

Les MEMS, du laboratoire aux Smartphones

P. Blondy

XLIM UMR CNRS 6172

Institut Universitaire de France –
Université de Limoges

FRANCE

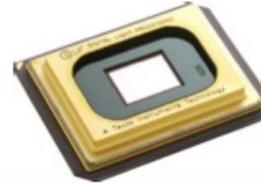
pblondy@xlim.fr



MEMS the World!

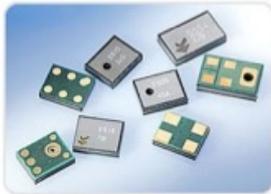
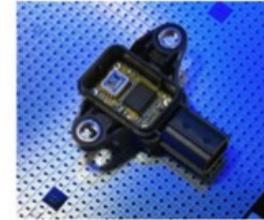


Accelerometers
in iPhones and
Nintendo Wii



Digital light
projection

Airbag sensors



MEMS
microphones
in laptops and
cell phones



Pressure
sensors



Optical
switches



DNA chips



Inkjet printers



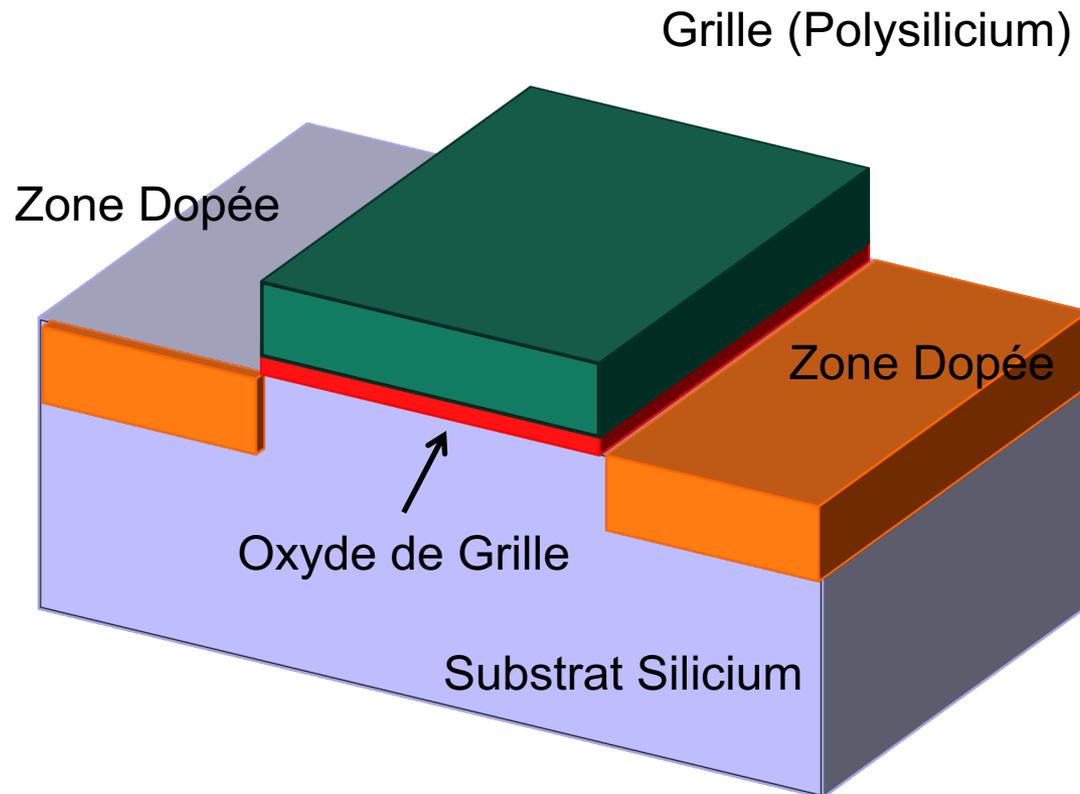
Gyroscopes

Un peu d'histoire...

- D'où viennent les MEMS?
 - De la technologie CMOS!
- Les premiers MEMS viennent directement de Transistors CMOS
- Tests dans les labos d'IBM et l'université de Stanford, fin des années 60, pour réduire les capacités de grille C_{ox} , et augmenter la vitesse de fonctionnement des transistors MOS
- Début du micro usinage du silicium pour la réalisation de composants mécaniques à l'université de Stanford

Du Transistor MOS au MEMS...

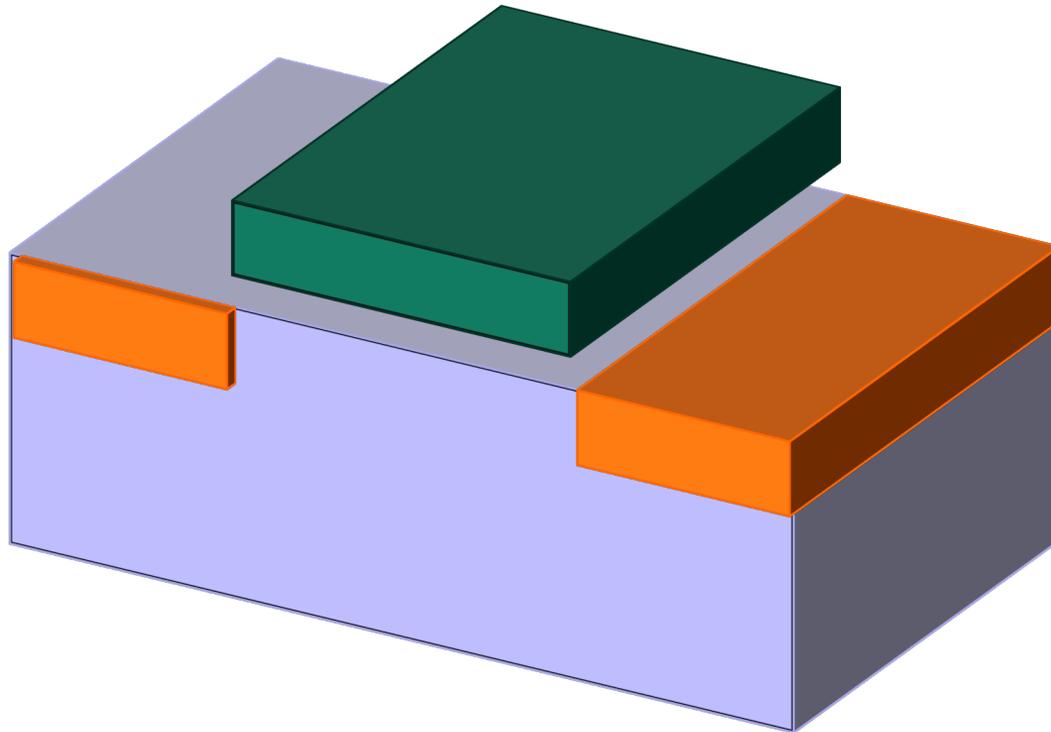
- Vue en coupe (simplifiée) d'un transistor MOS



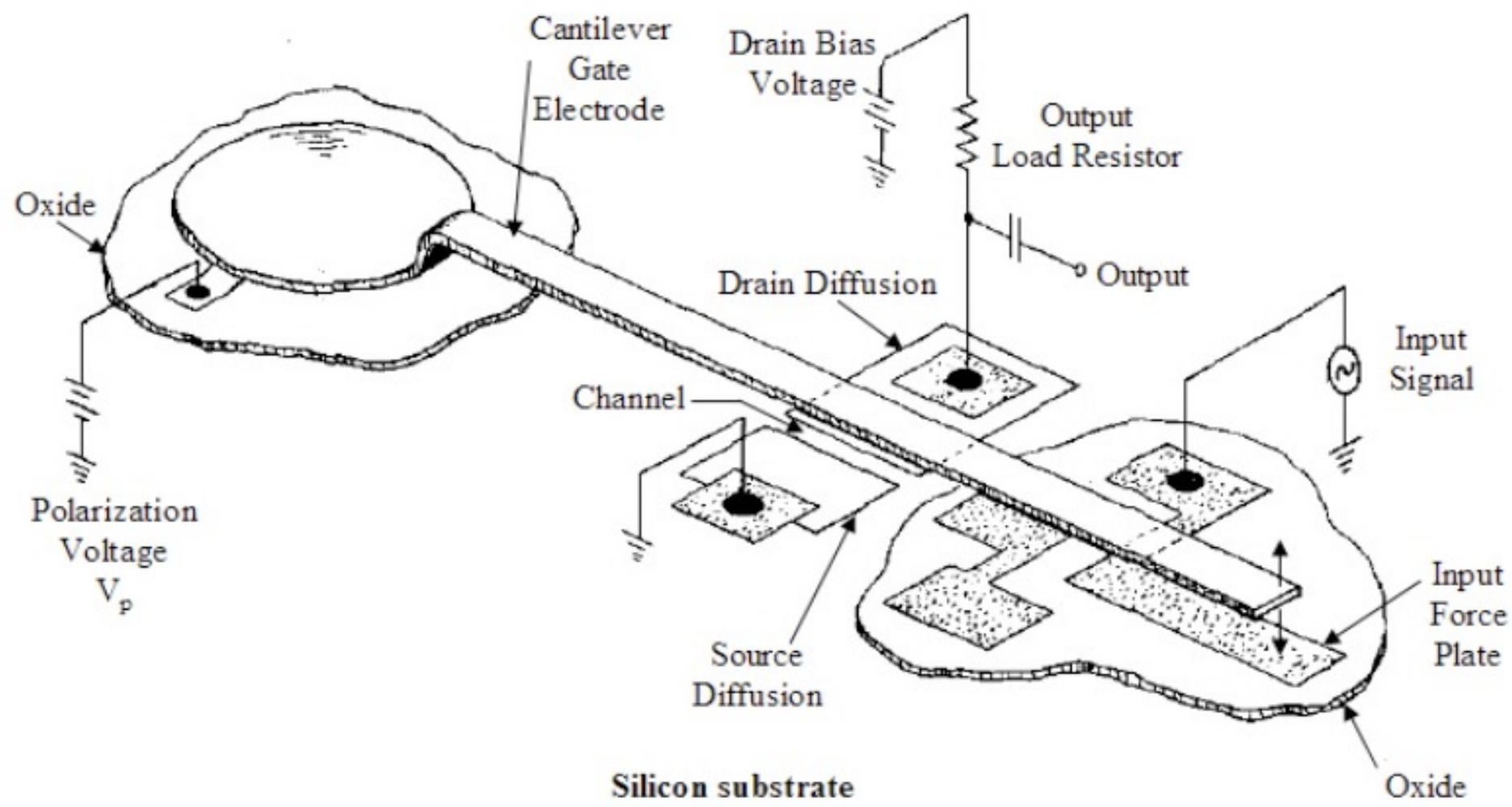
Du Transistor MOS au MEMS...

- Vue en coupe (simplifiée) d'un transistor MOS

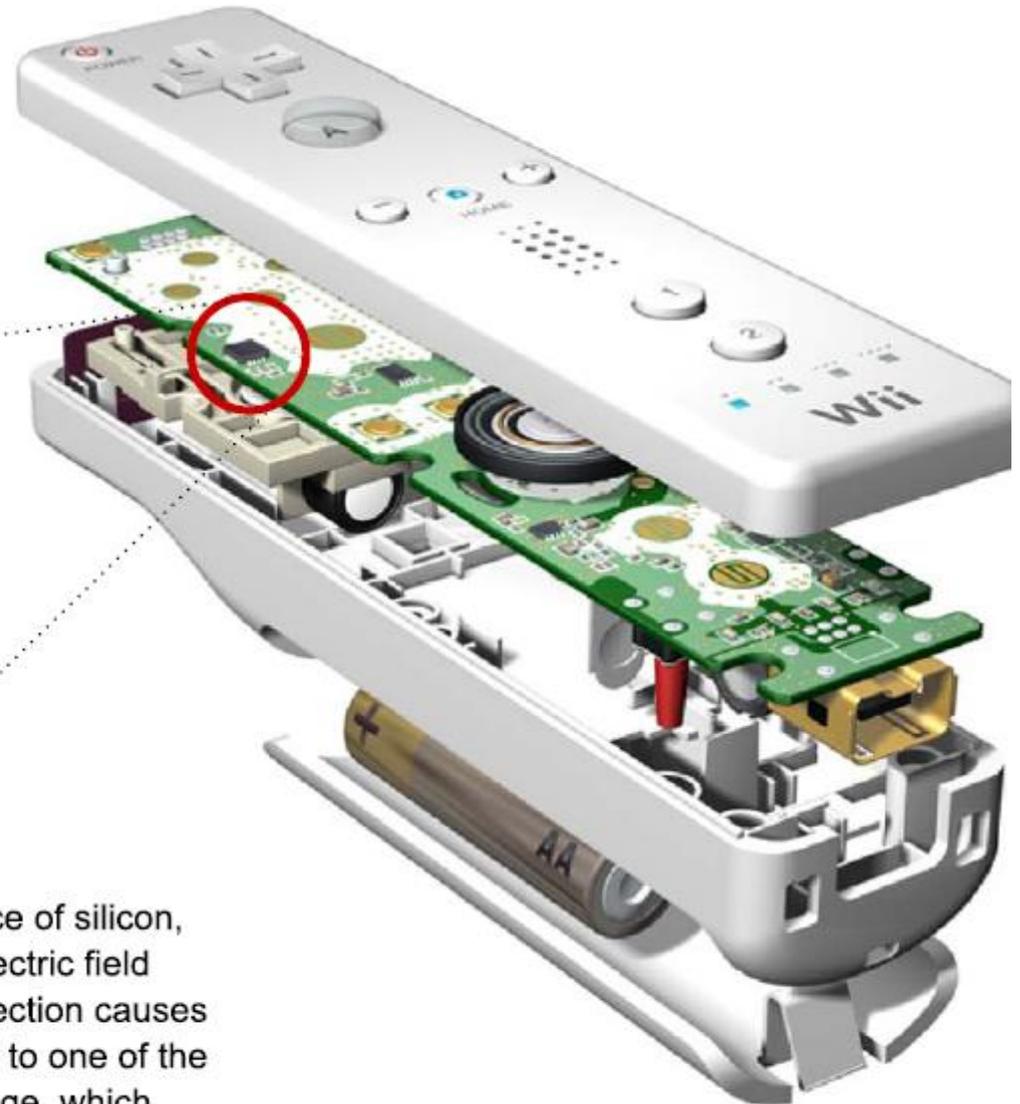
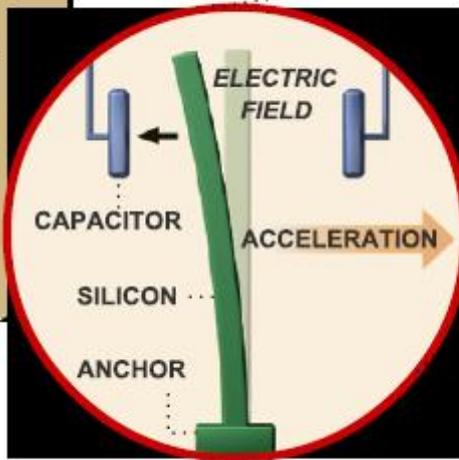
La grille est libre !



Transistor à grille résonante de Nathanson



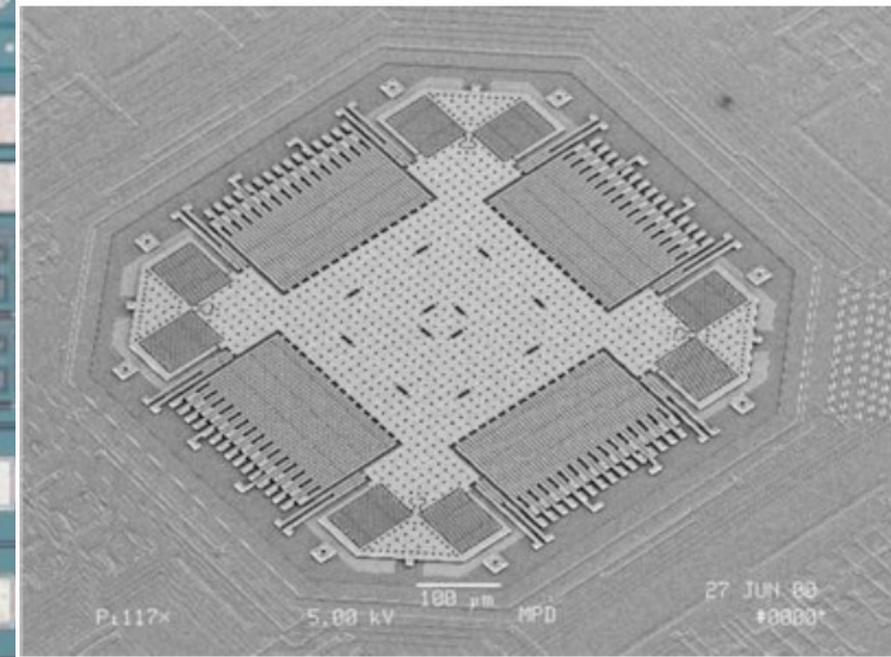
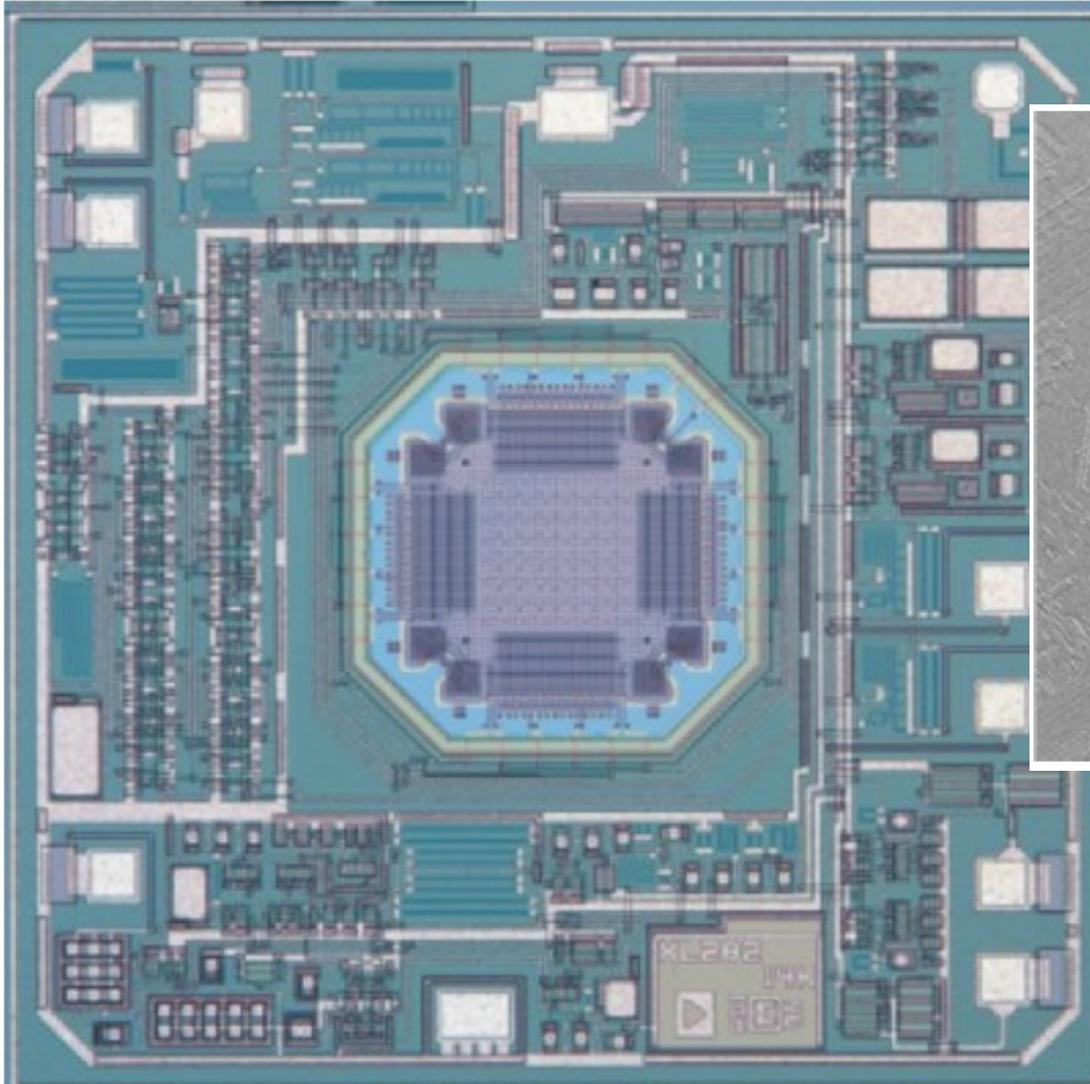
Accéléromètres



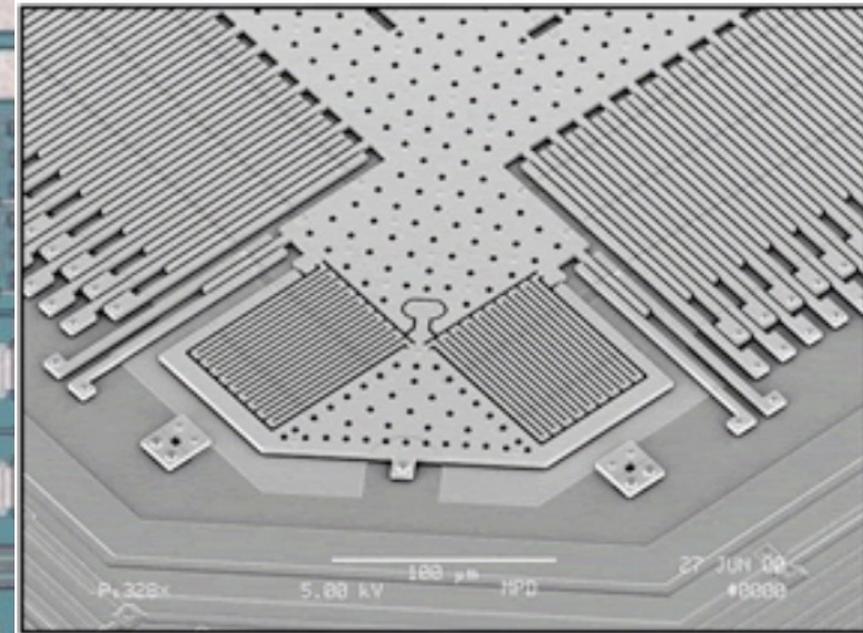
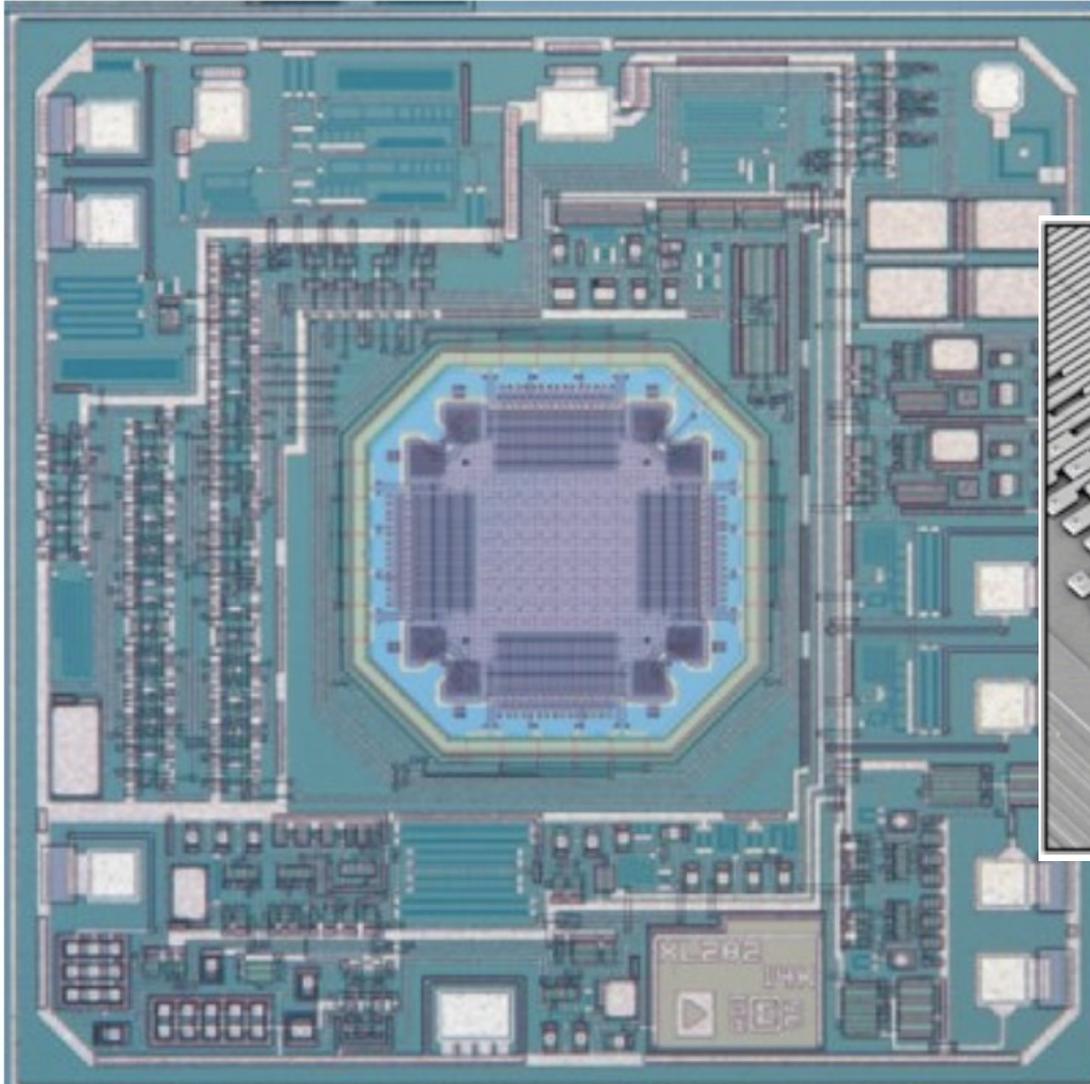
Acceleration sensor

This chip provides all the motion sensing. A piece of silicon, anchored at one end, is evenly spaced in the electric field between two capacitors. Acceleration in one direction causes the silicon to bend in the other, becoming closer to one of the capacitors. This causes the electric field to change, which translates into motion on screen.

Analog Devices Polysilicon MEMS

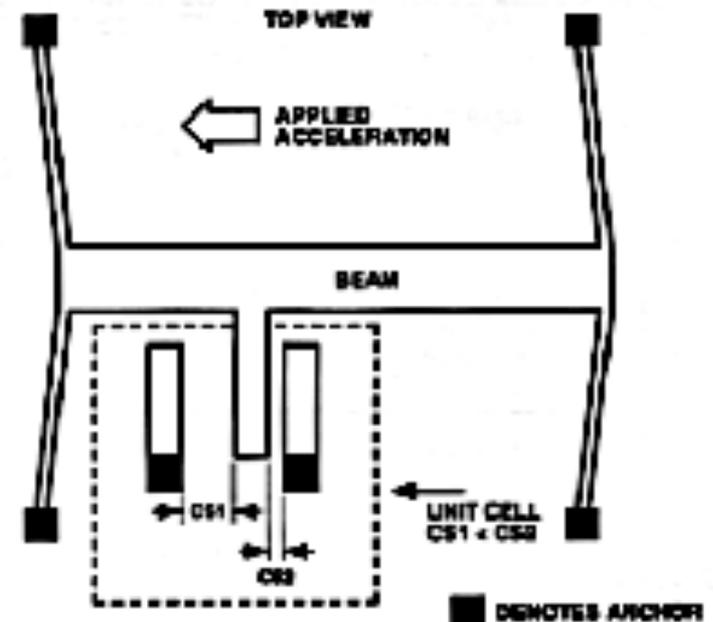
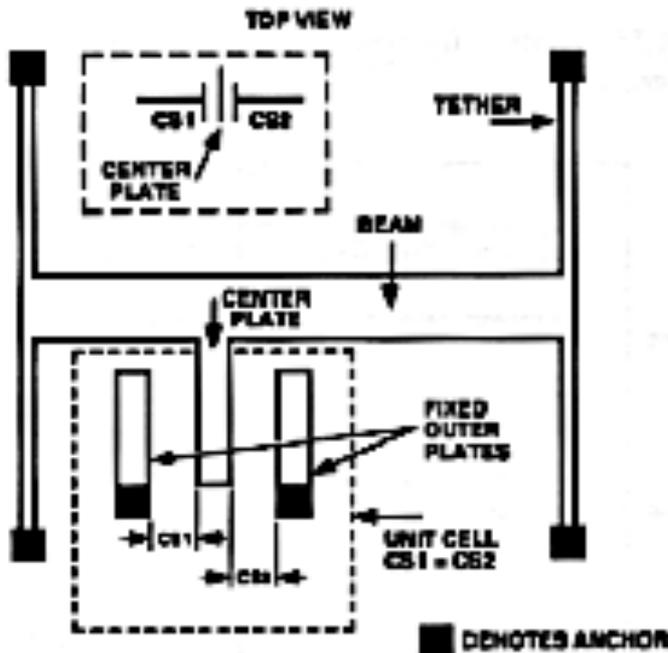


Analog Devices Polysilicon MEMS

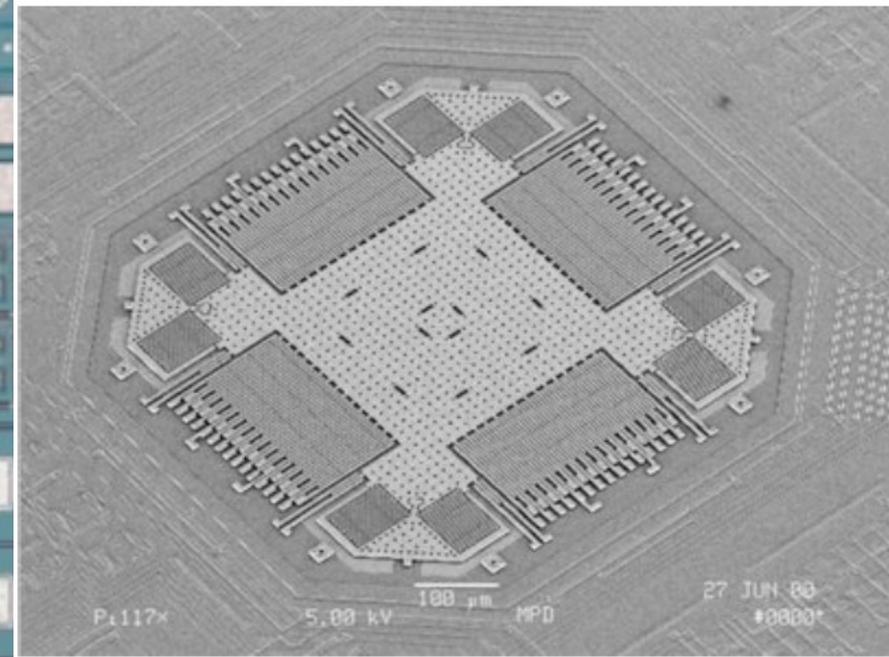
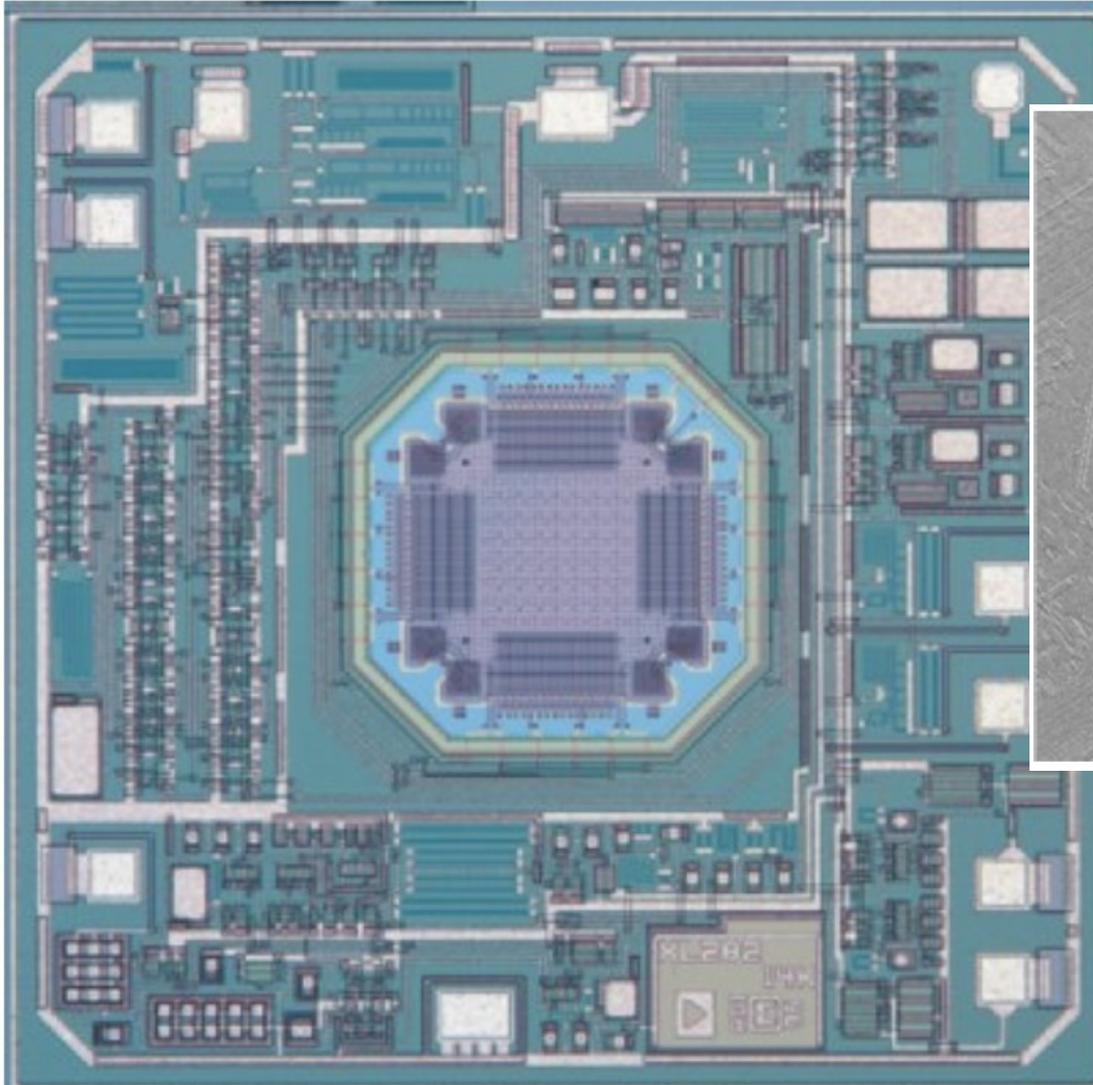


ADXL50 Sensing Mechanism

- Mesure d'une variation de capacité différentielle
- Sous l'effet d'une accélération, les plaques des capacités se déplacent, et changent la tension de sortie
- Le circuit sur puce applique une tension de contre-réaction pour recentrer la masse et les plaques de la capacité

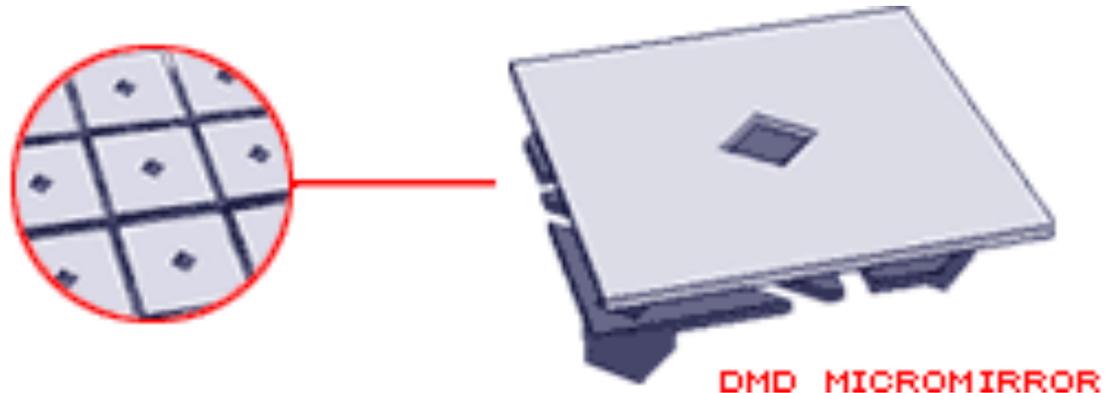


Analog Devices Polysilicon MEMS



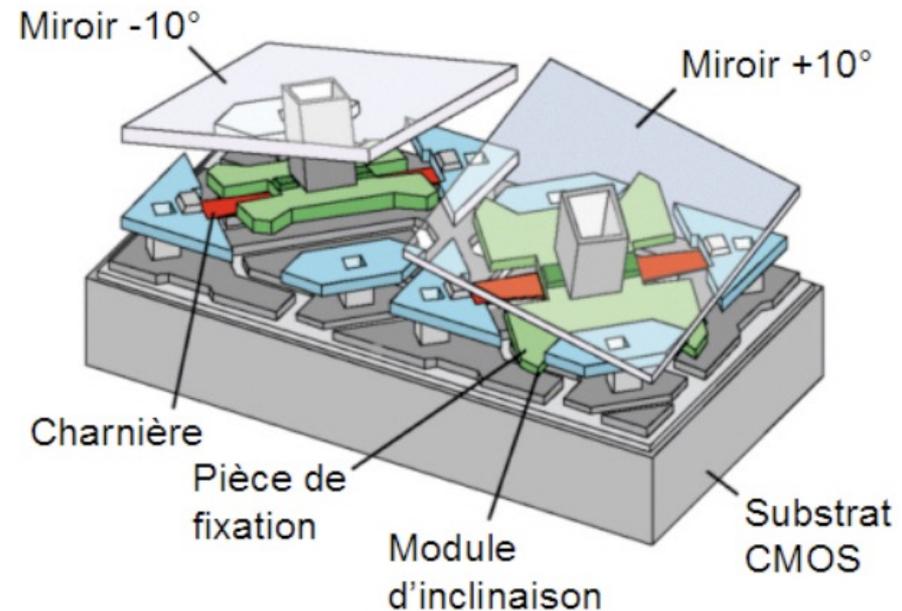
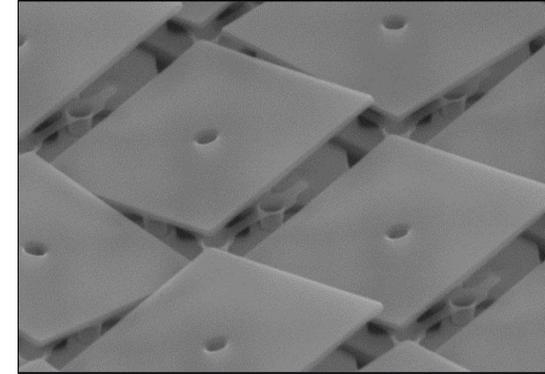
DLP Imaging System

- Digital Micromirror Device (DMD)
- Larry Hornbeck Texas Instrument
- Commutateur mécanique de lumière
- Réseau de 1,3 millions de miroirs sur 2 cm²
- Chaque miroir 1/5 de diamètre de cheveu
- 1 miroir = 1 pixel
- Fabriqué sur une puce CMOS

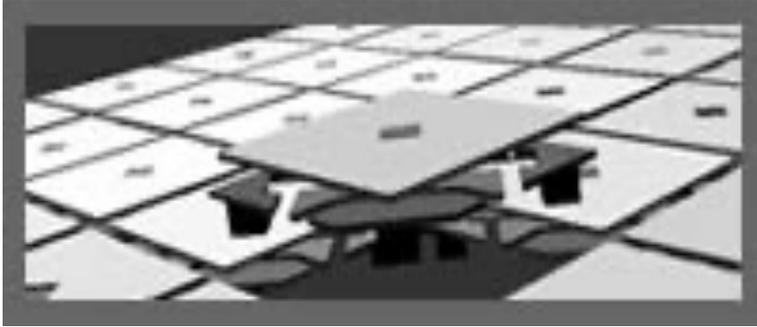


DLP Imaging System

- Digital Micromirror Device (DMD)
- Larry Hornbeck Texas Instrument
- Commutateur mécanique de lumière
- Réseau de 1,3 millions de miroirs sur 2 cm²
- Chaque miroir 1/5 de diamètre de cheveu
- 1 miroir = 1 pixel
- Fabriqué sur une puce CMOS

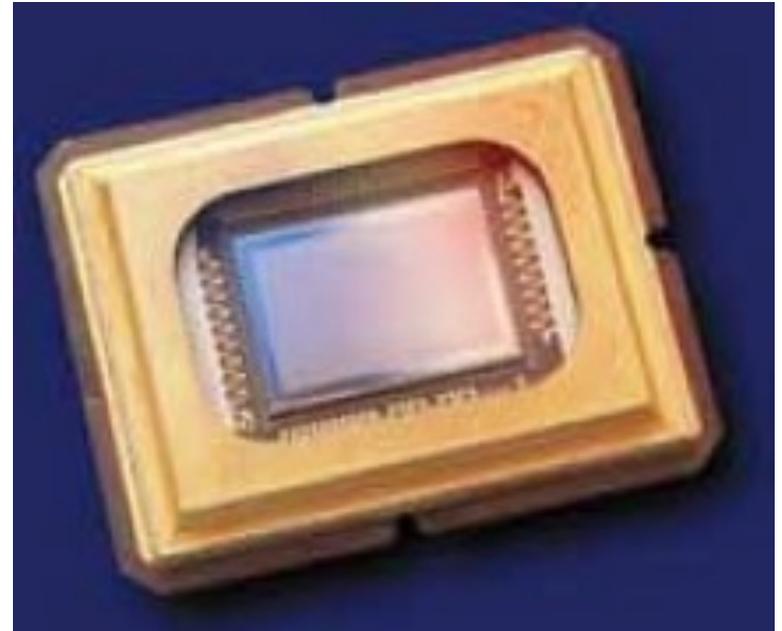


DLP Imaging System

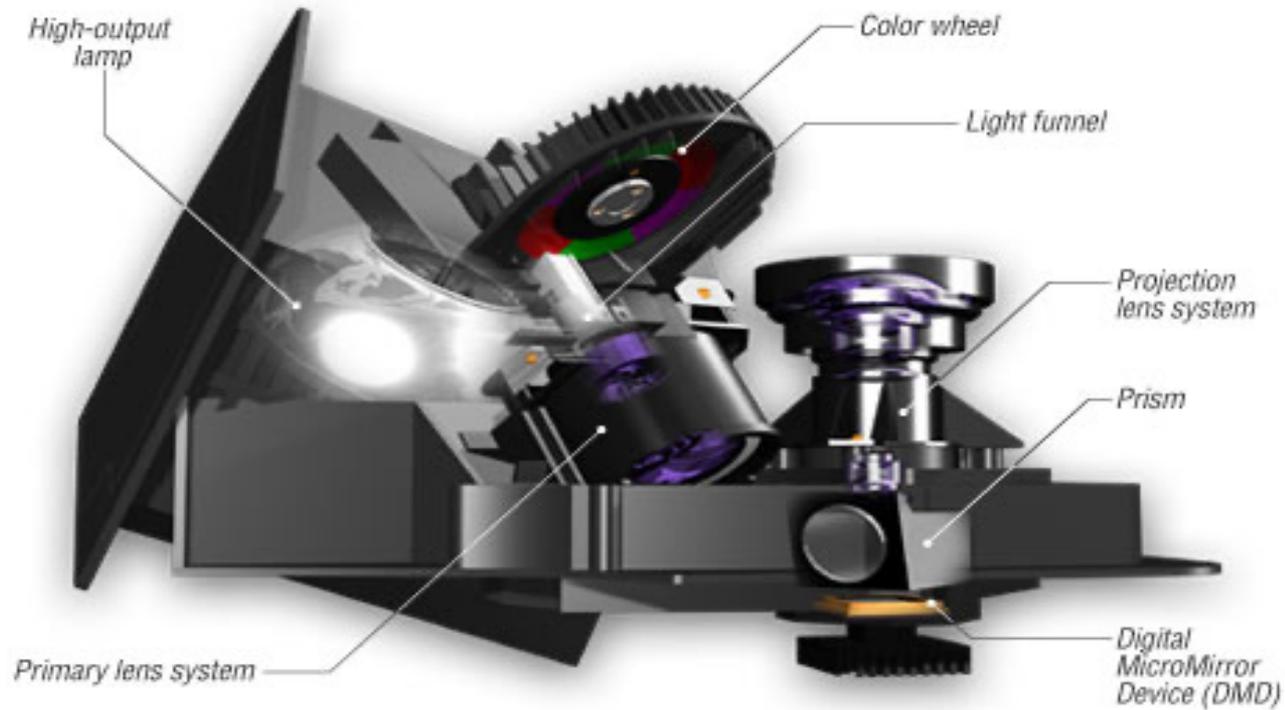


- Not operating – parked at 0 degree
- On – Tilt +10 degrees
- Off – Tilt -10 degrees
- On/Off Switching – 1000 times/sec

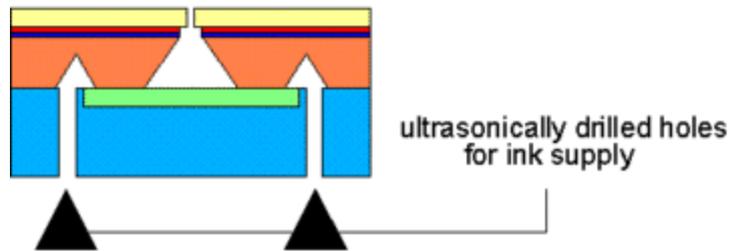
- 848 x 600 DMD
- Consists of 508,800 tiny, tiltable mirrors
- A glass window seals and protects the mirrors.



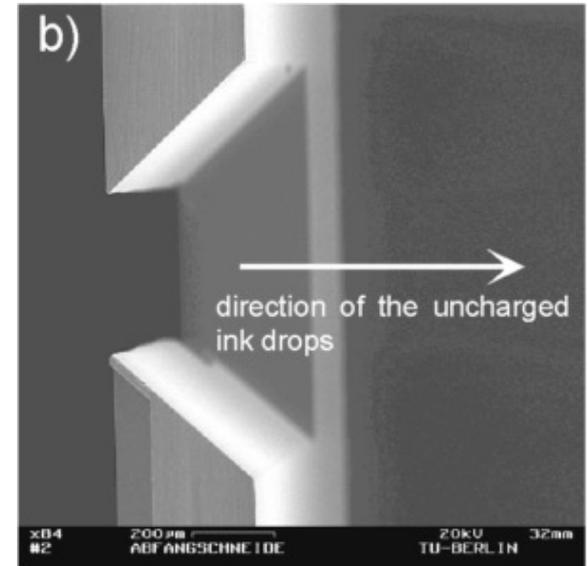
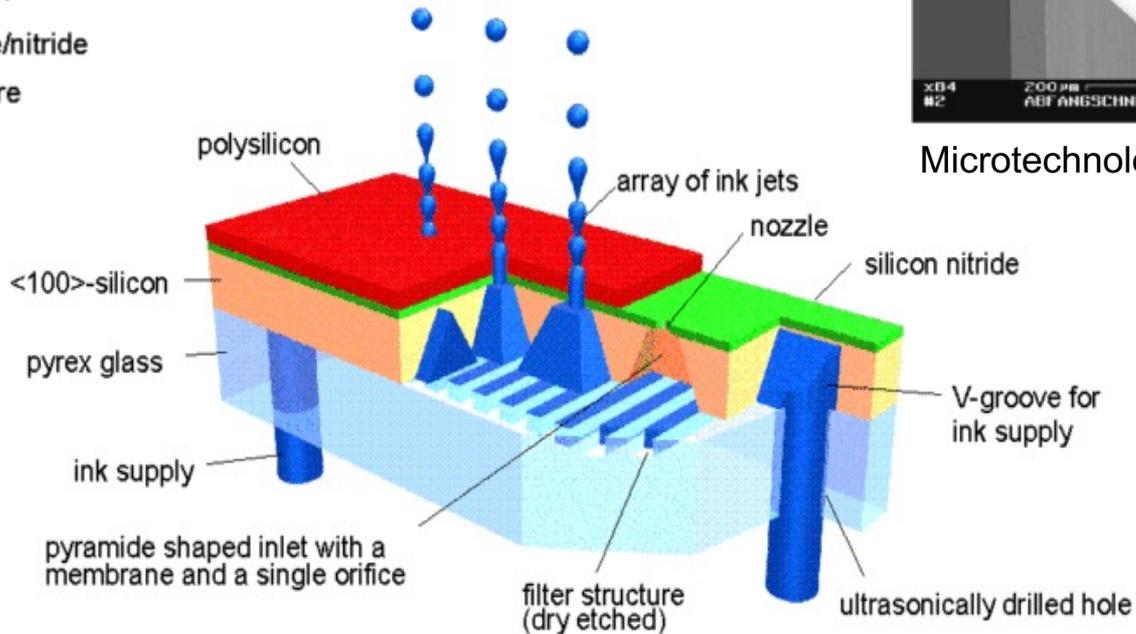
DLP Imaging System



Tête d'Imprimantes jet d'encre



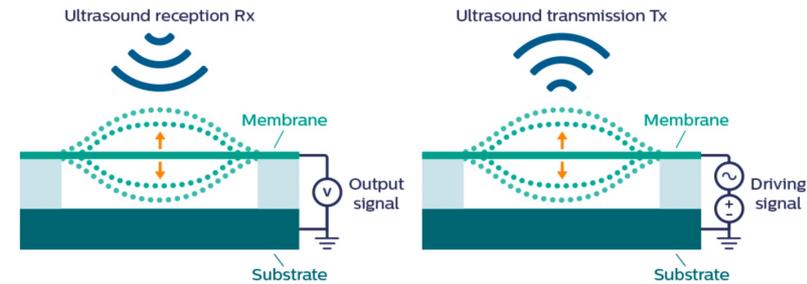
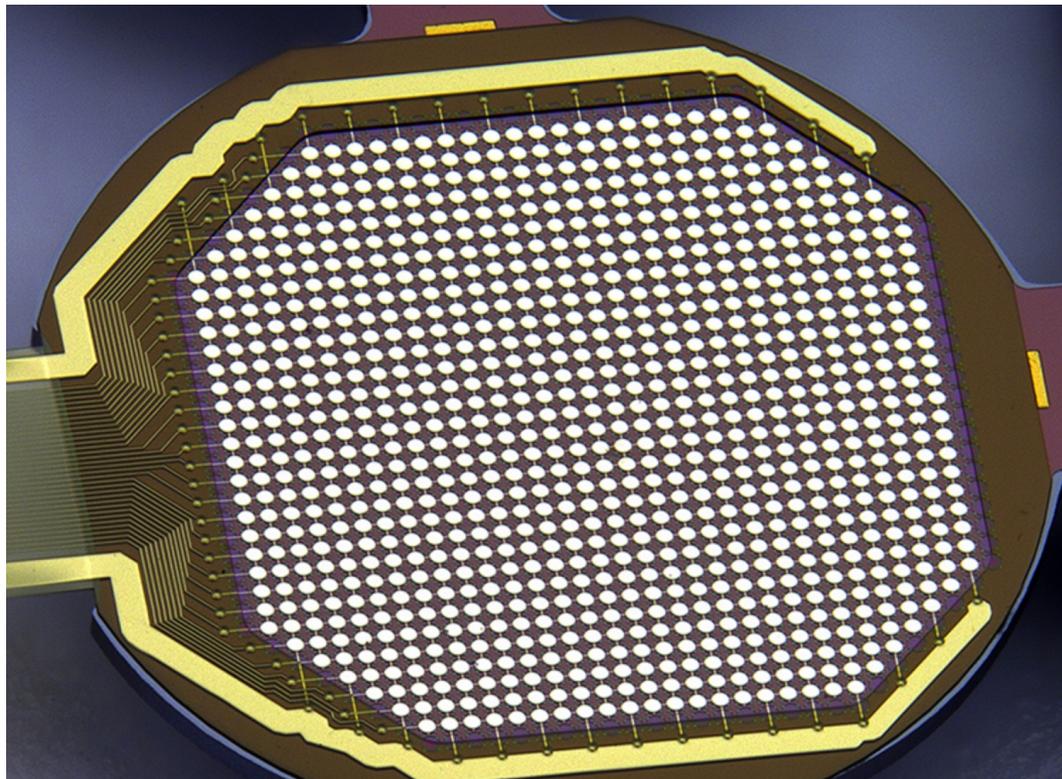
- polysilicon
- <100>-silicon
- silicon oxide/nitride
- filter structure
- pyrex glass



Microtechnology group, TU Berlin

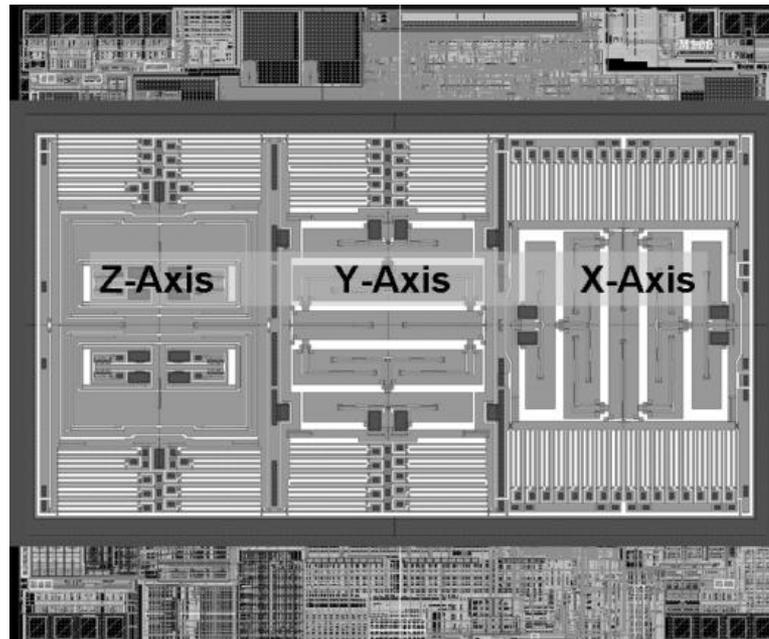
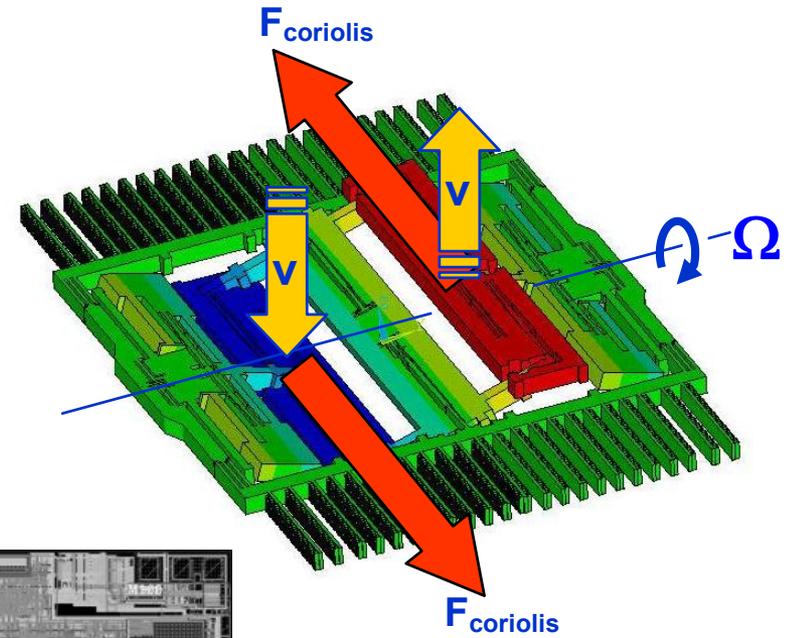
Systemes d'Echographie

CMUT: Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers



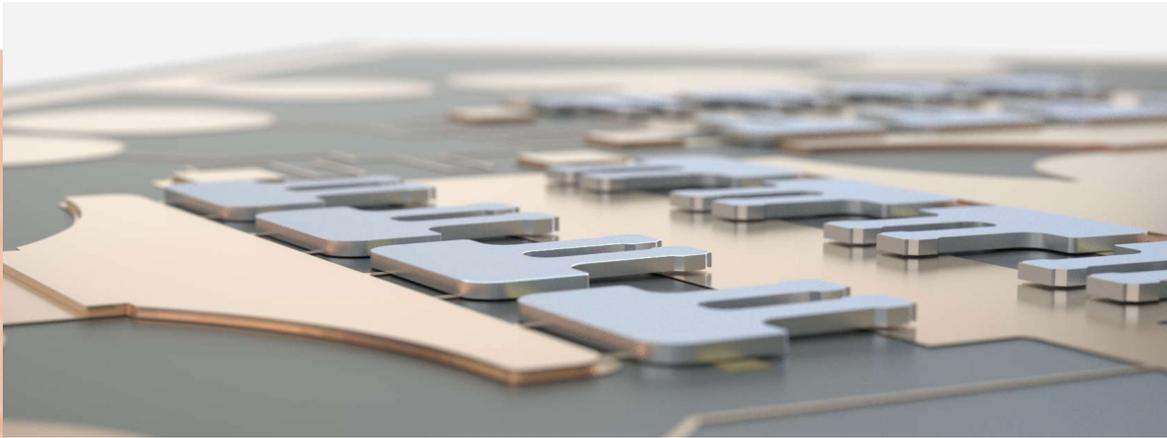
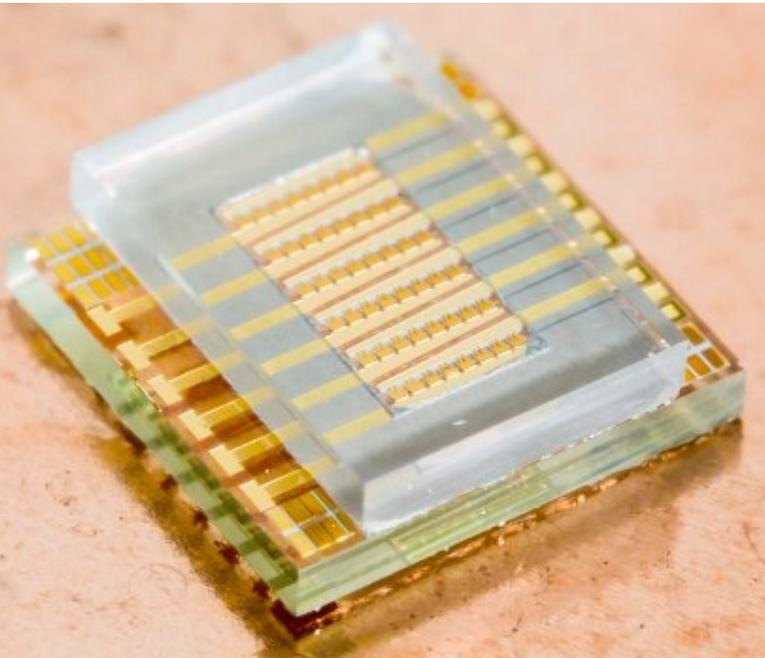
Micro Gyros

- Exemple Invensense



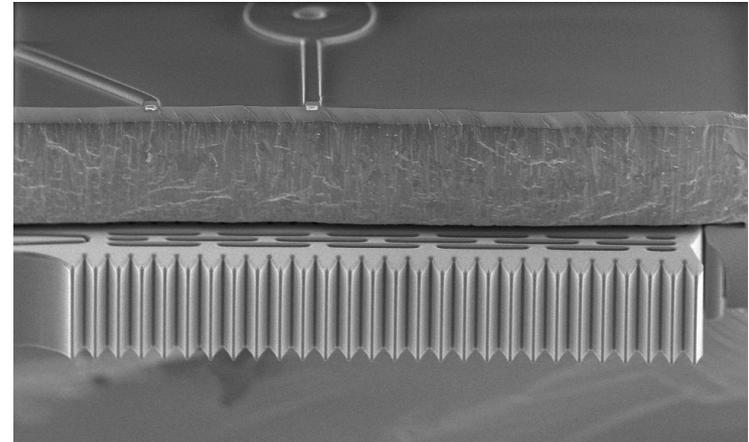
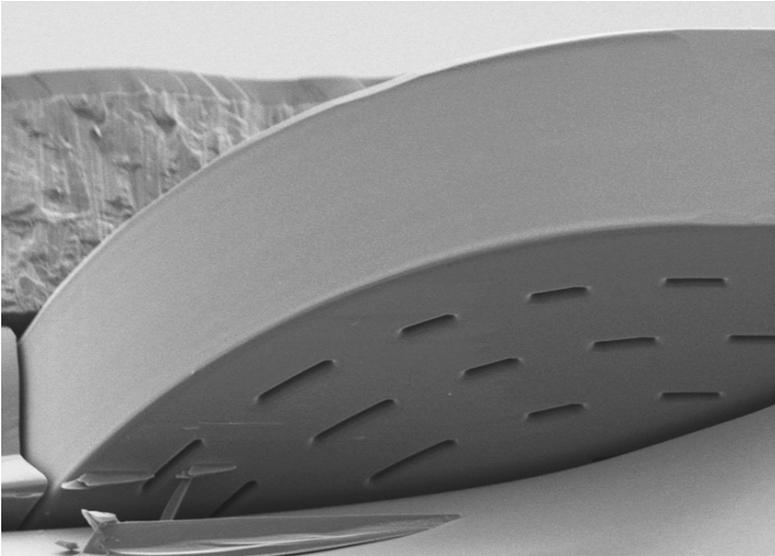
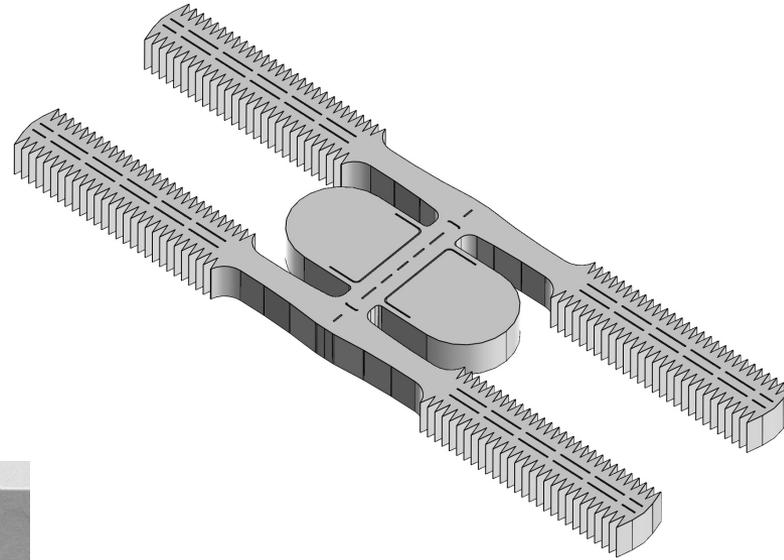
Quelques exemples: Switches

- Menlo Micro
 - Développé par GE pour des applications IRM



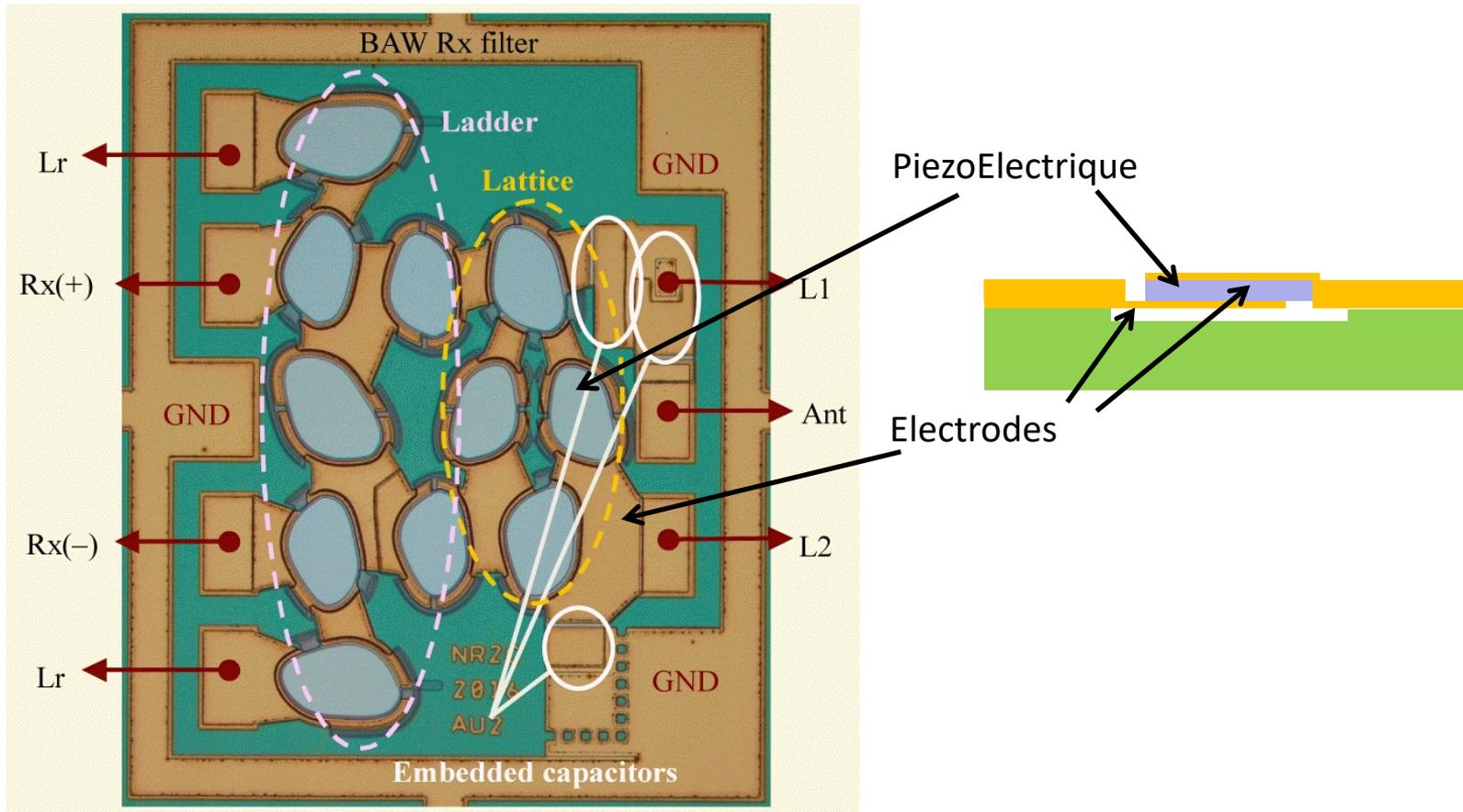
Résonateurs MEMS

- Résonateurs (SiTime), présents dans tous les produits Apple

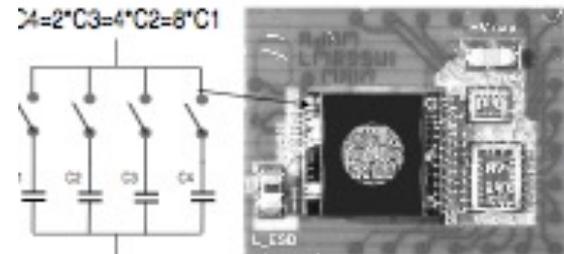
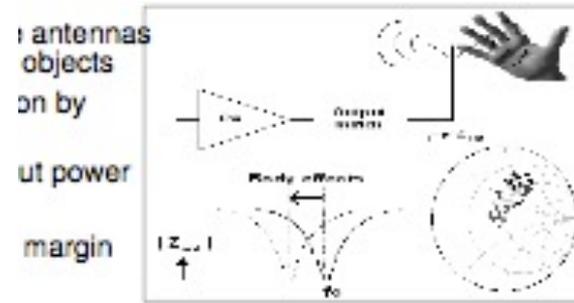


Résonateurs MEMS Piezoélectriques

- Résonateurs piezoélectriques suspendus

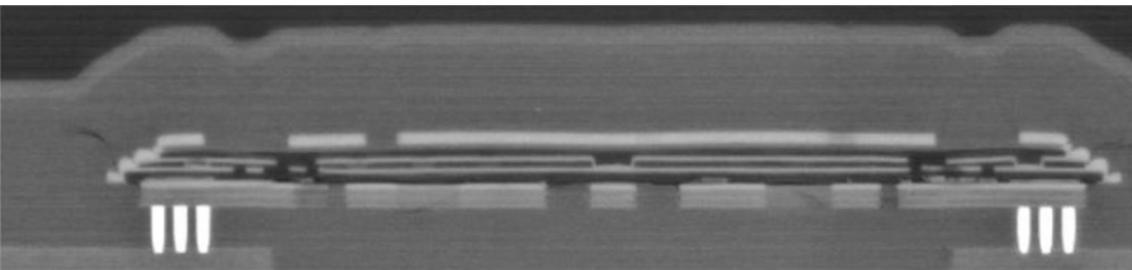
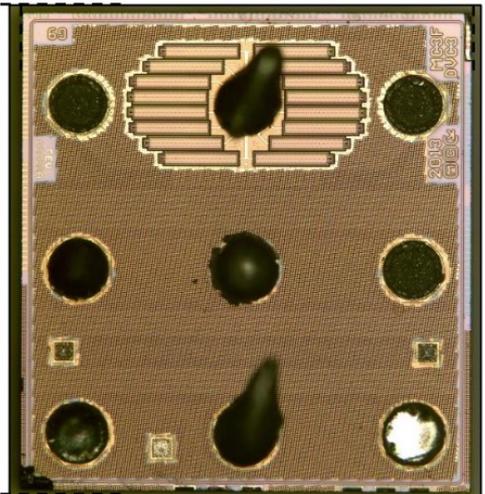


Tuners de téléphones portables



1.35mm

1.45mm



Historique

Airbags - Automobile Electronique Grand Public



1^{er} accéléromètre MEMS 1979
Stanford

15 ans

1^{er} accéléromètre MEMS Produit!

2006

Introduction de l'Iphone

Introduction de la Wii



1965-1970

1980

1990

2000

2010

U. de Stanford

R.S. Muller
Berkeley

LIMMS
CNRS+U. Tokyo

IBM

K. Wise
U. of Michigan

U Limoges !!!

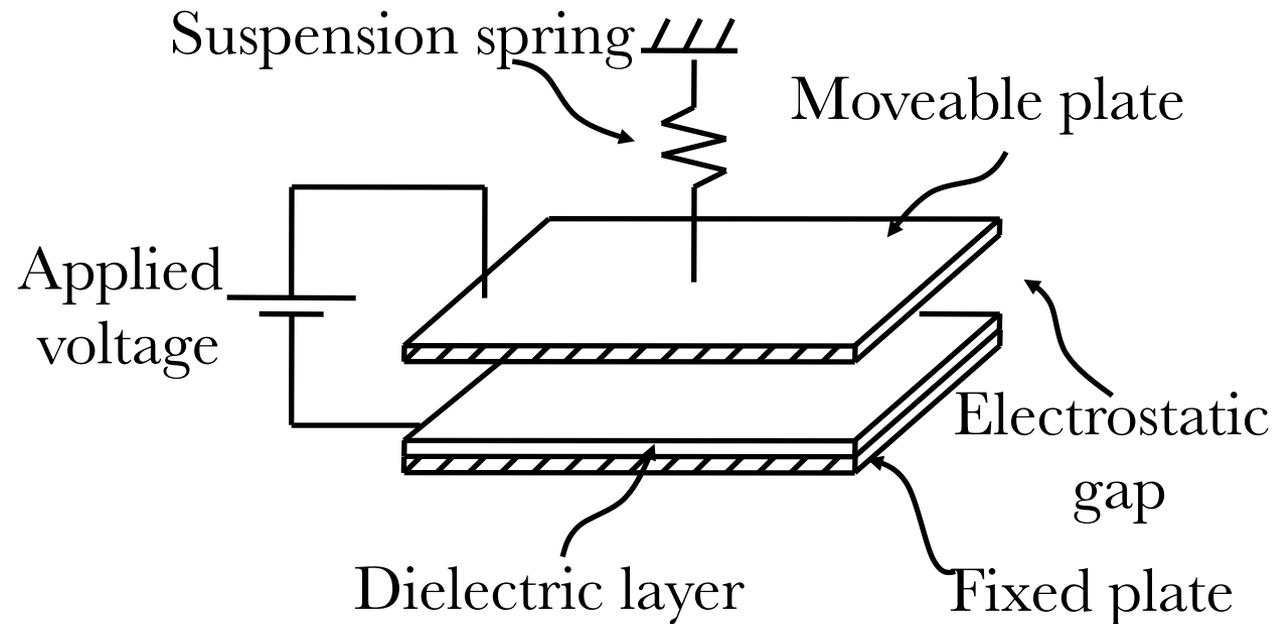
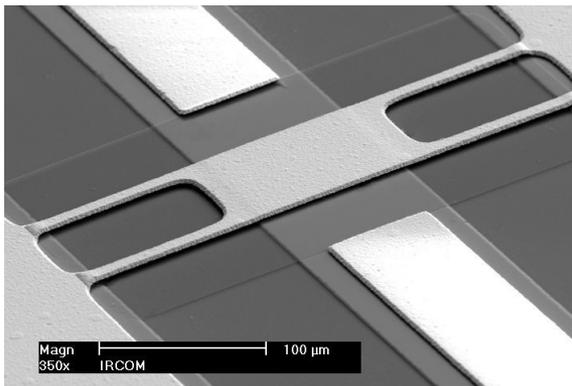
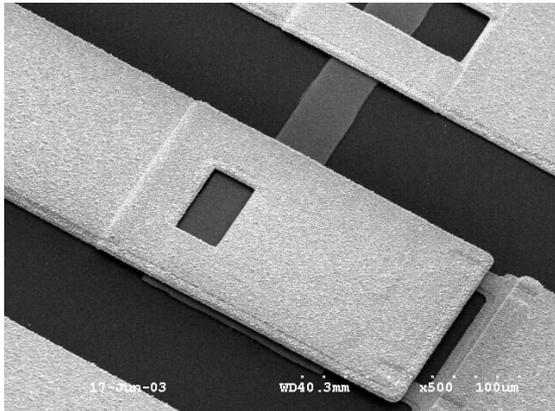
G. Rebeiz
U. of Michigan

LES ACTIONNEURS

- Comment ça bouge?
- Les MEMS = Electrostatique
- Un peu de piezoélectriques
- La force dérive de l'énergie potentielle de capacités à gap
- Force non-linéaire, analyse des actionneurs un peu compliquée

Les actionneurs à plaques parallèles

- Les MEMS sont des structures très "plates"
- L'actionneur à plaques parallèles génère la force -> c'est le moteur!



Les actionneurs à plaques parallèles

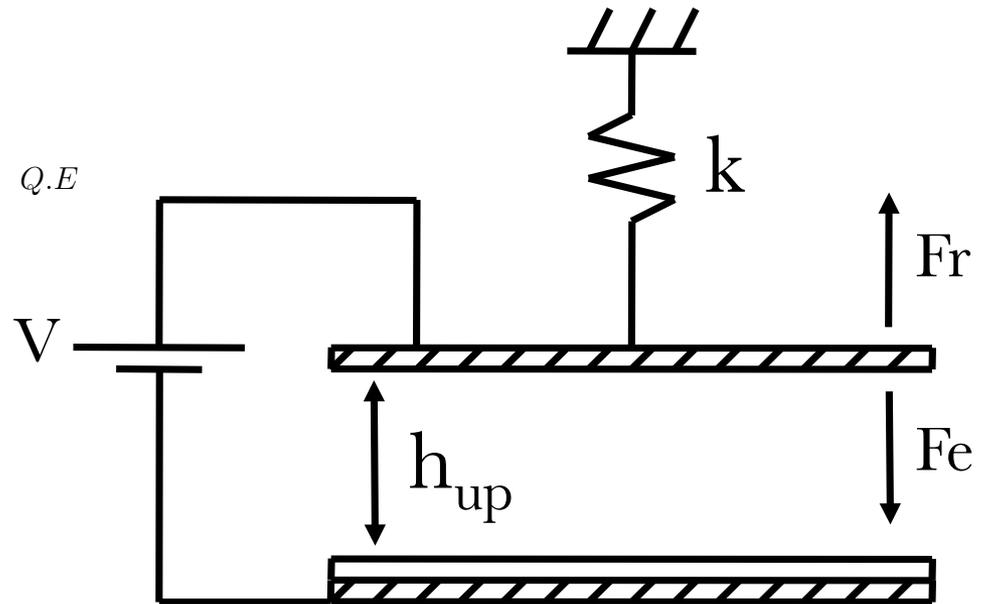
- Vue en coupe d'un actionneur

Force électrostatique sur la plaque

$$F_e = \frac{1}{2} Q \cdot E = \frac{\epsilon_o \cdot S \cdot V^2}{2 \cdot h^2}$$

Force de rappel sur la plaque

$$F_r = k \cdot (h_{up} - h)$$



Les actionneurs à plaques parallèles

- Forces sur l'actionneur

Les 2 forces F_e et F_r sont identiques

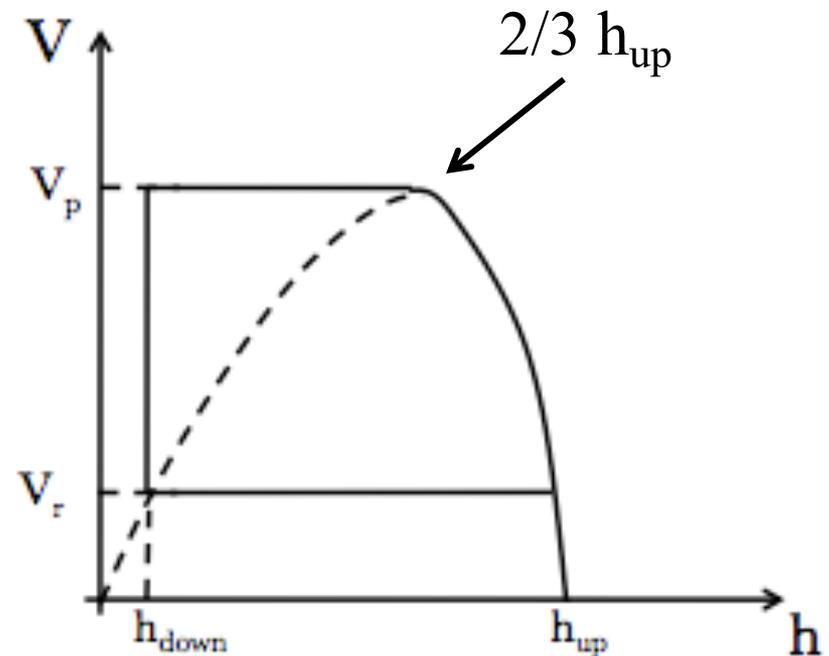
$$k.(h_{up} - h) = \frac{\epsilon_o.S.V^2}{2.h^2}$$

V:

$$V = \sqrt{\frac{2.k.h^2(h_{up} - h)}{\epsilon_o.S}}$$

V_p is:

$$V_p = \sqrt{\frac{8.k.h_{up}^3}{27.\epsilon_o.S}}$$



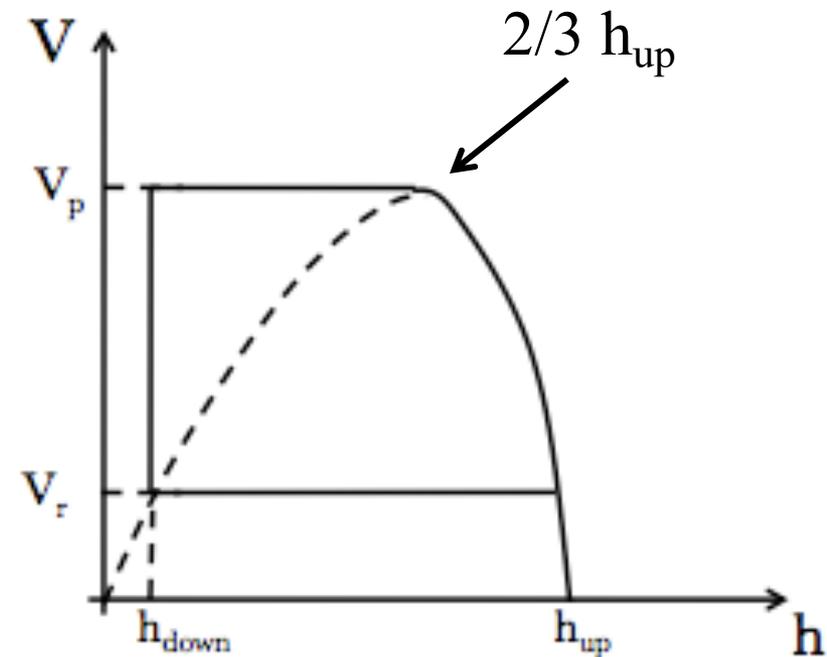
Les actionneurs à plaques parallèles

- Choses à se rappeler

Un actionneur à plaques parallèles est Instable. L'entrefer ne peut être changé que sur une faible portion: 30% en théorie 10% max en pratique

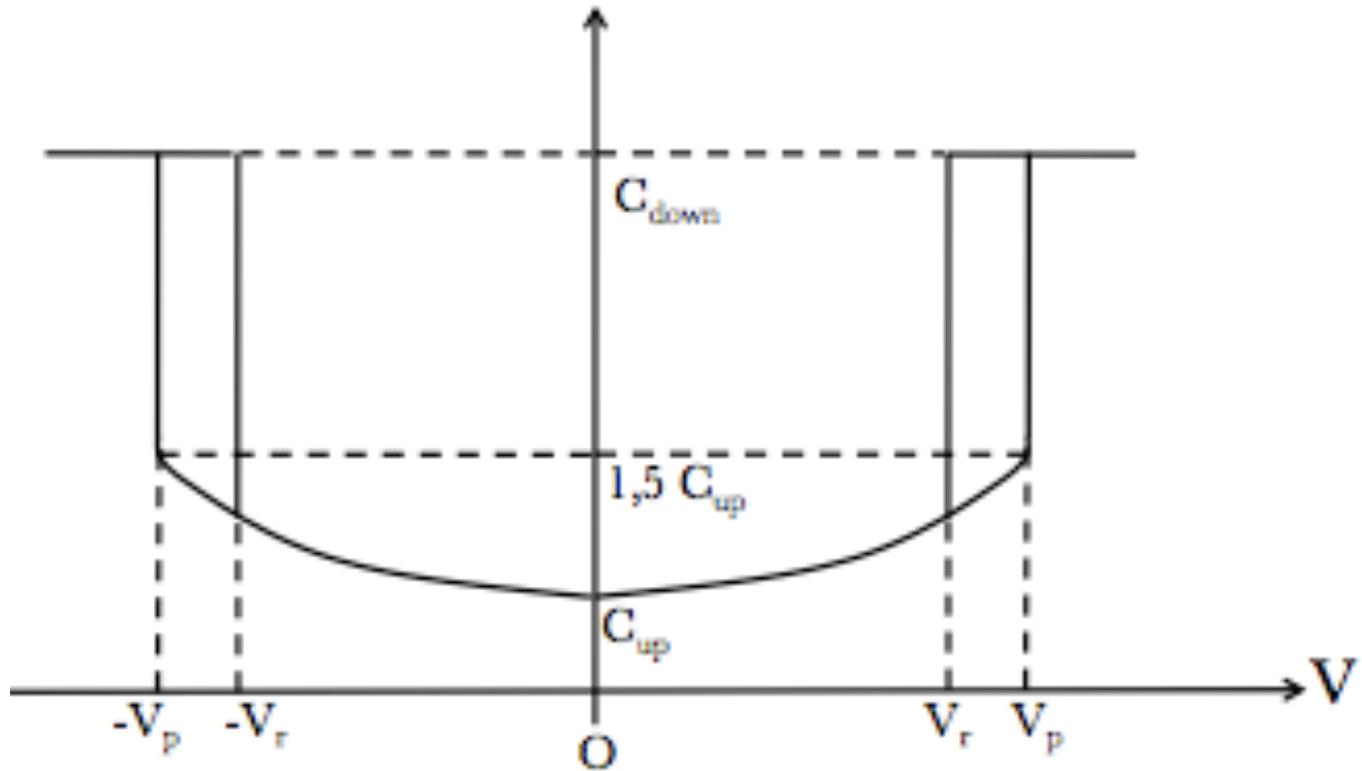
Les tensions d'abaissement sont de quelques dizaines de volts

La présence d'humidité affecte fortement la fiabilité



Les actionneurs à plaques parallèles

- Caractéristique $C(V)$



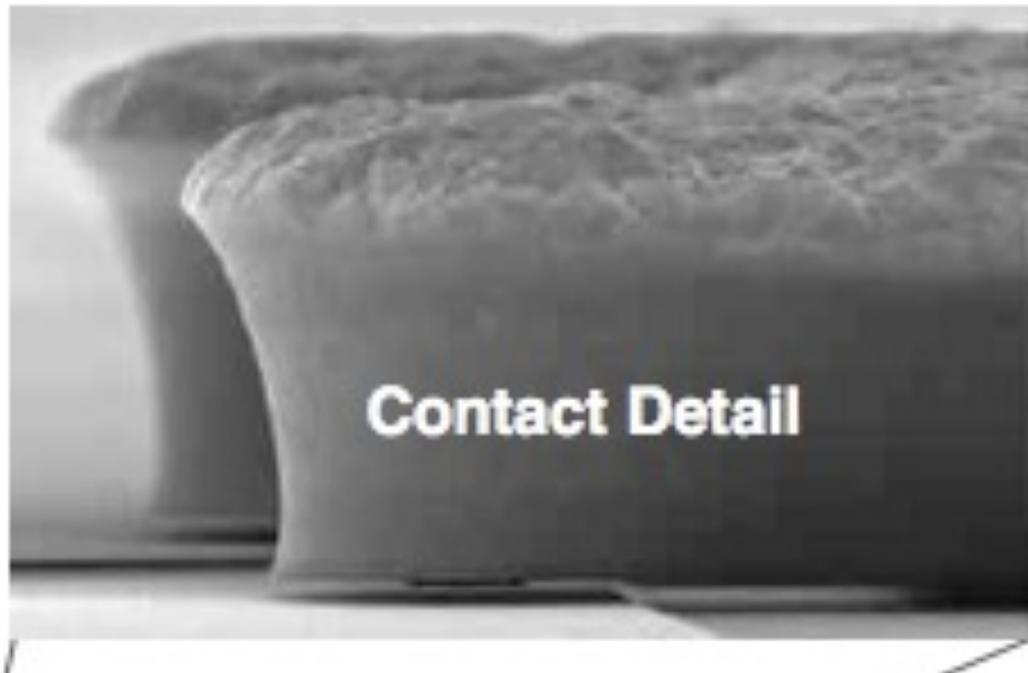
Les actionneurs à plaques parallèles

- La mécanique de l'actionneur est contre-intuitive:

Pour une tension de commande donnée, plus le gap est petit, plus les forces sont grandes

(... et les dispos sont plus fiables, et les poutres sont plus épaisses)

Ex. Le switch MEMS de Radant:



Petit Test

- Exemple: on considère deux plaques parallèles de 1m^2 séparées de 1m . A 15V de tension, quelle est la force qui s'exerce sur elles? $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ séparées par $1\mu\text{m}$? $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ par $1\mu\text{m}$ à 150V ?

	$1\text{m}^2 \times 1\text{m}$	$1\mu\text{m}^2 \times 1\mu\text{m}$	$1\text{mm}^2 \times 1\mu\text{m}$ 150 Volts
$1/2 \epsilon V^2$	1nN	1nN	
Rapport Aire/gap ²	1	1	
Force F_y	1nN	1nN	

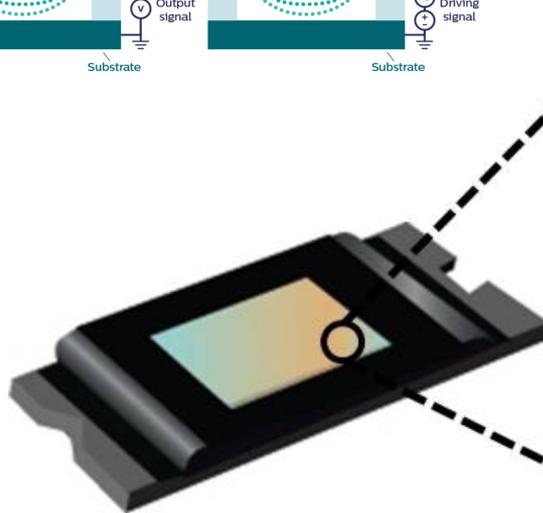
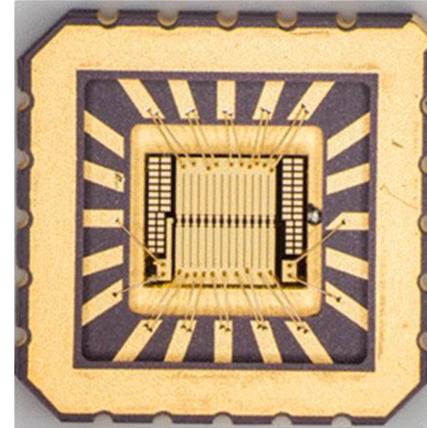
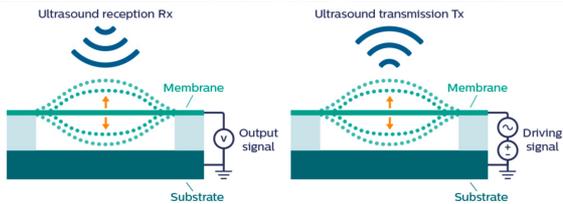
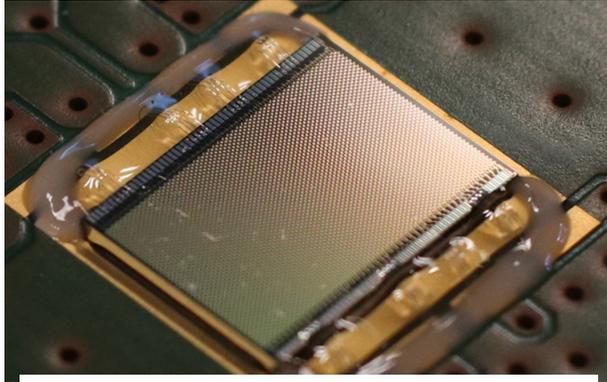
Petit Test

- Exemple: on considère deux plaques parallèles de 1m^2 séparées de 1m . A 15V de tension, quelle est la force qui s'exerce sur elles? $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ séparées par $1\mu\text{m}$? $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ par $1\mu\text{m}$ à 150V ?

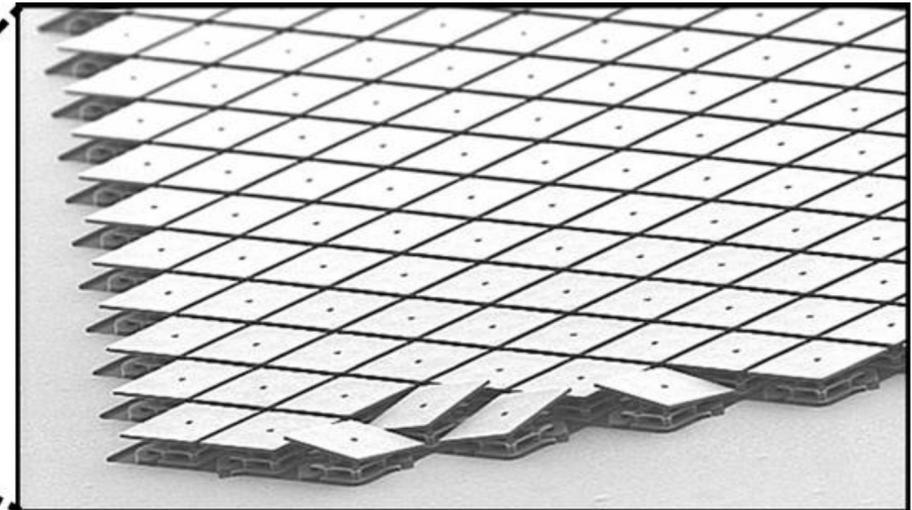
	$1\text{m}^2 \times 1\text{m}$	$1\mu\text{m}^2 \times 1\mu\text{m}$	$1\text{mm}^2 \times 1\mu\text{m}$ 150 Volts
$\frac{1}{2} \epsilon V^2$	1nN	1nN	100nN
Rapport Aire/gap ²	1	1	1 000 000
Force F_y	1nN	1nN	0,1 N !

Exemples

- Plein de MEMS!

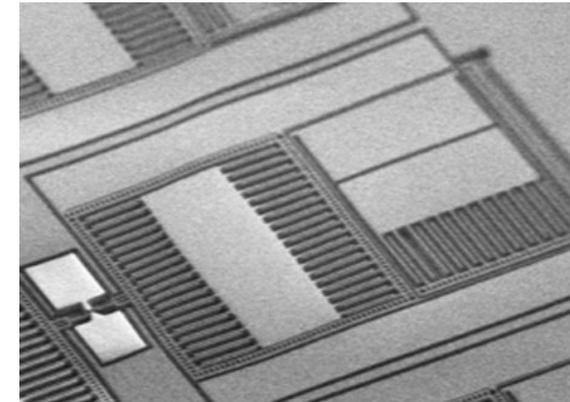
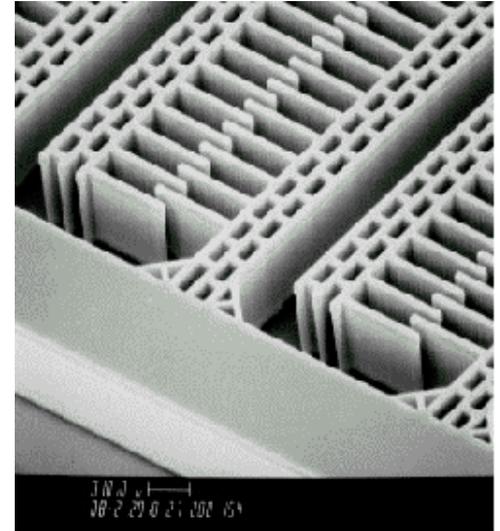
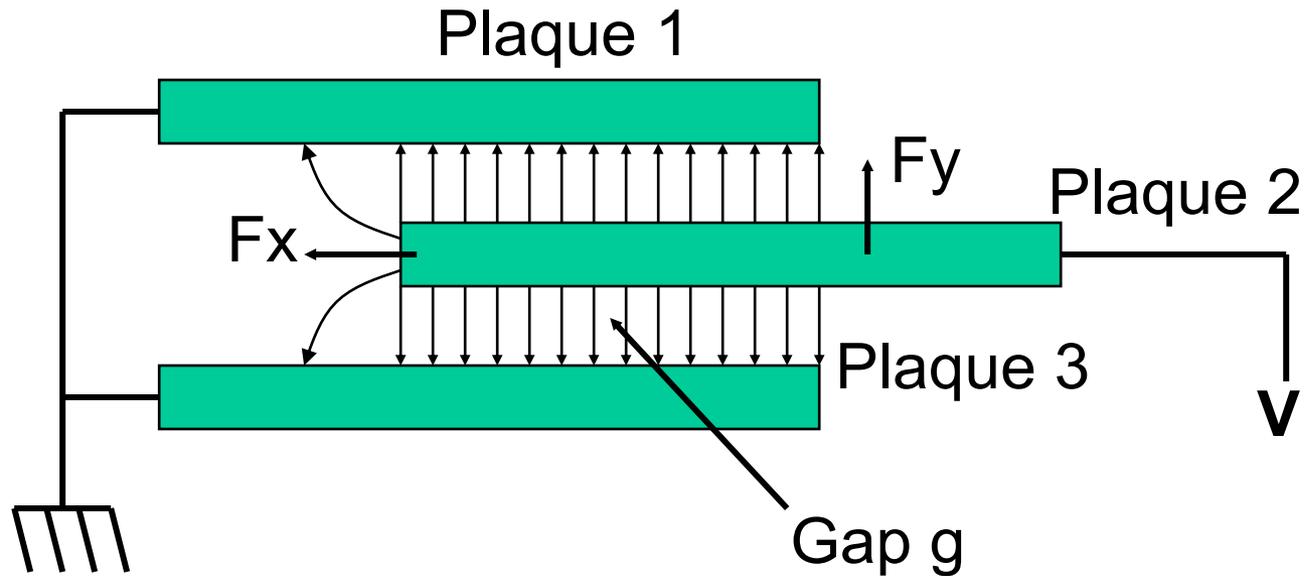


Digital Micromirror Device (DMD)



Array of micromirrors

Les actionneurs CombDrive



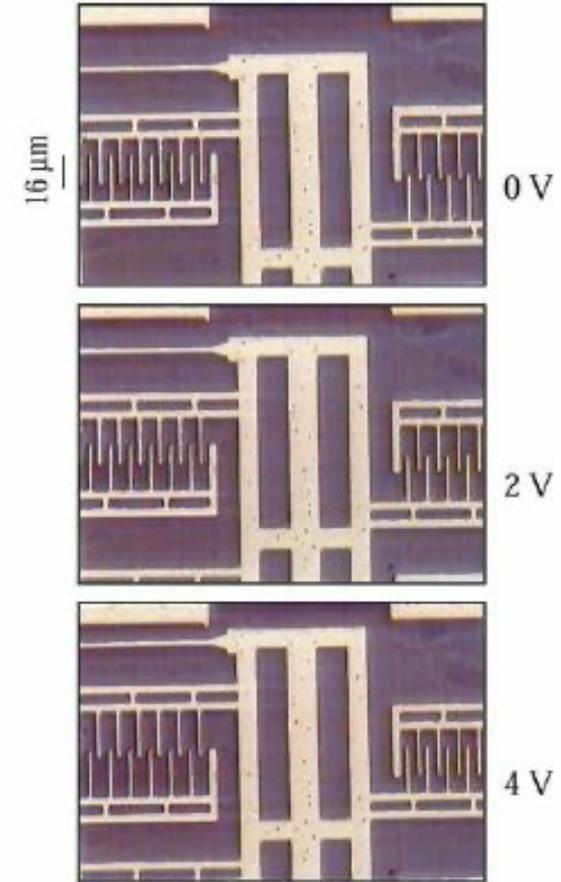
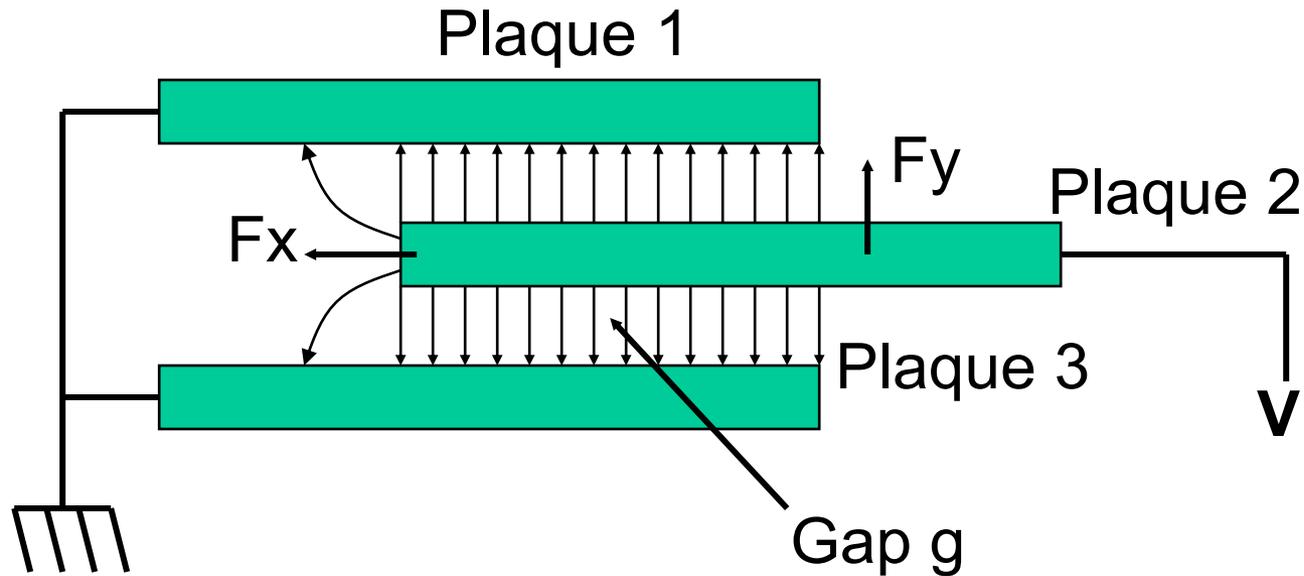
La plaque 2 est soumise à:

$$F_x = \left(\frac{1}{2} \epsilon V^2 \right) \left(\frac{2t}{g} \right)$$

=1nN@15 volts

Indépendant de x!
Proportionnel à t

Les actionneurs CombDrive



La plaque 2 est soumise à:

$$F_x = \left(\frac{1}{2} \epsilon V^2 \right) \left(\frac{2t}{g} \right)$$

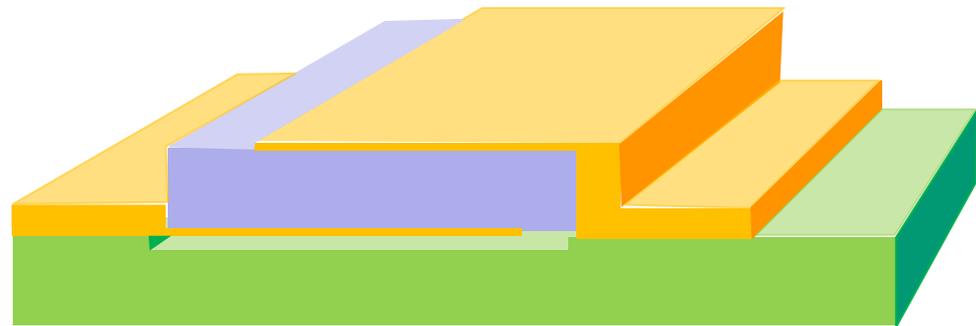
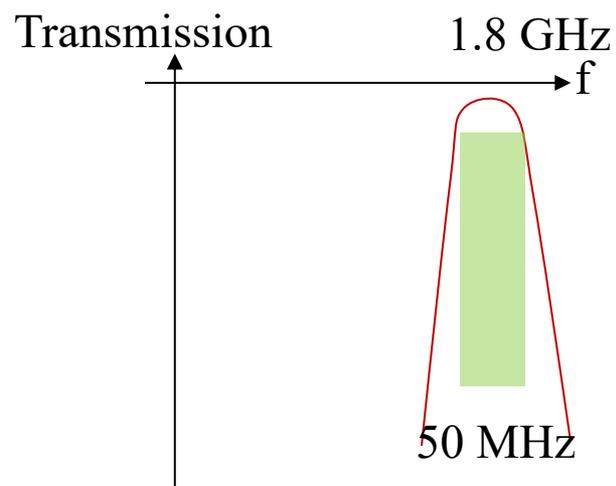
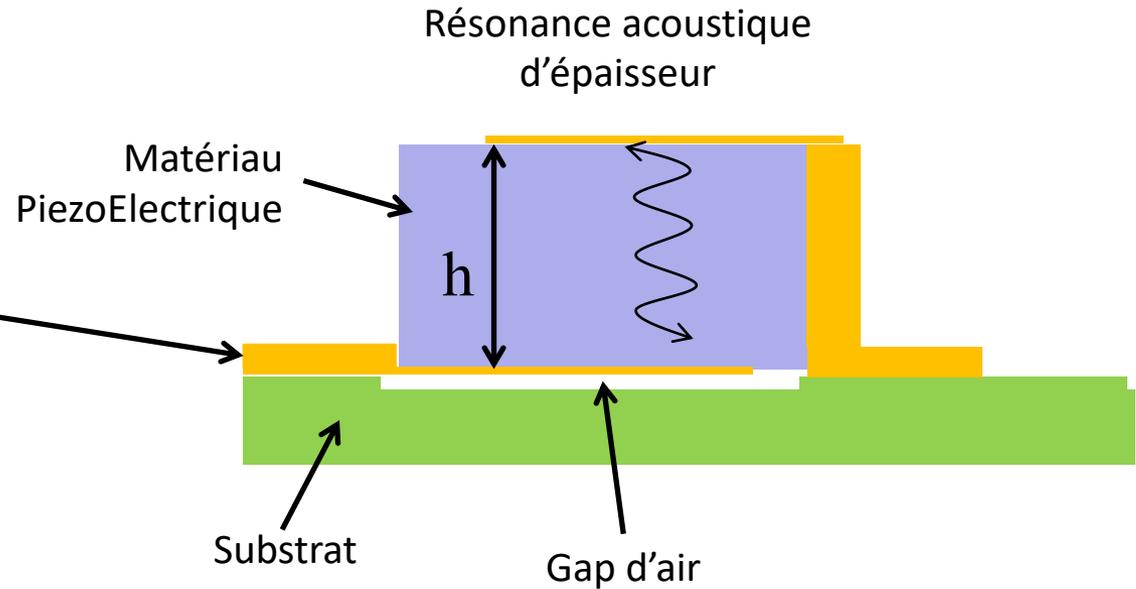
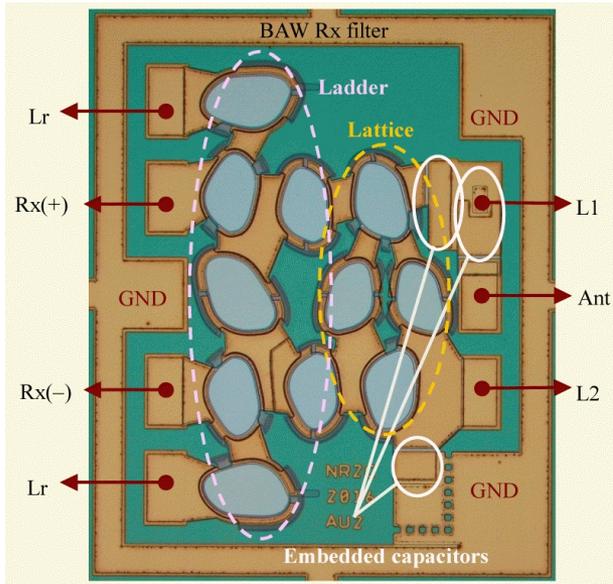
= 1 nN @ 15 volts

Indépendant de x!
Proportionnel à t

Résonateurs acoustiques – Quelques calculs

- Les filtres de sélection de fréquences FBAR (Film Bulk Acoustic Resonators)
- Utilisés dans tous les Smartphones (~ 10 par Téléphones)
- Principe: On lance une onde de volume dans un matériau piézoélectrique (AlN) et on obtient une résonance acoustique fixée par l'épaisseur du matériau

Résonateurs acoustiques



Résonateurs acoustiques

- $V_{AIN} = 10400 \text{ m.s}^{-1}$
- $f_0 = 1.8 \text{ GHz}$

$$V_{AIN} = 10400 \text{ m.s}^{-1}$$

$$f_0 = 1.8 \text{ GHz}$$

$$\lambda = \frac{V_{AIN}}{f_0}$$

$$\lambda = \frac{10400}{1,8 \cdot 10^9} = 5,77 \mu\text{m}$$

$$\frac{\lambda}{2} = 2,88 \mu\text{m}$$

$$h = \frac{V_{AIN}}{2f_0}$$

$$\frac{dh}{df} = -\frac{V_{AIN}}{2f_0^2}$$

$$\Delta h = -\frac{V_{AIN}}{2f_0^2} \Delta f$$

$$\Delta h = -\frac{V_{AIN}}{2f_0^2} \Delta f$$

$$\Delta h = -\frac{10400}{2,3,24 \cdot 10^{18}} \Delta f$$

$$\Delta h = -\frac{10400}{2,3,24 \cdot 10^{18}} 50 \cdot 10^6$$

$$\Delta h = -\frac{1,04 \cdot 10^4}{2,3,24 \cdot 10^{18}} 50 \cdot 10^6$$

$$\Delta h = -\frac{52 \cdot 10^{10}}{2,3,24 \cdot 10^{18}}$$

$$\Delta h = -8,02 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

Pour 1 MHz

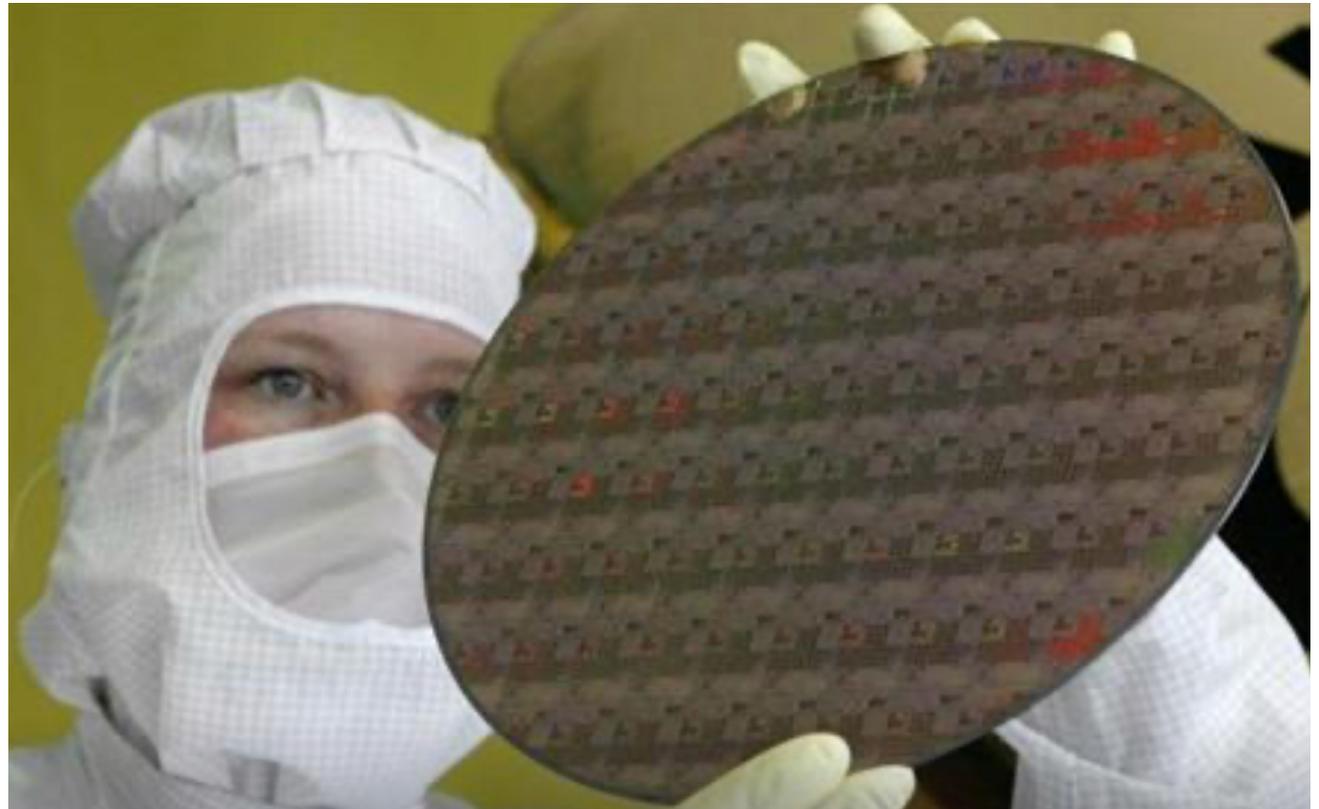
$$\Delta h = -16,04 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

50 MHz

Résonateurs acoustiques

- $V_{\text{AIN}} = 10400 \text{ m.s}^{-1}$
- $f_0 = 1.8 \text{ GHz}$

$$\Delta h = -16.10^{-10} \text{ m}$$



Conclusions - Takeaway

- Les MEMS sont des composants dérivés de la microélectronique:
 - Applications grand public, fort volume
- La physique des MEMS est « classique »: mécanique + électrostatique
- Les applications sont principalement dans les smartphones
- Ces composants sont souvent disponibles pour d'autres applications (Arduino, Drones, projecteurs « head up » de voitures etc..)