

Habilitation à Diriger des Recherches

Micromécanique et microthermique, micro et nano-systèmes pour les sciences de la vie

8 Avril 2015

Benoît CHARLOT

IES Institut d'Electronique et des Systèmes
CNRS Université Montpellier



Quelques chiffres

42_{ans} 2001_{thèse}
2002_{entrée au CNRS} 3_{laboratoires}
2_{ans au Japon}
26_{articles} 3_{thèses co-encadrées}
53_{conférences} 20_{masters}
16_{h-index} 35_{heures de cours/an}
3_{projets Européens} 2,5_{années au CA de l'UM2}
11_{projets ANR refusés} 10_{mois dans la Marine}
2_{filles au collège} 3_{rides sur le front}

Parcours



TIMA 1998-2005

Thèse (test des MEMS)

Capteur d'empreintes

Microsources / Microthermique



LIMMS 2005-2007

Mémoires nanomécaniques

Jauge à émission de champ



IES 2007-2015

Pyroelectricité

BioMEMS

Préambule

Electronique intégrée

Micromécanique

Microthermique

Traitement de l'image

Capteur d'empreintes

MEMS

Simulations

Accéléromètres

Micro Electro Mechanical Systems

Thermographie

Piezo/Pyroélectricité

Microfabrication

Microfluidique

Neurosciences

Micro générateurs

Biophysique

ADN

Cellules

Plan

1. Micromécanique

Capteur d'empreintes digitales
Microsources
Mémoires nanomécaniques

2. Microthermique

Thermographie de CI
Pyroelectricité

3. BioMEMS

Microfluidique pour les neurosciences
Peignage de l'ADN

1^{ere} Partie

Micromécanique

1.1 Capteur d'empreintes digitales

1999-2005

Développement d'un capteur d'empreintes digitales **MEMS**



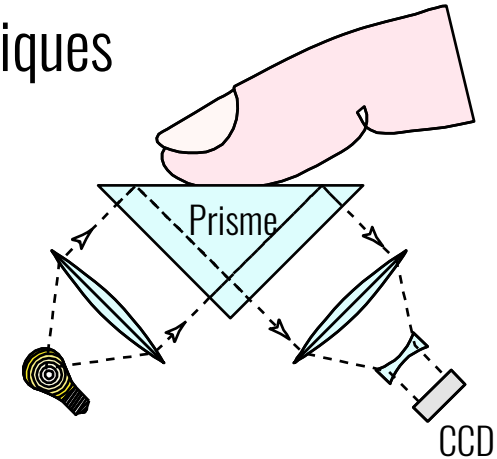
1.1 Capteurs d'empreintes

Capteurs :

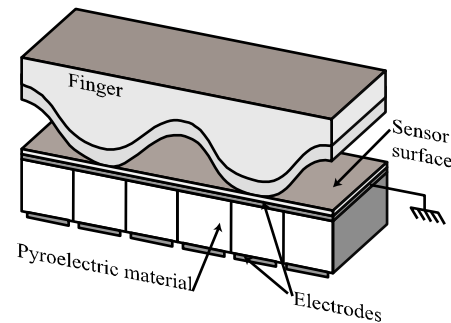
- Macroscopiques
- Intégrés



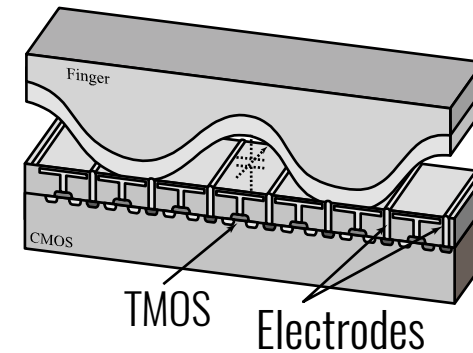
Optiques



Thermiques



Capacitifs



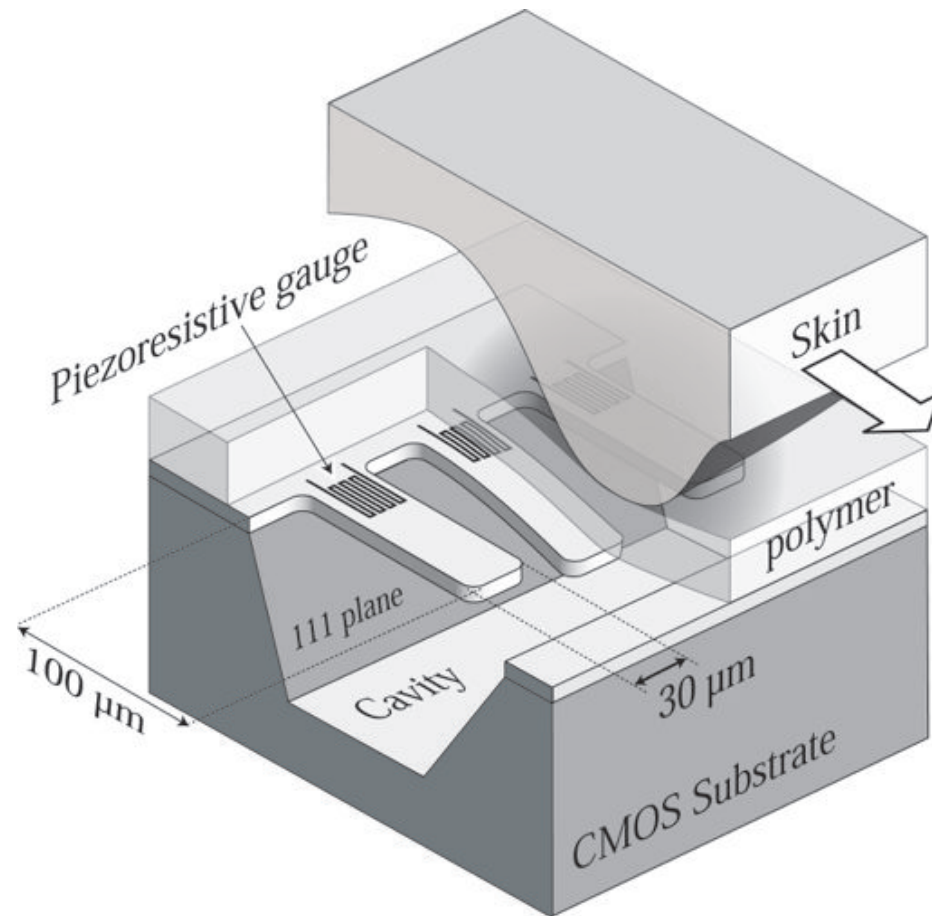
1.1 Capteurs d'empreintes

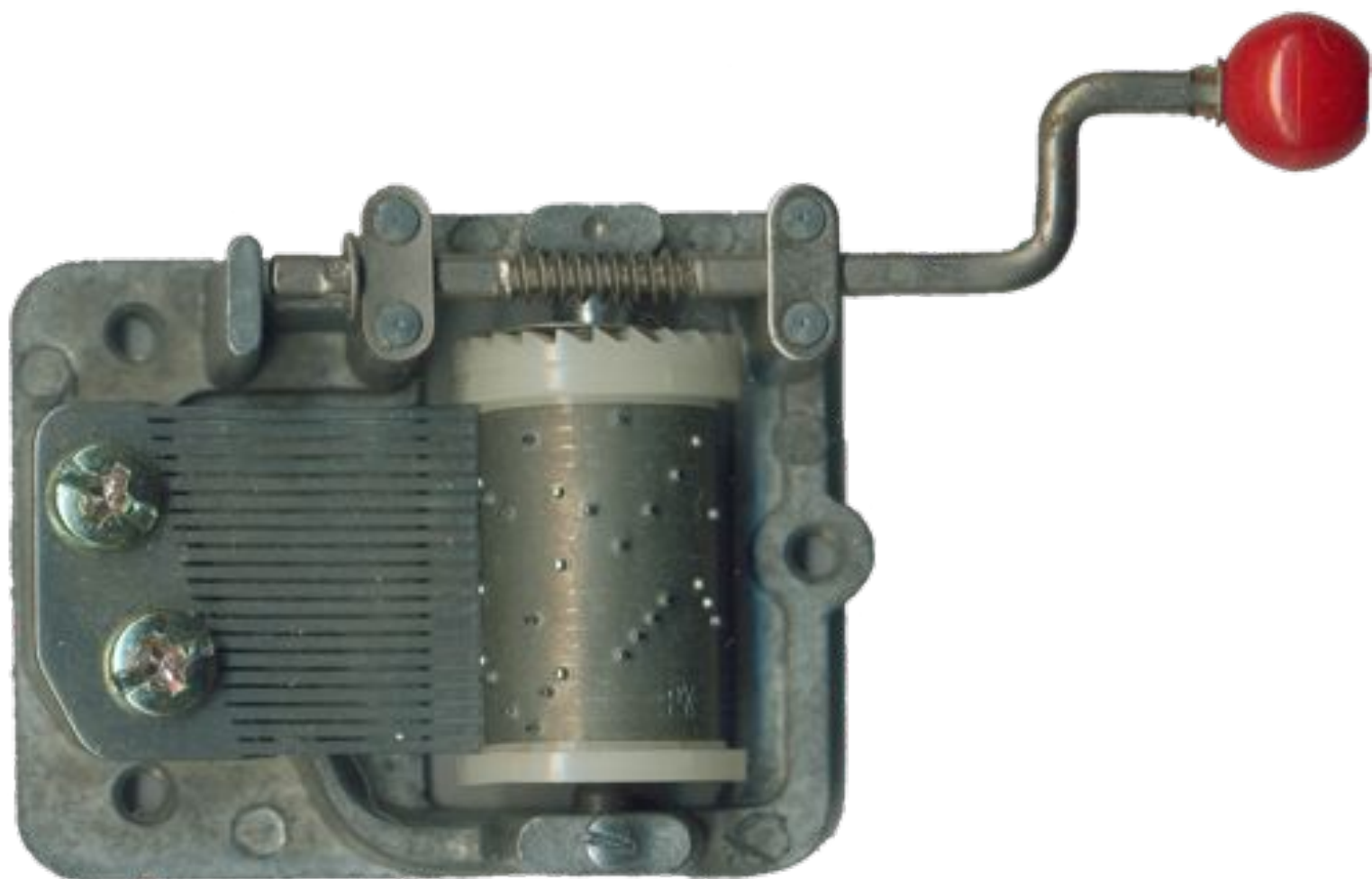
Mécanique (piezorésistif)

En ligne (surface mini)

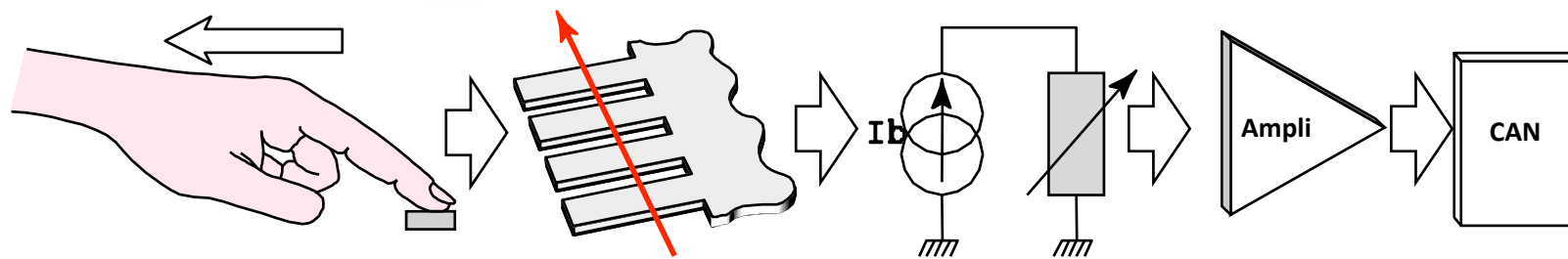
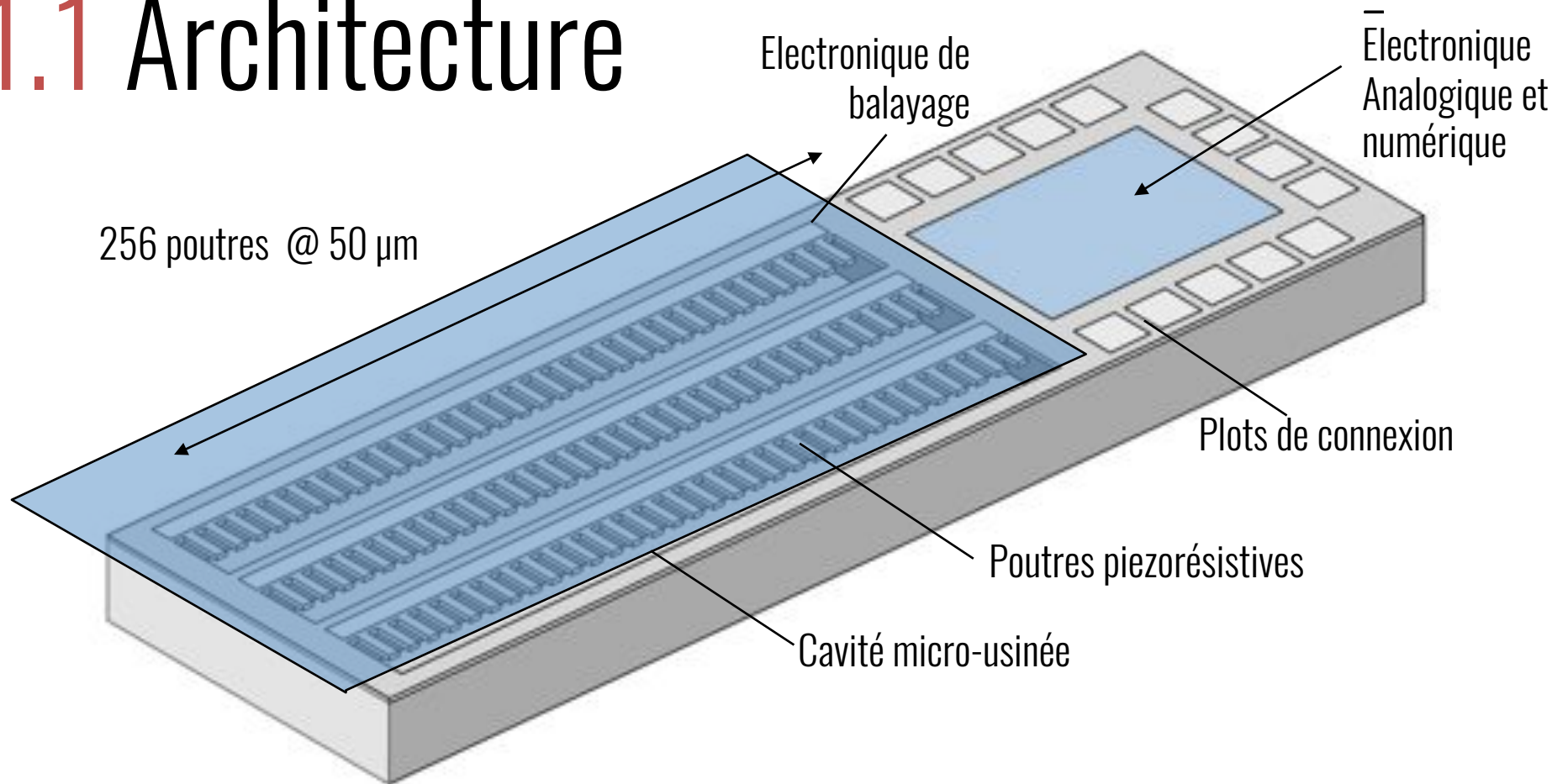
Monolithique, intégré

CMOS + gravure en volume





1.1 Architecture



Balayage du doigt

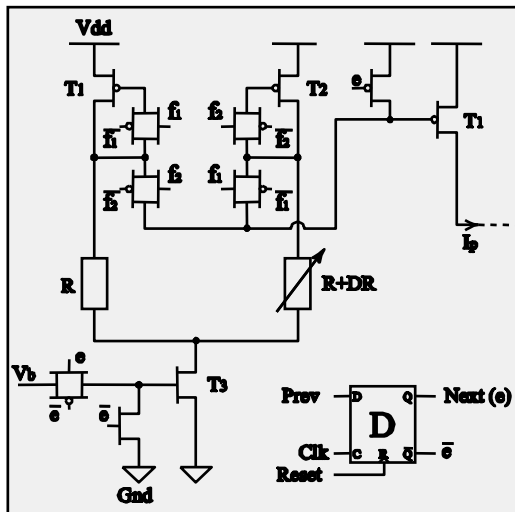
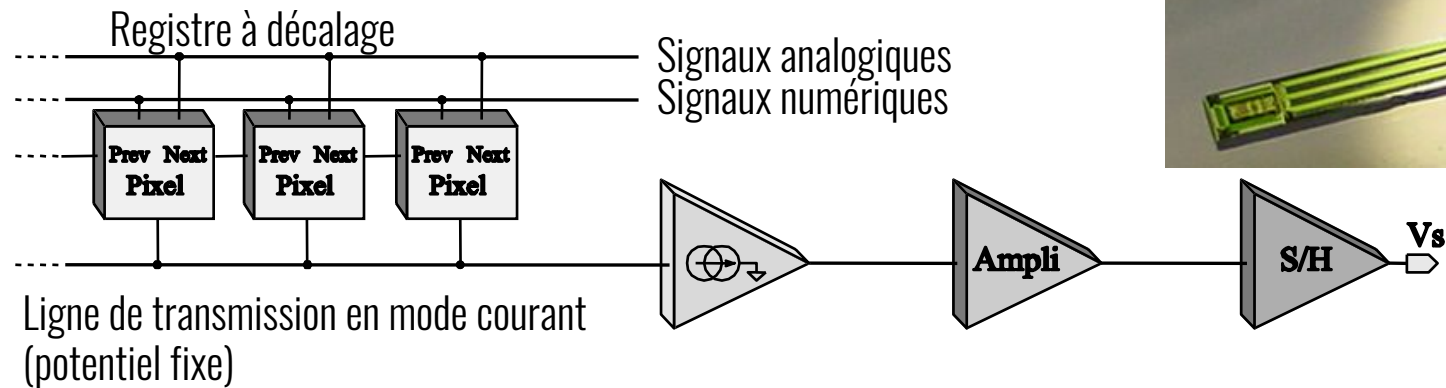
Balayage de la ligne

Transduction

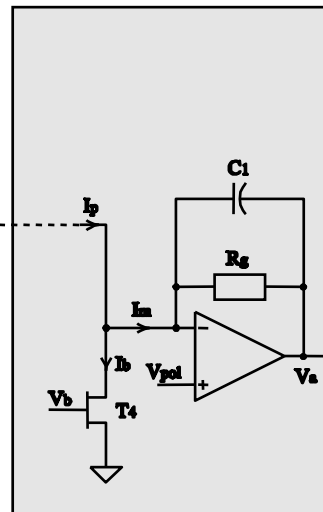
Amplification

Conversion
8-bit ADC

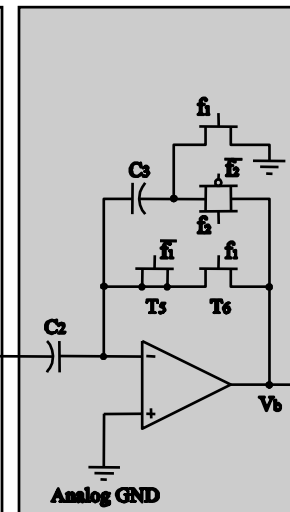
1.1 Electronique intégrée



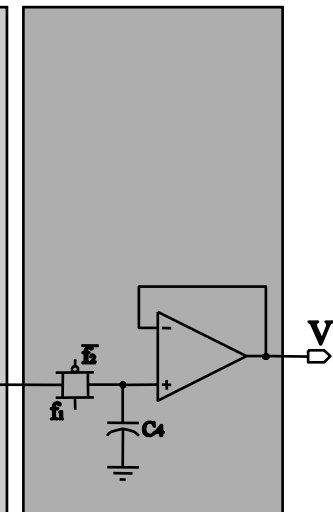
Electronique des pixels



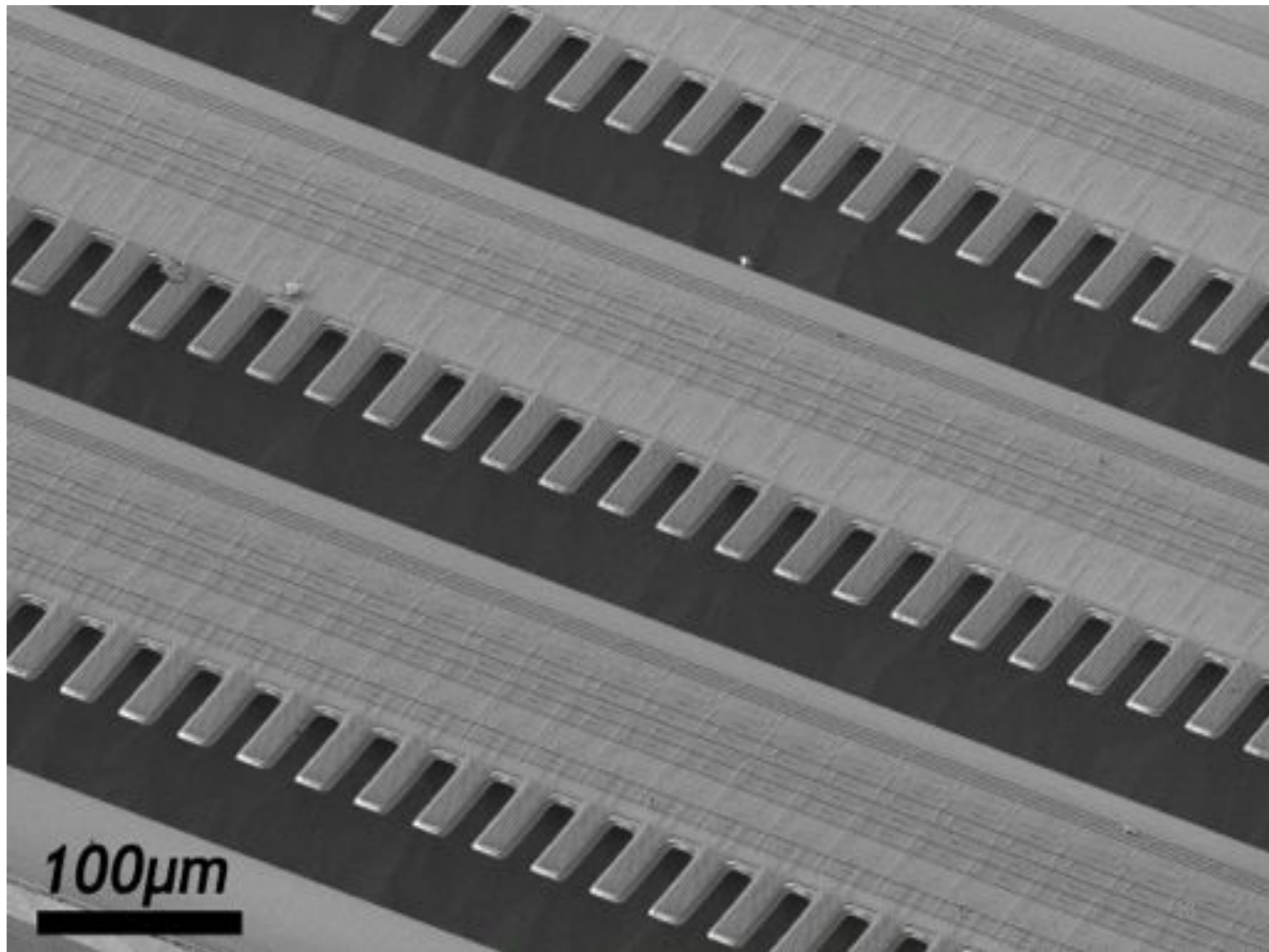
Amplificateur Transimpedance

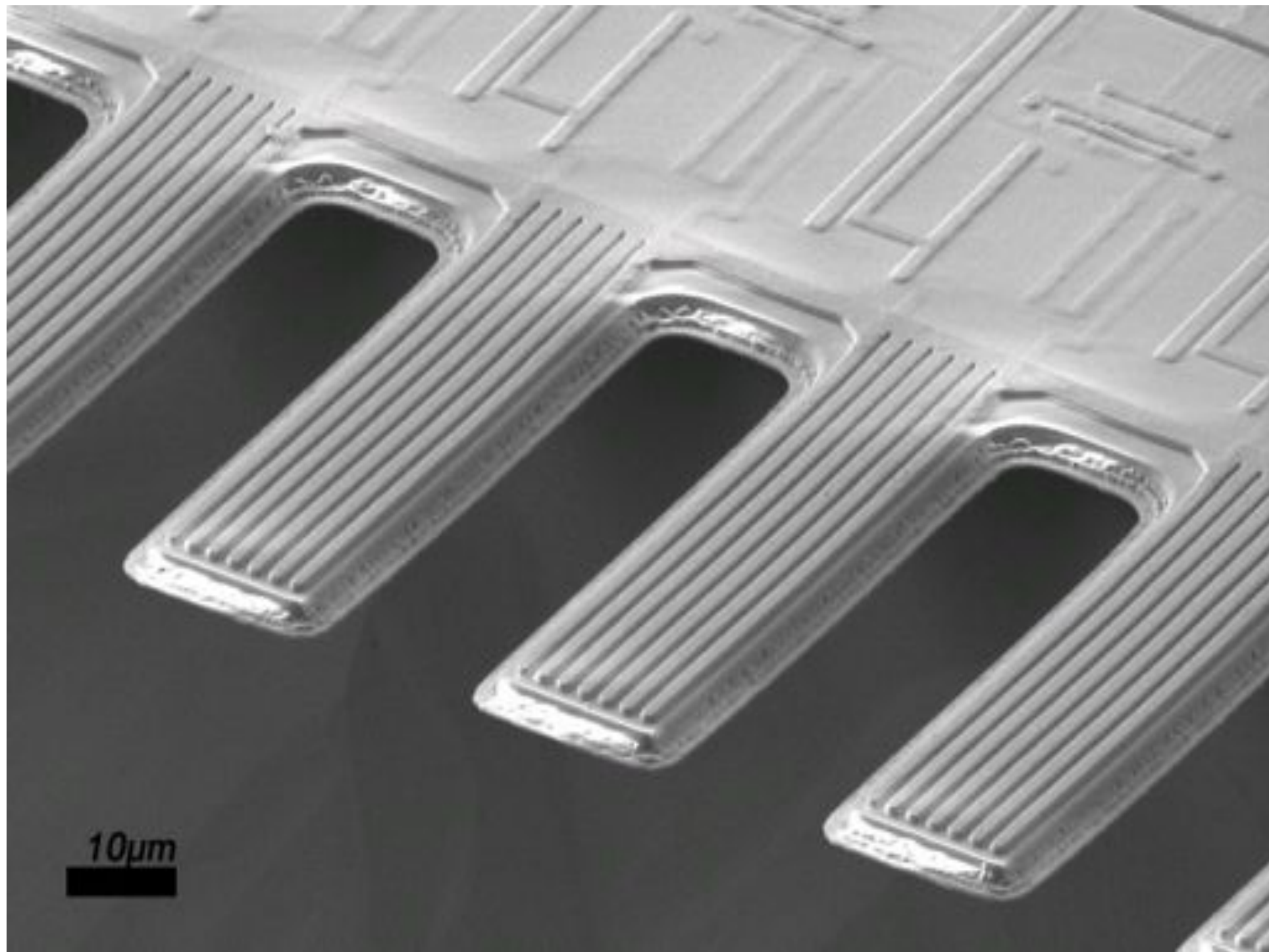


Amplificateur Capa com

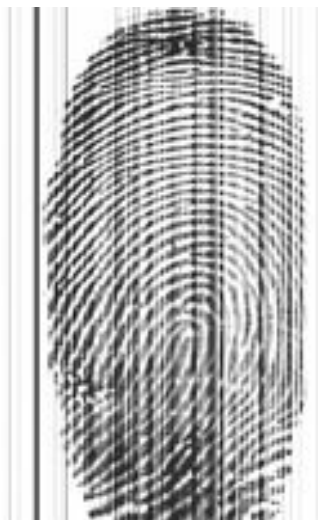


Sample and hold

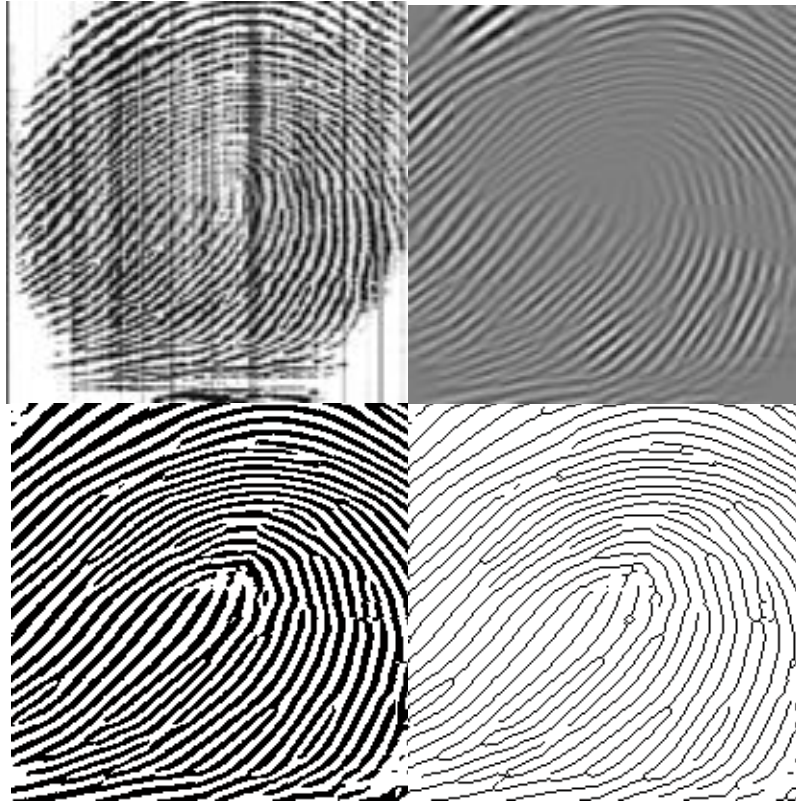




1.1 Mesures



1.1 Reconnaissance



Traitement de l'image



Extraction de la signature

1.1 Bilan

- **Deux thèses** : Fabien Parrain et Nicolas Galy
- Un système complet MEMS monolithique : fonctionnel
- Auto-test intégré
- Des performances ... encourageantes

taux de fausse acceptation / faux rejet : **10 -15%** (état de l'art 1%)

B.Charlot, et al. "A Sweeping Mode Integrated Fingerprint Sensor With 256 Tactile Microbeams". *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol 13, Issue 4, 2004, pp. 636-644

N.Galy et al. , "A Full Fingerprint Verification System for a Single-Line Sweep Sensor", *IEEE Sensors Journal*, Vol.7, issue 7, pp. 1054-1065, (2007).

B.Charlot, et al. "A Sweeping Mode Tactile Integrated Fingerprint Sensor", 12th International conference on solid-state sensors, actuators and microsystems *TRANSDUCERS'03*, 8-12 June 2003, Boston

1.2 Micro-sources d'énergie

2002-2005



Philips Research
Tyndall
U Southampton
TIMA
FEMTO-ST
Metravib
MEMSCAP

Contexte

Entrée au CNRS / arrivée de Skandar BASROUR

Projet Européen **VIBES**

Objectifs :

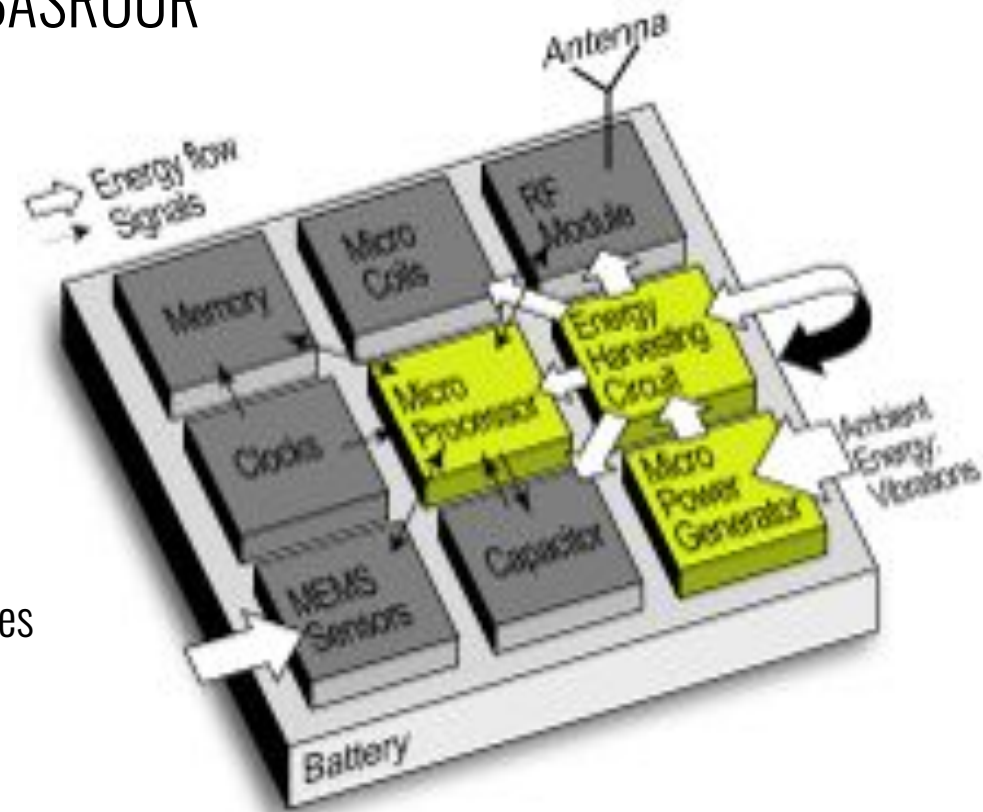
Module autonome

μ -contrôleur ultra basse conso

μ -batteries

Micro générateur de puissance récoltant l'énergie des vibrations

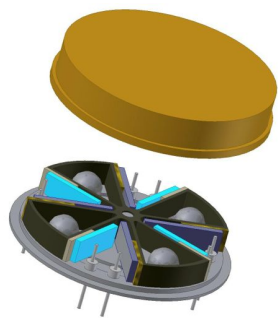
1 μ W



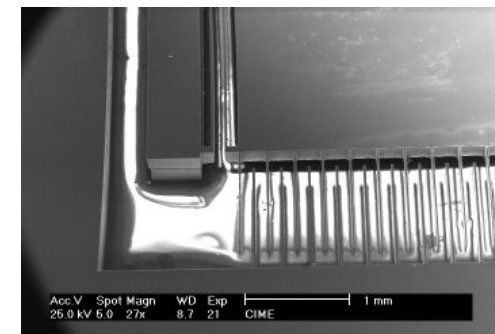
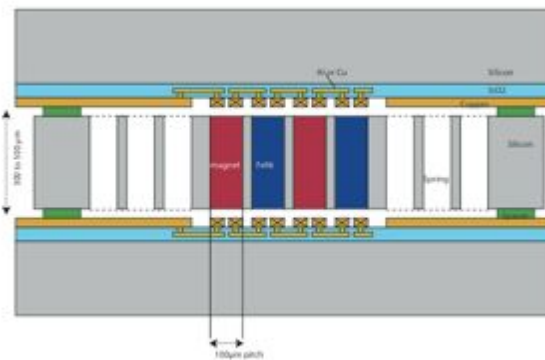
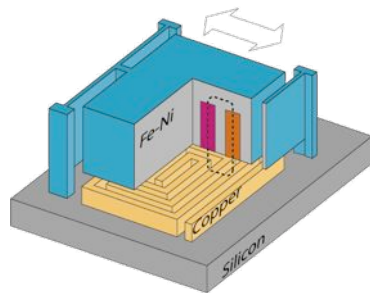
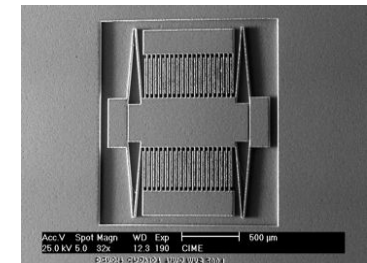
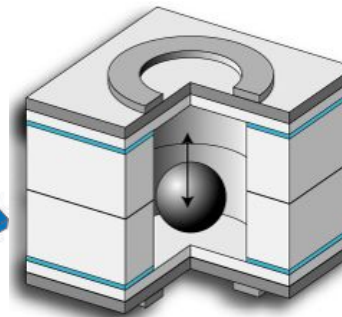
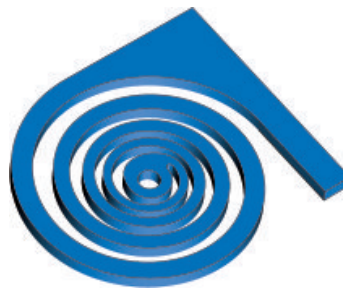
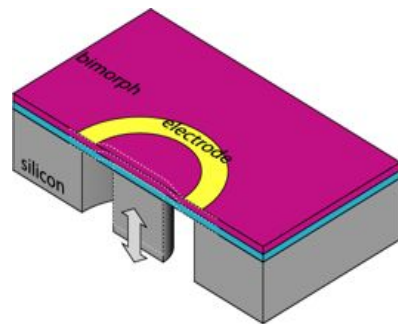
1.2 Microsources

Quelques hésitations sur le fond et la forme...

Electromagnétisme, électrostatique, piezoélectrique
Couplage, résonance, chocs, échappement



S.Ballandras, FEMTO

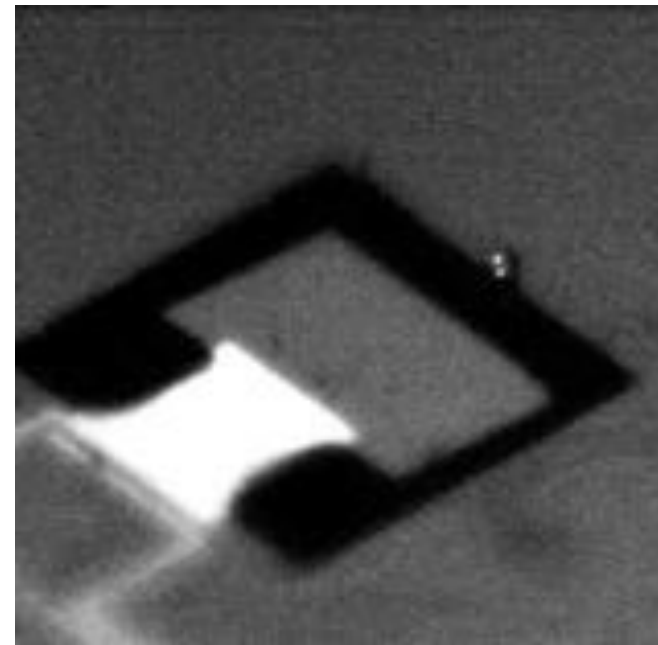
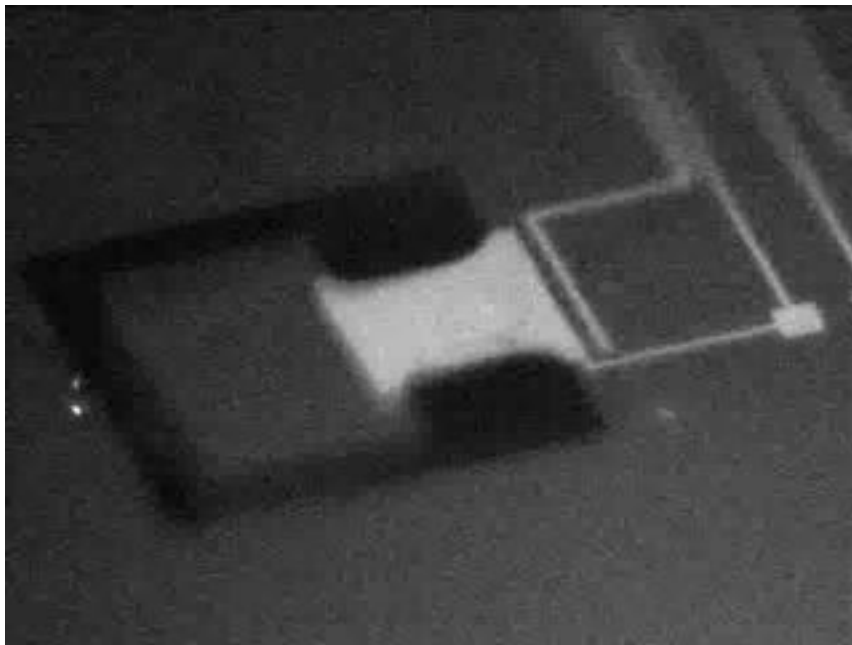
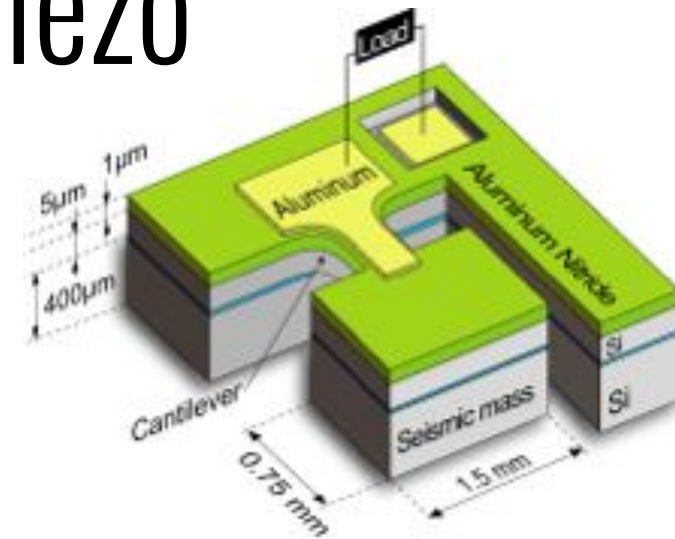


G.Despesse, LETI

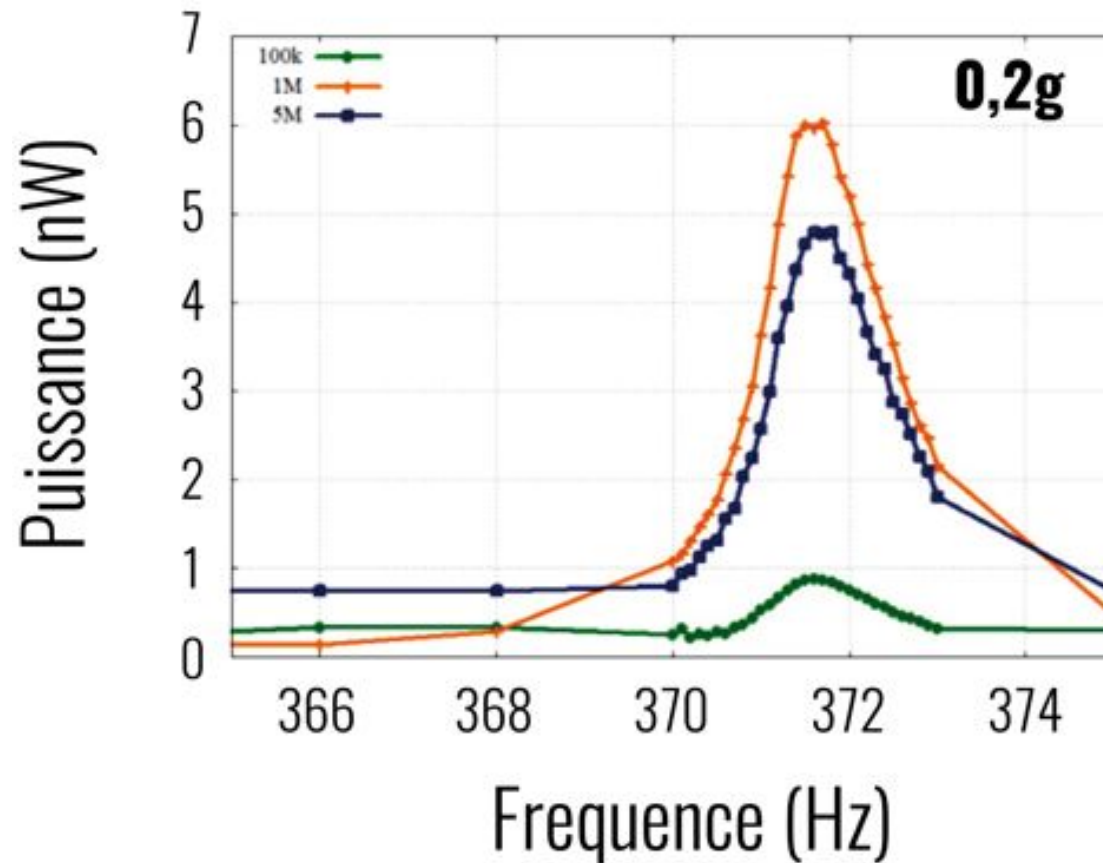
1.2 Micro générateur piezo

Pour se focaliser sur la **piezoélectricité**

substrat SOI + DRIE av/ar
Couche active en AlN (ESIEE)
Fr=200Hz p=38nW

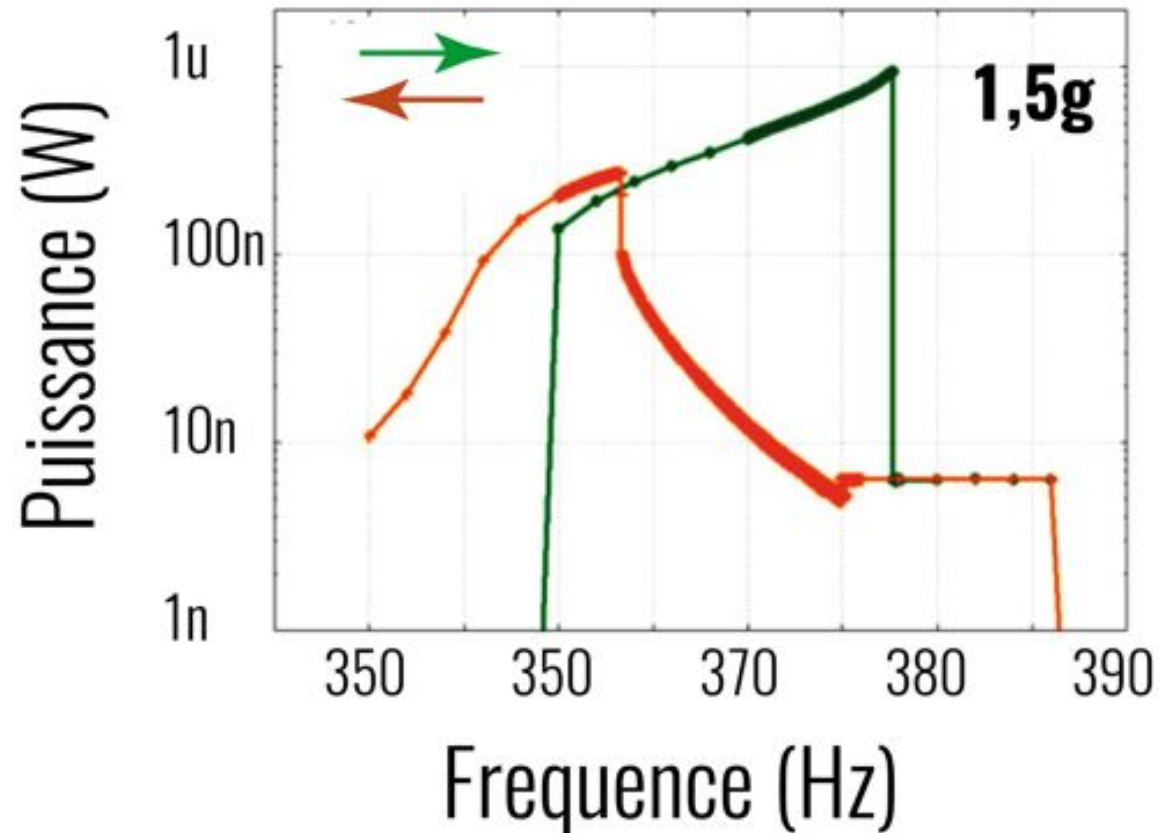


1.2 Micro générateur piezo



→ $P_{out} = f(F)$ @ 0,2g : linéaire 6nW

1.2 Micro générateur piezo

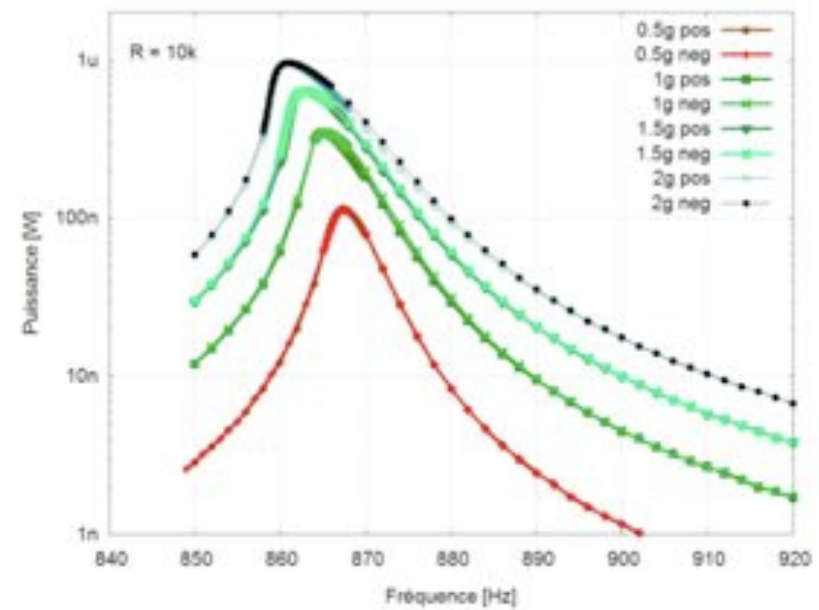
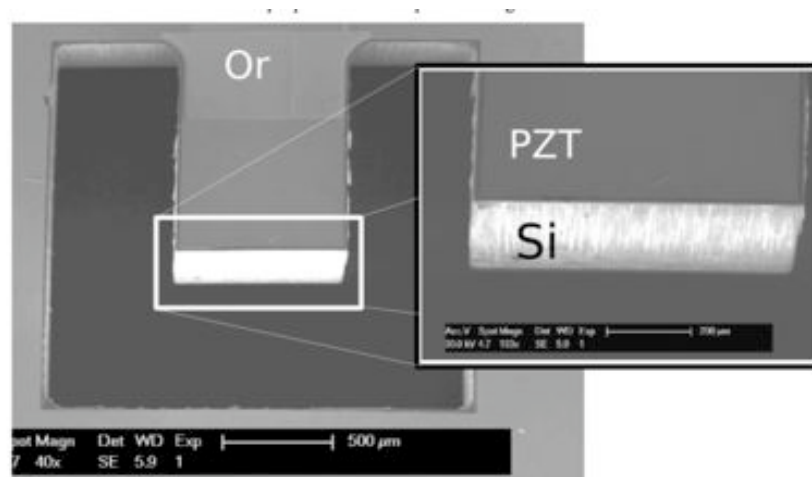


→ $P_{out} = f(F)$ @ 1,5 g : **non-linéaire 1μW**

1.2 Micro générateur piezo

Passage à une couche active en **PZT** (EPFL)

Fr=800hz



→ 1μW @ 2g

1.2 Micro générateur piezo

Gestion de la charge

Alimenter une batterie Li-ion à partir d'un micro générateur

Rectification ($V_{th}=0,6V$) / **Élévation**

Consommation < génération (60 nW)

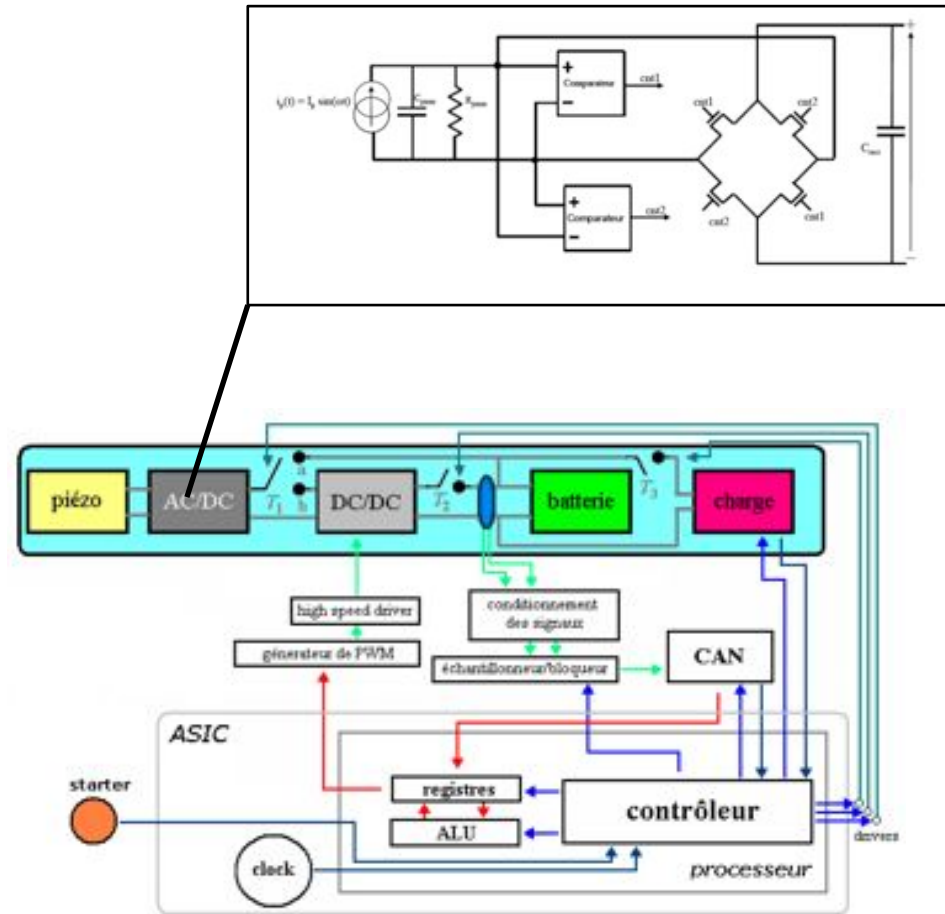
+ circuits asynchrones

+ architecture SSHI

Thèse de Yasser AMMAR

Y.Ammar et al. , "Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator", in *SoC-EUSAI, Smart Objects & Ambient Intelligence*, October 12th - 14th 2005, Grenoble, France

Cité 76 fois



1.2 Bilan

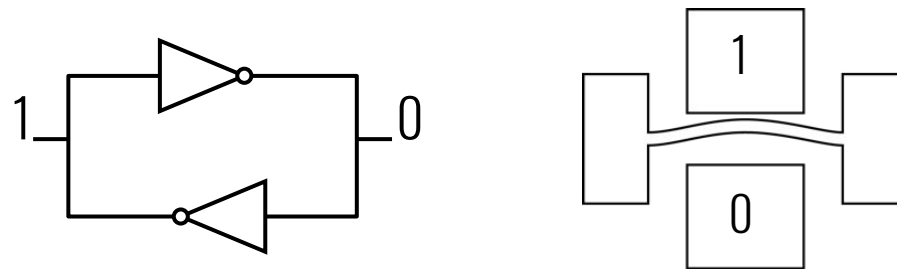
- Micro générateur piezo MEMS performants
- Parmi les premiers travaux dans le domaine
- Innovations sur la partie architecture du système : électronique asynchrone

Une thèse co-encadrée (partiellement) : Marcin MARZENCKI

1.3 Mémoires nanomécaniques

2005-2007

→ Développement d'un point mémoire basé sur une structure bistable mécanique



Écriture / Lecture électrique

équivalent à une SRAM +

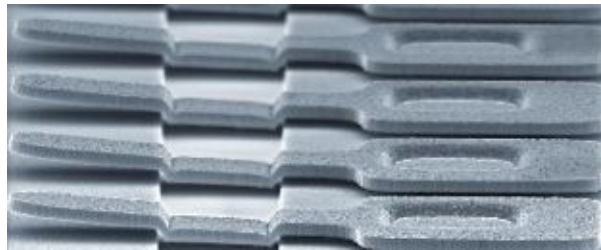
Non volatile

Tolérance aux radiations

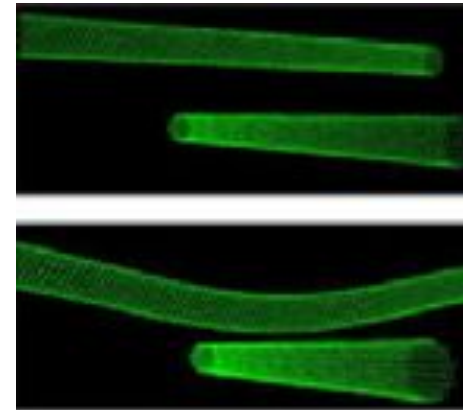
1.3 Mémoires nanomécaniques

Etat de l'art

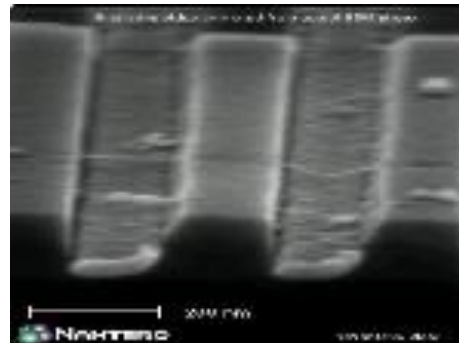
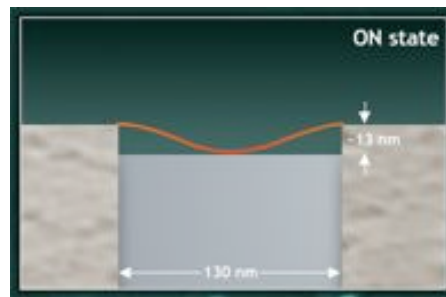
- Mémoires micro mécaniques
- Nanotubes de Carbone



Cavendish Kinetics



Thomas Rueckes, et al., "Carbon Nanotube Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing", **SCIENCE**, VOL 289, 7 JULY 2000.

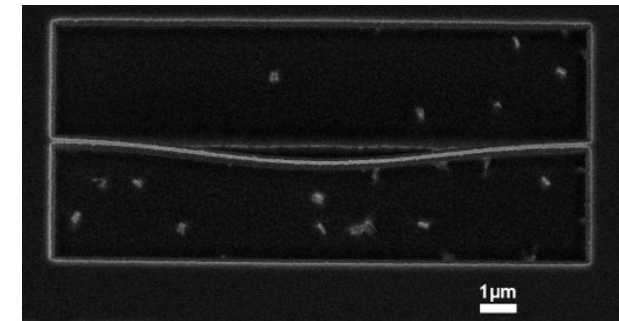
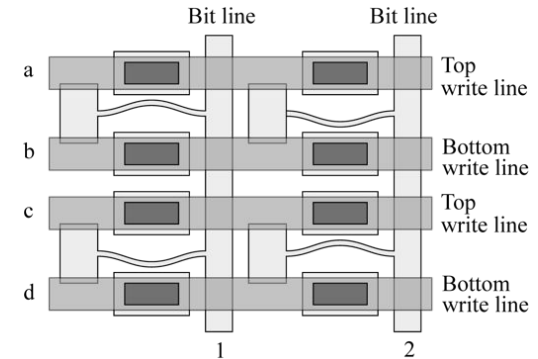
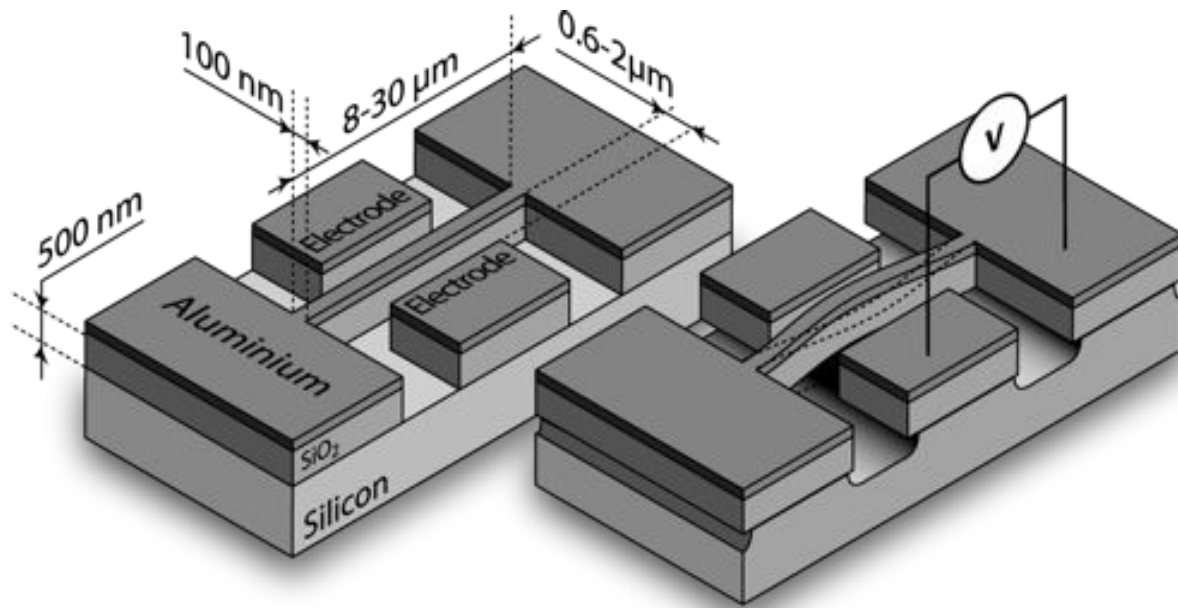


Nantero NRAM™



1.3 Mémoires nanomécaniques

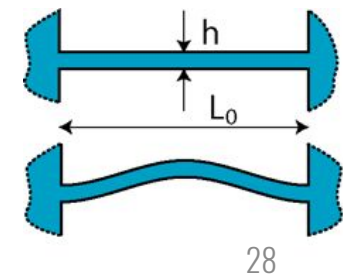
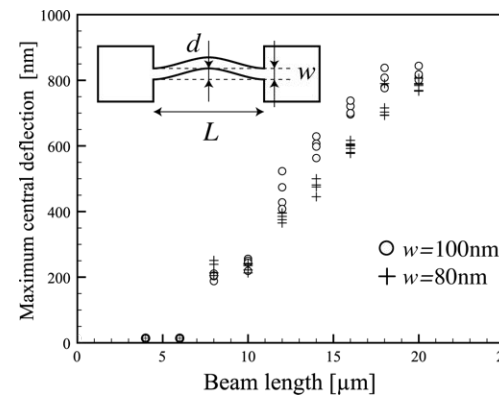
→ Micropoutres encastrées/encastrées avec **flambage dans le plan**



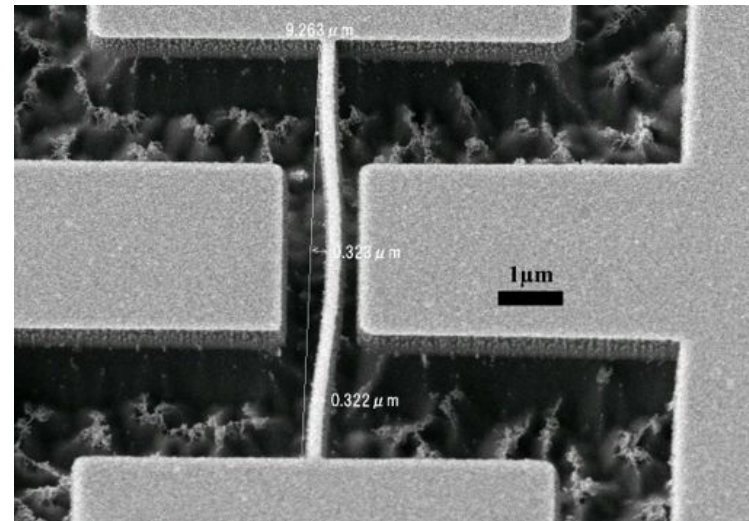
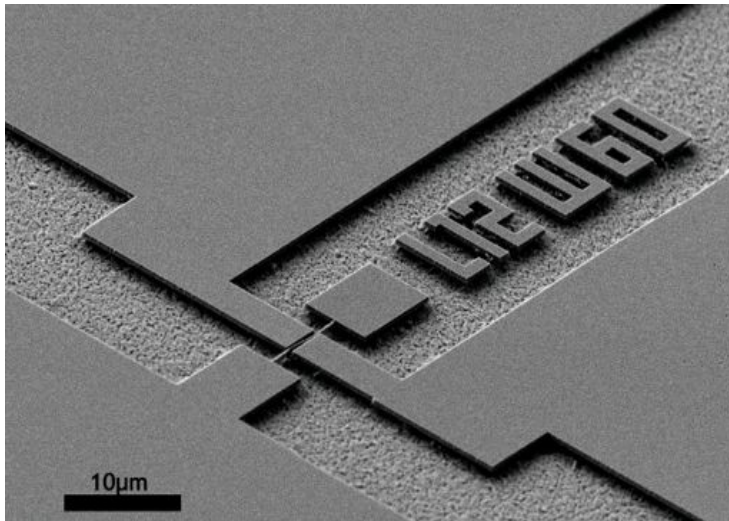
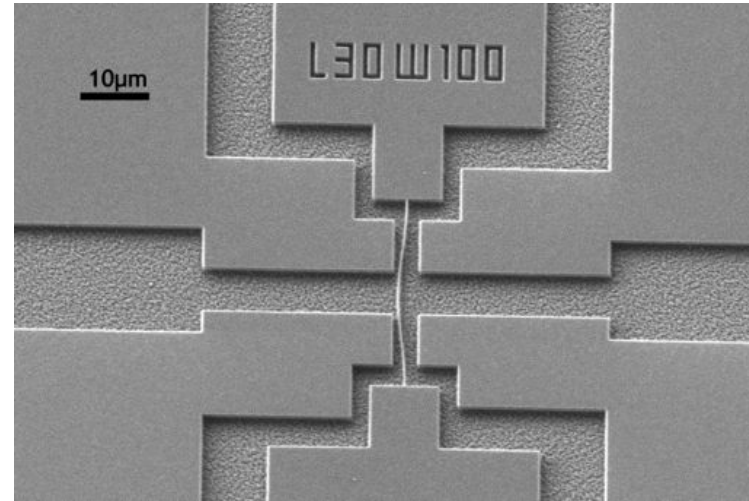
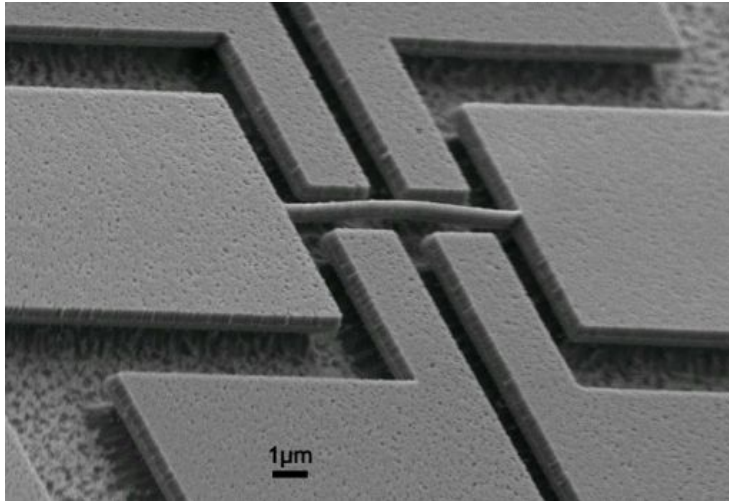
Actionnement par force électrostatique (écriture)

Pont capacitif (lecture)

Critère de flambage
$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{3} E \left(\frac{h}{L_0} \right)^2$$



1.3 Mémoires nanomécaniques



1.3 Mémoires nanomécaniques

Excitation: 90V@1kHz



B.Charlot, K.Yamashita, W.Sun, H.Fujita and H.Toshiyoshi, "Bistable nanowire for micromechanical memory", **Journal of Micromechanics and Microengineering** 18, 045005, (2008)

1.3 Mémoires nanomécaniques

Bilan :

Un système fonctionnel : stockage d'un bit sous forme mécanique, permanent

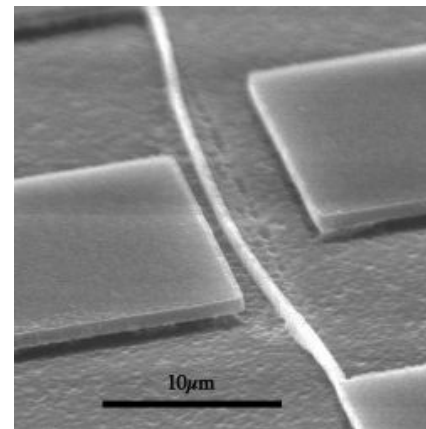
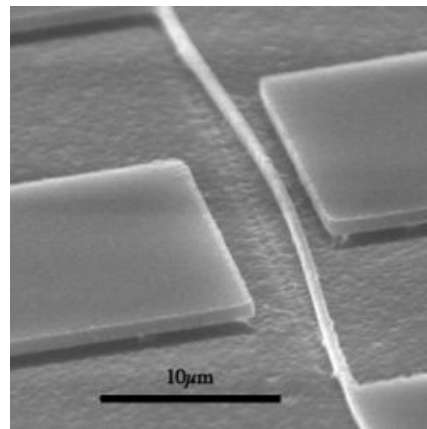
Évaluation de la lecture (pont capacitif)

Diminution de la taille (nanofils?)

Tension d'actionnement élevée

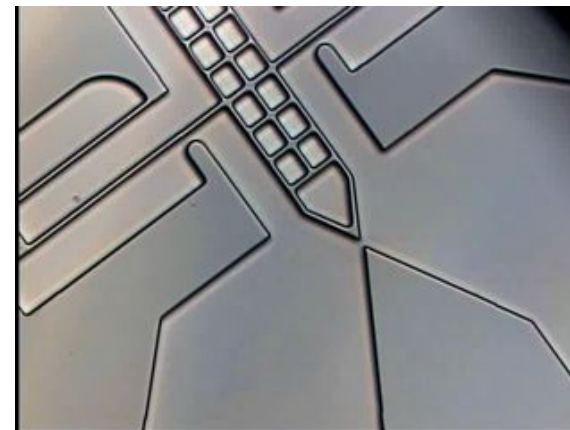
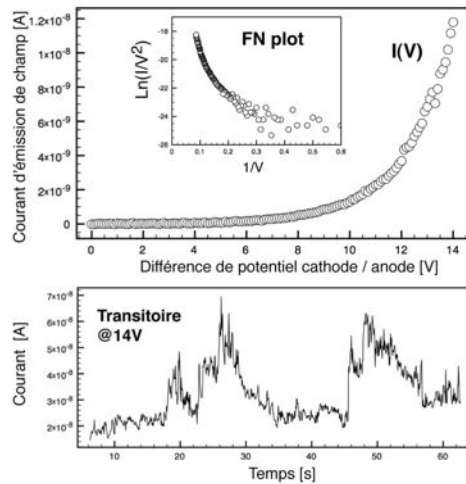
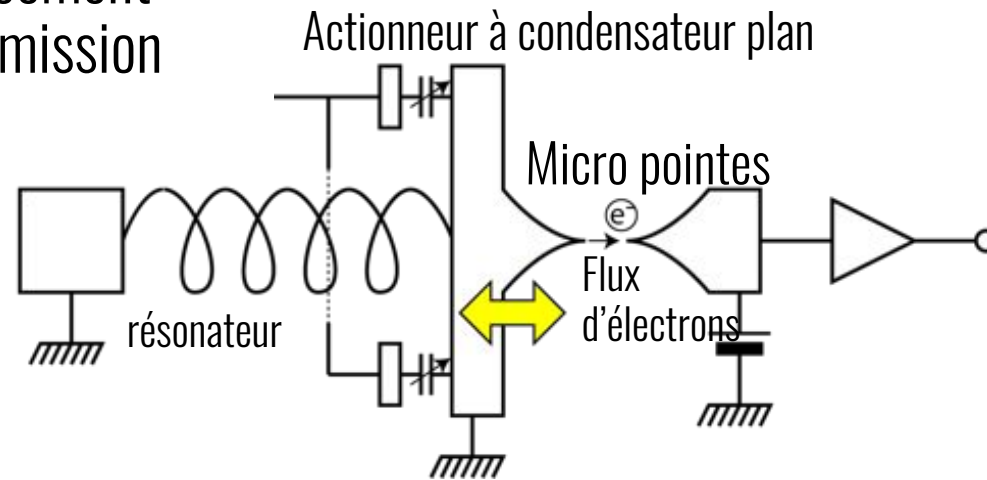
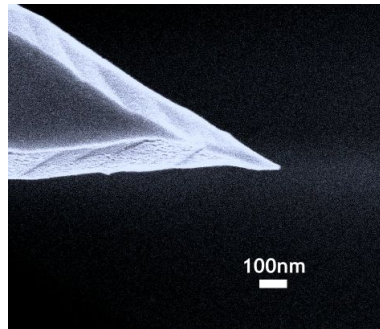
A l'IES : développement d'une version en a:Si-H

Flambage OK mais problème de dopage/ recristallisation



1.4 Jauge de déplacement FN

→ Remplacer les jauges de déplacement capacitives par un système à émission de champ



2^{eme} Partie

Microthermique

2 Micro thermique

Dissipation de la chaleur dans les CI

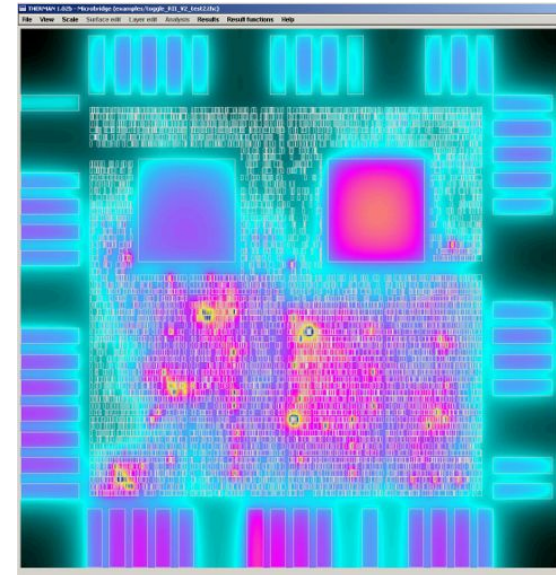
Gradients de température

- Taux de défaillance
- Détérioration de l'intégrité du signal

Il est possible d'agir sur le placement/ routage
Pour atténuer les points chauds

Besoins :

- Simulation électrothermique
- **Thermographie dynamique**

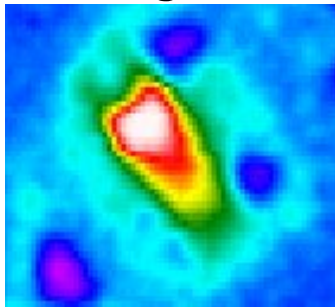


K.Torki, Simulation electrothermique
au niveau cellule

2.1 Thermographie

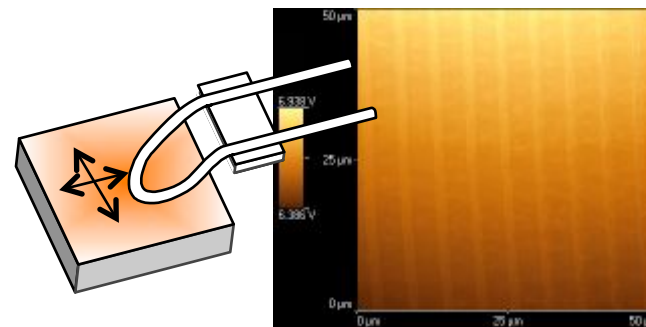
Avec les équipes du **GDR Micro et nanothermique** : évaluation des techniques de thermographie

Infrarouges



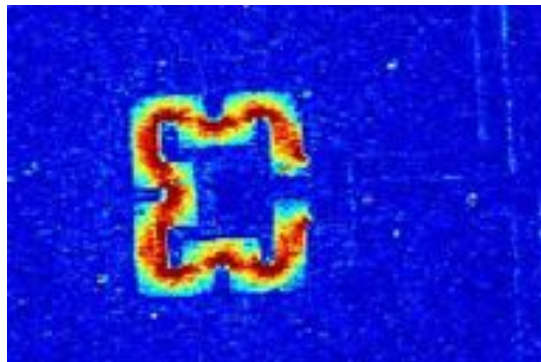
D.Veychard, TIMA

SthM : pont de Wollaston



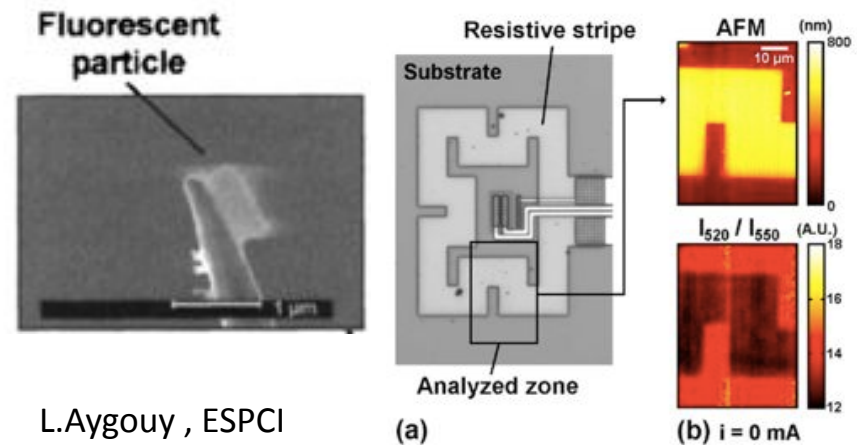
N.Trannoy, LEO

Thermoreflectance



G.Tessier, ESPCI

AFM : fluorescence



L.Aygouy , ESPCI

2.1 Thermoreflectance

- Méthode optique / sans contact / sans perturbations
- Modulation de l'éclairage HF (LED)
- Visualisation des échauffements dans les conducteurs sous la passivation

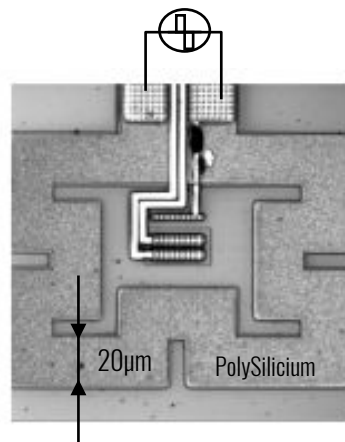
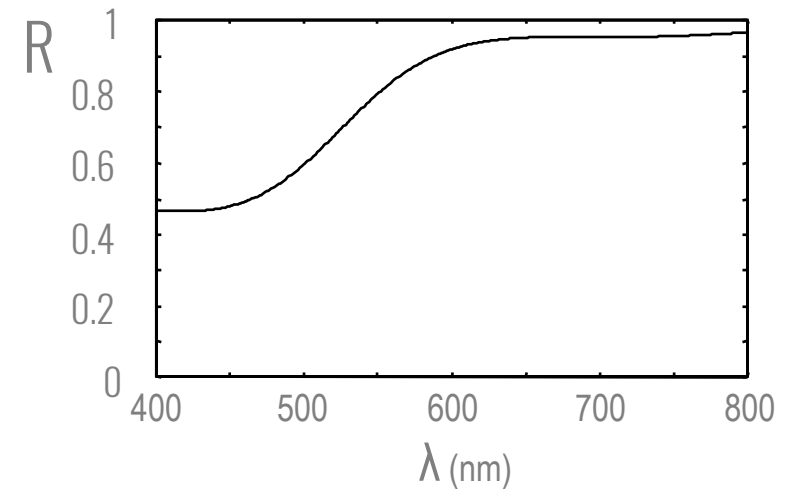
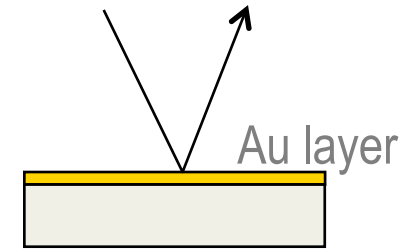


Image optique

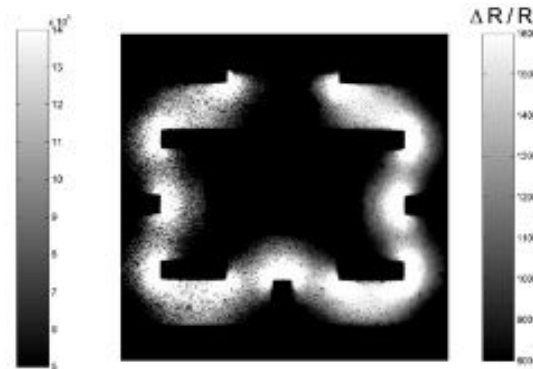
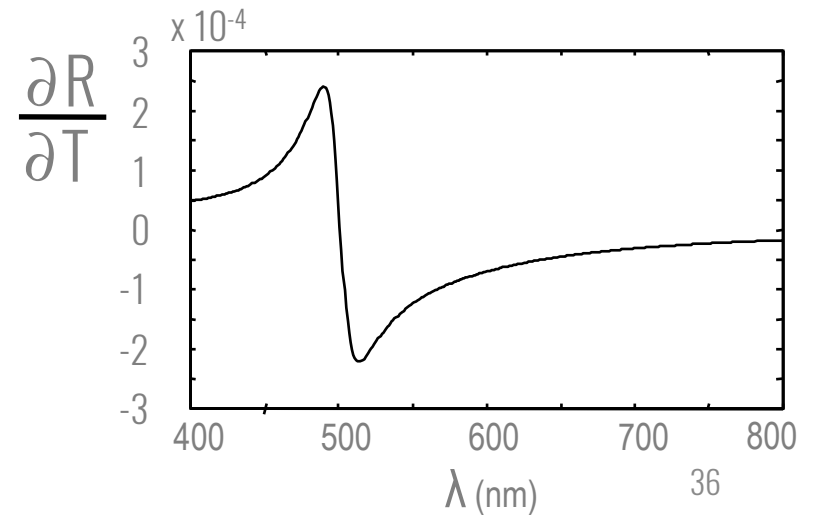


Image thermique

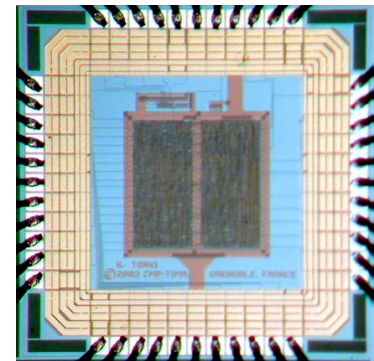
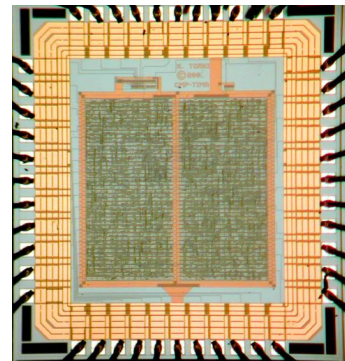
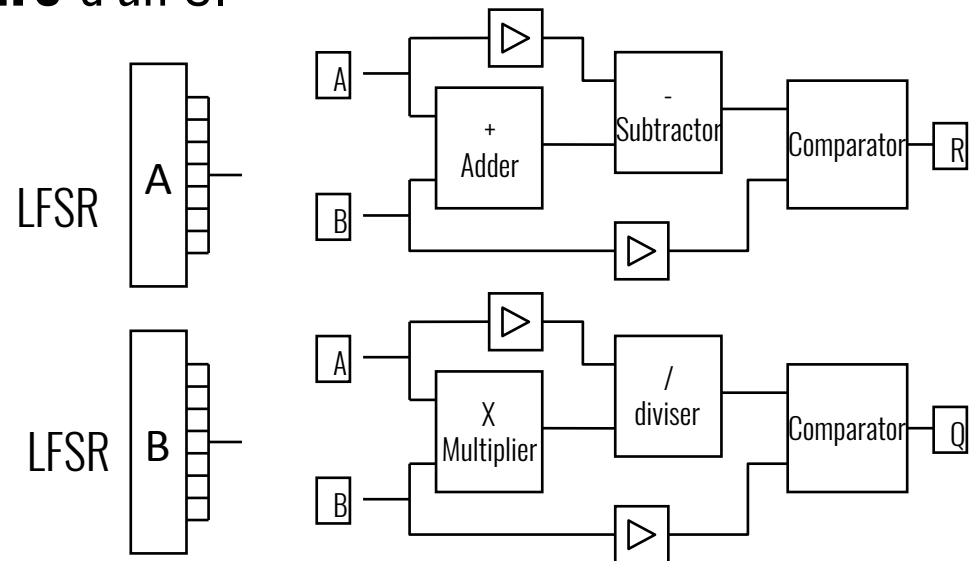


2.1 Thermoreflectance sur CI

Produire une **carte de la température** d'un CI pendant un cycle de calcul

Design d'un CI spécifique

- Adapté aux manip de TR
- Fonctionnement répétitif
- Différents niveau de congestion
- validation des simulations



2.1 Thermoreflectance sur CI

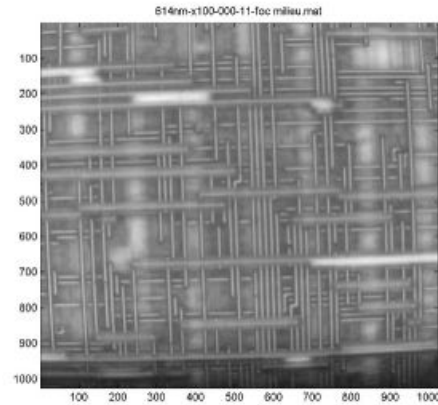


Image optique

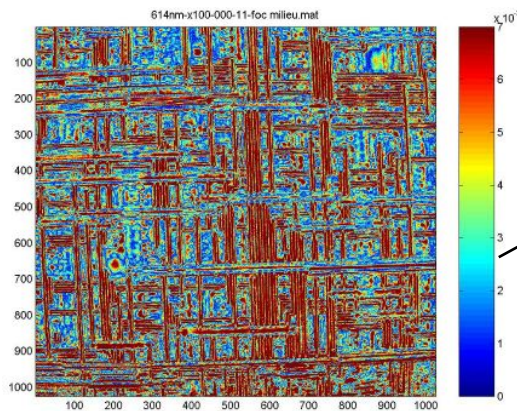
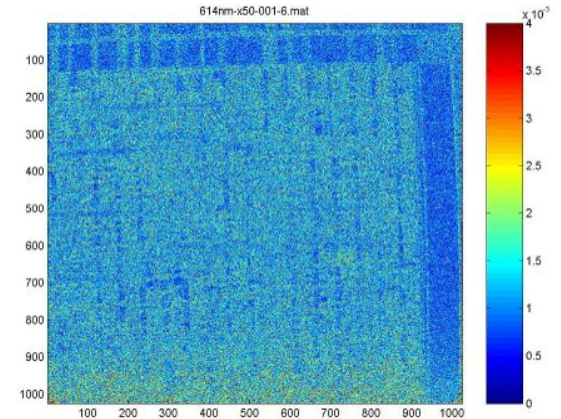
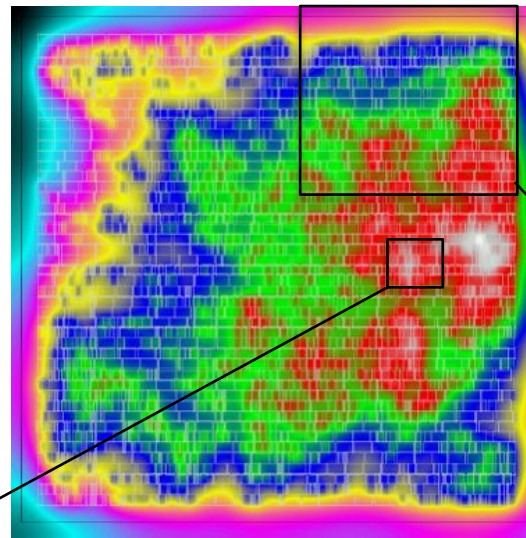
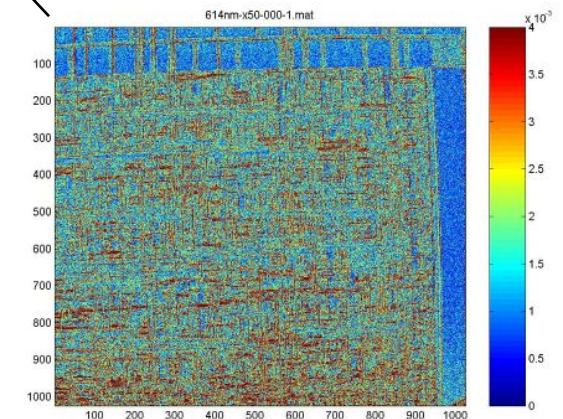


Image thermique



40 mHz



225 mHz

2.1 Thermoreflectance

Technique très prometteuse

Mesure optique/ pas d'interférence

Précision spatiale et temporelle (heterodynage)

Mesure de la température à travers la passivation

Nécessite une calibration

Le projet aurait mérité plus de moyens...

B.Charlot et al. , "A Digital CMOS Circuit For Reflectance Thermography", 10th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, THERMINIC'04

L.Aigouy et al. "Scanning thermal imaging of microelectronic circuits with a fluorescent nanoprobe", *Appl. Phys. Lett.* **87**, 184105 (2005).

S.Gomes, et al., "Temperature Study of Sub-Micrometric ICs by Scanning Thermal Microscopy", *IEEE Transaction of Components and Packaging Technologies*, 30-3 , (2007).

S.Grauby, et al. "Comparison of thermoreflectance and scanning thermal microscopy for microelectronic device temperature variation imaging: Calibration and resolution issues", *Microelectronics Reliability*, 48-2 (2008)

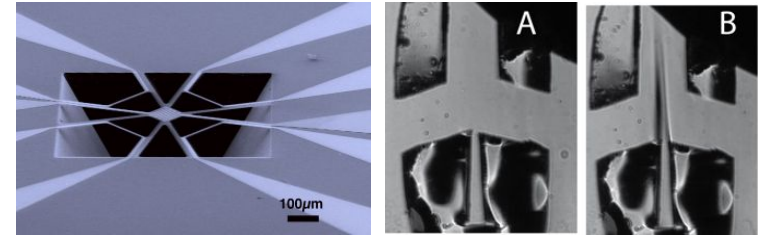
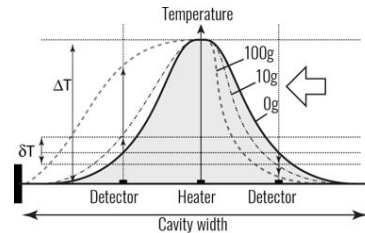
2.2 Microthermique à l'IES

Accelero / gyro thermique avec Alain Giani

Projet ANR Rage

A.Garraud, et al. "Frequency response analysis of an accelerometer based on thermal convection", *J. Micromech. Microeng.* 21 035017 (2011).

A.Garraud, et al. "A dual axis CMOS micromachined convective thermal accelerometer" *Sensors and Actuators A: Physical*, [Vol.170, Issues 1-2](#), Pages 44-50, (2011).



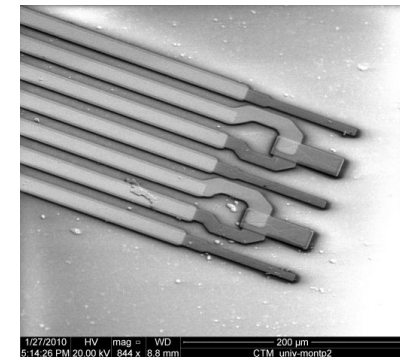
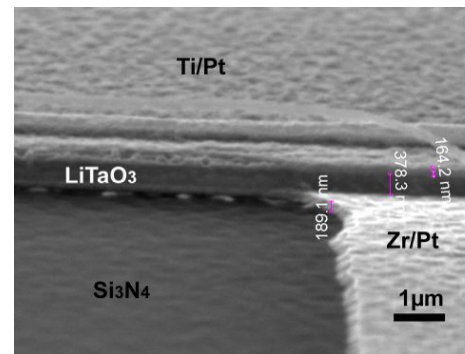
Matériaux Pyroélectriques avec Philippe Combette

PVDF (polymère)

LiTaO₃ oxyde métallique (sputtering)

PZT céramique (sérigraphie, frittage)

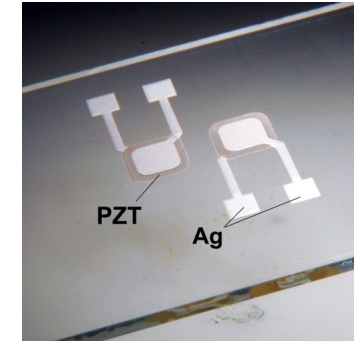
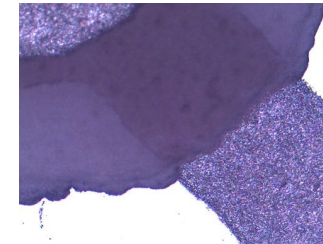
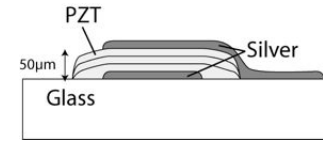
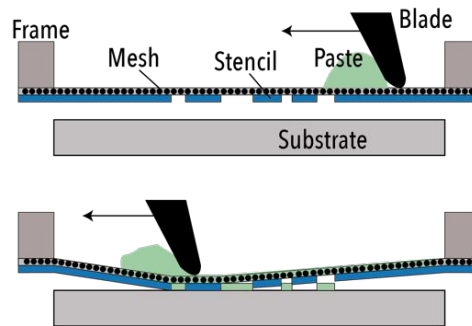
Coef Pyro. : 30 à 200 ($\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)



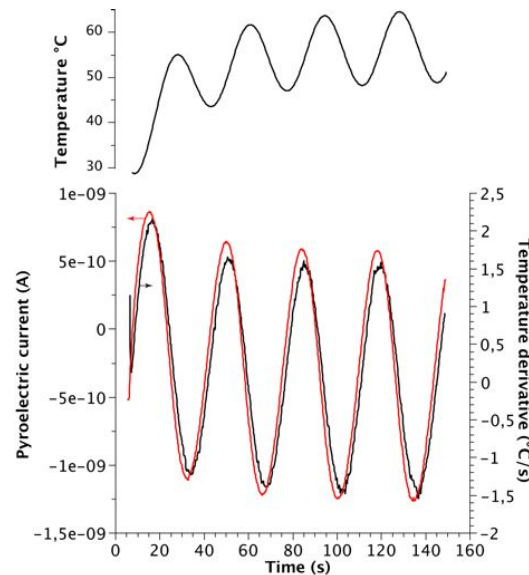
B.Charlot, S.Gauthier, A.Garraud, P.Combette, A.Giani, "PVDF/PMMA blend pyroelectric thin films" *J Mater Sci: Mater Electron*, [22,12](#), pp.1766-1771, (2011),

2.2 Sérigraphie

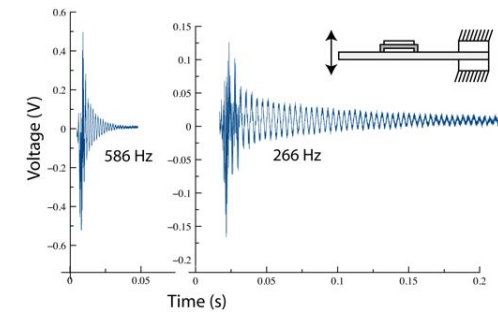
Couches épaisses (50µm)
 Frittage à 850°C (650°C sur verre)
 Grandes surfaces
 Faible coût
 Fabrication des encres



$$I_{pyro} = pS_{el} \frac{dT}{dt}$$



Pyro

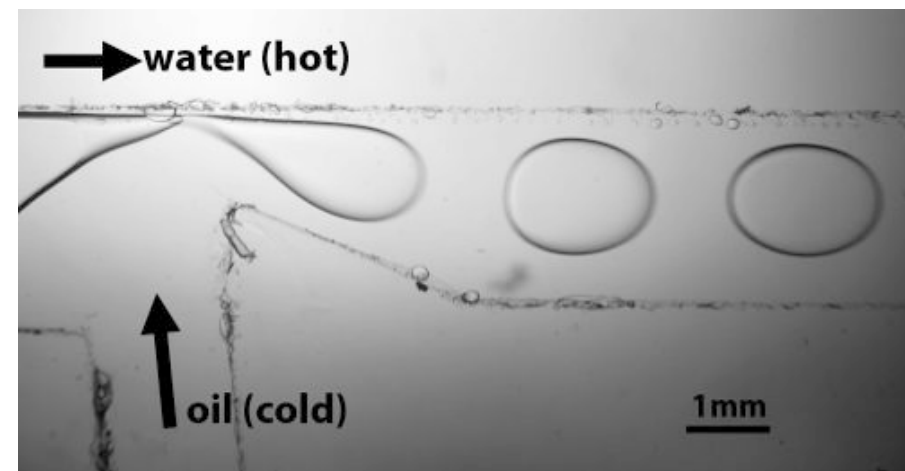
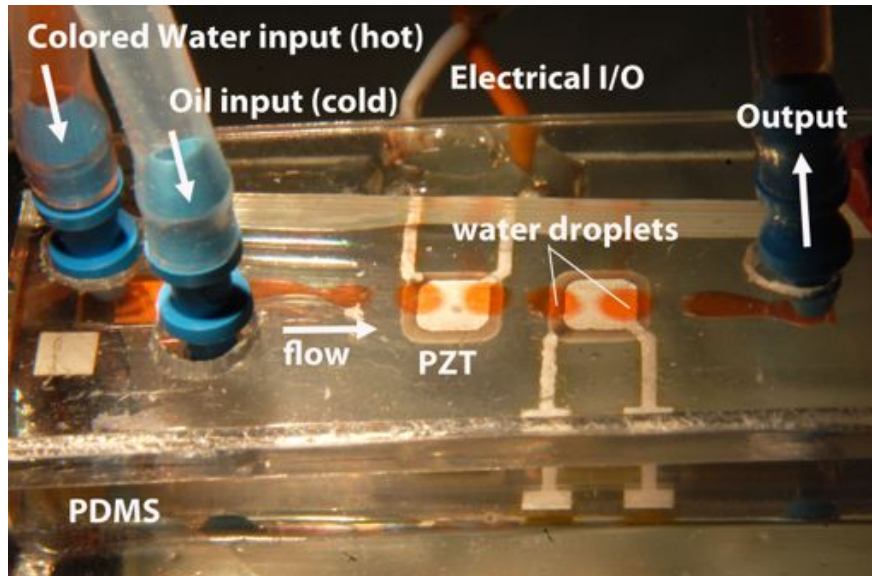
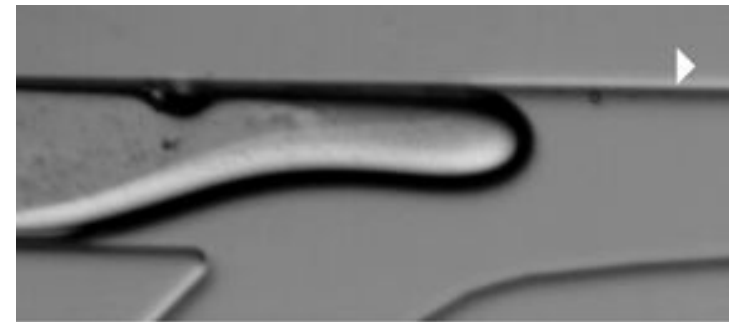
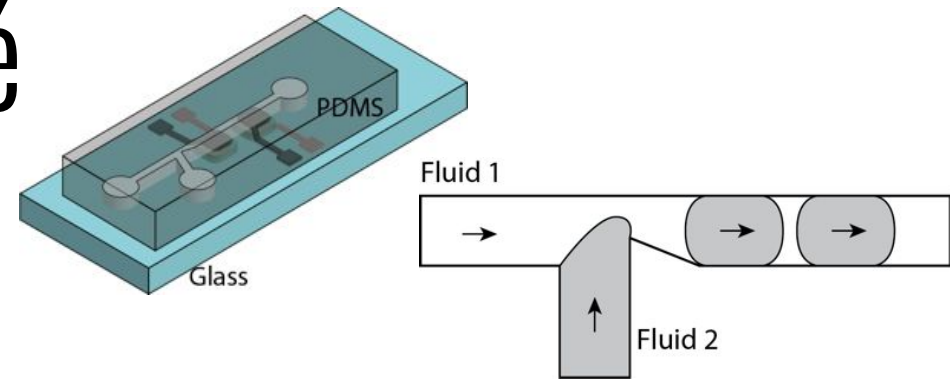


Piezo

2.2 Pyroélectricité

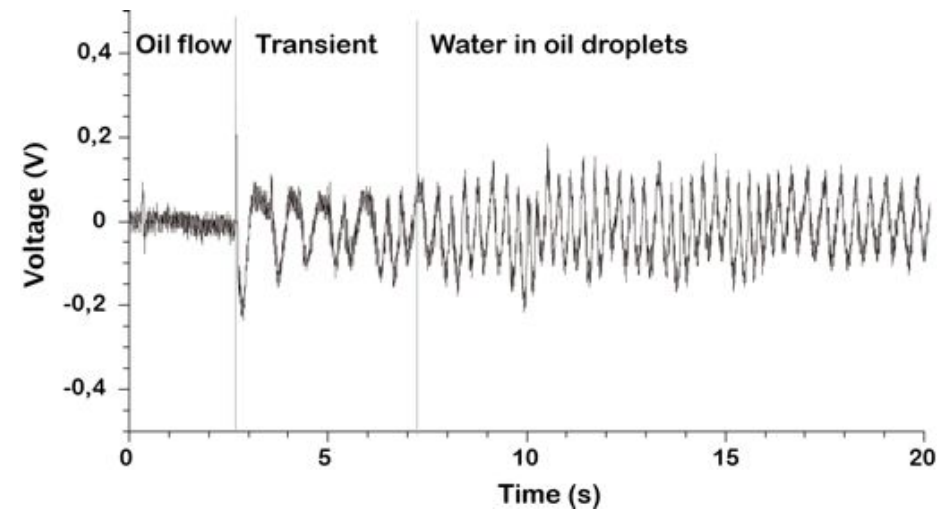
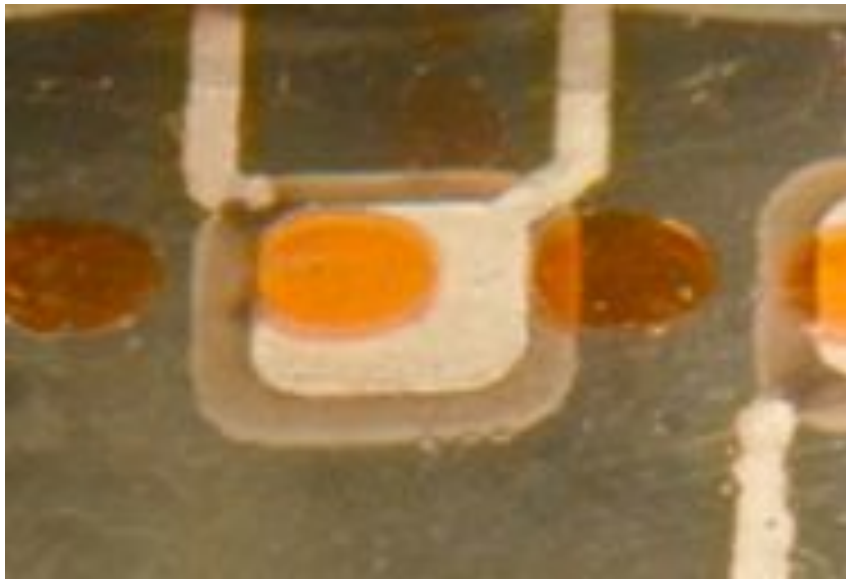
Combiner la microfluidique et les pyro?

A partir de nos travaux avec SANOFI sur les polymersomes :



2.2 Pyroélectricité

Stimulation thermique transitoire par un écoulement diphasique en température



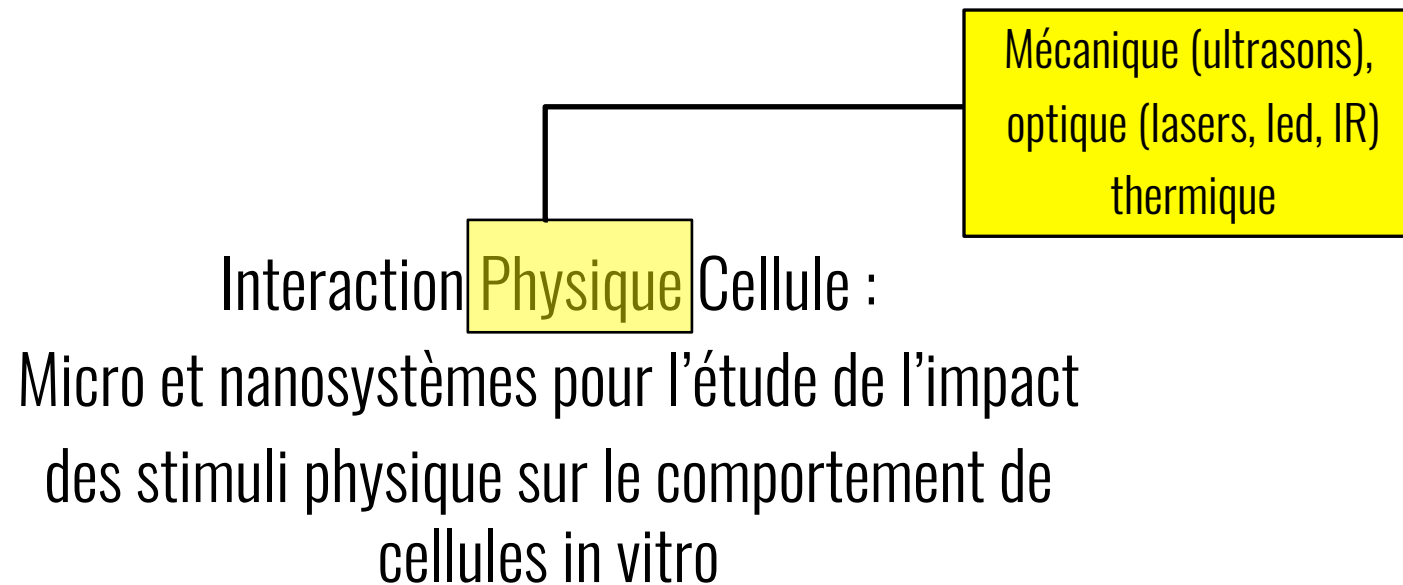
Vers la **récupération d'énergie pyroélectrique?**
+ accelero / gyro pyro + capteur tactile + Ultrasons

B.Charlot, D.Coudouel, F.Very, P.Combette, A.Giani, "Droplet generation for thermal transient stimulation of pyroelectric PZT element", *Sensors and Actuators A*, sous presse, (2015),

3^{eme} Partie

Microsystemes pour les sciences de la vie

3.1 Microfluidique Neurosciences



3.1 Microfluidique Neurosciences

Interaction Physique Cellule :

Micro et nanosystèmes pour l'étude de l'impact
des stimuli physique sur le comportement de
cellules in vitro

MEMS, microfluidique, nanostructuration,
électrodes, capteurs, actioneurs, piezo
Materiaux : Métaux, piezo pyro
Polymères conducteurs

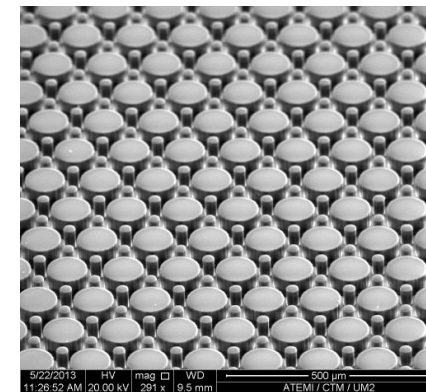
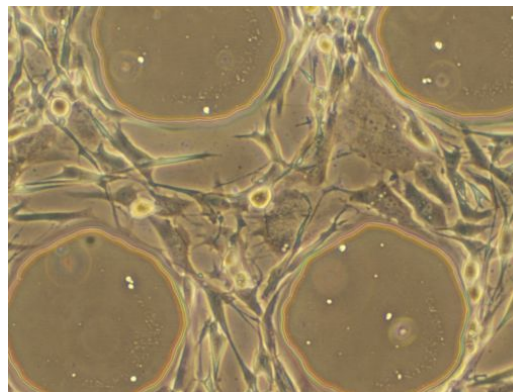
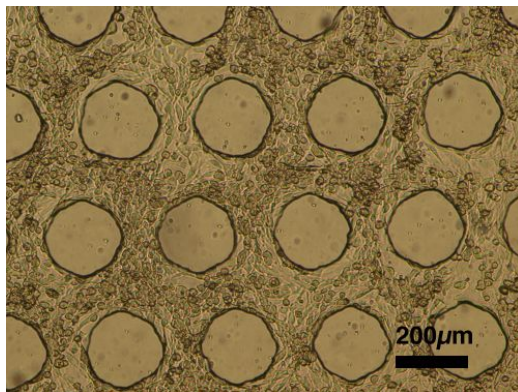
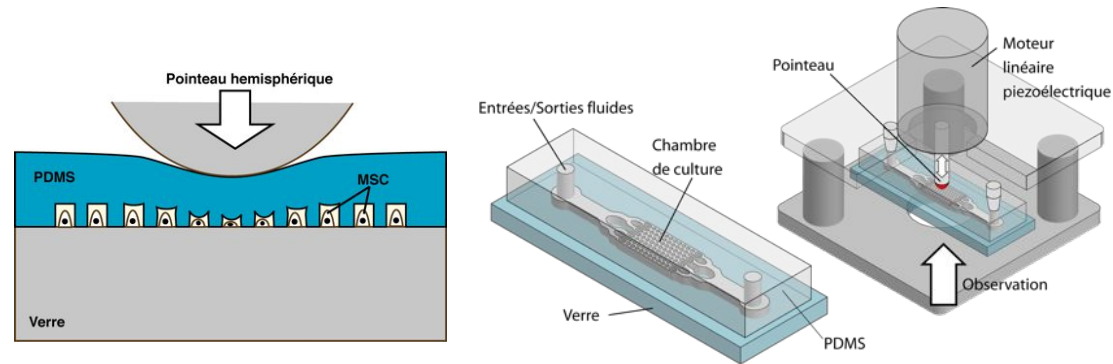
3.1 Microfluidique Neurosciences

Interaction Physique Cellule :
Micro et nanosystèmes pour l'étude de l'impact
des stimuli physique sur le **comportement** de
cellules in vitro

Physiologie,
electrophysiologie,
croissance, transport
axonal, phenotype

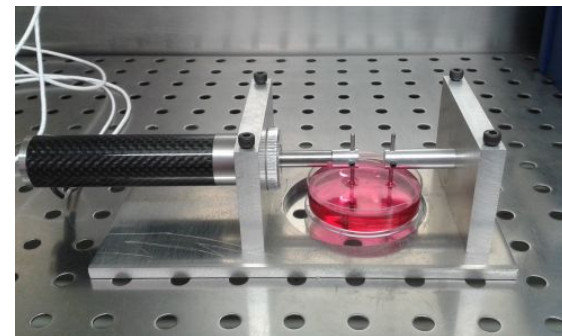
3.1 Différenciation de cellules souches

Projet STIMDIF
(PEPS CNRS)



Stimulation mécanique de CSM sur scaffold tressé en copolymère biodégradable

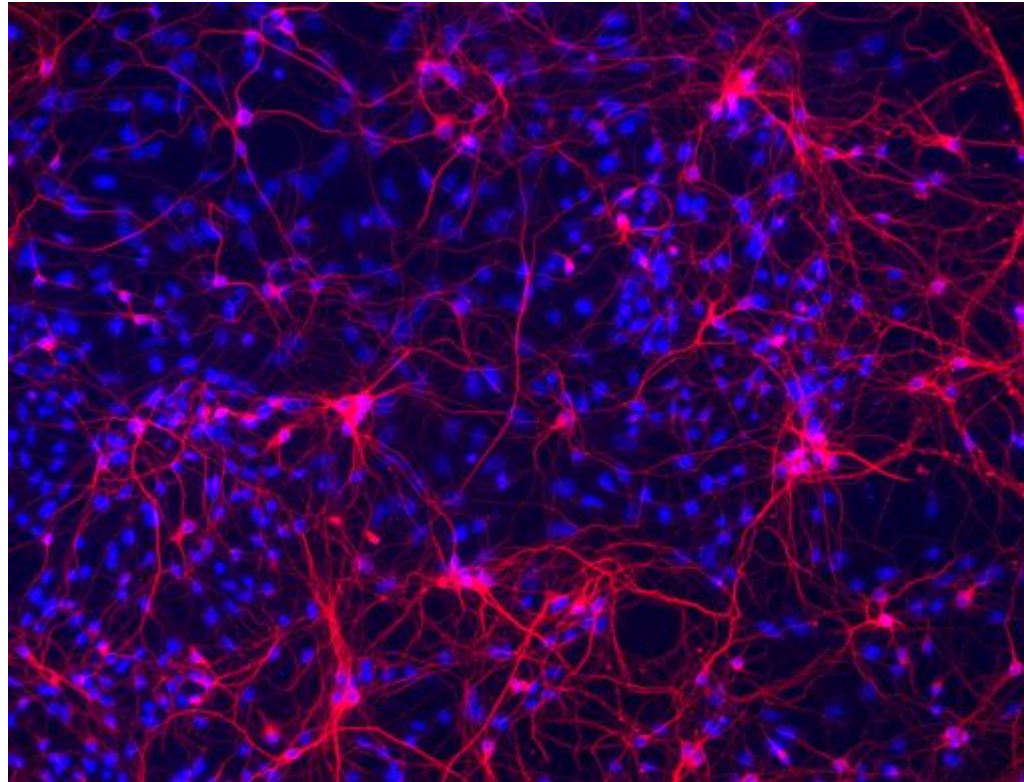
A.Leroy, C.Bony, C.Pinese, B.Charlot, X.Garric, D.Noël, J.Coudane, "PLA-ploxamer/ploxamine copolymers for ligament tissue engineering: sound macromolecular design for degradable scaffolds and MSC differentiation", *Biomaterials Science*, DOI: 10.1039/C4BM00433G, (2015)



Projet Arrêté... faute de moyens (et de bras)

3.2 Neurosciences

Neurones en culture in-vitro : organisation en réseau



Neurones DRG
β tubulin
DAPI

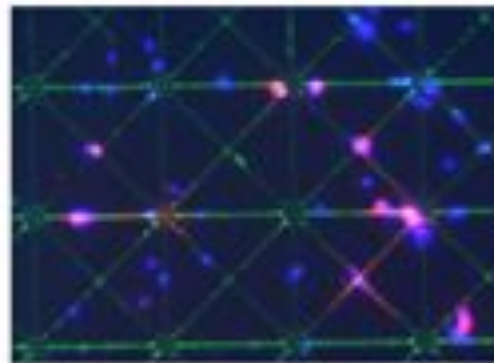
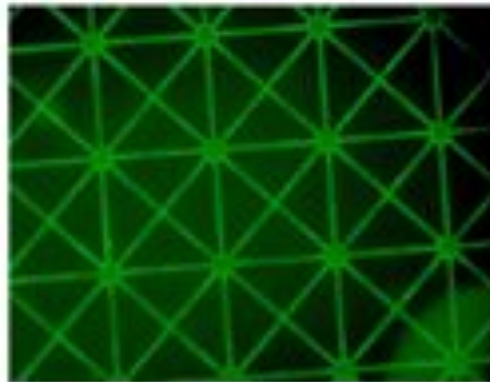
Organiser la croissance, observer, stimuler, mesurer...

3.2 Neurosciences

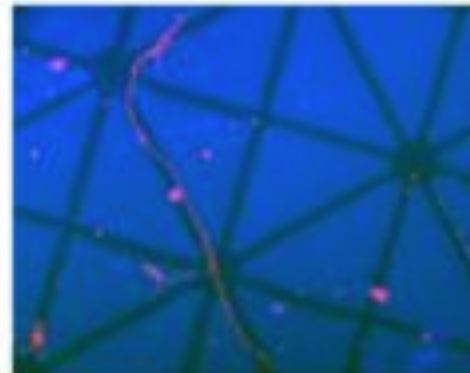
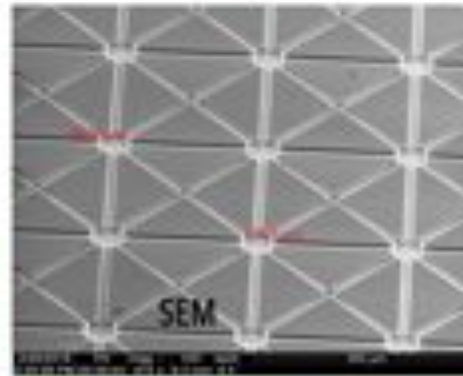


Confinement de la culture neuronale in vitro

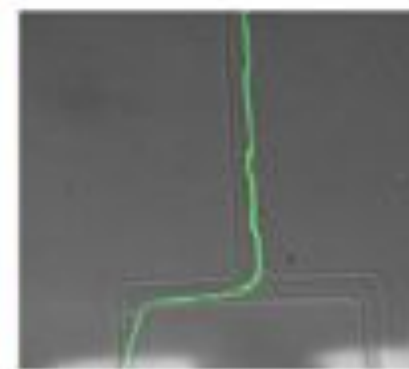
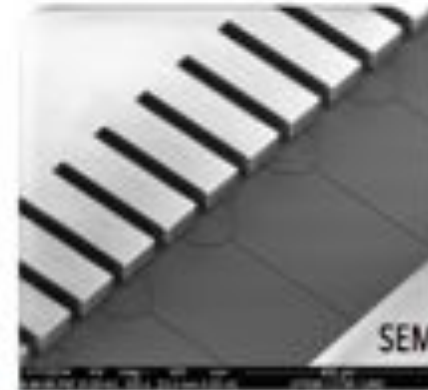
Tamponnage de protéine
d'adhésion
Confinement **2D**



Microstructures PEG-DMA
Confinement **2,5D**



Chambres de culture
microfluidiques PDMS
Confinement **3D**



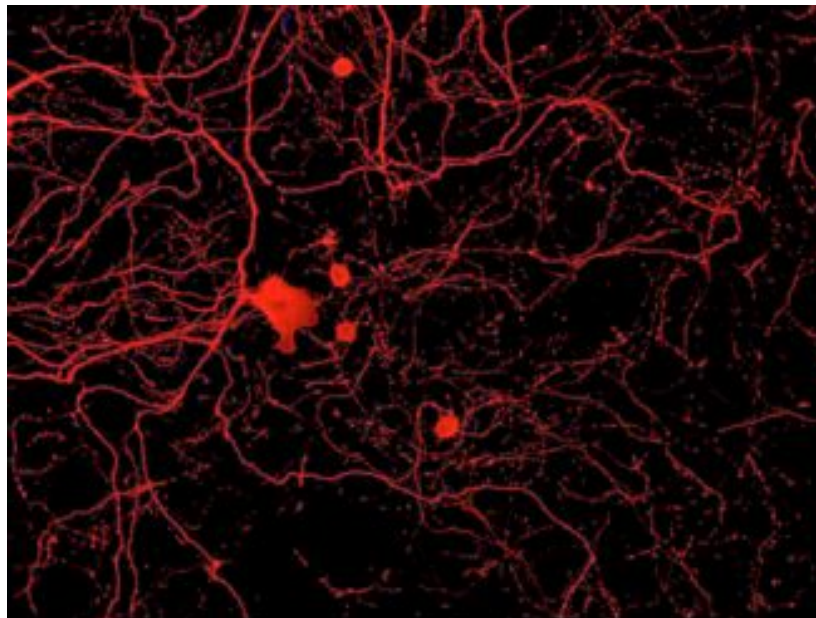
3.2 Guidage Axonal

Médecine régénérative du Système nerveux périphérique

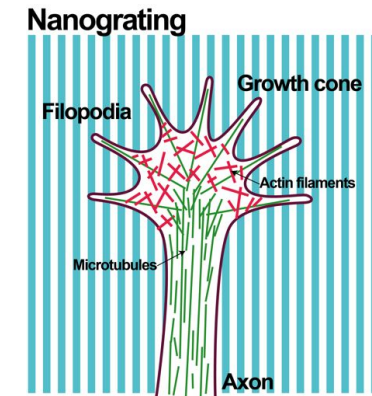
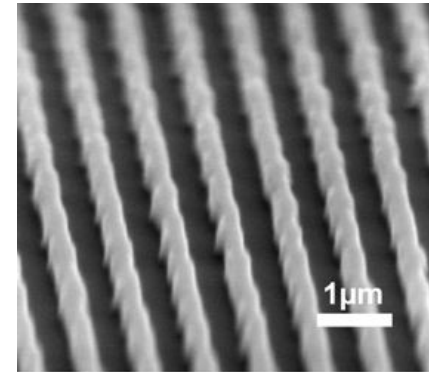
Faire pousser les neurones

+loin +longtemps

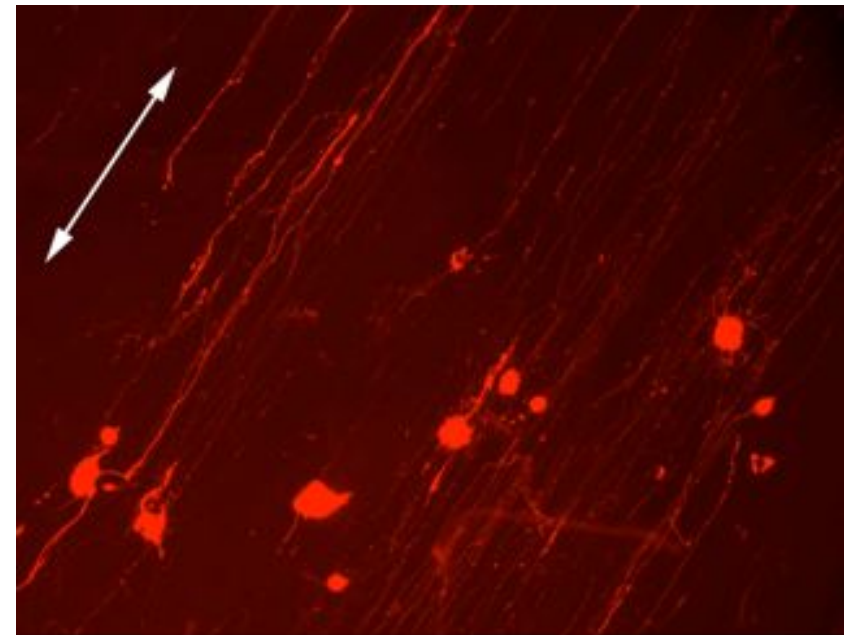
En ligne droite



-Un 1/2 thésard



-Lithographie par interférence (R.Teissier)



B.Charlot, et al., "Axonal growth guidance by surface nanotopology for the regeneration of sensori motor neurons", IEEE EMBS Neural engineering conference, Montpellier, France, (2015)

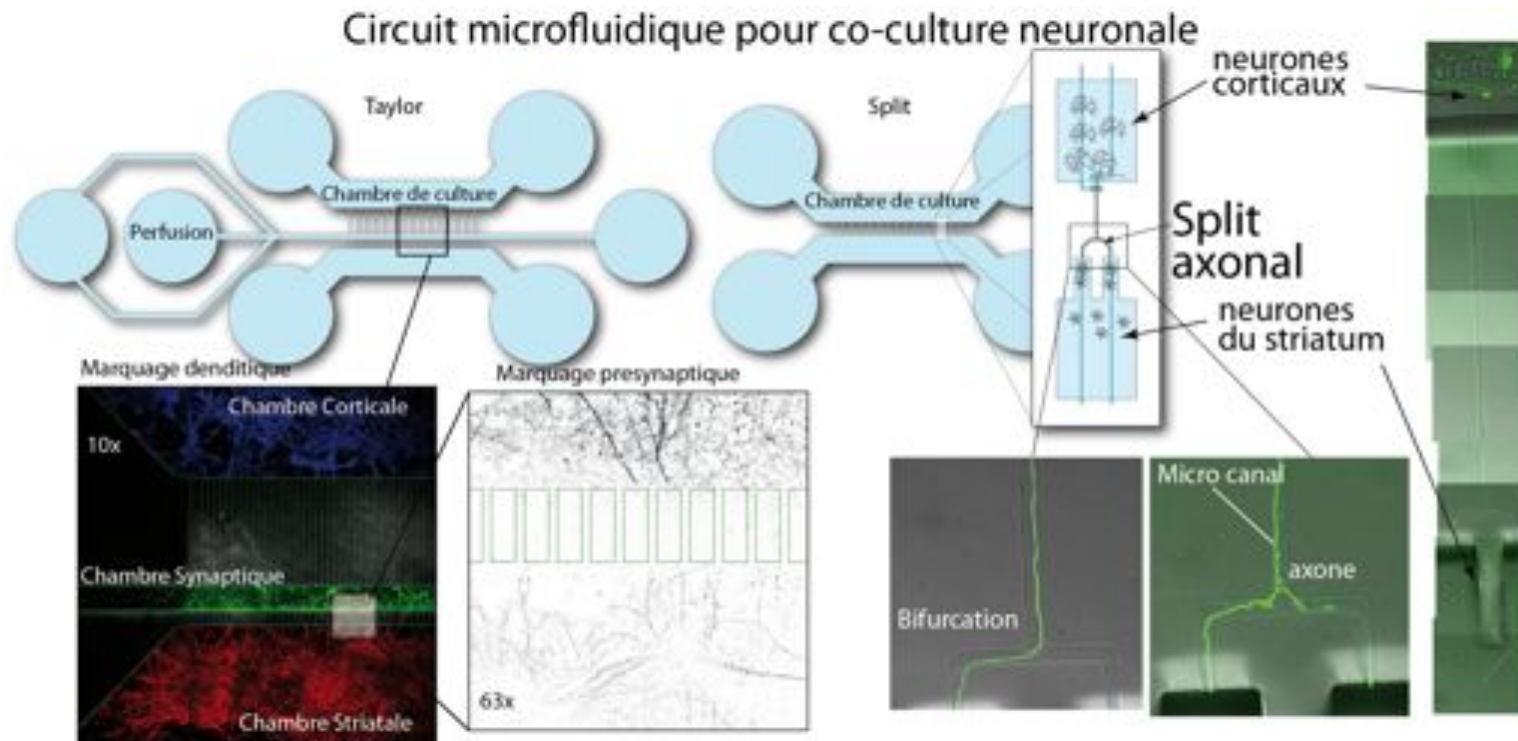
3.2 Microfluidique Neurosciences

Reconstruction de jonctions neuronales *in-vitro*



M.Cazorla, F.Saudou

- Modèle de cerveaux pathologiques (Alzheimer, Huntington..)
- Jonctions Cortico-striatales
- Transport axonal (vesicules pre-synaptiques)

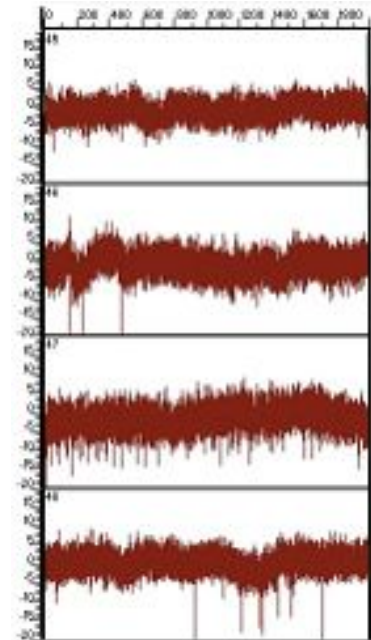


+ Intégration d'un réseau d'électrodes

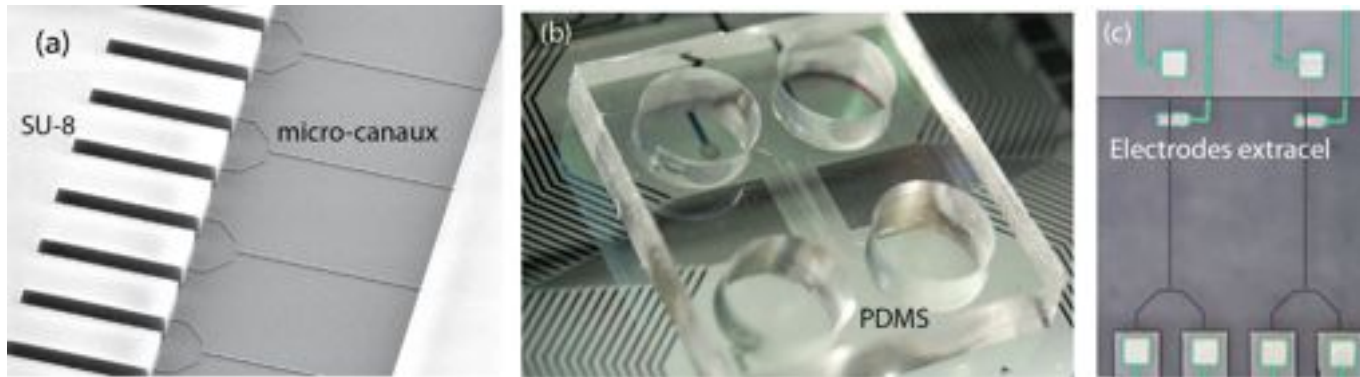
3.2 Microfluidique Neurosciences

Intégration d'un réseau d'électrodes

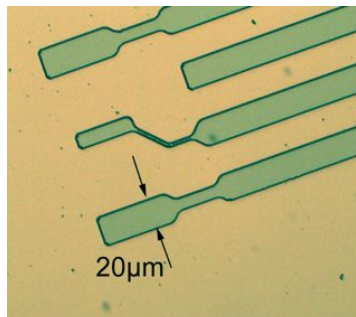
- Réseau d'électrodes en platine + nanostructuration + polymère PEDOT:PSS
- Premières mesures extracel



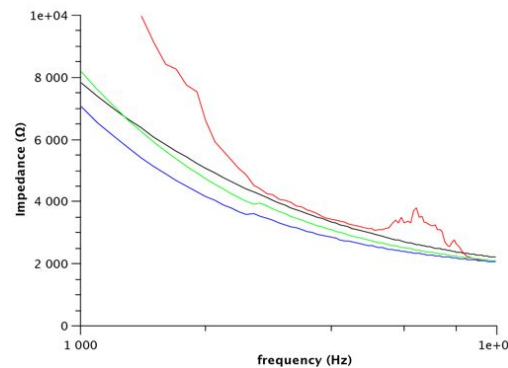
M.Cazorla



Electrodes en PEDOT:PSS



B.Charlot, et al., "Micropatterning PEDOT-PSS layers", *Microsystem technologies* 19,6, pp 895-903, (2013)



Impédance des électrodes Pt

M.Cazorla et al. "Microfluidics on microelectrode arrays for the local manipulation of synaptic transmission within complex neuronal" *Colloque de la société des Neurosciences 2015*

J.A.Rodier et al. "Dynamic regulation of BDNF axonal transport by neuronal activity" *Colloque de la société des Neurosciences 2015*

3.2 Microfluidique Neurosciences

Maîtrise de la culture neuronale confinée

→ Stimulation physique

Optique (Lasers, LED, IR) avec Fabrice BARDIN

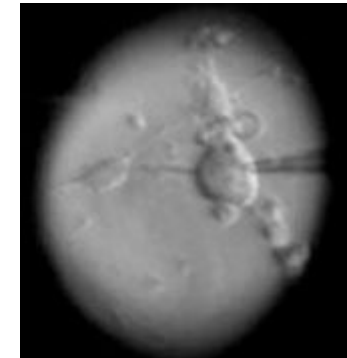
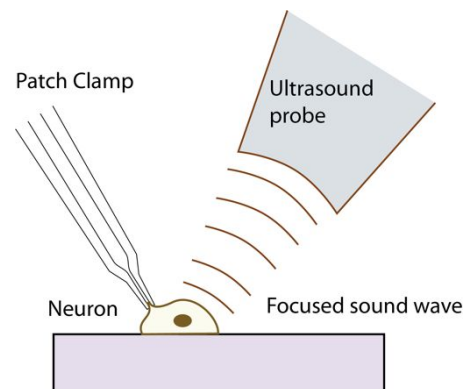
Projets PEPS NEURILED + LEDouleur + Thèse Lambert Paris

Projet FRM en cours

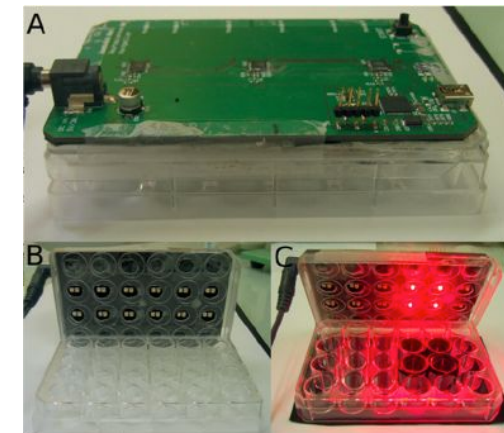
GIN +LTM+ IES

Thermique.... ANR TEP, TEMP

Acoustique....

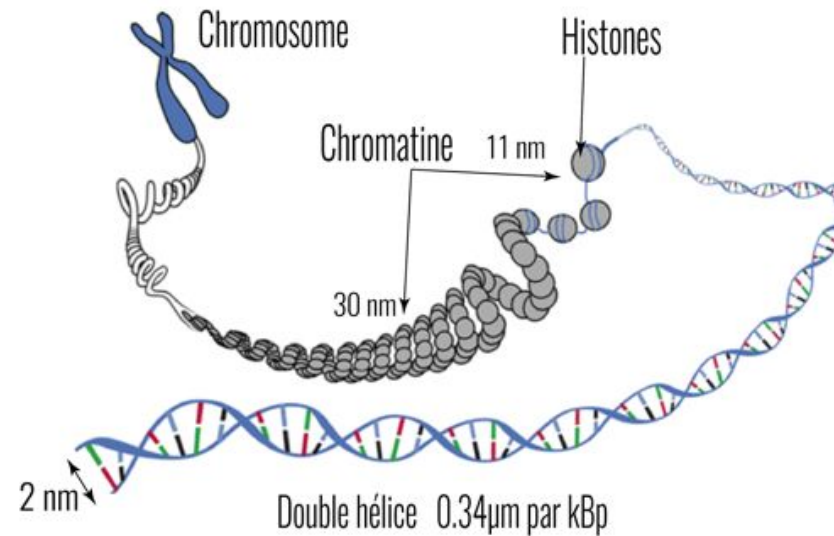


L.Paris et al. , "Neurite growth acceleration of adult Dorsal Root Ganglion neurons illuminated by low-level Light Emitting Diode light at 645 nm", *Journal of Biophotonics* 1–9 (2014)



3.3 Peignage de l'ADN

→ Organisation d'ADN



Etienne Schwob

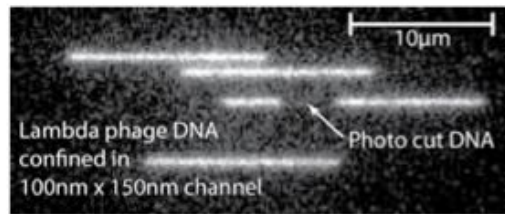
Longueur de persistance : **100 nm** ADN double brin et 2 nm pour l'ADN simple brin

En solution : **Pelotes**

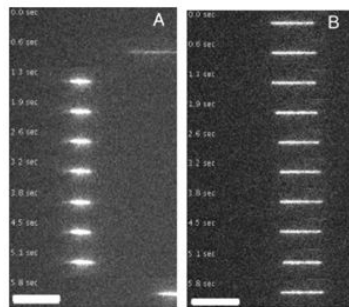
Comment étirer et fixer l'ADN pour l'observer?

3.3 Peignage de l'ADN

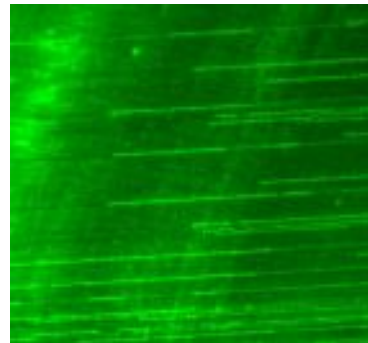
→ **Confinement** de l'ADN en Nanofluidique



F. Westerlund, Chalmers

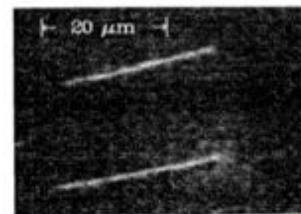


D.E.Streng; North Carolina state Univ.



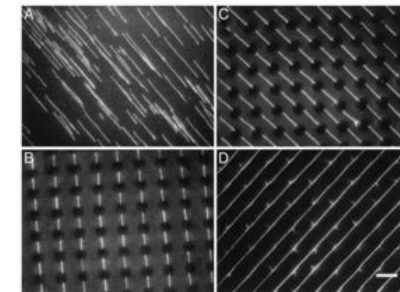
→ Dépôt par **démouillage** (force capillaire)

D.Bensimon, ENS

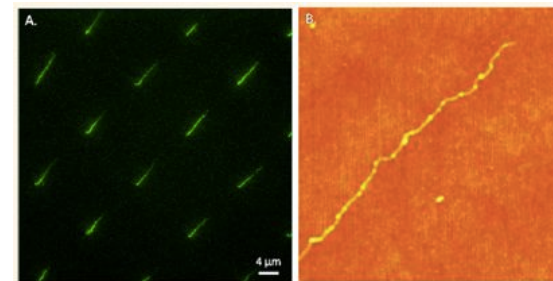


Hydrophobic surface

J. Guan and L. J.Lee
Ohio State University

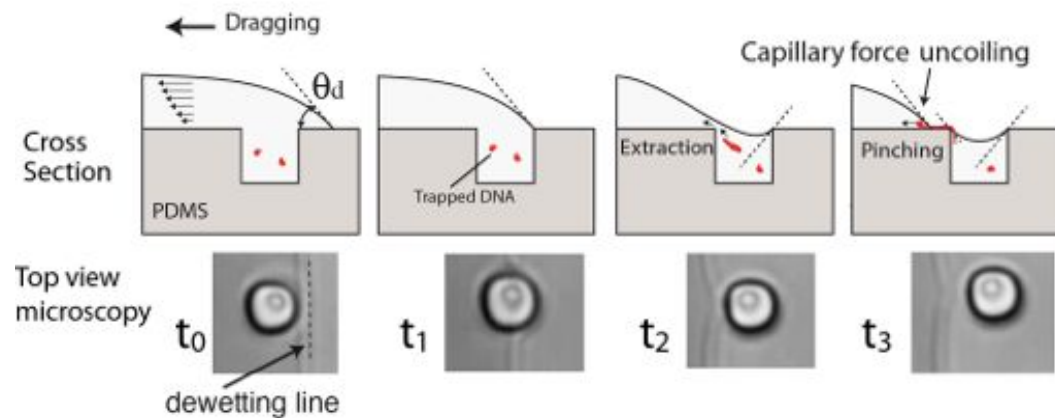
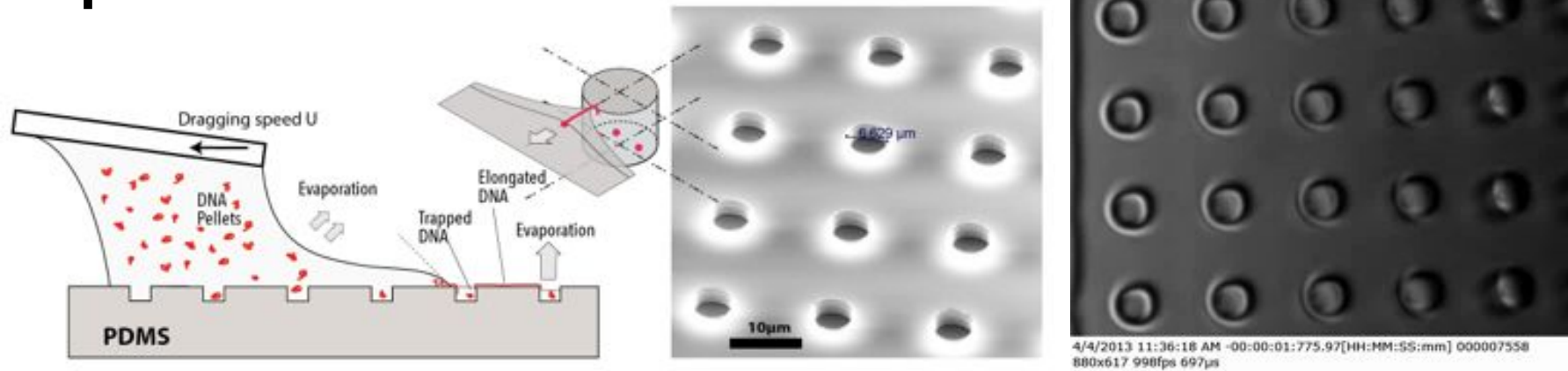
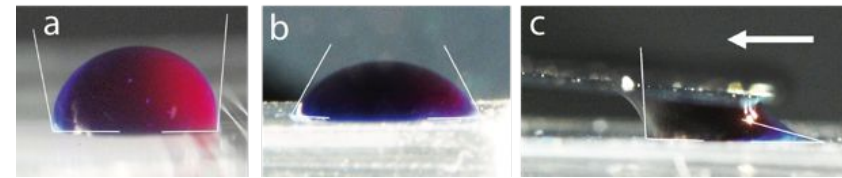


A.Cerf, LAAS CNRS



3.3 Peignage de l'ADN

- Peignage ordonné de filaments d'ADN uniques
- Démouillage forcé sur des perturbations



3.3 Peignage de l'ADN

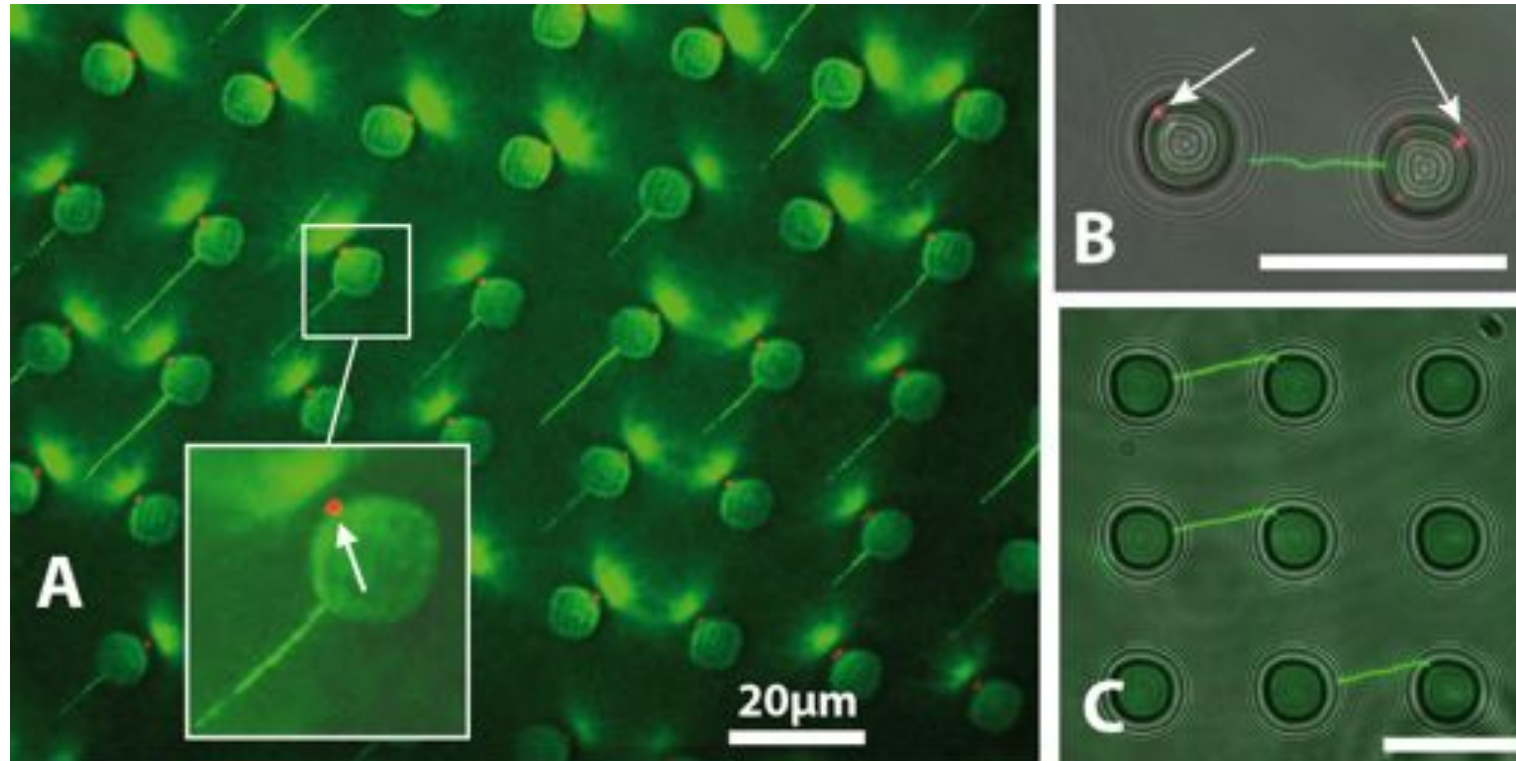
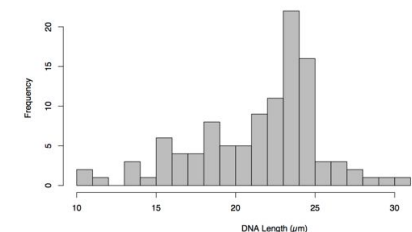
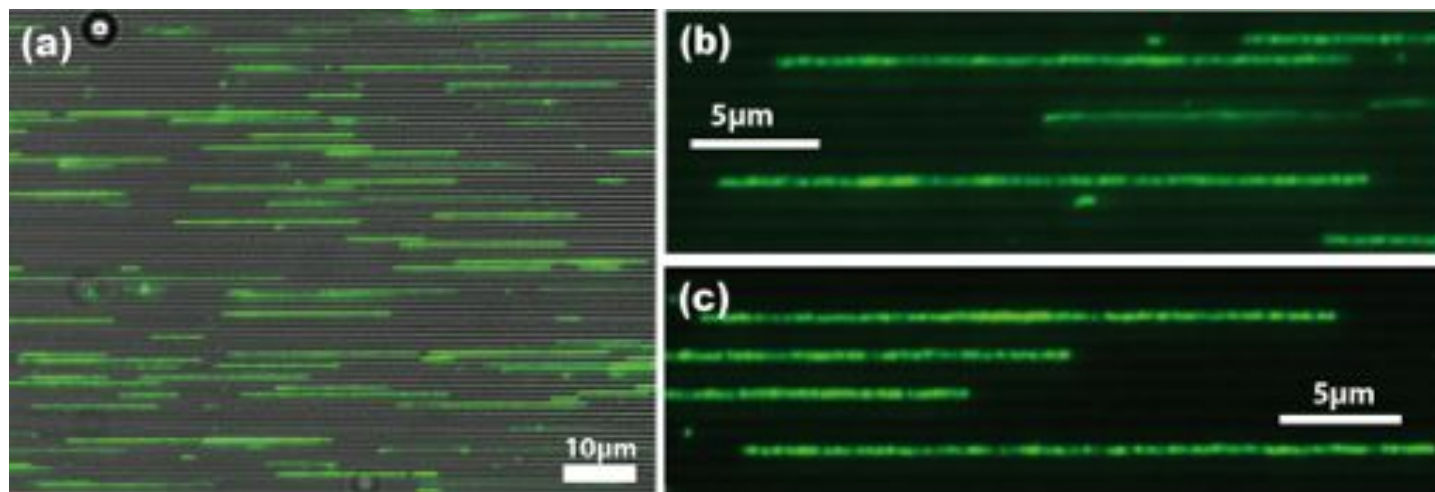
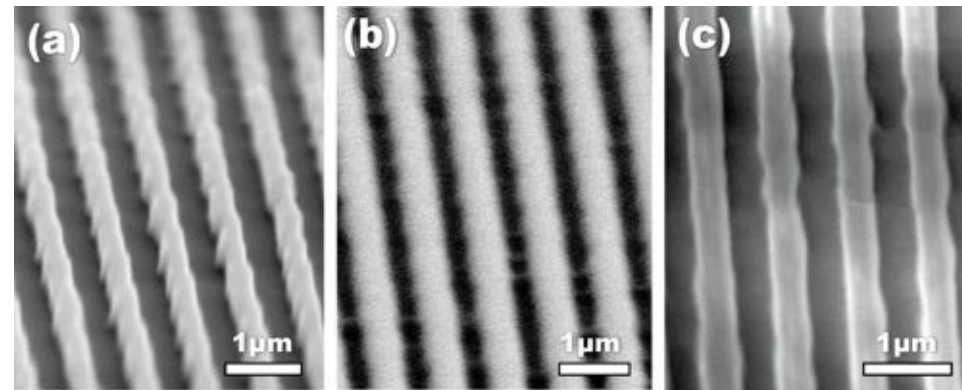


Image composite (Fluorescence GFP + lumière transmise) de filaments d'ADN de phage I (48kbp) marqués à l'intercalant YOYO. Les filaments sont peignés à partir de micro puits dans un substrat de PDMS, vitesse de démouillage 400μm/s. En rouge : des pelotes d'ADN au fond des puits, 5μm sous la surface

B. Charlot, et al. "Elongated unique DNA strand deposition on microstructured substrate by receding meniscus assembly and capillary force", **Biomicrofluidics** 8, 014103 (2014).

3.3 Peignage de l'ADN

- Peignage sur des surface nano-structurées : guidage des filaments
- Lithographie par interférence



B.Charlot, R.Teissier, M.Drac, E.Schwob, "DNA on rails: Combing DNA fibers on nanogratings", **Applied Physics Letters**, 105, 243701 (2014).

3.3 Peignage de l'ADN

Bilan

Deux techniques de dépôt qui fonctionnent

Combinaison des techniques PDMS + nanoréseau

Dépôt d'ADN génomique long

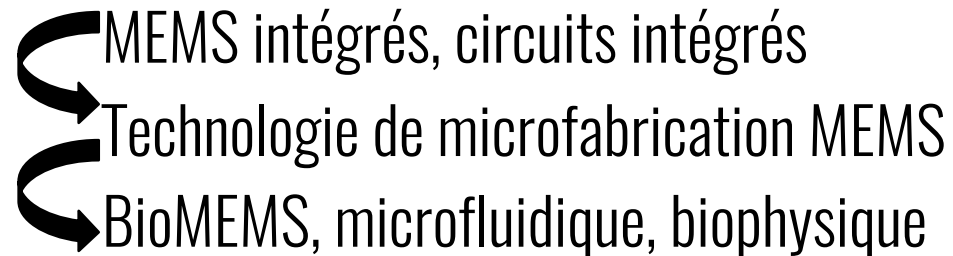
Manipulation de la chromatine

4. Conclusions

Des MEMS et un éventail assez large d'applications:

Capteurs tactiles, micro résonateurs, mémoires, micro-thermique, acceleromètres, micro générateurs, microfluidique, puces à cellules,....

Une évolution thématique



Des partenariats fructueux.

4. Remerciements

Rapporteurs et examinateurs : Bruno Le PIOUFLE, Elie LEFEUVRE, Vincent SENEZ, Alain GIANI, Fabien PASCAL, Pascal NOUET

Co-auteurs :

IES : Fabrice BARDIN, Lambert PARIS, Alain GIANI, Philippe COMBETTE, Brice SORLI, Arnaud VENA, Alexandra GARRAUD, Roland TEISSIER, Denis COUDOUEL, Florian VERY, Gilbert SASSINE, Mathias LECHELON, David LAPEINE, Mamadou BALDE

CTM: Frederic PICHOT, Jean Marie PEIRIS, Jean LYONNET

TIMA: Bernard COURTOIS, Salvador MIR, Skandar BASROUR, Damien VEYCHARD, Fabien PARRAIN, Marcin MARZENCKI, Yasser AMMAR, Guillaume PRENAT, Kholdoun TORKI, Libor RUFER, Gregory DIPENDINA, Karine MATOU, Marc RENAUDIN

LIMMS: Hiroshi TOSHIYOSHI, Winston SUN, Hiroyuki FUJITA, Kiyotaka YAMASHITA , Nazare PEREIRA RODRIGUES, Teruo FUJII, Yumi HIRANO, Dominique COLLARD, Bruno LEPIOUFLE, Christian BERGAUD, Fabrice XXX

ESPCI: Gillles TESSIER, Lionel AIGOUY, Danièle FOURNIER

BUTE : Vladimir SZELELY, Marta RENCZ

LETI: Ghislain DESPESE, Jean Jacques CHAILLOUT, Thomas JAGER, Pharell WILLIAMS

FEMTO: Sylvain BALLANDRAS, Pascal VAIRAC, Bernard CRETIN, Bruno CAVALLIER

INM : Jean VALMIER, Patrick CAROLL, Jean-Michel BEC, Pascale BOMONT, Danièle NOEL, Marc MATHIEU, Hassan BOUKHADAoui, Marion BURLAND, Lucie DIOULOUFET, Chamroem SAR

MMDN : Christelle LASBLEIZ, Jean Michel VERDIER

IGMM : Etienne SCHWOB, Marjorie DRAC

IBMM : Adrien LEROY, Xavier GARRIC, Jean COUDANE

GIN: Maxime CAZORLA, Frédéric SAUDOU

SANOFI : Pascale ROUX, Nicolas SANCHEZ, Sandrine TEIXEIRA

Questions?