

# Microsystèmes et matériaux piézoélectriques

Philippe Gaucher

## Summary

### MEMS and piezoelectric materials

Smart materials are taking a growing importance in the field of micro-electro-mechanical systems (MEMS). Among them, piezoelectric materials are of primary interest due to the large elastic energy density per unit volume they can generate, and also to their low electrical impedance. The integration of piezoelectric thin films into MEMS is ongoing rapid progresses. The applications are in sensors, acoustic transducers, micromirrors... They will allow the fabrication of low cost devices due to a collective process, and at term to the integration of the signal processing circuits on the same chip.

## Mots-clés

**microsystèmes, piézoélectriques, intégration, technologie silicium, matériaux fonctionnels.**

## Key-words

**MEMS, piezoelectric, integration, silicium technology, functional materials.**

Dans le domaine en forte croissance des MEMS<sup>1</sup> (micro-electro-mechanical system), les matériaux fonctionnels sont appelés à plus ou moins long terme à jouer un rôle important en vue de l'amélioration des performances et de la compétitivité des dispositifs.

Parmi eux, les piézoélectriques présentent un intérêt particulier en raison de la forte densité d'énergie élastique qu'ils peuvent générer dans un volume réduit et de leur faible impédance électrique : cela permet de faire des actionneurs basse tension fortement miniaturisés et des capteurs de microdéformations très sensibles. Les concepts ont été validés sur des démonstrateurs divers utilisables dans de nombreux domaines concernant l'optique, le contrôle de vibrations, l'acoustique haute fréquence...

L'intégration de ces matériaux dans des microsystèmes représente un saut technologique important et l'on voit apparaître (particulièrement au Japon) une nouvelle génération de MEMS où des couches minces de céramiques – voire de monocristaux – sont intégrées à des dispositifs originaux et performants. Outre l'abaissement des coûts de fabrication par l'aspect collectif de la technologie, cela permettra à terme l'intégration du traitement de signal sur la même puce.

## Du matériau à la propriété physique

La science des matériaux est une discipline fortement représentée en France, en particulier les domaines de la cristallographie, de la physique du solide et de la chimie structurale. La découverte de la piézoélectricité par Pierre Curie et du premier transducteur sonar par Paul Langevin en sont des exemples célèbres dans le domaine traité ici.

Les premiers cristaux piézoélectriques connus avaient surtout des propriétés intéressantes pour faire des oscillateurs : on connaît bien les quartz pour générer des signaux très stables en fréquence. Cependant, il a fallu découvrir les matériaux ferroélectriques pour avoir de réelles performances mécaniques. En effet, ces matériaux ont une polarisation interne  $P$  qui s'exprime en fonction du champ  $E$  par :

$$P = P_i(E) + P_s$$

où  $P_s$  est une polarisation spontanée qui se forme dans le cristal au-dessous d'une température dite de Curie et  $P_i(E) = \chi \cdot E$  est la polarisation induite ( $\chi$ , susceptibilité diélectrique).

La relation fondamentale de l'électrostriction, reliant la déformation  $S$  à la polarisation  $P$ , avec  $Q$  : constante d'électrostriction, est vraie pour tous les matériaux :

$$S = Q \cdot P^2$$

Elle donne pour ces matériaux ferroélectriques :

$$S = S_0 + 2QP_s \cdot \chi \cdot E + Q \cdot P_i(E)^2$$

Le second terme est précisément l'effet piézoélectrique  $S = d \cdot E$ , avec  $d$  : constante de charge piézoélectrique ; on voit ainsi immédiatement que les matériaux à forte polarisation spontanée ainsi qu'à forte susceptibilité  $\chi$  auront une grande déformation induite par le champ, et donc une forte énergie élastique disponible par unité de volume  $Y \cdot S^2$  si le module élastique  $Y$  est élevé.

C'est le cas en particulier des oxydes iono-covalents de la famille de la perovskite  $ABO_3$  ayant la structure présentée dans la *figure 1*, avec des octaèdres  $BO_6$  constituant un réseau cubique contenant des ions  $A^{2-}$ .

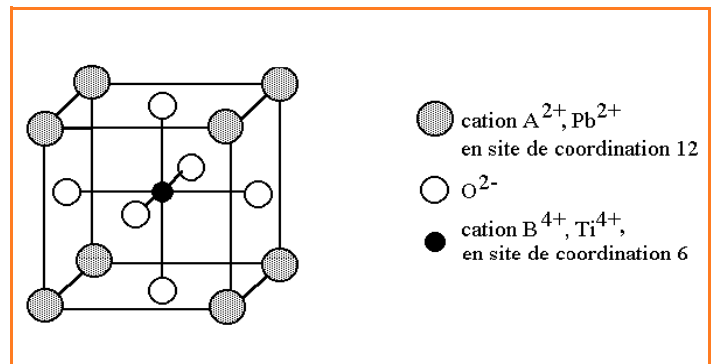


Figure 1 - Structure de la perovskite  $ABO_3$ .

Les polymères partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliant<sup>2</sup> mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous-marine (hydrophones). Le PVDF (poly fluorure de vinylidène), dont les chaînes peuvent s'orienter lorsqu'on l'étire sous un champ électrique, en est le représentant le plus connu (figure 2).

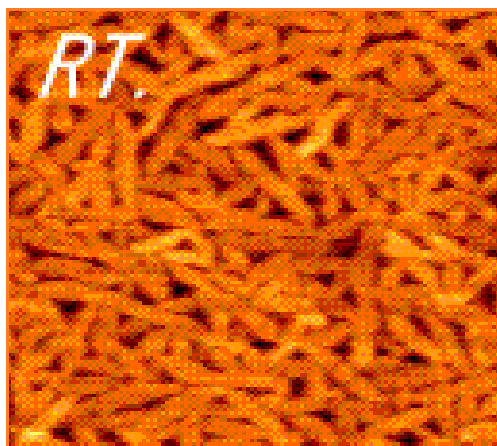


Figure 2 - Orientation des chaînes du poly fluorure de vinylidène étiré sous un champ électrique.

Entre ces deux extrêmes, le module élastique varie de  $10^7$  à  $10^{11}$  N/m<sup>2</sup>. Les matériaux composites polymère-céramique permettent d'obtenir des valeurs intermédiaires avec éventuellement une anisotropie contrôlée.

## De la propriété physique à l'application

Parallèlement, la compétition industrielle a généré des besoins de plus en plus variés comme le montre le *tableau I* (non exhaustif).

Ces dispositifs ont pour la plupart été réalisés avec des matériaux piézoélectriques usinés et assemblés individuellement. Les coûts élevés de production et le besoin de miniaturisation vont dans le sens des procédés collectifs et de l'intégration des matériaux sous forme de couches minces.

Les microtechnologies du silicium sont actuellement en plein essor. Différents types d'actionneurs possibles sont comparés dans le *tableau II*.

C'est ainsi que les actionneurs piézoélectriques sont préférés pour les applications haute fréquence ou à faible temps de réponse, puisque leur bande passante est

seulement limitée par la vitesse du son dans les solides. On leur préférera au contraire des actionneurs électrostatiques si l'on veut faire du « quasi statique », ou des actionneurs magnétiques si l'on dispose d'une source de courant ou de champ magnétique suffisante.

Dans tous les cas, l'intégration à terme du traitement de signal sur la même puce permettra de simplifier la connectique vers le monde macroscopique : la faisabilité de la technologie CMOS<sup>4</sup> combinée avec la technologie piézoélectrique a été démontrée dans le cas des FRAM<sup>5</sup> (mémoires non volatiles), puis des MEMS (figure 3).

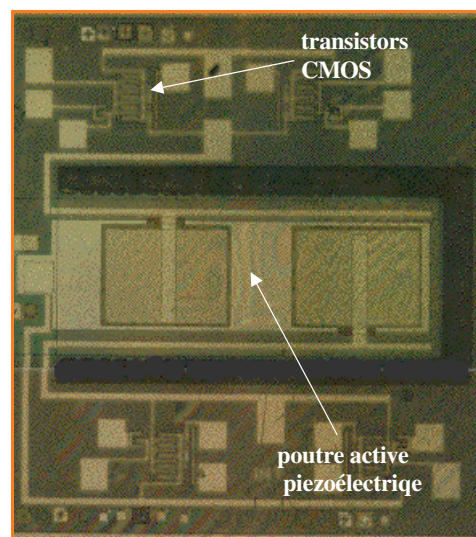


Figure 3 - Combinaison des technologies CMOS et piézoélectriques dans les MEMS (microelectro mechanical systems). Photo LCR Thales.

## De l'application à la conception optimisée

Une fois le démonstrateur générique réalisé et testé, il reste un gros travail d'optimisation de la conception pour répondre à des spécifications nombreuses et complexes. Bien que les logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) ne prennent encore que peu en compte les matériaux « exotiques », il y a une forte tendance à développer des logiciels qui modélisent ce que l'on appelle les « phénomènes couplés ». Un exemple simple est celui de la membrane qui se déforme sous l'effet d'une force,

Tableau I - De la propriété physique à l'application.

Application	Principe physique	Segment de marché	Zone géographique principale
buses d'impression jet d'encre	micropompe	péri-informatique	Extrême-Orient
capteurs inertiels (accélération, rotation)	détection des forces d'inertie (masse, Coriolis)	défense, espace, avionique	États-Unis, Europe
contrôle de vibrations	capteurs bimorphes	défense, espace, avionique	États-Unis
miroirs tiltés <sup>3</sup>	actuateur bimorphe	scanners optiques, projection d'images	Extrême-Orient
optique adaptative	membrane déformable	astronomie, défense	États-Unis, Europe
capteur de viscosité d'huile	résonateur chargé	automobile	Europe
transducteurs acoustiques	membrane résonante	médical	États-Unis, Europe

Tableau II - Les différents types d'actionneurs. S : déformation ; V : tension électrique ; e : épaisseur ; T : température ; eps, d, M,  $\mu$  : constantes diélectrique, piézoélectrique, électrostrictive et magnétique.

	Énergie	Force	Déplacement	Avantages Inconvénients
<b>Electrostatique (force normale)</b>	$\frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \frac{S}{e} \cdot V^2$	$\frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \frac{S \cdot V^2}{e^2}$	$\sqrt{\frac{\epsilon_0 S}{2 k e}} \cdot V$	Faible consommation Haute tension
<b>Électrostatique (force tangentielle)</b>	"	$\frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \frac{L \cdot V^2}{e}$	$k \cdot V^2$	Grands déplacements Réponse lente
<b>Bimorphe piézoélectrique</b>	$\frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot k_{31}^2 \frac{S}{e} \cdot V^2$	$d_{31} \cdot Y \cdot \frac{V}{e}$	$\frac{L^2}{e^2} \cdot d_{31} \cdot V$	Faible impédance Technologie complexe
<b>Bimorphe électrostrictif</b>	"	$M_{31} \cdot Y \cdot \frac{V^2}{e^2}$	$\frac{L^2}{e^3} \cdot M_{31} \cdot V^2$	Process basse température Non linéaire
<b>Magnétique (force normale)</b>	$\frac{1}{2} \mu_0 \cdot \left(\frac{N \cdot i}{2}\right)^2 \cdot S \cdot e$	$\frac{1}{2} \mu_0 \frac{S}{e^2} (N \cdot i)^2$	$\infty$	Commande sans fils Consommation
<b>Bimorphe magnétostrictif</b>	$\frac{1}{2} \mu_0 \mu \cdot k_{31}^2 \cdot H^2$	$d_{31} \cdot Y \cdot H$	$\frac{L^2}{e} \cdot d_{31} \cdot H$	Forte énergie Basse fréquence
<b>Bimorphe thermique</b>	$\frac{1}{4} Y \cdot (\alpha \cdot \Delta T)^2$	$\frac{Y \cdot t}{12(1 - \nu^2)} \cdot S$	$\alpha \cdot \Delta T$	Grande déformation Réponse lente Consommation élevée



Figure 4 - Cheminement de la conception optimisée d'un matériau.

elle-même générée par une charge... qui dépend de la déformation. Les méthodes d'éléments finis se substituent aux équations aux dérivées partielles grâce à la puissance croissante des ordinateurs, et permettent de traiter toutes les géométries possibles.

L'étape suivante sera un retour vers le matériau pour définir la formulation qui convient le mieux au design trouvé. La notion de « material tailoring » commence à peine à apparaître dans les centres de recherche mais semble avoir un avenir très prometteur. Avec la complexité croissante des matériaux, donnant lieu à un grand nombre de possibilités, les méthodes de conception « top to down »<sup>6</sup> remplaceront les simulations du type « bottom-up »<sup>6</sup> où l'on part d'un design quasiment intuitif. Le cheminement devrait être celui décrit sur la figure 4.

## Conclusion : la compétitivité par la rupture technologique

La validation d'une filière technologique nouvelle peut donc donner lieu à de nombreuses innovations : c'est ainsi que des centaines de brevets existent sur les moteurs à ondes acoustiques ou sur les transformateurs piézoélectriques. Les applications sont encore souvent dans des « niches » (appareils photo haut de gamme, allumage de tubes plasma) mais les entreprises qui investissent dans ces technologies « à risque » ont souvent l'occasion par la suite de prendre des parts de marché importantes dans un domaine où elles étaient peu présentes : souvenons nous des premières montres à quartz de Seiko qui ont fini par anéantir l'industrie horlogère traditionnelle.

## Notes

- 1 MEMS : terme générique aux États-Unis pour micro-electro-mechanical system, ou microsystème en Français.
- 2 matériau compliant : contraire de matériau rigide (dur).
- 3 miroir tilté : système industrialisé, entre autres, par Texas Instruments pour la déflexion de rayons lumineux (application à la projection d'images, aux lasers...).
- 4 technologie CMOS : complementary metal oxide semiconductor. Technologie transistor en silicium pour circuits numériques.
- 5 FRAM : ferroelectric random access memory. Mémoire non volatile basée sur un matériau à mémoire de polarisation.
- 6 conception « top to down » : méthode de conception de circuits électroniques basée sur une description d'abord générale du système global, suivie par une description de plus en plus détaillée des sous-systèmes (au contraire de « bottom-up »).



### Philippe Gaucher

est ingénieur au Laboratoire central de recherches du groupe Thales\*.

\* Domaine de Corbeville, 91404 Orsay Cedex.  
Tél. : 01 69 33 91 32. Fax : 01 69 33 03 09.  
E-mail : philippe.gaucher@thalesgroup.com

## Pour en savoir plus

- Ferroelectric Thin Films in Micro-Electromechanical Systems Applications, Polla D.L., Francis L.F., *MRS Bull.*, juillet 1996, p. 59.
- Thin films for microsensors and Actuators: where do we stand?, Muralt P., *IEEE Trans. Ultrason. and Frequ. Control*, juillet 2000, 47(4), p. 903.
- Organically modified sol-gel precursors for ferroelectric deposition by spin coating, Gaucher P., Hector J., Kurfiss J.C., in *NATO Advanced research workshop, Villa del Mare (Italie)*, in *Science and Technology of Electroceramic thin Films*, éd. Kluwer Acad. Pub. (1995), p. 147.