

INTRODUCTION :

Avec le développement des microsystèmes depuis les années 80, l'étude mécanique des éléments et des matériaux composant ces dispositifs s'avère nécessaire. Cette nécessité est, actuellement, amplifiée par la tendance actuelle à la réduction des échelles des systèmes électromécaniques vers les nanosystèmes.

Le premier enjeu de la miniaturisation des systèmes réside dans la réduction des coûts de production et l'accroissement de la fiabilité. En effet, les technologies des semi-conducteurs permettent de réaliser de manière collective un grand nombre de dispositifs identiques et parfaitement reproductibles. Pour les microcapteurs utilisés sur des marchés de masse, comme l'automobile, cet enjeu est déterminant.

Le deuxième enjeu des microsystèmes est l'accès à des nouvelles applications pour lesquelles une taille microscopique est primordiale ; c'est le cas des dispositifs biomédicaux destinés à intervenir dans le corps humain [1-2].

Après avoir présenté les enjeux suscités par les microsystèmes, nous présenterons les perspectives liées à la réduction des échelles de systèmes électromécaniques. Notamment, afin de fiabiliser ou d'améliorer le comportement de systèmes électromécaniques aux petites échelles, il est important d'effectuer de nouvelles études mécaniques sur les matériaux composant ces systèmes.

L'objectif de ce chapitre est de préciser les motivations des microsystèmes et de faire le point sur les techniques de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux basées sur l'utilisation de microstructures déformables. La caractérisation mécanique de matériaux aux petites échelles sera centrée sur l'étude des paramètres suivant : module d'Young, contrainte résiduelle et coefficient de Poisson.

I.1. Les microsystèmes :

I. 1.1. Généralités :

Un microsystème est une puce électronique contenant des parties non électroniques, comme par exemple un capteur ou un actionneur. Un microsystème peut contenir un capteur de température, de l'électronique analogique pour la conversion des valeurs du capteur et de l'électronique numérique pour l'interfaçage avec d'autres puces, le tout intégré dans un seul composant électronique.

Quand le microsystème comprend des parties mobiles, on emploie le terme de microsystème électromécanique.

I. 1.2. Microsystèmes électromécaniques (MEMs) :

Un microsystème électromécanique est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur. Le terme microsystèmes électromécaniques est la version française de l'acronyme anglais MEMs (*MicroElectroMechanical Systems*).

A l'origine, les MEMs sont issus de la microélectronique. C'est l'apparition de composants solides et miniaturisés (invention du transistor bipolaire en 1957 [3]) et de méthodes de fabrication des composants au silicium (procédé « planar » en 1960 [4]), qui a permis le développement des microsystèmes à partir des années 70 avec, par exemple, l'invention du premier MEMs en 1967 schématisé dans la figure I.1 (transistor MOS à grille résonante [5]).

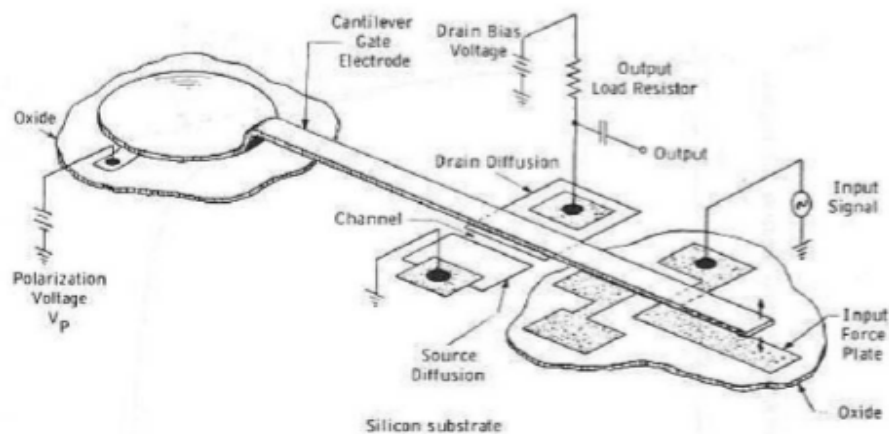


Figure I.1 : Schéma du premier microsystème : un transistor MOS à grille résonante (1967) [5].

Les MEMs se différencient de la microélectronique par l'intégration des fonctions mécaniques. Ils représentent un assemblage, dans un même composant à faibles dimensions, d'un ou plusieurs capteurs et/ou actionneurs et de l'électronique associée au traitement de l'information.

Les fonctions mécaniques présentes dans les MEMs peuvent être des membranes, des poutres, des ressorts,... réalisés sur silicium à l'échelle micrométrique afin de mesurer les

paramètres environnementaux (capteurs) ou interagissant avec le monde extérieur (actionneurs) grâce aux forces générées par des transducteurs électromécaniques.

De manière générale, les microsystèmes électromécaniques sont des dispositifs dont on a réduit les dimensions à l'échelle micrométrique (approche top-down) intégrant ou combinant des éléments mécaniques et de l'électronique sur un même substrat.

I.1.2. Les atouts des microsystèmes :

L'intérêt suscite par les MEMs depuis les années 80 repose sur leurs caractéristiques issues de la réduction des dimensions de ces dispositifs. D'un point de vue économique, la réduction des échelles (en masse et en volume) permet de limiter les encombrements et de multiplier les fonctionnalités sur un même substrat [6]. On peut, par exemple, intégrer en parallèle des capteurs capables de mesurer des paramètres d'environnement (pression, accélération,...) et des actionneurs (micromoteurs,...). De plus, leur mode de fabrication permet de les produire (facilement, rapidement et simultanément) en grande quantité et à faible coût. L'intérêt, pour les microsystèmes, suscite également, par leurs performances liées à la réduction des échelles avec des fréquences de résonance élevées, de faibles inerties, des sensibilités importantes, de faibles consommations,...

Issus de la technologie de la micro-électronique, les MEMs font appel pour leur fabrication aux microtechnologies, qui permettent une production à grande échelle. Les MEMs sont le plus souvent à base de silicium, mais on utilise également d'autres matériaux suivant l'adéquation de leurs propriétés physiques à certaines applications, comme les métaux, les matériaux piézoélectriques, divers polymères, etc.

Ils sont utilisés dans des domaines aussi variés que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, la biologie, les télécommunications, ainsi que dans certaines applications « de tous les jours » telles que certains vidéoprojecteurs, téléviseurs haute-définition ou coussins gonflables de sécurité pour automobiles.

Face au développement de ces domaines, on a vu apparaître des termes dérivés pour désigner des MEMs spécialisés. Par exemple, dans le domaine optique on utilise le terme MOEMs (*Micro Opto Electro Mechanical Systems*) ou Optical MEMs, alors que dans le domaine biologique on utilise bioMEMs. On notera aussi un nouveau terme, NEMs (*Nano Electro Mechanical Systems*), Nanosystèmes en français, désignant des structures semblables aux MEMs mais de taille sub-micrométrique.

I.2. Intégration dans les domaines des microsystèmes :

Dans le domaine des microsystèmes, les mots composants et dispositifs sous-entendent non seulement les composants fondamentaux de la microélectronique mais aussi les capteurs, les actionneurs et des modules divers. Le champ des microsystèmes hybrides couvre l'ensemble des microsystèmes obtenus par assemblage de composants, de circuits et de microdispositifs divers. Ces dispositifs ont une caractéristique commune. Ils sont réalisables par les techniques classiques de la microélectronique sur silicium et par des techniques annexes compatibles : procédés couches minces, usinages chimiques de surface et de volume, électrodéposition, soudure atomique,... Ils se distinguent des composants électroniques par leur structure. En effet, en microélectronique, les formes sont invariablement planes. La mise en œuvre de techniques d'usinage, d'assemblage, d'électrodéposition ont pour finalité la fabrication de micro et nanostructures tridimensionnelles qui intègrent éventuellement des composants et des circuits microélectroniques.

Les activités de recherche s'effectuent, d'une part dans les domaines des nouveaux dispositifs de détection et d'actionnement, et d'autre part sur le plan de l'intégration des systèmes (conception et réalisation), en centrant les préoccupations d'application sur quelques thématiques fortes telles que le génie biologique et médical, la domotique, l'aéronautique et l'espace, l'instrumentation.

Ces activités couvrent un vaste champ d'investigation allant des technologies de base jusqu'à la modélisation comportementale du système et le traitement du signal. Elles reposent sur quelques points clés : les méthodologies de modélisation et simulation, les étapes et filières technologiques spécifiques au micro et nano technologies, les technologies d'assemblage, la caractérisation, et la conception de microdispositifs.

I.3. Principaux types de microsystèmes :

Afin de mieux illustrer ces considérations, nous allons abordés en détail le thème des principaux types de microsystèmes et microstructures électromécaniques intégrées et des applications qui en découlent. Il existe ainsi trois catégories générales : les microcapteurs, les micro-actionneurs et les microstructures passives.

I.3.1. Microcapteurs mécaniques :

En général, un capteur est un dispositif qui génère un signal électrique lorsqu'il est soumis à l'action d'une grandeur (objet de la mesure) appelée mesurande, dont la nature peut être physique, chimique ou biologique.

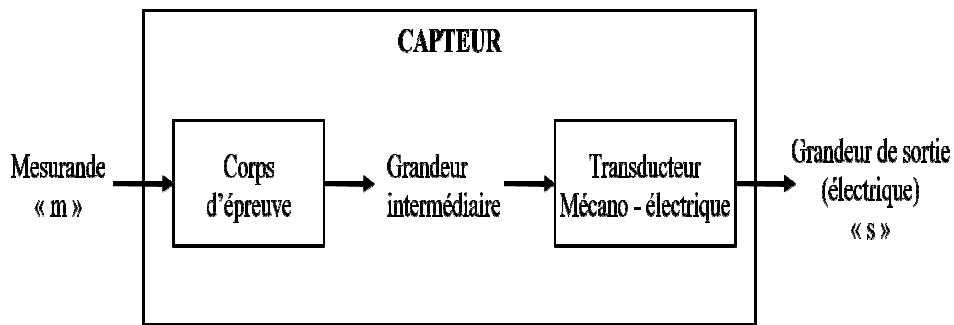


Figure I. 2 : Représentation schématique d'un capteur

Afin de classifier les capteurs, plusieurs critères peuvent être adoptés :

- En fonction des principes de transduction utilisés (physiques, chimiques ou biologiques).
- En fonction du type de mesurande (capteur de : force, pression, d'accélération, de gaz, etc...).
- En fonction de l'application visée (domaines de l'automobile, de l'aérospatial, du biomédical, etc...).

Traditionnellement, à travers l'ensemble de la littérature de spécialité, la classification des capteurs est faite sur la base de combinaisons entre le principe de transduction, le mesurande et l'application qui leur sont spécifiques.

Pourquoi des petits capteurs ?

▪ Fonctionnalité :

- Dispositif peu encombrant.
- Discret et léger.
- Perturbe moins par sa présence l'environnement qu'il est sensé analyser.

▪ Performances :

- Consommation électrique réduite.

- Plus grande rapidité mécanique : Quand la longueur du microlevier diminue, le temps de la réponse mécanique diminue.
 - Plus grande rapidité thermique : Quand la longueur du microlevier diminue, le temps de la réponse thermique diminue.
 - Possibilités accrues de fonctionnement en réseaux de capteurs.
- **Economie :**
- Fabrication collective et à bas coût.

Un microcapteur mécanique traduit une grandeur physique appartenant au domaine mécanique (masse, déplacement, force, vitesse, accélération, pression, etc.) en un signal électrique (tension, courant, etc.).

Un microcapteur mécanique peut être (**Voir chapitre III**) :

- A détection intégrée, ce qui signifie que le signal mécanique est directement traduit en signal électrique, sans avoir besoin d'un apport d'énergie extérieur.
- A détection externe, auquel cas le microcapteur nécessite une source d'énergie auxiliaire afin de générer le signal électrique.

Les microcapteurs mécaniques peuvent fonctionner suivant deux régimes : statiques et dynamique.

I.3.1.1. Régime statique :

Les microcapteurs mécaniques fonctionnant en régime statique traduisent la déformation mécanique induite par le mesurande en une variation de tension ou de courant. Les domaines d'application sont très variés :

- Le micro-calorimètre proposé par Berger et al. [7] permet de mesurer des variations d'enthalpie de l'ordre de 10 nJ lors de transitions de paraffines déposées en surface de microleviers bi-couches Si_xN_y - Au. Ces variations sont mesurées à partir de la déflexion du microlevier engendrée par une variation de la température (effet thermo-mécanique sur le microlevier bi-métallique).
- Le microcapteur pour analyse qualitative de cinétiques de réaction proposé par Berger et al. [8] traduit l'auto-organisation de mono-couches d'alcanethiols ($CH_3-(CH_2)_{n-1}-SH$) sur une couche mince d'or en déflexion d'un microlevier bi-couches Si_xN_y -Au par un changement du gradient de contrainte auquel ce dernier est soumis. La sensibilité d'un tel

microcapteur est telle qu'il peut détecter des modifications quantitatives de l'ordre de la zeptomole (10^{-21} mole).

- Le microcapteur chimique pour l'identification de gaz et vapeurs réalisé par Lang et al. [9] permet, en utilisant le même effet de contrainte que ci-dessus :
 - La détection de l'hydrogène par adsorption sur la surface d'une couche mince de platine déposée en surface d'un microlevier en silicium.
 - La distinction entre les vapeurs de méthanol, d'éthanol, de 1-propanol ou de 1-butanol par diffusion dans une couche mince de PMMA déposée en surface du même type de microlevier que ci-dessus.

I.3.1.2. Régime dynamique :

Les microcapteurs mécaniques fonctionnant en régime dynamique permettent des mesures en fonction des fréquences de résonances de la structure étudiée. Le nombre d'applications utilisant des microcapteurs en régime dynamique est considérable. Nous citerons par exemple :

- Les microcapteurs d'humidité réalisés par Scandella et al. [10] permettent de détecter des quantités d'eau de l'ordre de 5 ng. Ici, la structure poreuse de cristaux de zéolite alignés sur la surface de microleviers en silicium monocristallin en vibration permet l'absorption de vapeur d'eau. La modification de la masse globale des microleviers se traduit ainsi par le décalage de leurs fréquences de résonance respectives.
- Les microdétecteurs de vapeur de mercure proposés par Thundat et al. [11] utilisent le même principe que précédemment. Les microleviers utilisés dans cette application sont en nitrure de silicium et recouverts à l'extrémité libre par une couche mince d'or qui adsorbe les vapeurs de mercure.
- Les micro-viscosimètres de type microlevier proposés par Oden et al. [12] ou Bergaud et Nicu [13] permettent de mesurer les viscosités de divers fluides (mélange eau-glycérol, éthanol etc.) en fonction des fréquences de résonances dans le milieu respectif.

I.3.2. Micro-actionneurs :

Un actionneur est un dispositif mécanique qui traduit une sollicitation extérieure en une action physique (ex : force ou déplacement).



Figure I. 3 : Représentation schématique d'un actionneur

De la même manière que les microcapteurs, les micro-actionneurs peuvent être classifiés suivant divers critères :

- En fonction de l'effet physique utilisé pour réaliser la transduction du signal extérieur.
- En fonction du design de la partie mécanique active.

Si nous considérons le dernier critère cité ci-dessus, nous distinguons deux classes de micro-actionneurs :

- Les microstructures rigides, qui transmettent des forces ou des couples par translation ou rotation (exemple : le micromoteur électrostatique [14-15]).
- Les microstructures déformables, qui sont des microstructures de faible raideur de type microlevier, pont ou membrane. Ces dernières transmettent des forces ou des déplacements à travers leur déformation.

I.3.2.1. Exemples d'actionneurs :

- Valve, pompe
- Commutateur, interrupteur
- Haut-parleur
- Résonateur
- Tête d'imprimante à jet d'encre
- Tête d'écriture magnétique

I.3.2.2. Quelques Applications des micro-Actionneurs :

Contrairement aux microcapteurs, les lois d'échelle ne sont pas favorables à la miniaturisation des actionneurs, en termes de puissance générée, force, couple,...

C'est une des raisons pour lesquelles les micro-actionneurs ont eu plus de mal à émerger que les micro-capteurs. Quelques rares succès commerciaux font exception. Ex : têtes d'écriture magnétique et têtes d'imprimantes à jet d'encre dès le début des années 80.

Les applications viables des micro-actionneurs sont celles qui ne nécessitent pas une grande puissance de sortie :

- Manipuler de la lumière : MEMs Optiques,
- Générer des grandeurs extensives : déplacements, fréquences,
- Manipuler de faibles quantités fluidiques/biologiques,
- Servir d'interface avec le nano-monde. Ex : microscopie en champ proche, écriture et manipulation atomique.

I.3.3. Microstructures passives :

Ce sont des microstructures qui ne mettent en œuvre aucun principe de transduction. Nous avons classé ces microstructures en deux catégories :

- Microstructures de liaison.
- Microstructures pour l'extraction de paramètres.

I.3.3.1. Microstructures de liaison :

Le rôle des microstructures de liaison est celui d'assurer un interfaçage passif entre deux milieux à échelle différente.

Un exemple révélateur d'une telle microstructure est le micro-drain en silicium utilisé dans le processus d'impression à jet d'encre [16]. Un autre exemple de microstructure de liaison est le micro-testeur sous pointes réalisé au LAAS [17] qui permet l'interfaçage entre un domaine

de dimensions microscopiques et un autre domaine de dimensions nanoscopiques. Il s'agit d'un réseau de dix microleviers en titane/or de largeur égale à 2 μm et espacés de 4 μm .

I.3.3.2. Microstructures pour l'extraction de paramètres :

Il s'agit de microstructures simples par exemple de type microlevier constituées d'un ou, au plus deux matériaux en couche mince. Une analyse ciblée de leur comportement mécanique (statique ou dynamique) permet d'avoir accès aux propriétés physiques des matériaux les constituant.

a- Comportement mécanique statique :

La mesure de la déformation initiale de telle structure permet de calculer les valeurs des contraintes internes effectives spécifiques aux matériaux constituant la microstructure. Cette problématique fera l'objet de la première partie du deuxième chapitre pour le cas de microlevier encastré à une extrémité et soumis à une force ponctuelle à l'autre extrémité libre.

b- Comportement mécanique dynamique :

La fréquence de résonance d'un microlevier dépend- comme nous le montrerons en détail dans le deuxième chapitre pour un microlevier de forme rectangulaire de cette étude- de leur géométrie (épaisseur et longueur) ainsi que le module d'Young, du coefficient de Poisson et de la densité des matériaux qui les constituent.

Conclusion :

A travers ce chapitre nous avons pu voir l'importance grandissante des microsystèmes ainsi que l'intérêt de réduire leurs dimensions.

Une étude récente sur les potentialités des microsystèmes [18] permettait de dégager, en résumé, trois critères fondamentaux dont la satisfaction permet aujourd'hui à une structure (industrie et/ou recherche) d'être distinctement identifiée dans ce domaine :

- c- Le premier est d'acquérir et maîtriser des outils théoriques ou de simulation permettant de prendre en compte la variété des effets et propriétés physiques mis en jeu dans les applications aux microsystèmes. A ce propos, le choix de quelques applications de type microcapteur, micro-actionneur et microstructure passive à partie mécanique principale par exemple de type microlevier nous a permis de souligner la diversité de la nature des

interactions que les microsystèmes sont amenés à établir avec le monde physique extérieur.

- d- Le deuxième critère est d'acquérir des équipements spécifiques à la fabrication des microsystèmes afin de réaliser des dépôts de couches minces et épaisses, des gravures plus profondes, des opérations de manipulation et d'encapsulation (packaging) plus adaptées que celles propres à la micro-électronique.
- e- Enfin, acquérir et mettre en place de nouvelles techniques de caractérisation dédiées exclusivement aux tests finaux des microsystèmes et microstructures. Nous avons utilisé comme technique le microscope à force atomique au niveau du troisième chapitre.

C'est ainsi que, dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser, pour commencer, au comportement mécanique et électrique de microstructures de type microlevier.