution des TP

Nous mettons l'accent sur l'aspect évolutif de ces TP. Ils ont ainsi été adaptés avec succès à l'option 'Système sur Puce-SOC' (16 étudiants/an), en mettant en avant la possibilité de faire sur une même plaquette de capteurs ou MEMS et de circuits microélectroniques pour le traitement du signal. Ces TP sont également proposés dans le cadre de la formation continue Minatec et pour l'école d'été internationale en nanosciences [4]. Ils sont particulièrement appréciés par les étudiants, notamment grâce à l'approche multidisciplinaire, l'enchaînement des séances, depuis la simulation jusqu'à la réalisation et la caractérisation des composants qu'ils ont eux-mêmes réalisés. Des questionnaires et compléments pour chaque séance sont accessibles depuis un site internet [5]. D'autre part, dans un futur proche, nous intégrerons des aspects liés aux faibles dimensions comme des réalisations en technologie nano-imprint et des caractérisations AFM [6]. Enfin, dès la rentrée 2004-2005, ces TP seront couplés à de nouveaux projets spécifiques pour la conception de MEMS.

### Bibliographie

1. N. Mathieu, J. Brini, Revue Ingénieurs INPG 03-2, juin 2003, p.30
2. L. Montès et al., International-Conference-on-Microelectronic-Systems-Education. 2001: 91-2
3. C. Malhaire, thèse INSA Lyon, 1998
4. <http://www.nanosciences.online.fr>
5. [http://www.enserg.fr/fr/form/m8/cours\\_td\\_anna les/montes/index.htm](http://www.enserg.fr/fr/form/m8/cours_td_anna les/montes/index.htm)
6. voir dans ce volume l'article « Nanotechnologies et Nanoélectronique ».