

## Ecole MEMS et ACOUSTIQUE

L'Ecole *MEMS et Acoustique* était organisée en deux parties. Le premier groupe de cours a abordé les **notions fondamentales** associées aux MEMS : *définitions et historique* (Philippe Pernod et Arnaud Devos, IEMN), *technologies de fabrication* (Elisabeth Dufour-Gergam, IEF), *propriétés des matériaux dans les structures MEMS* (Lionel Buchaillot, IEMN), *acoustique physique aux petites échelles* (Michel Bruneau, LAUM), *modélisation des MEMS acoustiques* (Bertrand Dubus et Anne-Christine Hladky, IEMN), *caractérisation dynamique des MEMS* (Alain Bosseboeuf, IEF).

Les principaux **domaines d'applications** des MEMS acoustiques, actuels et en devenir, ont fait l'objet d'un second groupe d'exposés : *résonateurs électromécaniques* (Bernard Legrand, IEMN), *transducteurs micro-usinés et sondes d'imagerie ultrasonore* (Dominique Certon, LUSSE), *micro-capteurs acoustiques et micro-machines thermo-acoustiques* (Michel Bruneau, LAUM), *capteurs MEMS à ondes acoustiques* (Sylvain Ballandras, FEMTO-ST), *actionneurs micromécaniques et acoustiques* (Sergueï Nikitov, Institute of Radio-Engineering and Electronics).

Enfin, la conférence finale intitulée *vers les NEMS acoustiques* (Anthony Ayari, LPMCN) a proposé une ouverture sur le monde des nano-objets et ses liens avec l'acoustique.

Une synthèse des thèmes et discussions abordées lors de ces journées vous est proposée ci-après.

### Introduction

Depuis 1980, le formidable développement de la technologie des micro-systèmes électromécaniques (MEMS) a ouvert un vaste champ d'évolution pour les dispositifs acoustiques (miniaturisation, montée en fréquence...). Inversement, la science de la vibration de la matière est, par sa richesse et sa diversité, une source d'innovation constante pour le développement des micro-systèmes. Les micro-systèmes acoustiques ouvrent de la sorte un champ de recherche transversal susceptible d'interaction avec tous les domaines de l'Acoustique car permettant la réalisation d'instruments dédiés.

L'activité liant MEMS et Acoustique se divise en deux domaines aux principes et objectifs distincts : la miniaturisation de dispositifs acoustiques et l'obtention de fréquences très élevées.

- La **miniaturisation** de dispositifs acoustiques, déjà existants à l'échelle macroscopique par procédé MEMS est une solution de rupture qui améliore très significativement la compacité, le coût de production et la fiabilité, et qui permet la co-intégration de l'électronique. Les points d'équilibre en terme de performance (par exemple sensibilité/bande passante) sont généralement déplacés par rapport aux équivalents macroscopiques. Les microphones, certains micro-capteurs à ondes acoustiques, les micro-machines thermoacoustiques, parmi d'autres systèmes, entrent dans cette catégorie.

- L'**obtention de fréquences très élevées** (typiquement de 10 MHz à 10 GHz) et donc de longueurs d'onde très faibles (de 10  $\mu\text{m}$  à 100 nm) très difficiles à atteindre voire inaccessibles avec des dispositifs macroscopiques (à l'exception des systèmes optiques) devient possible. Cette montée en fréquence peut se traduire par un gain en résolution (imagerie ultrasonore), un gain en sensibilité (certains capteurs à ondes acoustiques) ou par la possibilité d'aborder de nouveaux domaines d'application (résonances mécaniques compatibles avec les fréquences de l'électronique et des télécommunications).

## Bref historique

L'histoire des MEMS commence à Caltech en 1959 avec la conférence *There is plenty of room at the bottom* de R.P. Feynman qui annonce un nouveau domaine de recherche à l'échelle microscopique. Le premier micro-système fabriqué est le transistor à grille résonante en 1967 par Nathanson et al coll. Vers 1980 débutent, à l'Université de Darmstadt, les travaux de G.M. Sessler sur le microphone intégré sur silicium, premier micro-système à vocation acoustique. Les activités micro-systèmes se structurent aux Etats-Unis et au Japon à partir des années 80, puis en Europe dans les années 90. Depuis 2003, le Ministère de la Recherche soutient, par l'intermédiaire du programme "Recherche Technologique de Base", un réseau français de cinq grandes centrales de micro-technologie dépendant du CNRS (FEMTO-ST à Besançon, IEF à Orsay, IEMN à Villeneuve d'Ascq, LAAS à Toulouse) et du CEA (LETI à Grenoble).

## Méthodes et technologies liées au thème

Le terme *Micro-technologie* désigne l'ensemble des procédés mis en œuvre pour fabriquer un MEMS. A l'origine, les procédés de fabrication étaient ceux de l'industrie micro-électronique. Depuis le début des années 90, des technologies spécifiques aux MEMS se sont développées et on parle aujourd'hui de fonderies micro-systèmes, usines dont l'outil de production ne peut pas être utilisé pour réaliser des composants micro-électroniques.

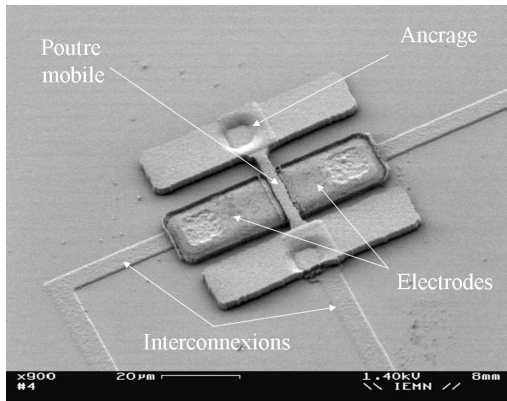
Sur le plan théorique, la plupart des MEMS acoustiques sont décrits par des modèles macroscopiques déjà bien connus (transduction, vibration mécanique, rayonnement acoustique, acoustique des fentes et guides, acoustique des cavités,...). Les principales spécificités de ces modèles sont liées :

- aux incertitudes sur la structure réelle (géométrie, propriétés des matériaux, contraintes résiduelles...), à l'importance des non-linéarités et aux interactions avec le substrat pour la structure élastique,
- à l'importance accrue des effets visqueux et thermiques pour la partie acoustique,
- aux techniques de report des modèles physiques vers les simulateurs électroniques (type VHDL-AMS) pour la partie contrôle/commande du MEMS.

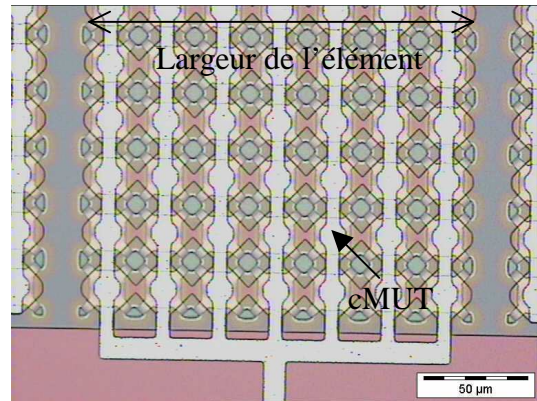
## Applications

Les applications potentielles des micro-systèmes acoustiques touchent un grand nombre de domaines :

- Les domaines de l'électronique et des télécommunications pour les MEMS acoustiques les plus avancés en terme de développement : microphones intégrés sur silicium, filtres et duplexeurs radio-fréquence, oscillateurs programmables ;
- Les transducteurs micro-usinés (MUT) à transduction électrostatique, en cours de transfert vers les fabricants de sondes échographiques, qui apparaissent comme la solution d'avenir dans le domaine de l'imagerie ultrasonore à haute résolution ;
- Le développement d'une instrumentation très variée de types capteurs et actionneurs répondant, soit à des besoins industriels (transports, environnement, santé, procédés..), soit à des objectifs scientifiques (micro-manipulation ou détection de fluide et d'objet, déclenchement d'effets physiques assistés par phénomène acoustique...). Cette activité, qui met en œuvre des MEMS basés sur des phénomènes acoustiques (propagation d'onde ou résonance), est pour l'heure essentiellement présente dans les laboratoires.



Résonateur électromécanique MEMS fonctionnant à 23 MHz (présentation de B. Legrand, IEMN)



Élément de barrette échographique en technologie cMUT (7 MHz) (présentation de D. Certon, LUSSI)

### Perspectives et enjeux

Les principaux marchés des micro-systèmes acoustiques qui ont émergé au niveau industriel concernent l'industrie de l'électronique et des télécommunications :

- les microphones sur silicium commercialisés depuis 2003 essentiellement par Knowles Acoustics (USA) et Infineon (D) (marché de 50 M\$ en 2004) ;
- les filtres et duplexers à ondes de volume (BAW) pour le filtrage radio-fréquence en télécommunication mobile produits principalement par les sociétés Agilent (USA) et Infineon (117 M\$ en 2004) ;
- les oscillateurs programmables réalisés à partir de résonateurs électro-mécaniques en silicium fabriqués par trois start-up américaines Discera, Si Time et Silicon Clocks (marché émergent d'environ 0,5 M\$ en 2006).

La liste qui suit (non exhaustive) présente les principaux laboratoires de recherche français qui travaillent sur les MEMS acoustiques : CEA-LETI à Grenoble (résonateurs et filtres BAW), FEMTO-ST à Besançon (capteurs à ondes acoustiques, résonateurs et filtres BAW), IEF à Orsay (résonateurs électromécaniques), IEMN à Villeneuve d'Ascq (capteurs et actionneurs à ondes acoustiques, résonateurs et filtres BAW, résonateurs électromécaniques, MUT piézoélectriques), IXL à Bordeaux (capteurs à ondes acoustiques, résonateurs et filtres BAW), LAUM au Mans (microphones, micro-machines thermoacoustiques), LUSSI et LMP à Tours (MUT électrostatiques), TIMA à Grenoble (microphones, MUT électrostatiques), XLIM à Limoges (résonateurs et filtres BAW).

L'évolution naturelle des MEMS acoustiques est liée à la diminution de la taille des dispositifs vers les nano-systèmes électromécaniques (NEMS) de dimensions inférieures à 100 nm grâce aux progrès de la nanotechnologie. Des NEMS mettant en œuvre des résonances mécaniques ou des ondes acoustiques de surface sont actuellement étudiés dans certains laboratoires. Les applications restent à identifier.

Michel Bruneau  
Bertrand Dubus