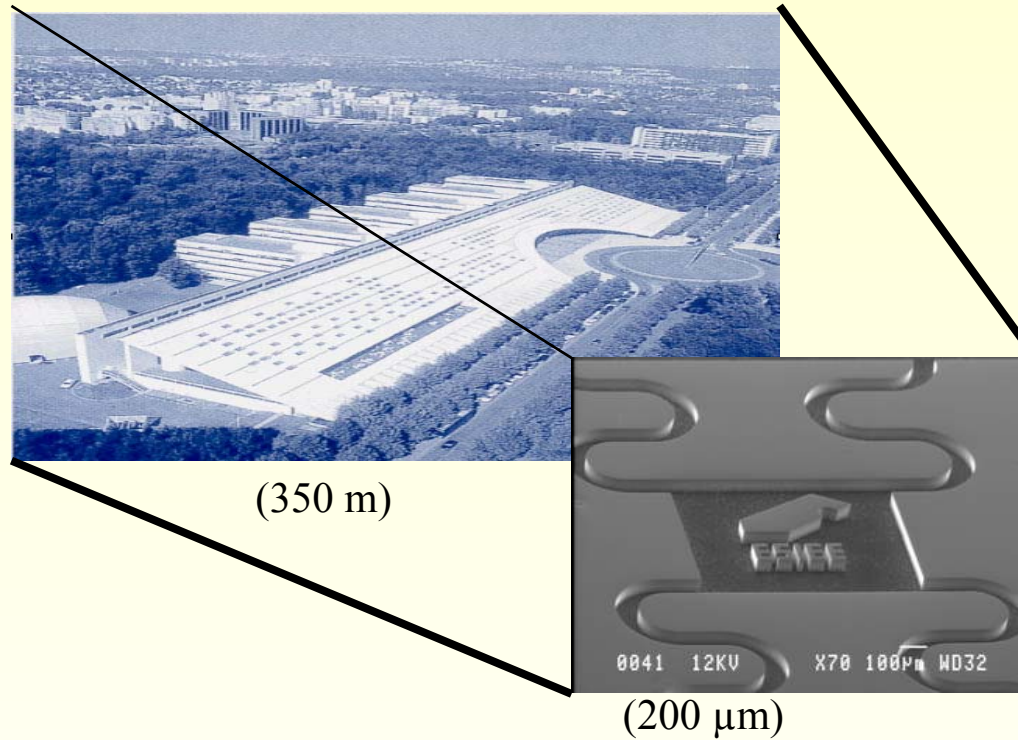


# Qu'est ce qu'un MEMS ?



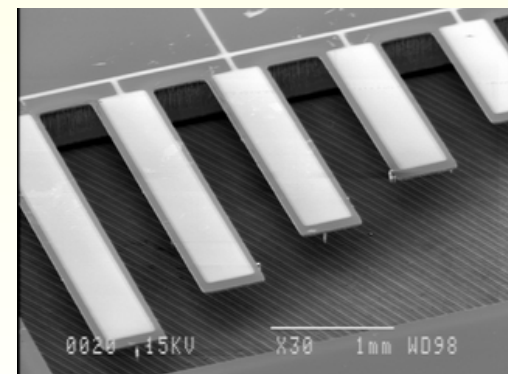
Olivier FRANCAIS / Groupe ESIEE

[o.francais@esiee.fr](mailto:o.francais@esiee.fr)

<http://www.esiee.fr/~francaio>

# Plan

- Définition de la notion de MEMS / Microsystèmes  
  
# Micro-Electro-Mechanical-Systems #
- Famille de MEMS : les applications
  1. Microsystèmes (Capteurs / Actionneurs)
  2. MOEMS
  3. RFMEMS
  4. BIOMEMS



**Réseau de Micropoutres**

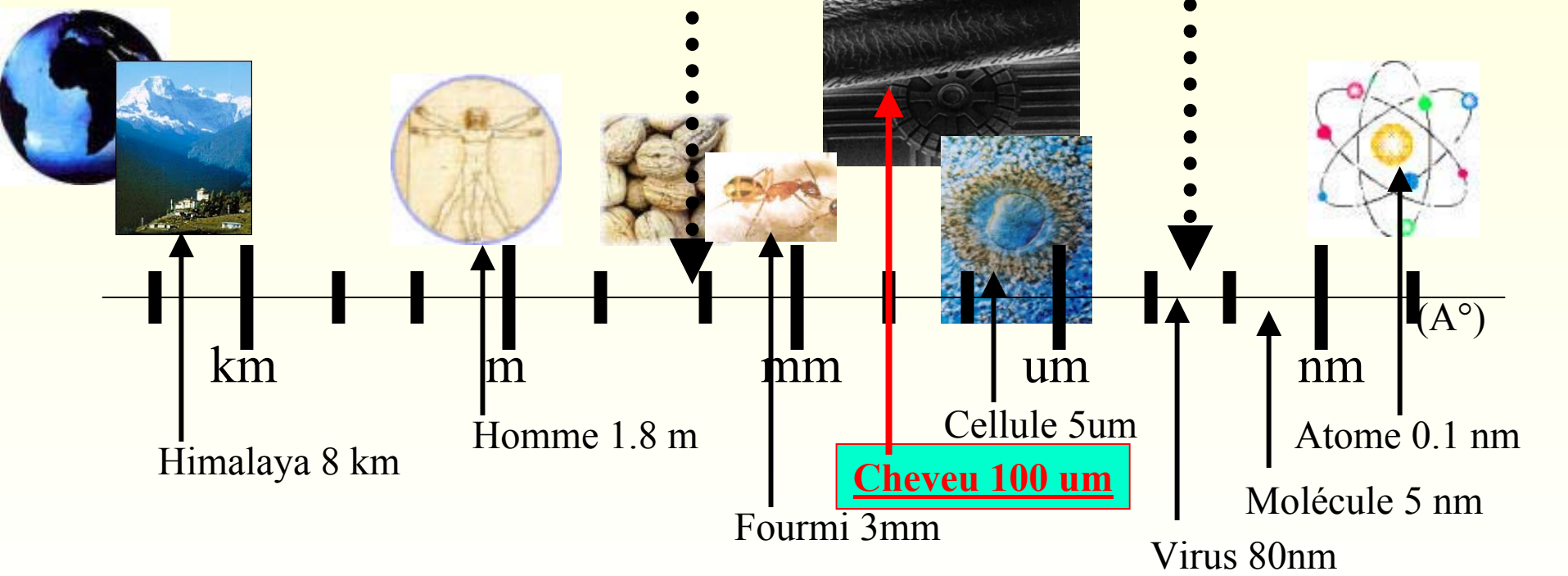
# Ordre de grandeur : les puissances de 10.....



**Par comparaison:**  
 MEMS : du virus (80 nm) à une noix (2 cm)  
 identique  
 d'une noix (2 cm) au sommet de l'himalaya (8km)

**MEMS**  
**Microtechnologie**  
**[cm ; 0.1µm]**

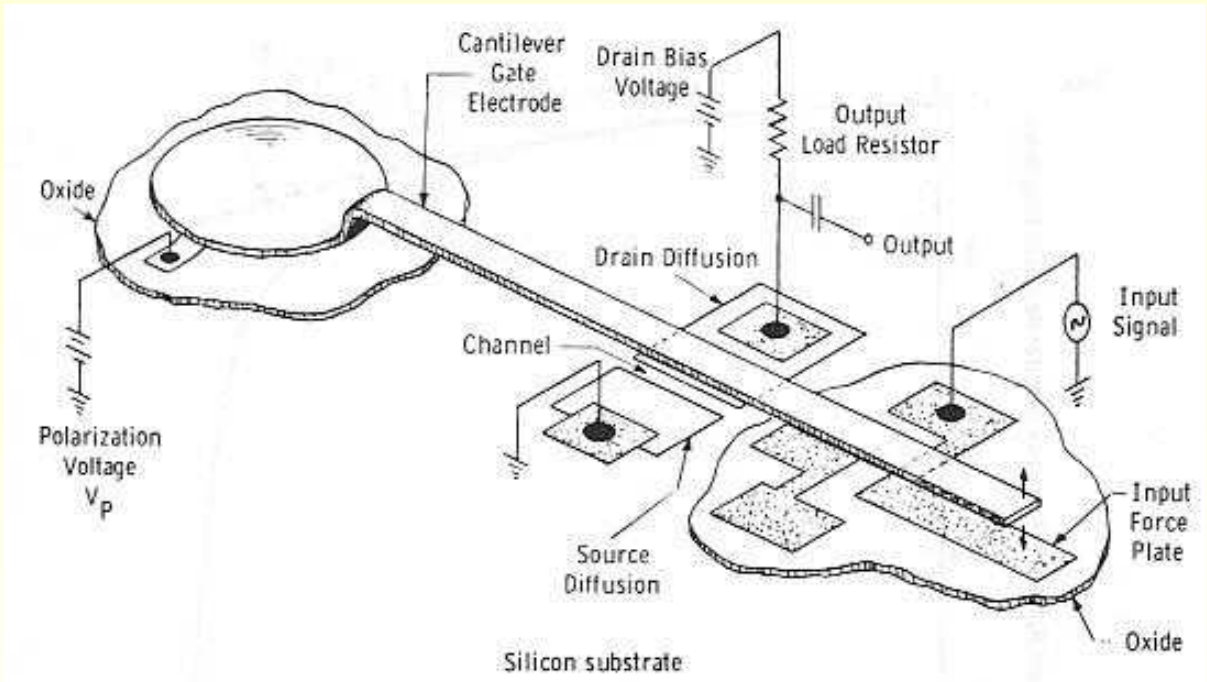
**NEMS**  
**Nanotechnologie**  
**<100nm**



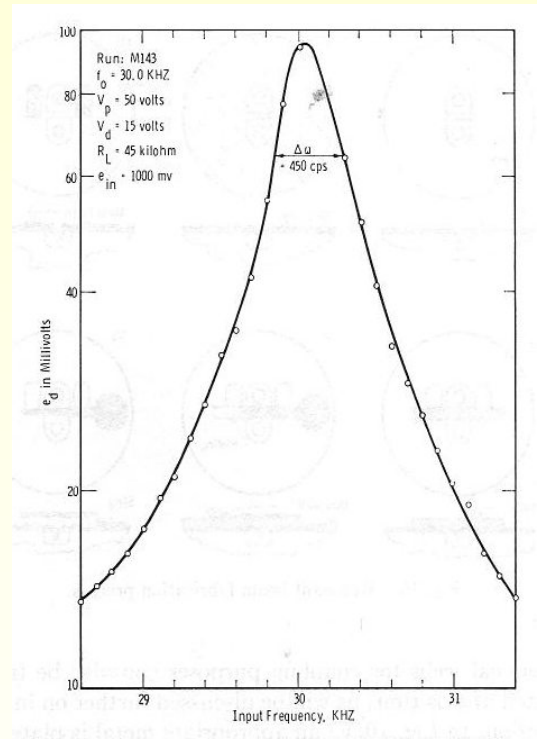
# Le premier MEMS : 1967 !!!!

## Transistor MOS à Grille résonante

[H.C. **Nathanson**, *et al.*, The Resonant Gate Transistor, IEEE Trans. Electron Devices, March 1967, vol. 14, no. 3, pp 117-133.]



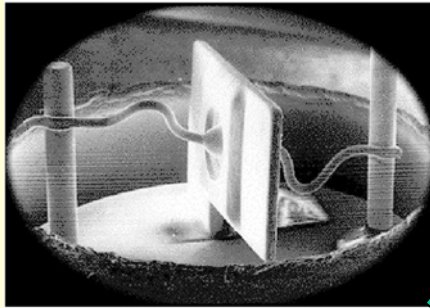
- Structure en Or : Grille – Pont mobile
- Couche sacrificielle en Résine
- Modulation du courant  $I_d$  (MOS)



Réponse en fréquence :  
 $f_o \cong 30\text{kHz}$

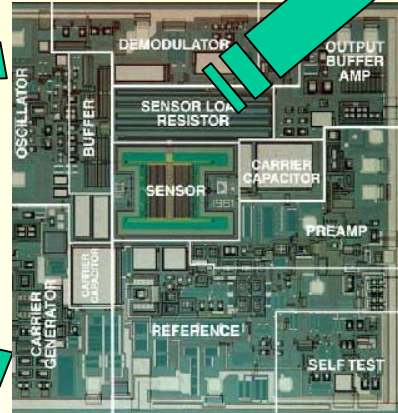
Technologie à l'époque peu compatible avec les C.I.

# Microsystème : une évolution progressive de l'électronique



Transistor au germanium (en 1950)

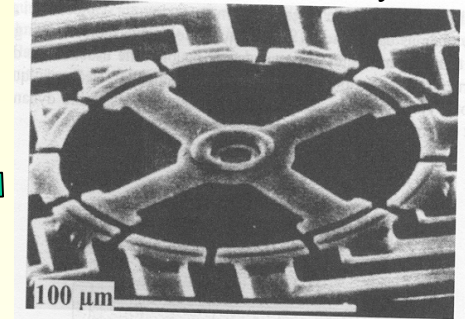
Traitement du signal



Airbag ADXL (Analog Devices 2000)

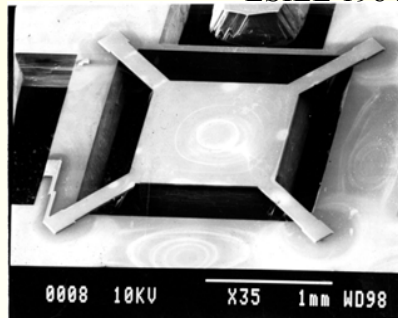
## Microsystème

Berkeley 1988

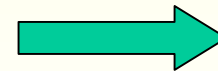


Actionneur

ESIEE 1984



Capteur



## MEMS

Microsystème Electro Mécanique

Utilisation du Silicium pour intégrer des fonctions capteurs et actionneurs avec une électronique associée



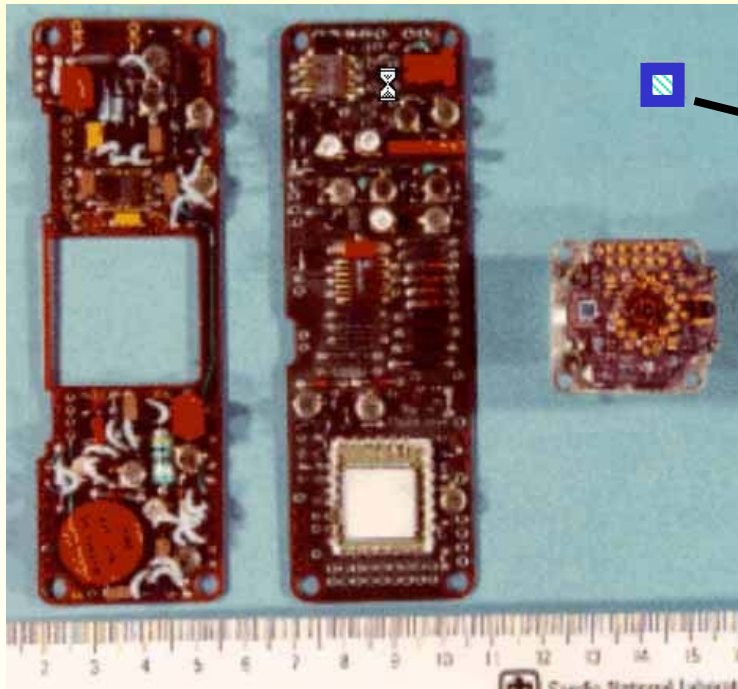
# Objectif Miniaturisation ...

Exemple : l'accéléromètre (Airbag)

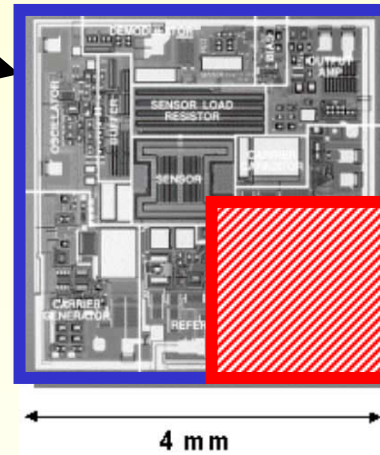
Intégration de fonctions

Réduction de coût

1980 : Carte 50cm<sup>2</sup>

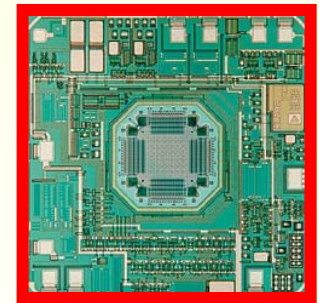


1995 : puce 16mm<sup>2</sup> (1D)



ADXL-50

2002 : puce 3mm<sup>2</sup>



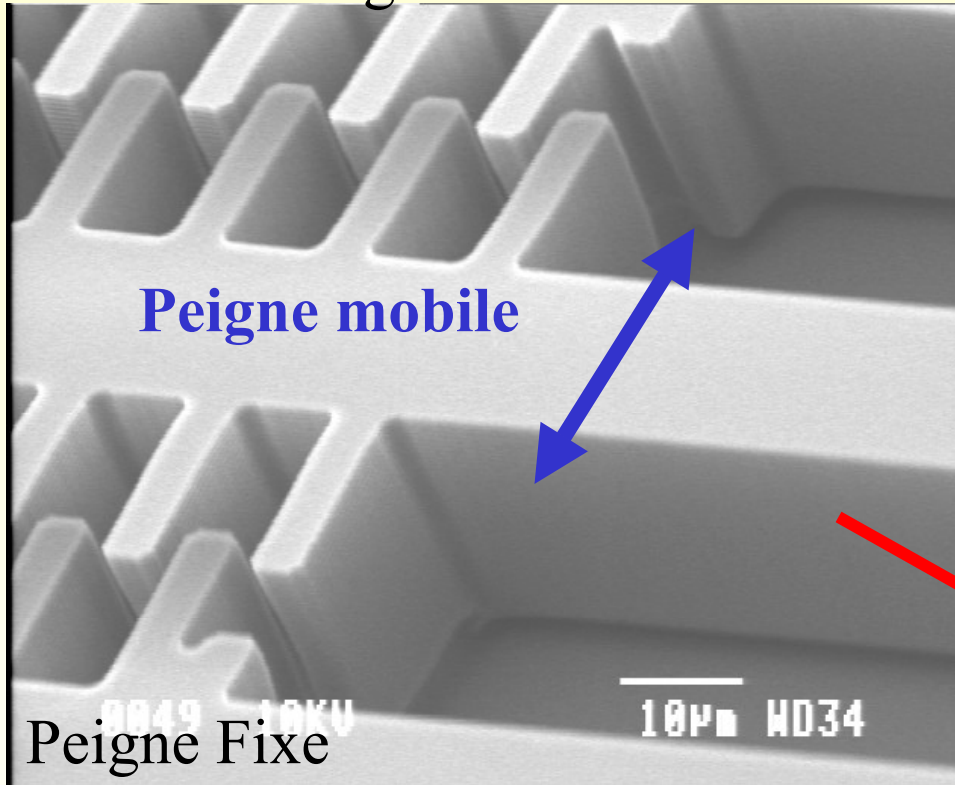
ADXL-202 (2D)

(3 mm<sup>2</sup>)

Technologie issue des C.I.  
(Compatible)

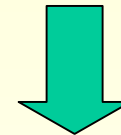
# Exemple de structure MEMS : Peignes interdigitités en Silicium

Peigne Fixe

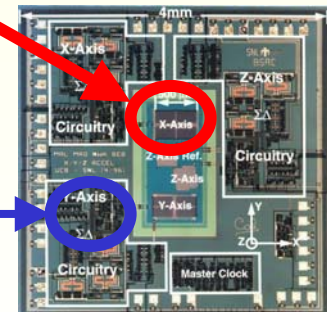


Utilisation :

- Capteur
- Actionneur



- Résonateur MEMS
- Filtre MEMS
- .....



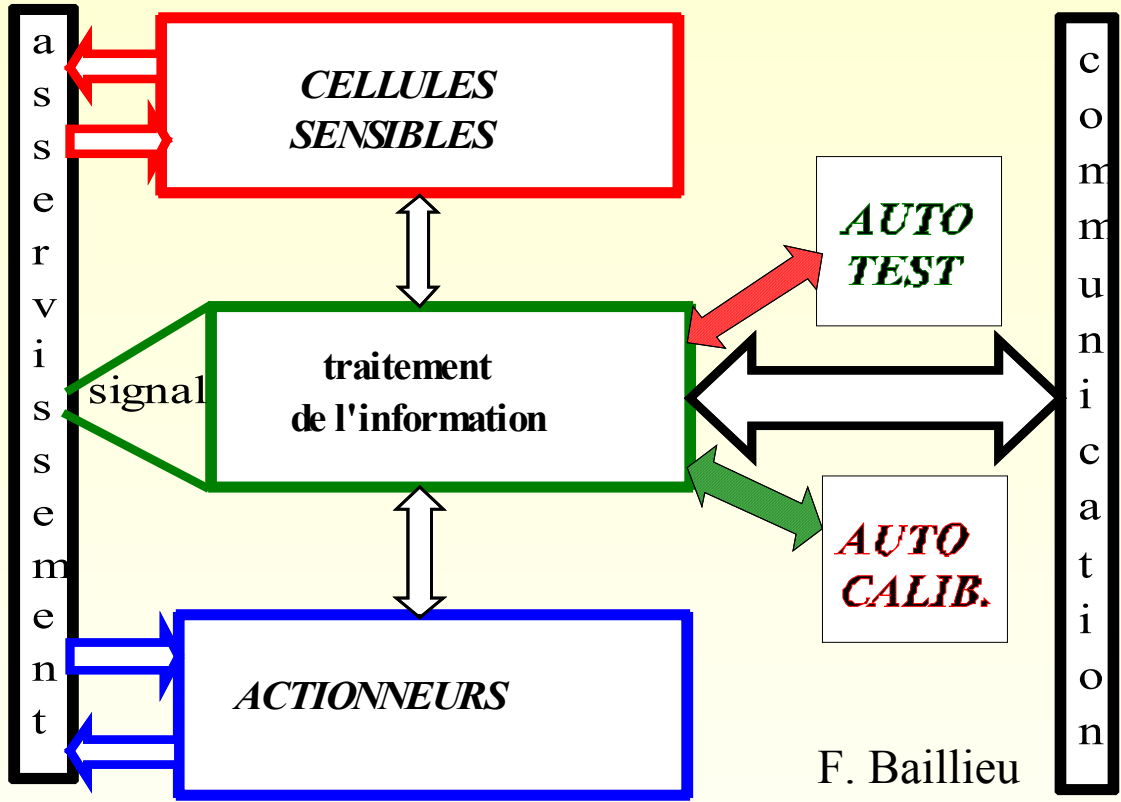
Integration du MEMS avec de l'électronique :



Microsystème

# Concept de Microsystème/MEMS

MEMS associé(s) à de l'intelligence



Vision globale de la chaîne de conception d'un système

Pluridisciplinarité avec un souci d'intégration

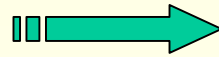


# L'explosion des applications...

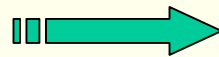
Initialement Technologie issue des Circuits Intégrés pour élaborer des structures micro-mécaniques → MEMS  
(associées à de l'électronique) → ( Microsystèmes)

## Désormais, « outils » aux services des applications

- Mécanique
- Optique
- Télécom
- Biologie
- Fluidique
- Chimie



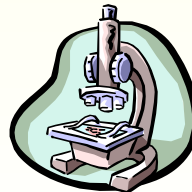
**MOEMS**



**RF MEMS**

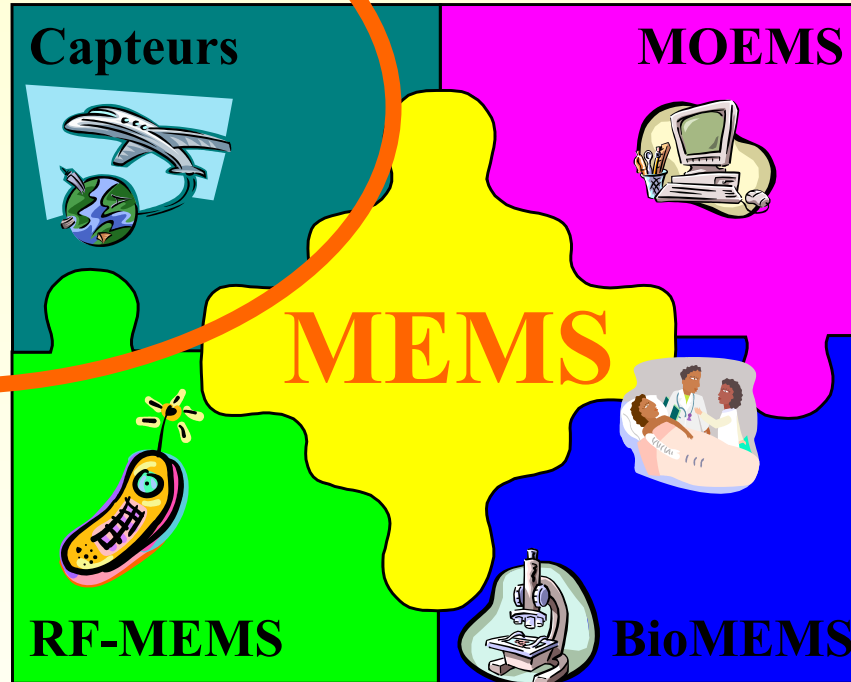


**Bio-MEMS**



# Applications typiques

- Capteurs de pression
- Centrale d'inertie
- ...

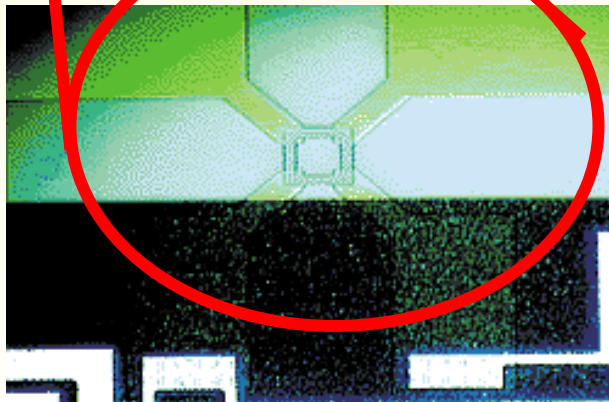
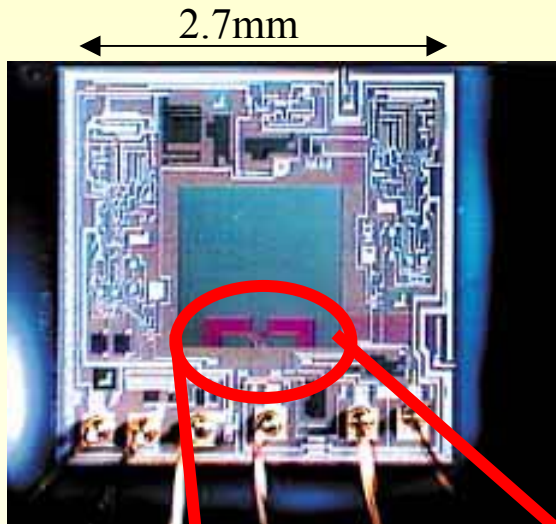
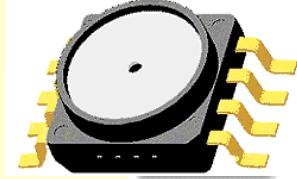


- Micromiroirs
- Switchs optiques
- Cavité optique

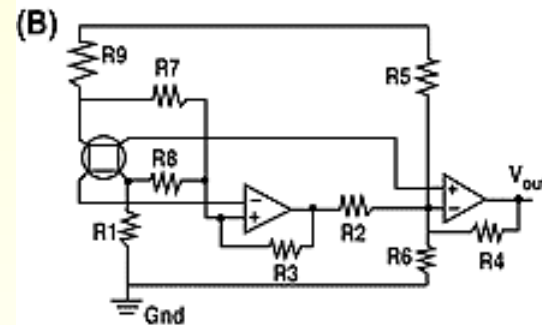
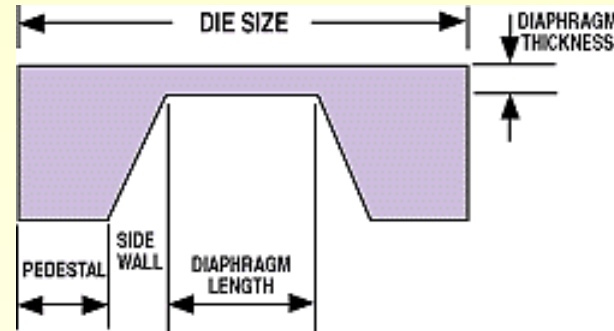
- Switch RF
- Composants passives variables
- Résonateur
- Filtres, antennes

- Puce à ADN
- Micro - Réacteur chimique
- Microvalve / Micropompe

# Ex: Capteur de pression intégré Motorola (2000)



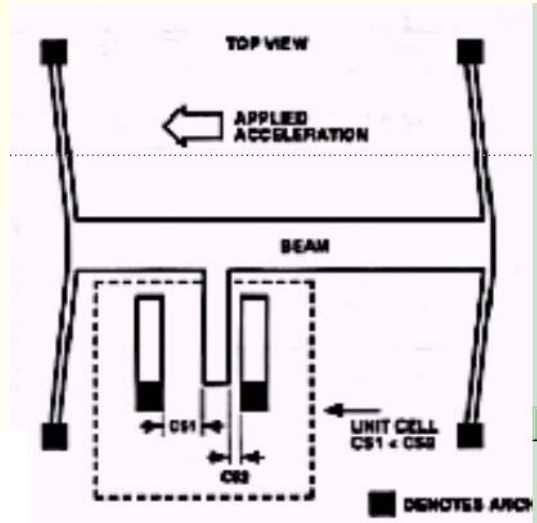
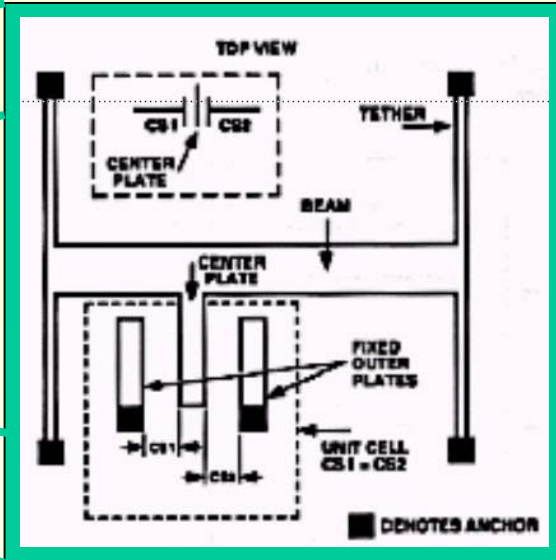
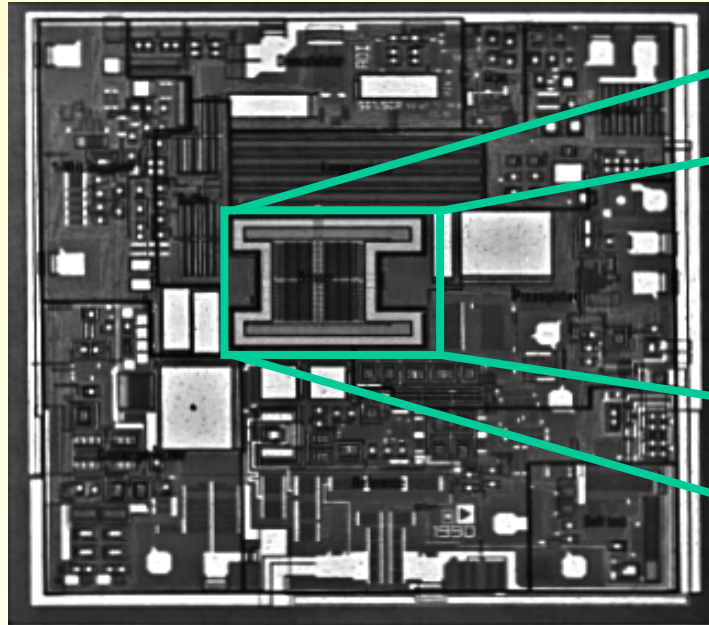
X-ducer sensor



Capteur 100kPa  
Amplification et compensation intégrées  
Ajustement des résistances par laser  
Sortie 0.2 à 4.7V avec une alim. 5V

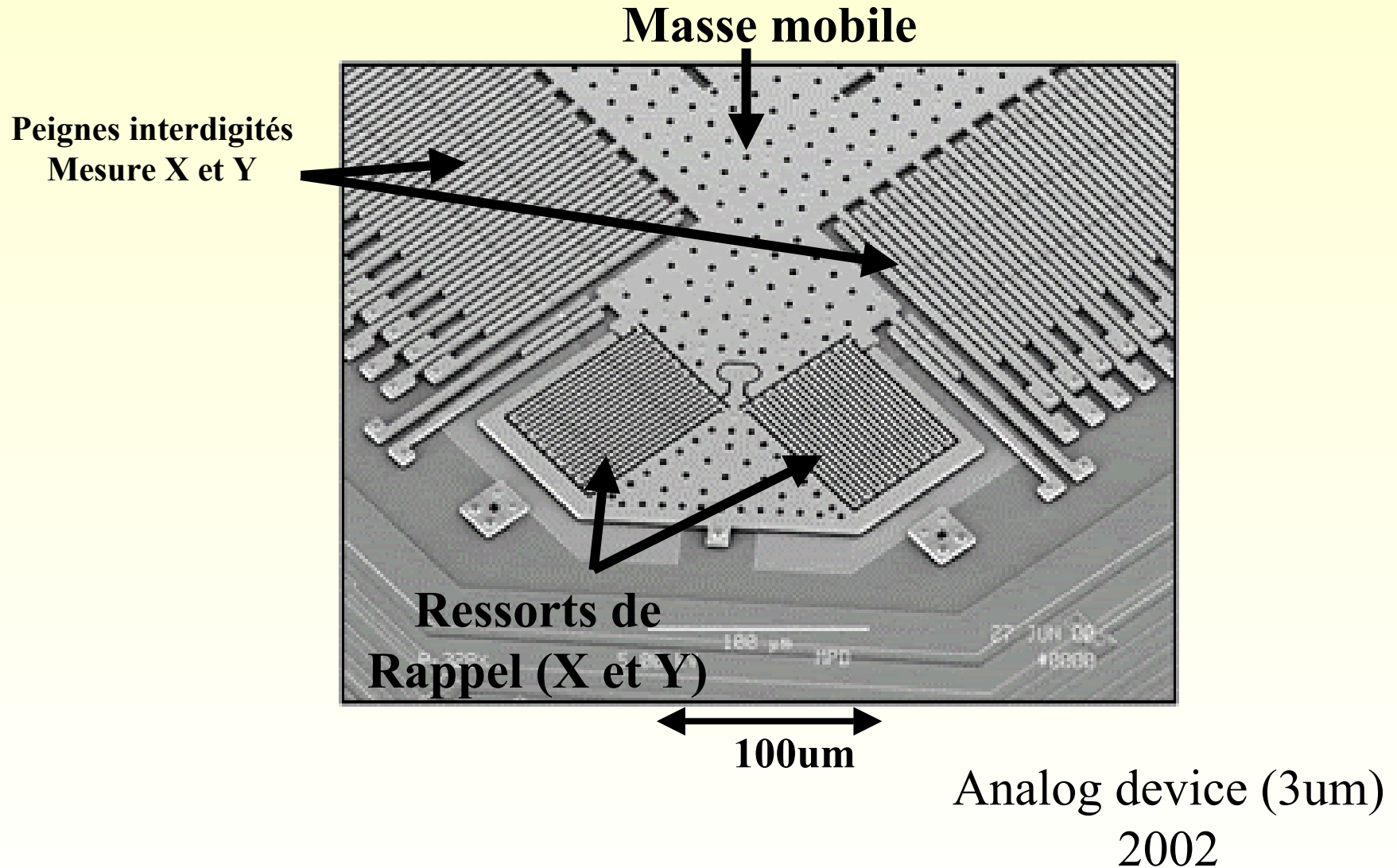
# Ex : Accéléromètre capacitif (ADXL150)

(1995)



- $\pm 50g$  (10mg)
- Polysilicon MEMS & BiCMOS
- Puce 4x4mm
- Mesure capacitive différentielle

# Accéléromètre capacitif en peigne

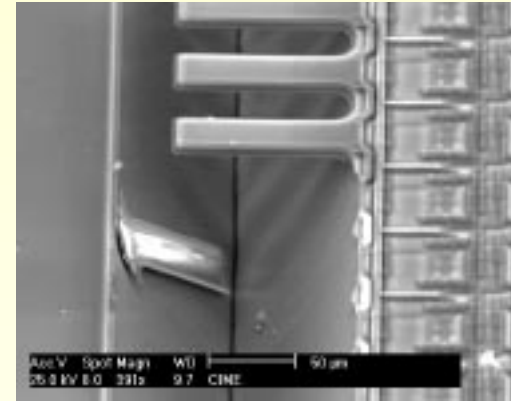
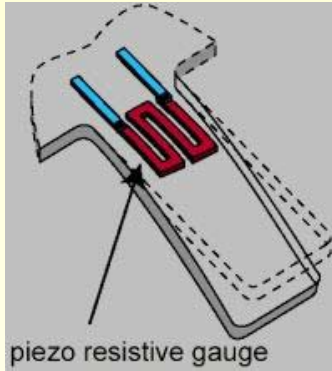




# Vers le 'Smart' MEMS : Microsystèmes...

- Cas capteur de contrainte

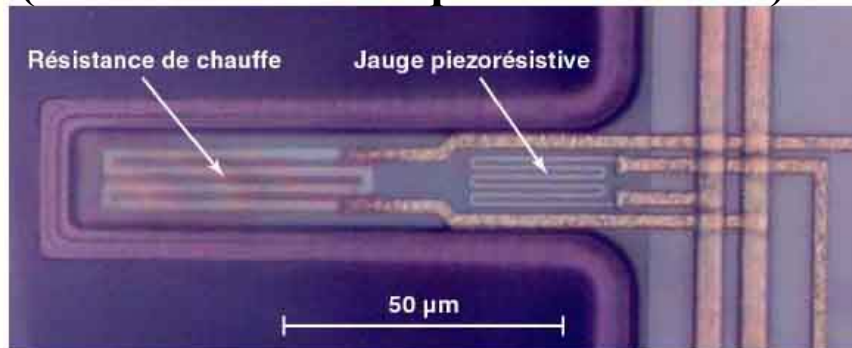
- Maintenance sur la jauge ?



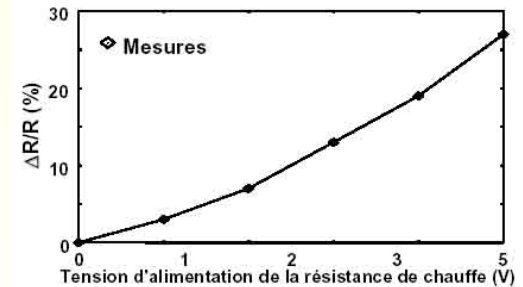
Structure fissurée / cassée

- **Smart MEMS :**

**Émulation de stimulations mécaniques :  
(stimulation thermique / effet bilame)**

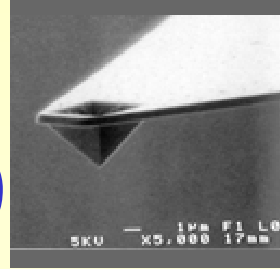


Fabien Parrain (TIMA/IEF)



Auto-test / Auto calibration

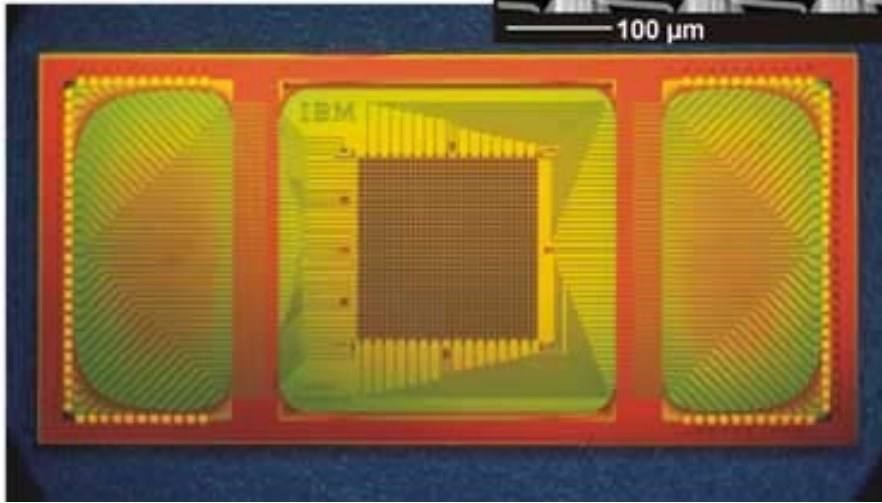
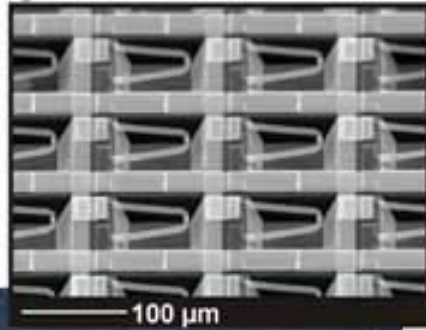
# Application AFM : Mémoire Haute Densité (IBM)



## Fabricated "MILLIPEDE" Chip

Integration in a  $7 \times 14 \text{ nm}^2$  chip size of:

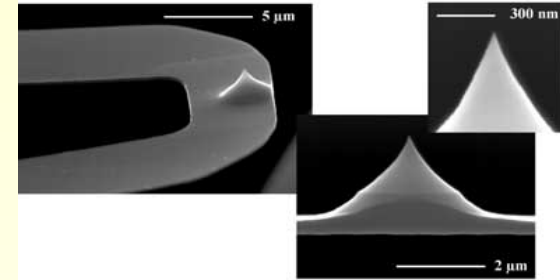
- An array of  $32 \times 32$  (1024) Cantilever
- Approaching, leveling sensors (4)
- Thermal sensors (4)
- Heaters



IBM Property

(400 Gb/in<sup>2</sup>)

## Microscopie à champ proche



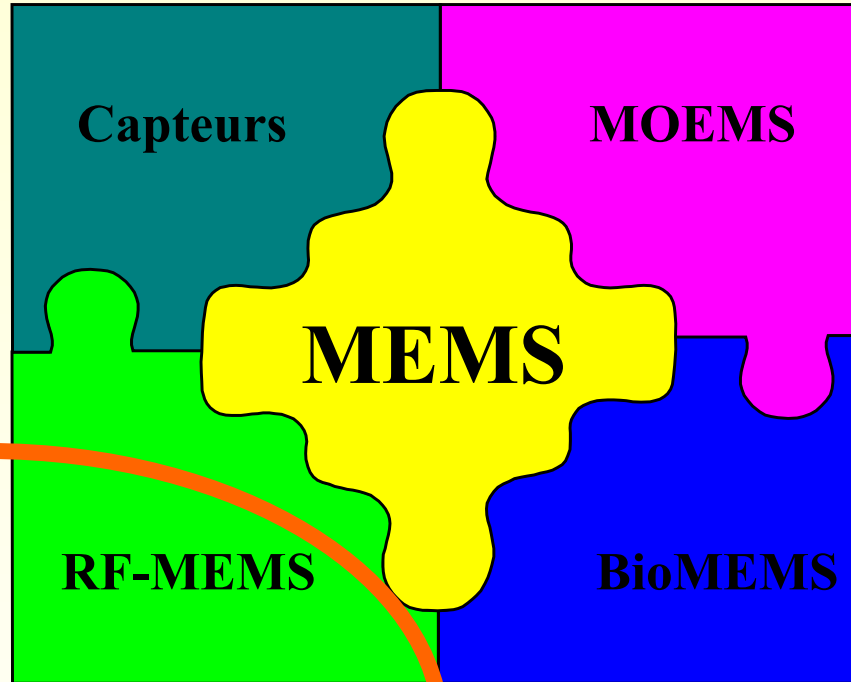
Tip Height:  $\sim 1.7 \mu\text{m}$   
 Tip Height Homogeneity in an Array:  $\pm 50 \text{ nm}$  ( $\pm 0.5\%$ )  
 Tip Radius:  $< 20 \text{ nm}$

<http://www.zurich.ibm.com/st/nanoscience/cantilever.html>

# Applications typiques

- Capteurs de pression
- Centrale d'inertie
- ...

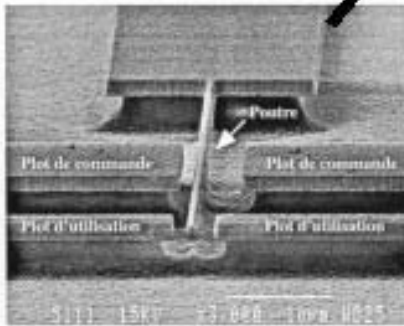
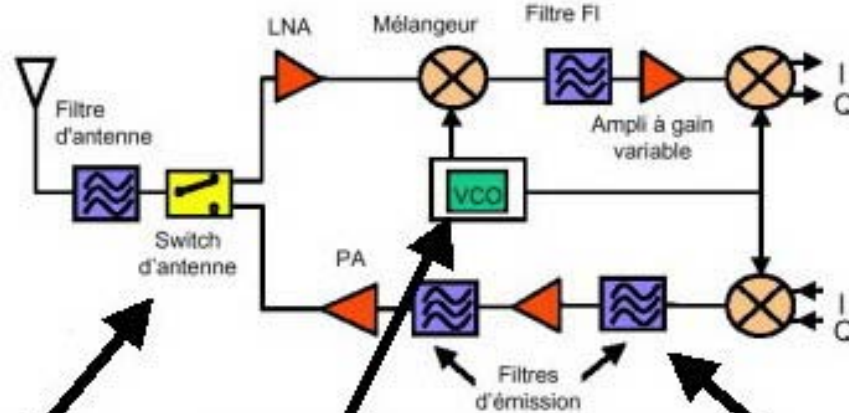
- Micromiroirs
- Switchs optiques
- Cavité optique



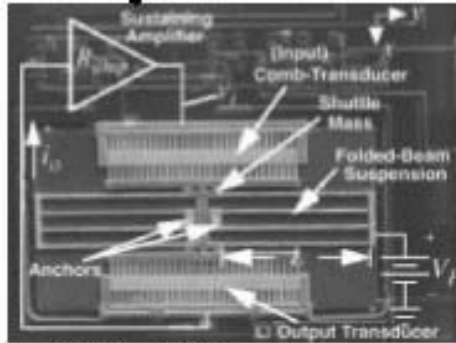
- Switch RF
- Composants passives variables
- Résonateur
- Filtres, antennes

- Puce à ADN
- Micro - Réacteur chimique
- Microvalve / Micropompe

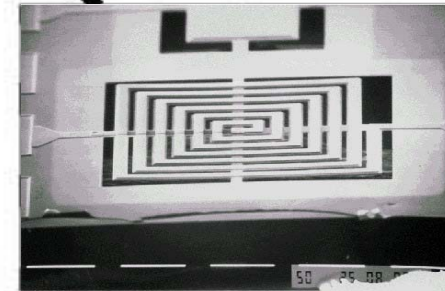
## Chaîne d'Emission / Réception :



Switch



Filtre/Résonateur

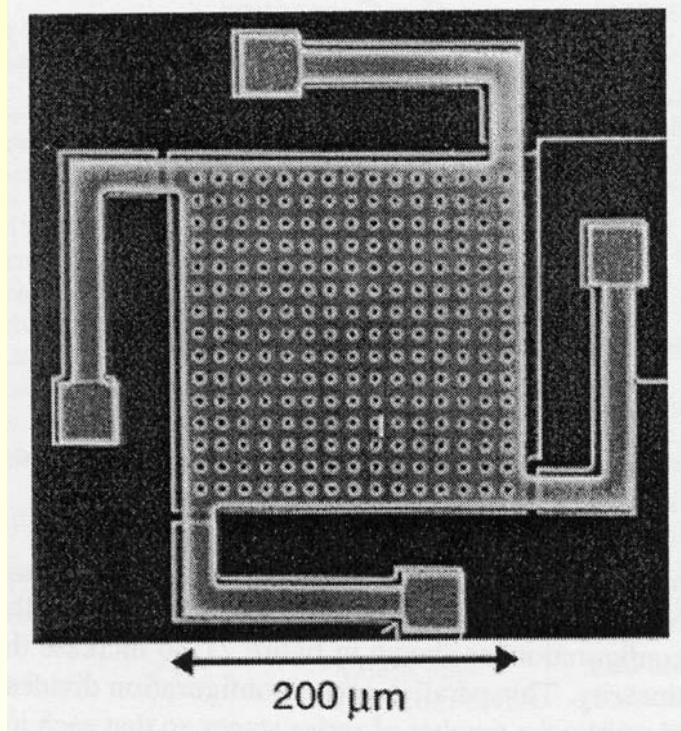


Composants passifs intégrés

Insertion de la technologie MEMS

# Applications RF : Capacité variable

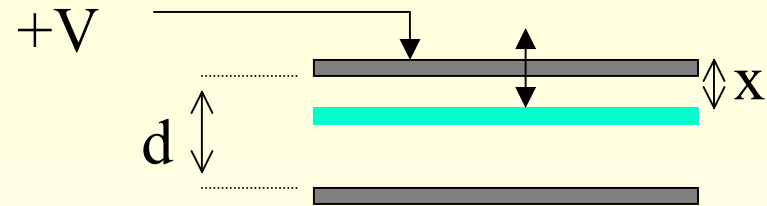
Vue de dessus



© Young & Boser, 1996, Univ. Berkeley  
(1 to 5 pF @ 1GHz, tension de commande < 5 V)

Usinage de surface

- Deux électrodes en vis à vis  $C = \epsilon \frac{S}{d - x}$



- Déplacement de l'électrode mobile par force électrostatique

$$F(x) = \frac{\epsilon S V^2}{2(d - x)^2}$$

Composants passifs variables **intégrés**

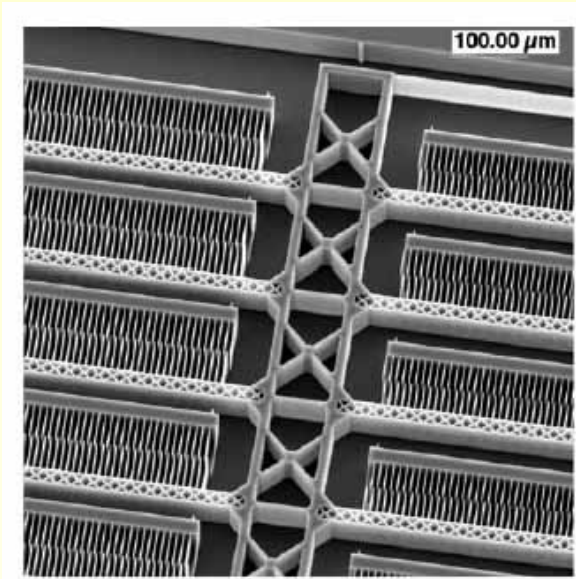
Filtre commandable

Oscillateur paramétrable

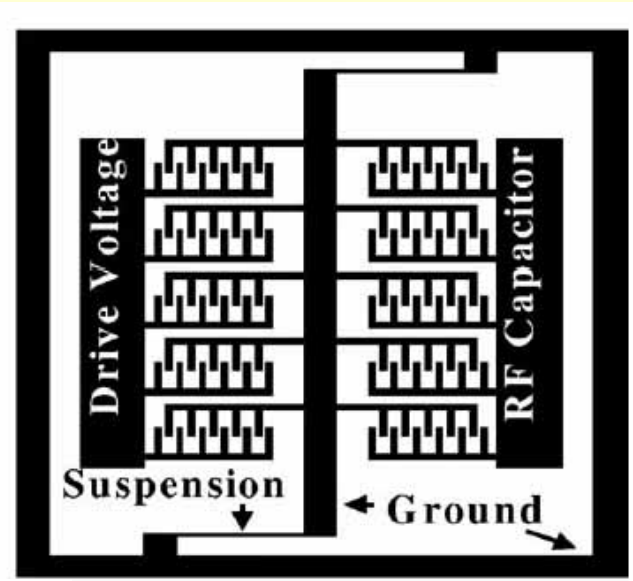
...



# Exemple de Capacité variable

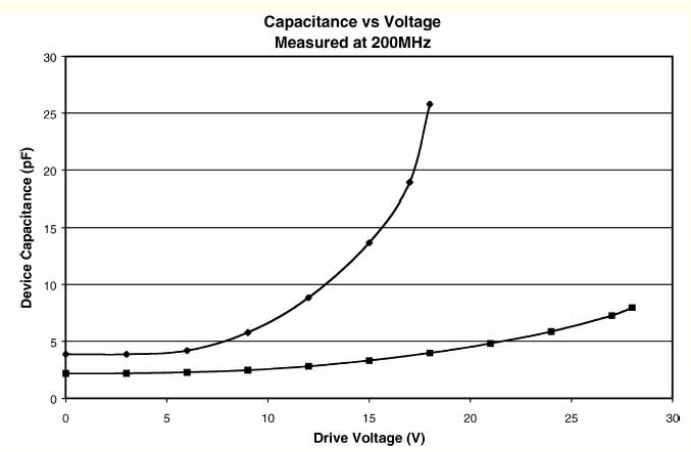


Usinage en volume



Capacité variable :

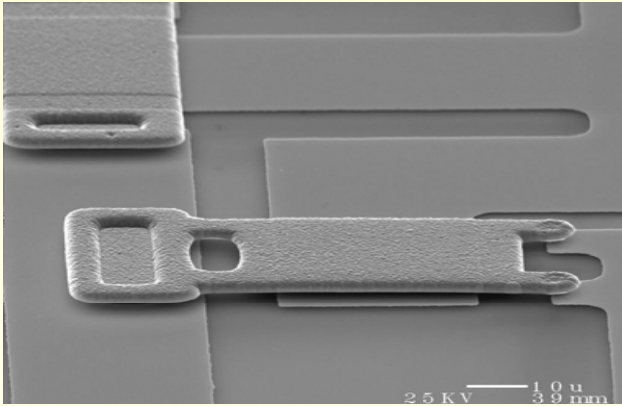
- 40 μm d'épaisseur, SOI
- 2 à 30 pf (500Mhz)
- Q : 100 -> 500



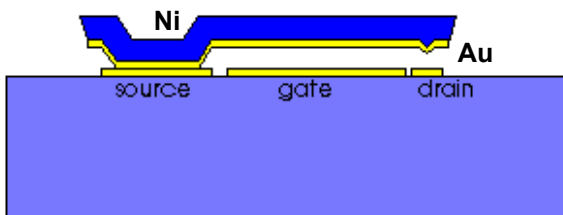
A High Q, marga tuning range MEMS capacitor for RF filter  
 Robert L. Borwick  
 Rockwell Scientific Company, CA, USA  
 S&A, A103 ( 2003) 33-41

# Micro-interrupteur mécanique : Switch RF

- Micro-interrupteur poutre :  
contact ON/OFF

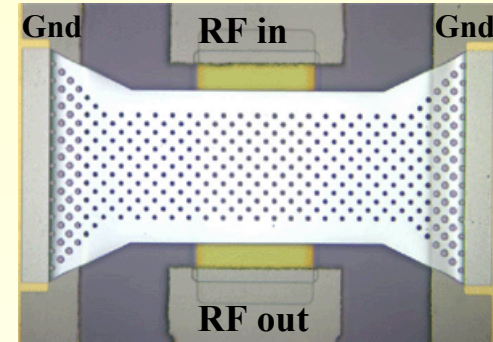


Majumder S., McGruyer N.E., « Measurement and modeling of surface micromachined electrostatically actuated microswitches », Tech. Digest, Transducers 1997, Chicago, June 1997, pp 1145-1148



Poutre :  $L/l/e$  : 60 / 30 / 2  $\mu\text{m}$   
Tension d'actionnement  $V \approx 30 \text{ V}$   
 $R_{DC} < 1 \Omega$

- Micro-interrupteur pont  
(application micro-onde)



Z. Yao, S. Chen, S. Eshelman, D. Denniston, and C. Goldsmith,  
"Micromachined low-loss microwave switches,"  
*IEEE J. MEMS*, Vol. 8, no. 2, pp. 129-134, 1999.

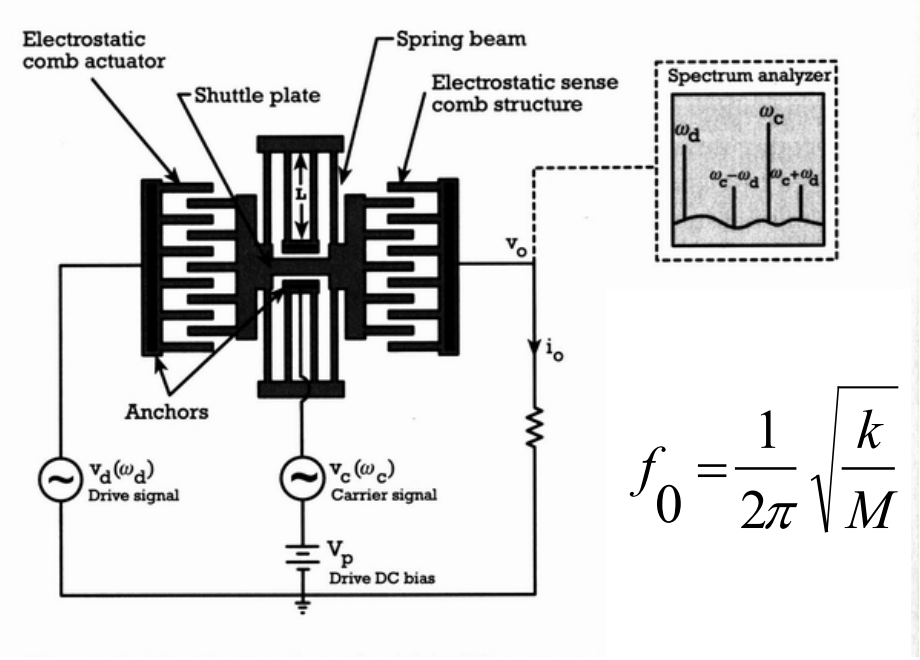
Faibles pertes d'insertions ( $< 0.1 \text{ dB}$ )

Faible consommation

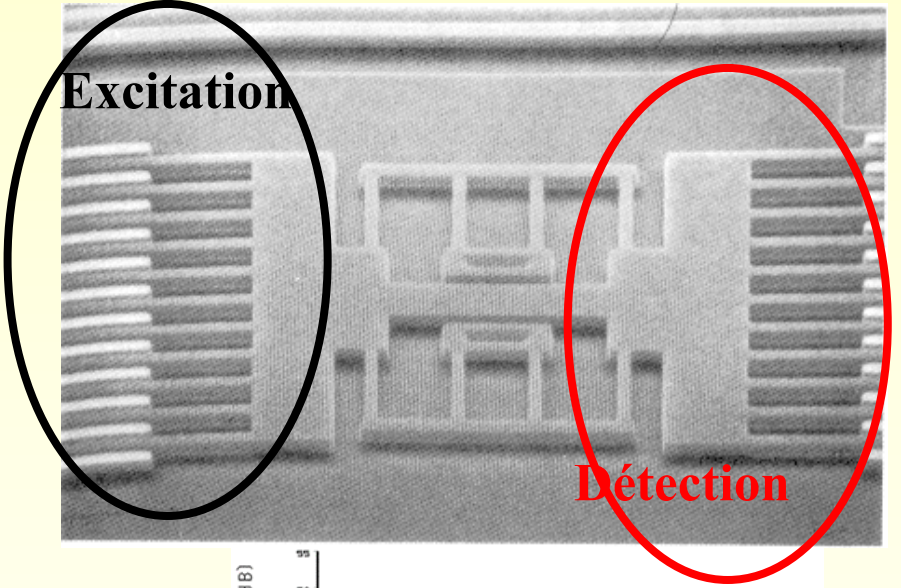
Bonne linéarité

...

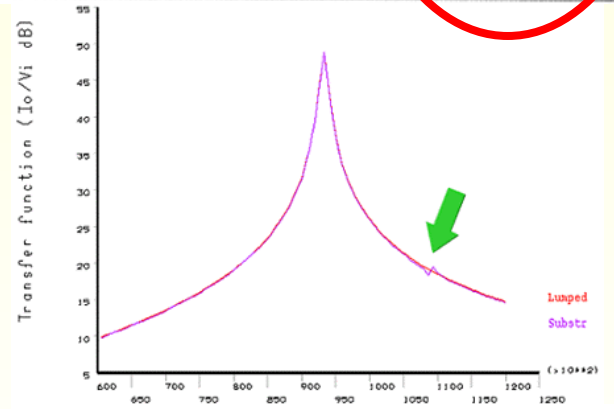
# Micro-résonateur / Micro-mélangeur / Filtre



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$



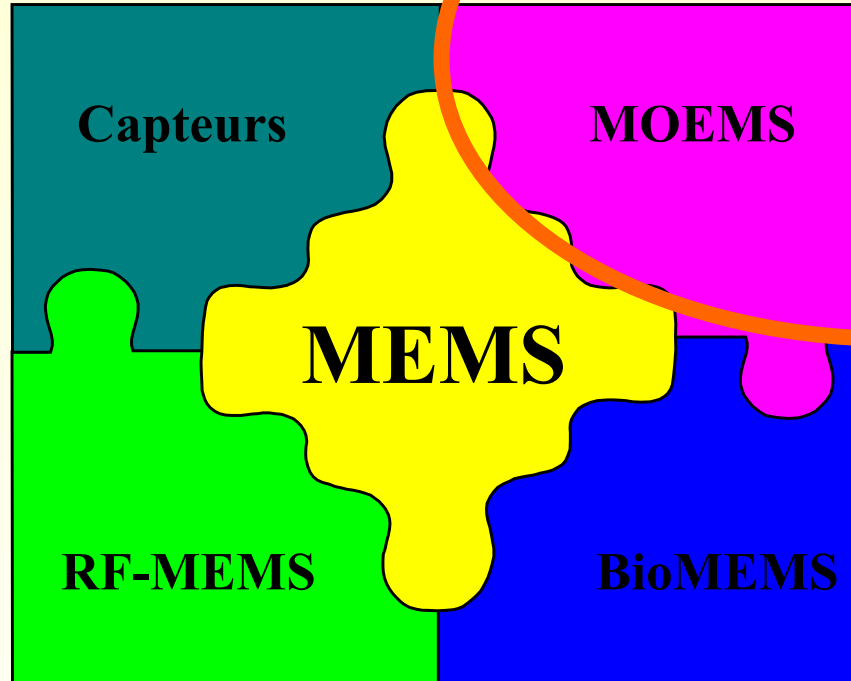
- Structure en peigne résonnante
- Fréquence contrôlable par polarisation (VCO)
- Modulation possible par polarisation avec porteuse -> Multiplieur



Réponse en fréquence :  
**Q > 1000 @ 100-500 khz**

# Applications typiques

- Capteurs de pression
- Centrale d'inertie
- ...



- Micromiroirs
- Switchs optiques
- Cavité optique
- Scanners

- Switch RF
- Composants passives variables
- Résonateur
- Filtres, antennes, Radar

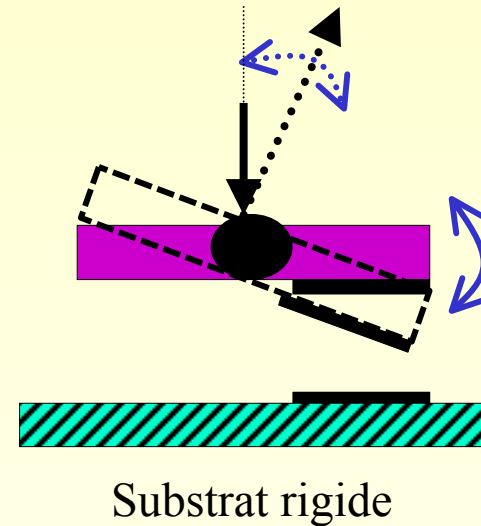
- Puce à ADN
- Micro - Réacteur chimique
- Microvalve / Micropompe

# Application Optique : Micro-miroir

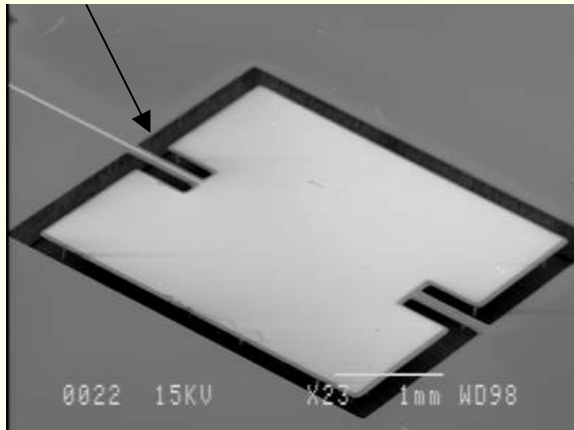
## Micro miroir inclinable

Déflexion d'un faisceau optique (laser,...)

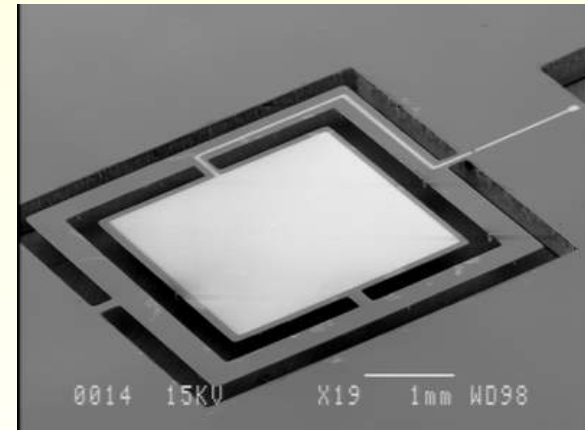
→ Cadre en torsion autour d'un axe



Axe de torsion



Axe de torsion 1D



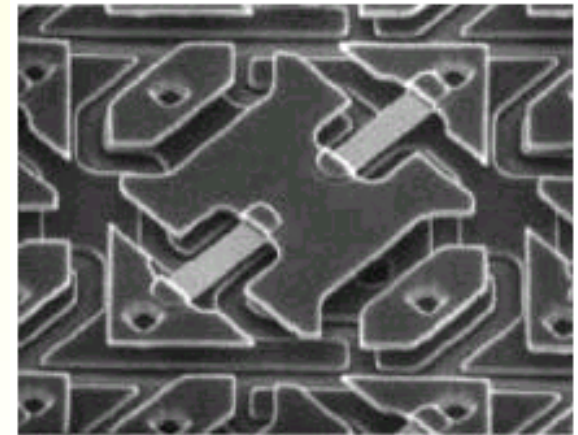
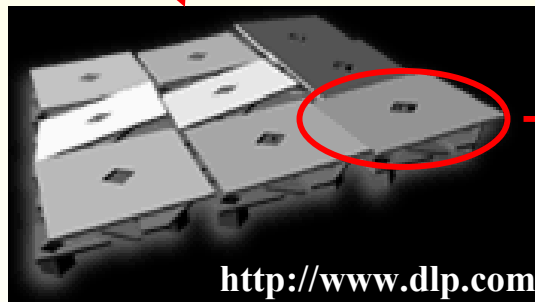
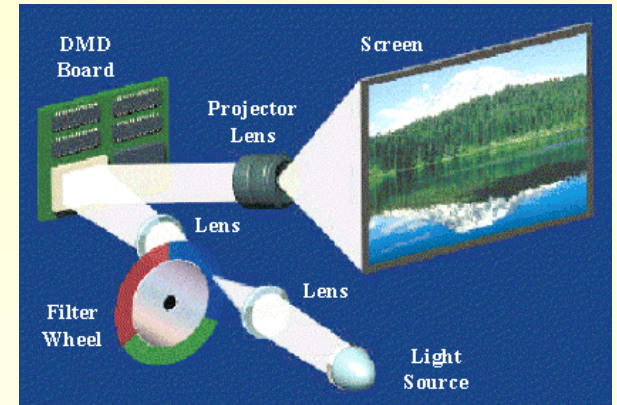
Axe de torsion 2D



# Le système de projection d'images de Texas-Instruments (1995)



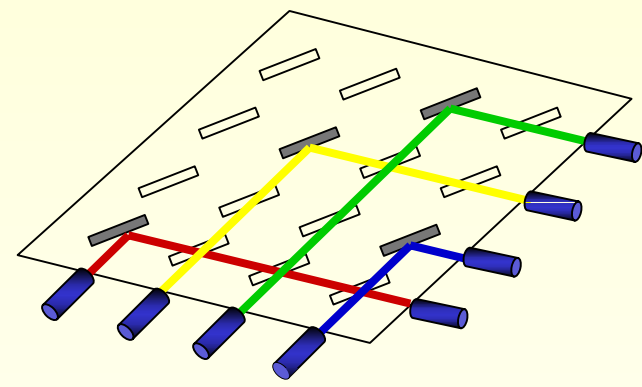
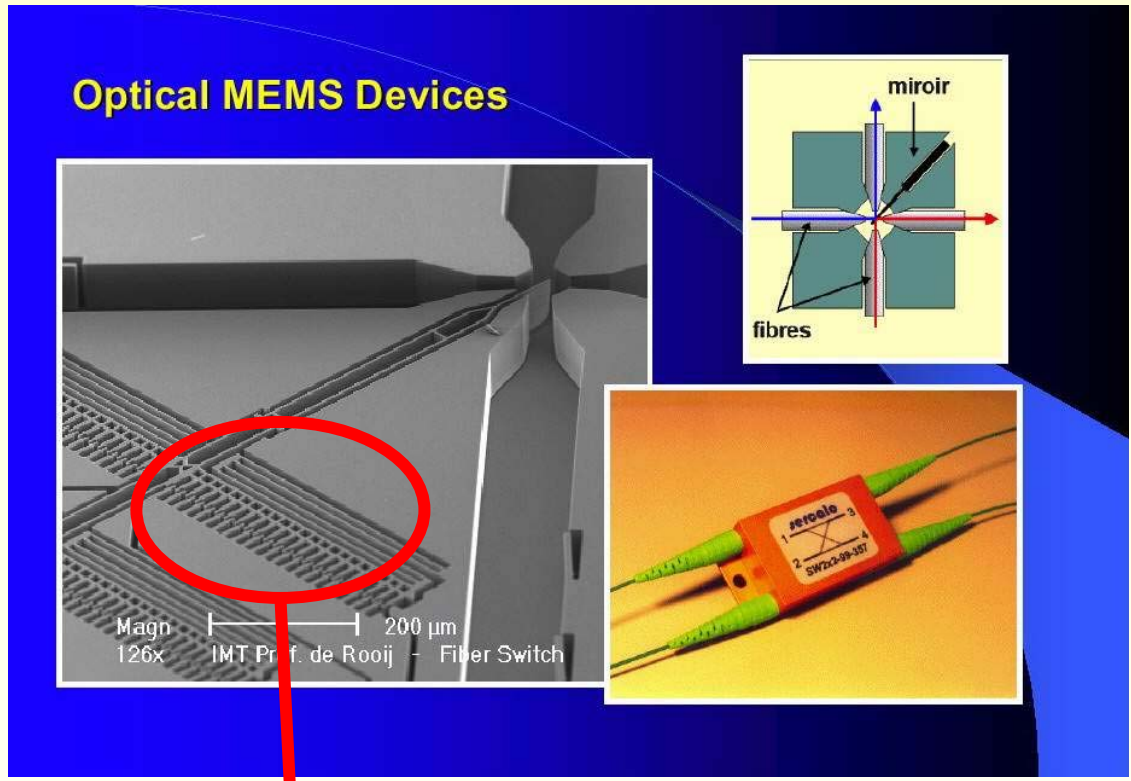
DMD : Digital Mirror Devices (MOEMS)



➤ 1 DMD = Matrice de 1280 x 1024 micro-miroirs de 15 micromètres de côté

Micro-usinage de surface  
Etude démarrée en 1977...

# Switch optique (2D)



Matrice de Switch

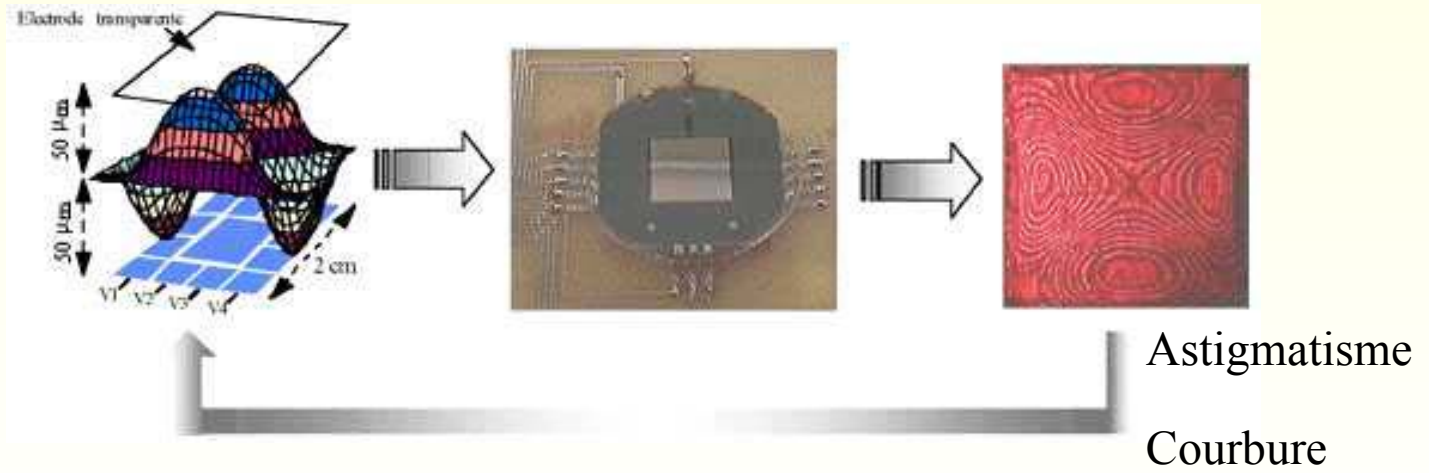
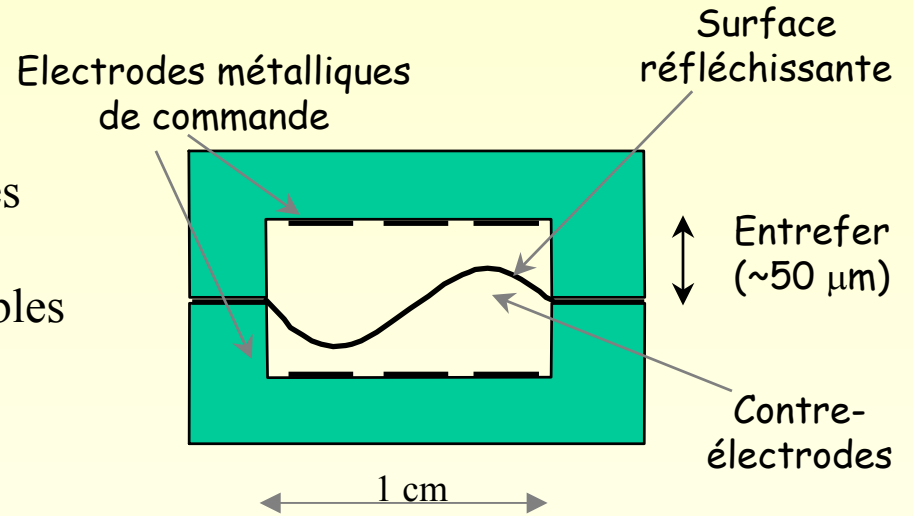
Sercalo (1999)

Commande par structure en peigne  
Actionnement Electrostatique

# Micro-miroirs Actifs

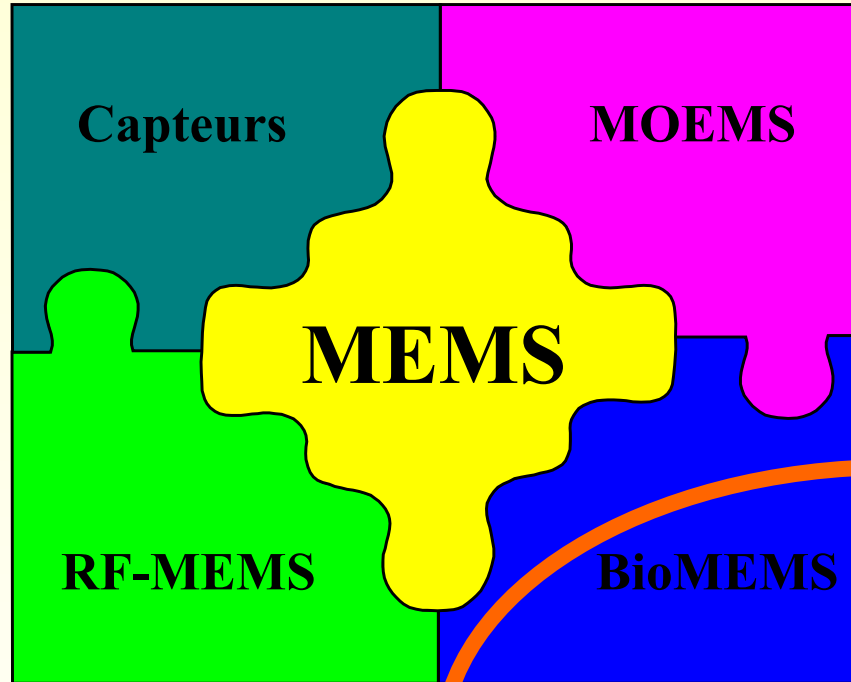
## Application :

- Amélioration de la résolution des télescopes
- Réalisation de motifs optiques programmables



# Applications typiques

- Capteurs de pression
- Centrale d'inertie
- ...



- Micromiroirs
- Switchs optiques
- Cavité optique
- Scanners

- Switch RF
- Composants passives variables
- Résonateur
- Filtres, antennes, Radar

- Puce à ADN
- Micro - Réacteur chimique
- Microvalve / Micropompe

# Tentative de définition des Bio-MEMS



- Systèmes miniaturisés, réalisés à partir des **micro- et nanotechnologies** issues de la micro-électronique (Circuits Intégrés)
- Destinés à réaliser des expérimentations en **biologie / chimie**

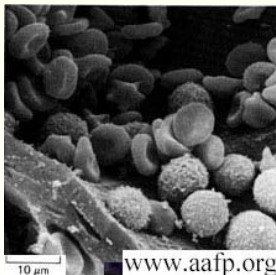
**BIOLOGISTES**

**Micro-technologues**

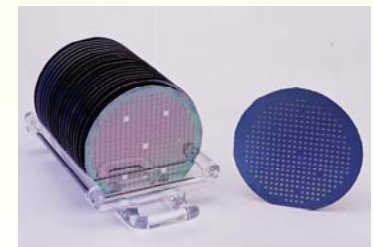
- Silicium
- Verre
- Polymère

Matières biologiques  
Applications biologiques

**INGENIERIE**  
Réalisation de  $\mu$ -composants

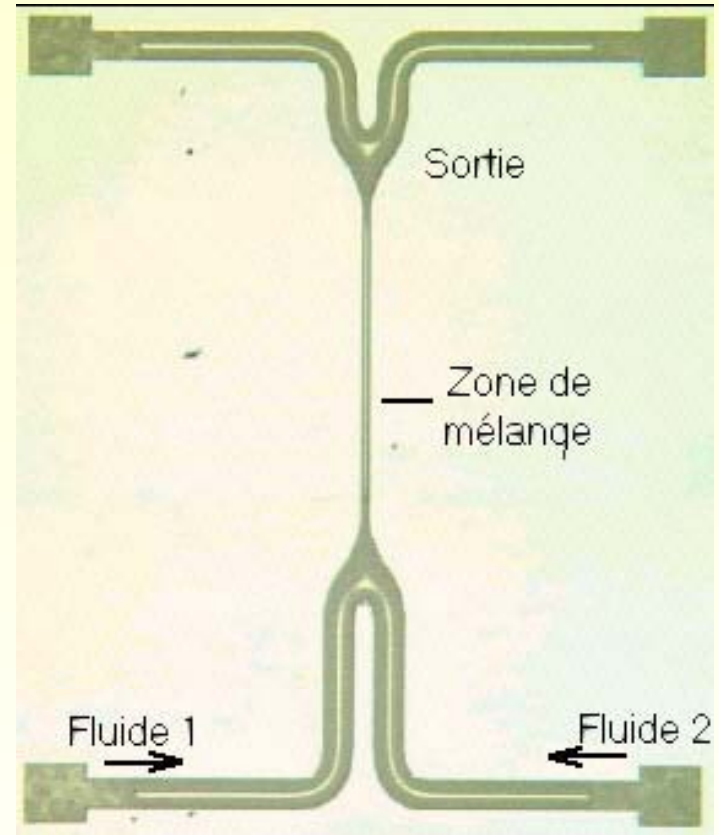
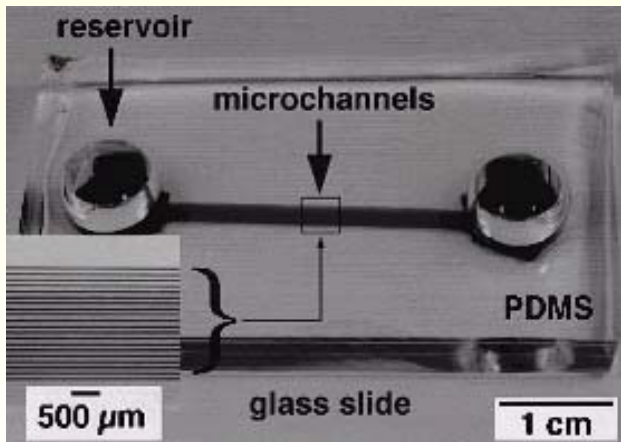
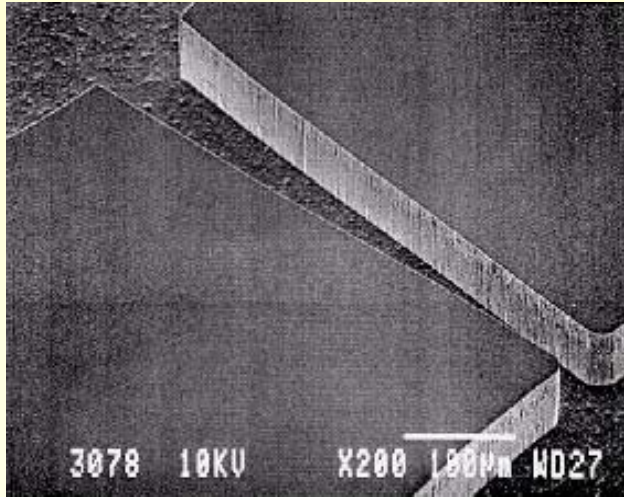


**Nouvelles possibilités  
expérimentales**



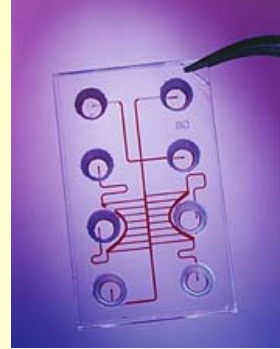


# Structures de base : Microcanaux / Micromélangeurs

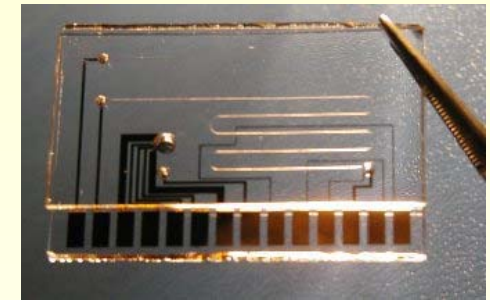
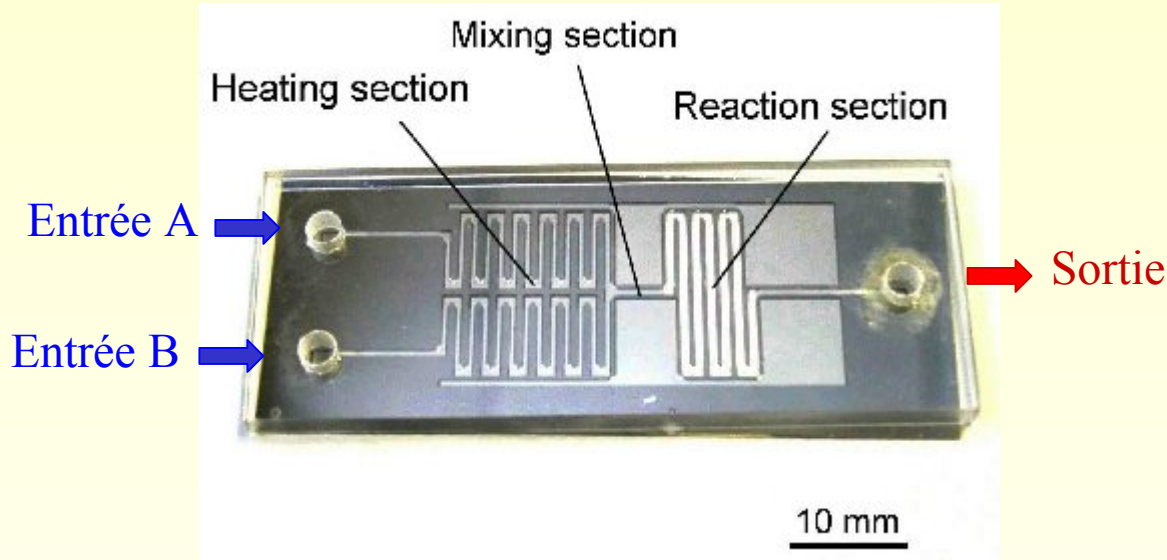


Micro-mélangeur

## Exemple d'application: Micro-réacteur



Caliper Tech.



### Quelques **avantages de la miniaturisation** :

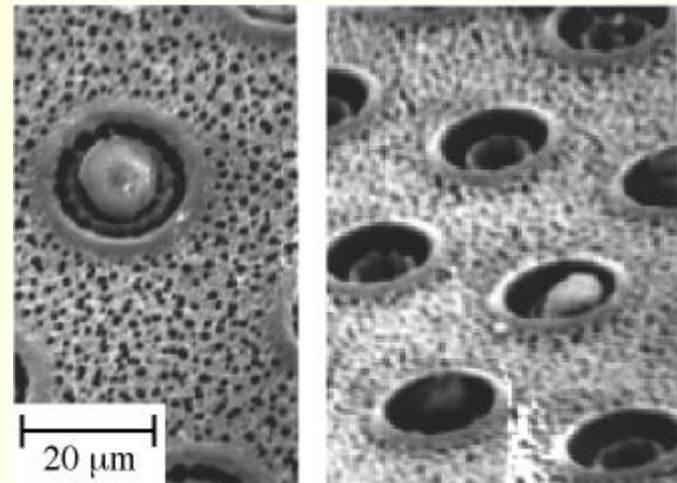
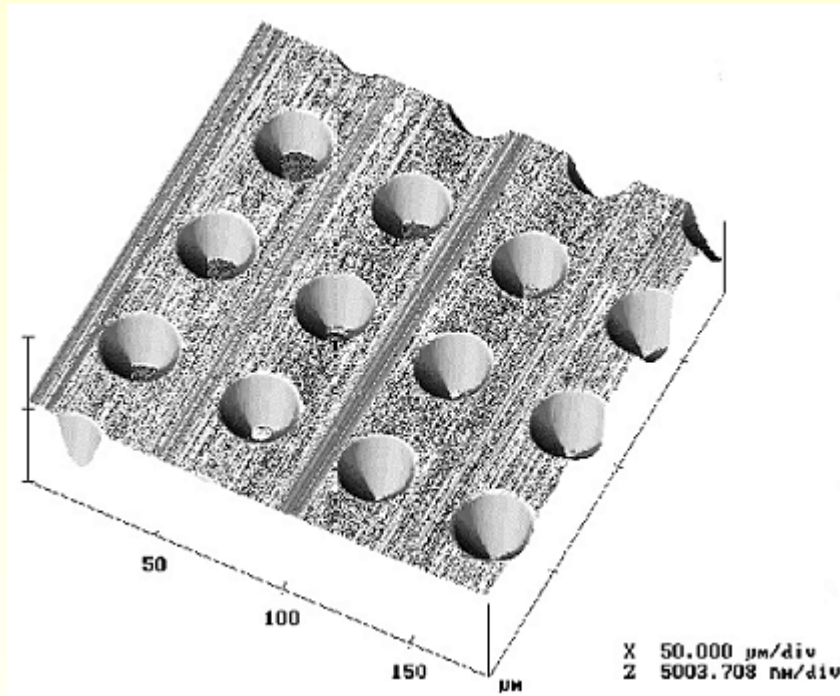
- Economie des échantillons et produits de réaction (nl; pl)
- Réactions plus rapides (~~Hr~~ → sec ; ~~Jour~~ → Minute)
- Traitements parallèles et en très grand nombre, coût réduit,...

### Quelques **fonctionnalités possibles** grâce à des réseaux d'électrodes :

- Chauffage, Déplacement, Piégeage électrostatique (de cellules...)

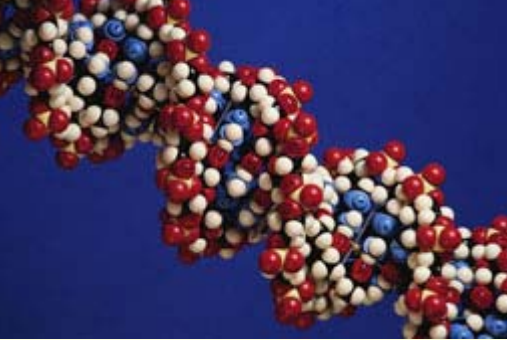
# Manipulation de cellules

Cellules : taille 5/10  $\mu\text{m}$

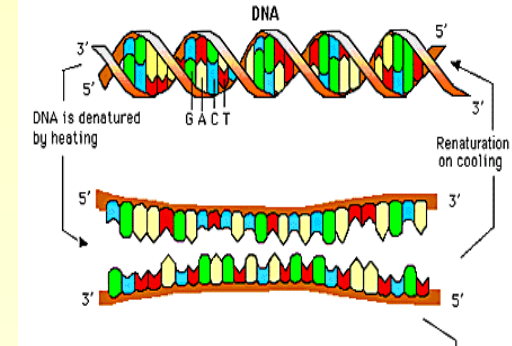


Cellule piégée

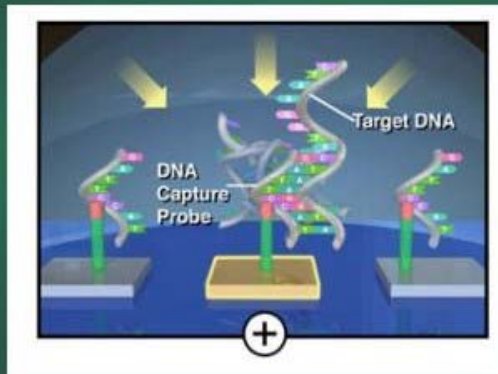
Matrice de trous pour piégeages de cellules



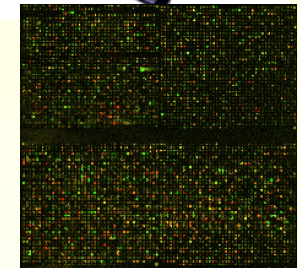
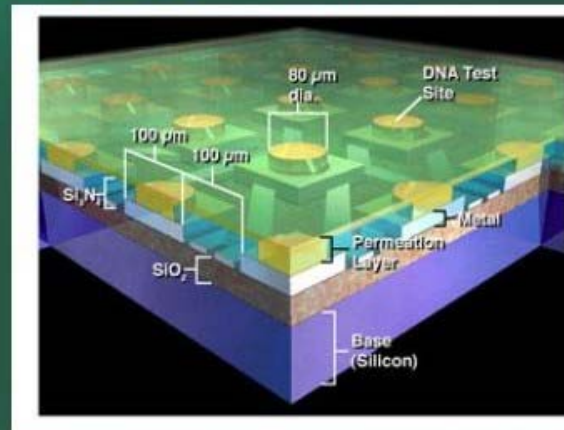
# Puce à ADN



“DNA chip”: biomolécules on electronic devices



[Nanogen, Inc.]



Etude et analyse de la structure génétique par détection de séquence d'ADN

- Identification de l'origine et du contenu (alimentation)
- Identification multiple (Ex : 12000 gènes identifiable sur 1cm<sup>2</sup>)
- identification de modifications génétiques (multiples)



# Micro-fluidique...!!!



Andreas Manz, Imperial College (London) and Harvard University (US)

Trouver la route la plus courte entre deux points.... : 500ms !!  
Temps de fabrication : 3 jours ...

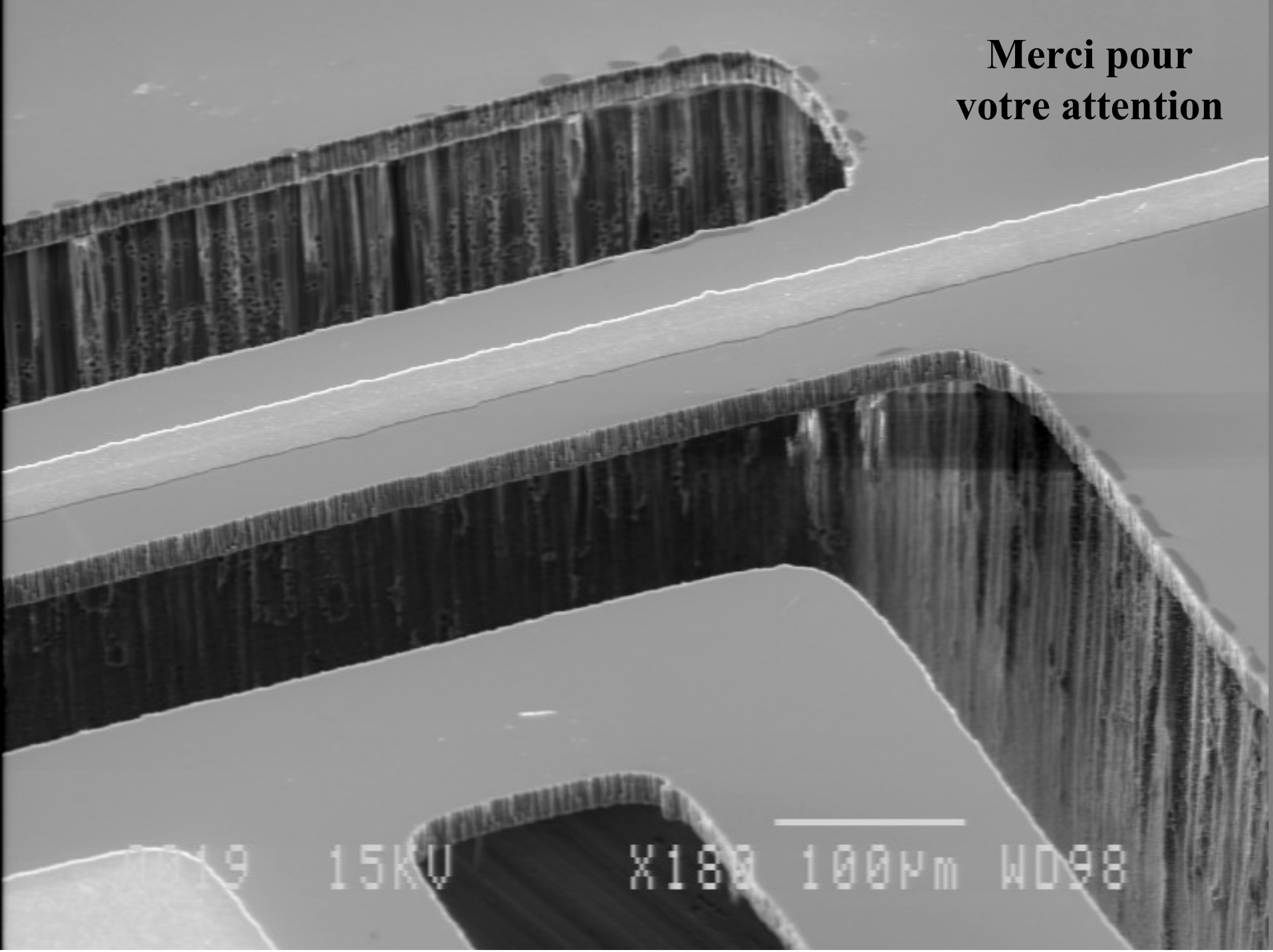


# Conclusion

Les MEMS sont une réalité...

- Ils couvrent de nombreux domaines d'applications  
→ **Pluridisciplinaire**
- Très fortes industrialisations pour les Capteurs  
« Microsystèmes »
- Ils promettent des performances accrues pour les applications types  
RF ou Optiques
- Ils ont permis de très forte innovation pour le domaine de l'analyse  
« bio-médico-chimique » qui est le secteur clé!!
- Ils constituent l'étape intermédiaire qui mènera vers les  
nanotechnologies... les NEMS...

**Merci pour  
votre attention**



0019

15KV

X180

100µm

WD98