

« MicroTechnologie, Capteurs & Microsystèmes »

Ph. Ménini
menini@laas.fr

Université Toulouse III Paul Sabatier
LAAS-CNRS

Plan

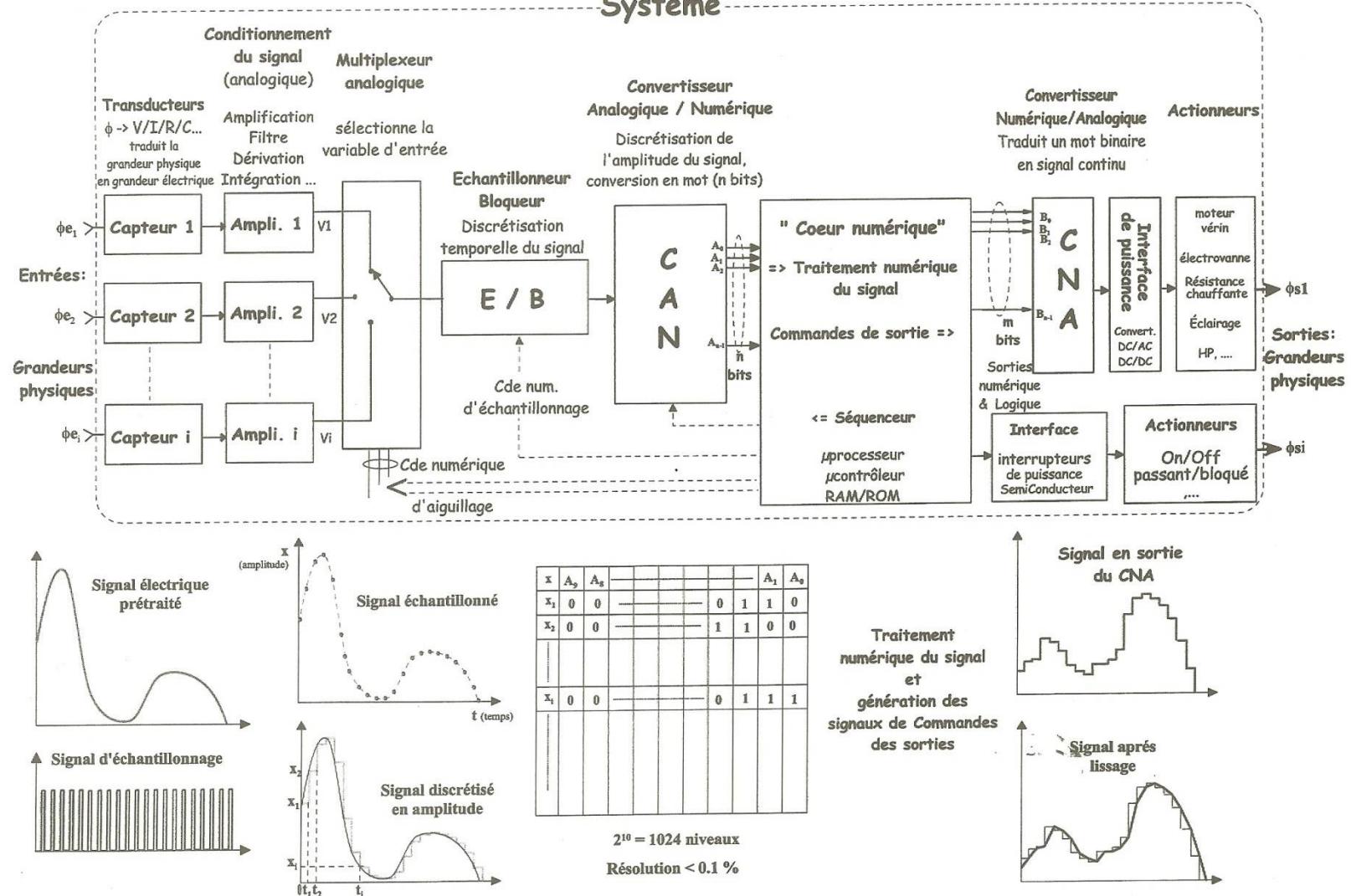
1. Introduction – Généralités sur les microsystèmes
2. Les Technologies de Fabrication
3. Exemples de Micro-capteurs et Actionneurs
4. Recherches sur les nez électroniques
5. Les Outils de Conception
6. Prospectives : Les Microsystèmes de demain...

Introduction - Généralités

- ✓ Chaine de mesure
- ✓ Définition d'un Microsystème
- ✓ Les atouts des microsystèmes
- ✓ Applications – Marchés
- ✓ Les centrales de Technologie en France
- ✓ Les acteurs industriels

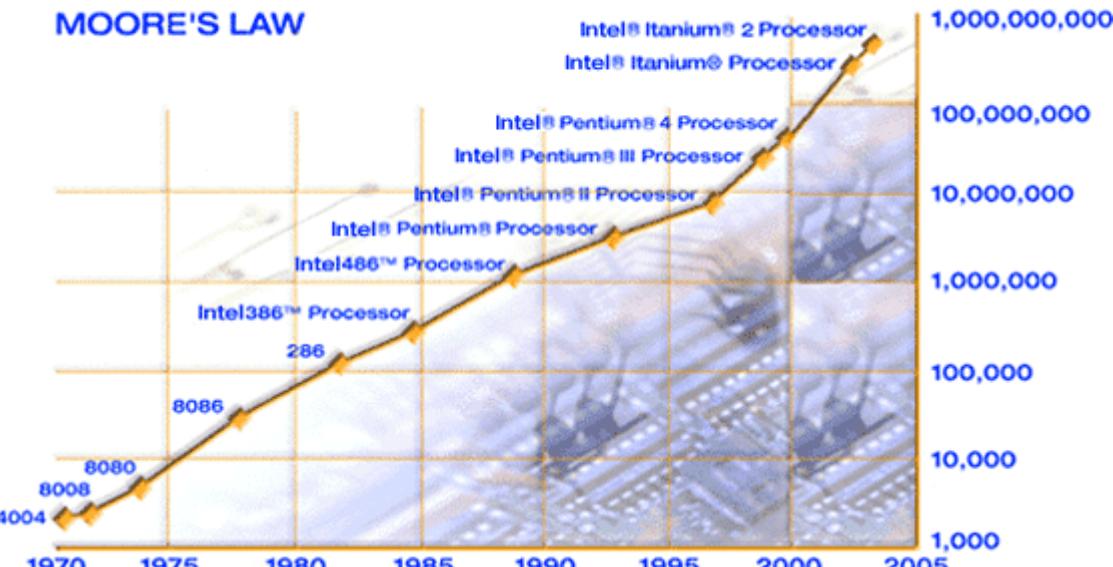
Chaine de Mesure

Système



Historique : De la microélectronique aux microtechnologies...

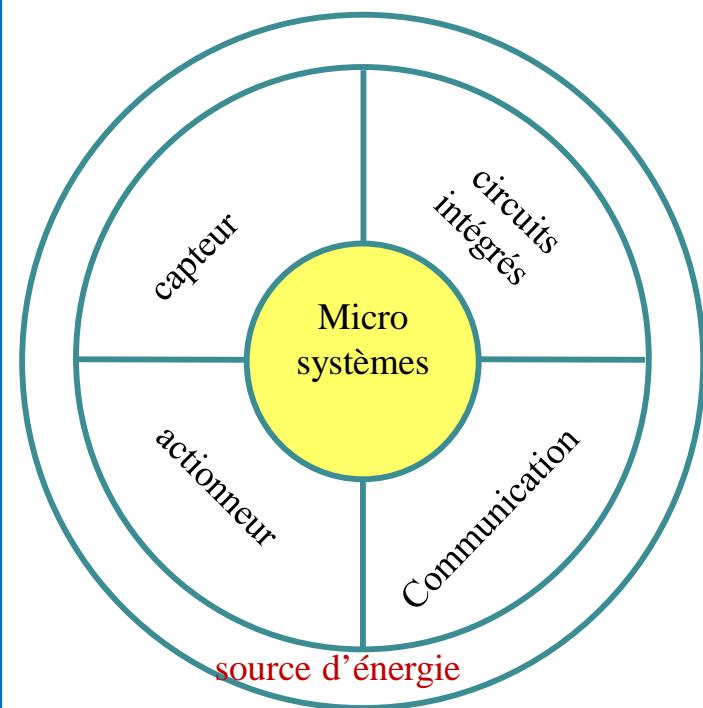
- 1950: Réalisation de composants amplificateurs et circuits électroniques à partir des matériaux semi-conducteurs
- 1960: développement de la technologie planaire pour les circuits intégrés
- 1970 – 2xxx : recherche des limites
 - ✓ Diminution des dimensions
 - ✓ Augmentation de la densité
 - ✓ Réduction des coûts
- 1990: naissance des Microtechnologies
 - ✓ Développement des intégrations
- 2000: transition des Microtechnologies vers les Nanotechnologies



Définition des Microsystèmes

➤ « Les microsystèmes sont des (mm → μm) associant des éléments afin de réaliser différentes »

- ✓
 - cellule sensible : détection d'une grandeur physique ou chimique (perception de l'environnement)
 - Transduction : transformation en signal électrique
- ✓
 - action sur l'environnement ou alarmes
- ✓
 - analyse, traitement du signal
 - prise de décision
- ✓
 - transmission des données
- ✓
 - autonomie



Définition des Microsystèmes

➤ « Les microsystèmes sont des **systèmes de faible taille** (mm → μm) associant des éléments **multidisciplinaires** afin de réaliser différentes **fonctions complémentaires** »

✓ **Capteurs**

- cellule sensible : détection d'une grandeur physique ou chimique (perception de l'environnement)
- Transduction : transformation en signal électrique

✓ **Actionneurs**

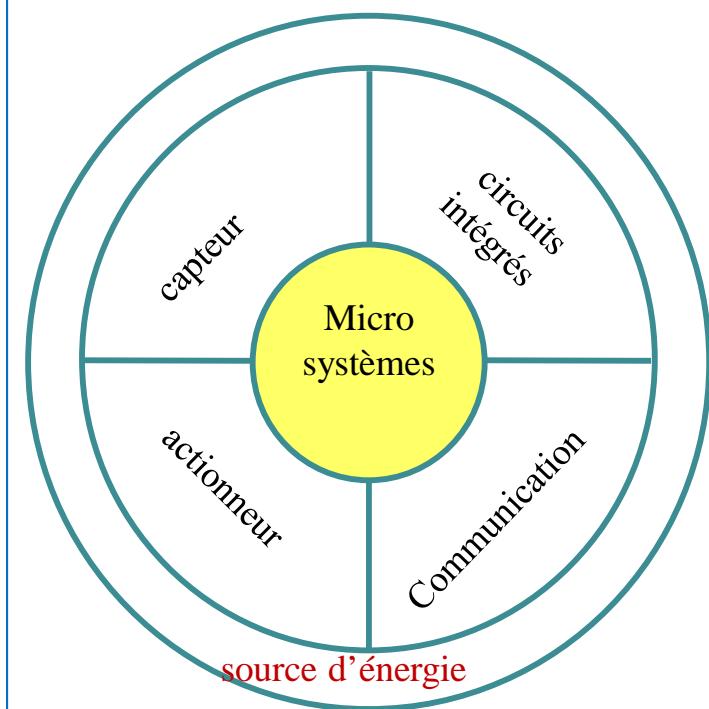
- action sur l'environnement ou alarmes

✓ **Circuits intégrés**

- analyse, traitement du signal
- prise de décision

✓ **Communication de l'information**

✓ **Source d'énergie - autonomie**



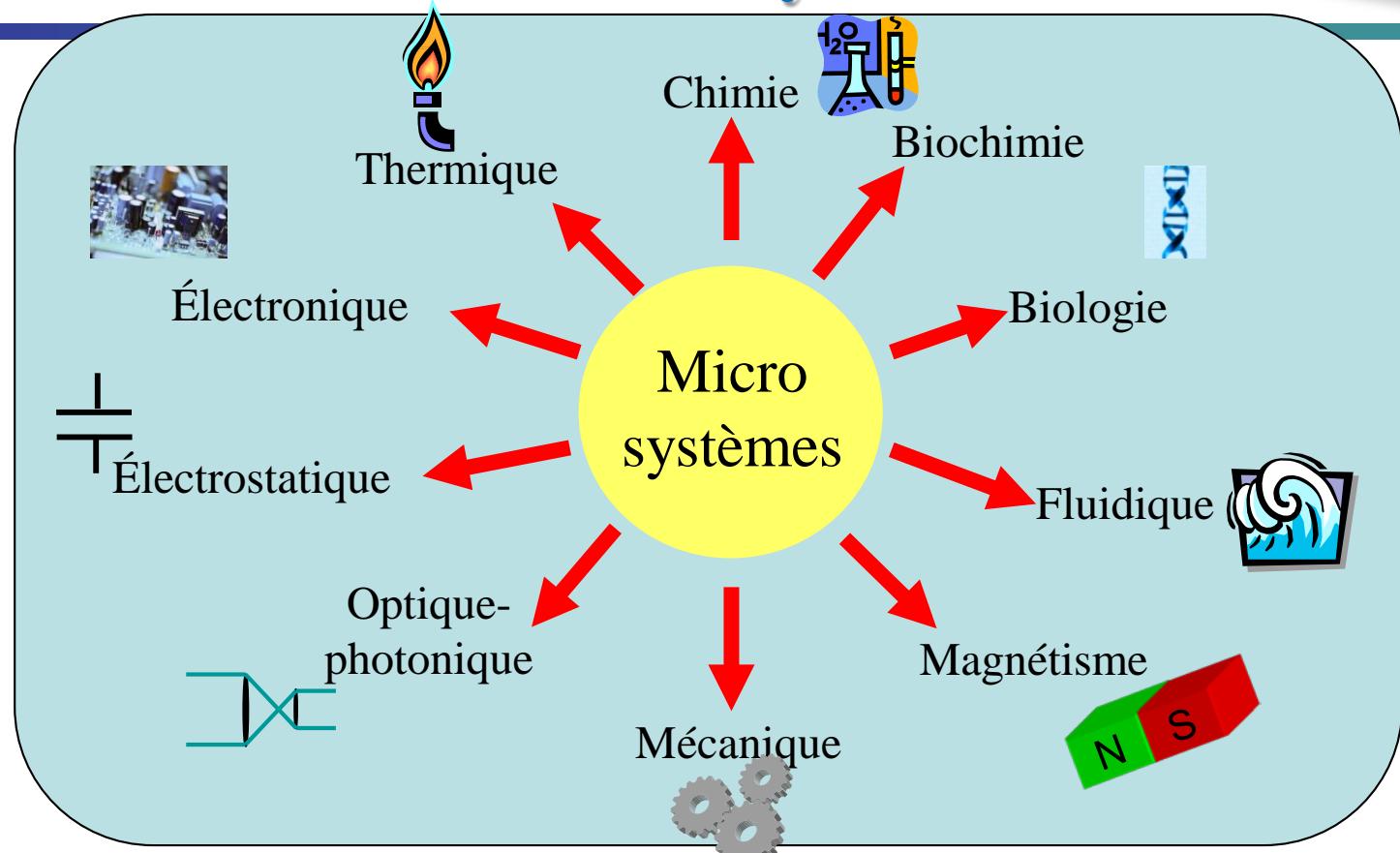
Appellations « Microsystèmes »...

- En EU : MST (MicroSystem Technology)
- Au Japon : MMT (Micro Machining Technology)
- Aux USA : MEMS (.....)

Micro Electro Mechanical Systems
Micro Optical Electro Mechanical Systems

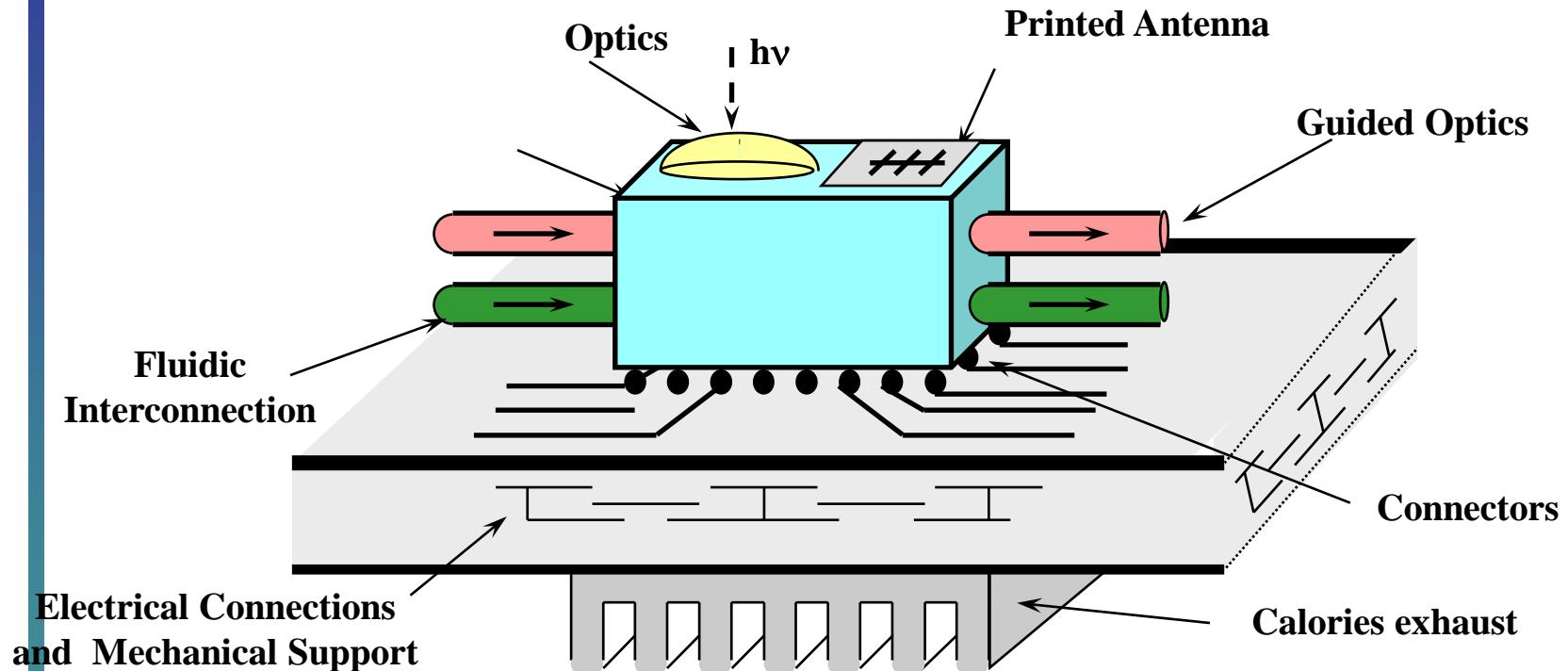


Sciences et Microsystèmes



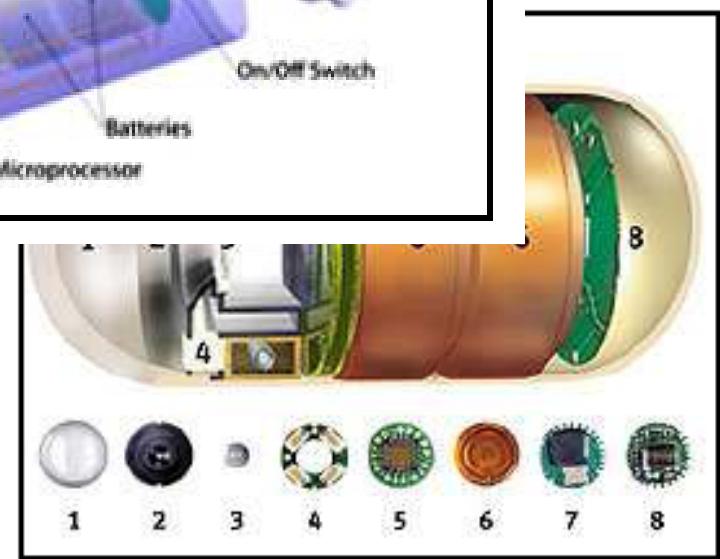
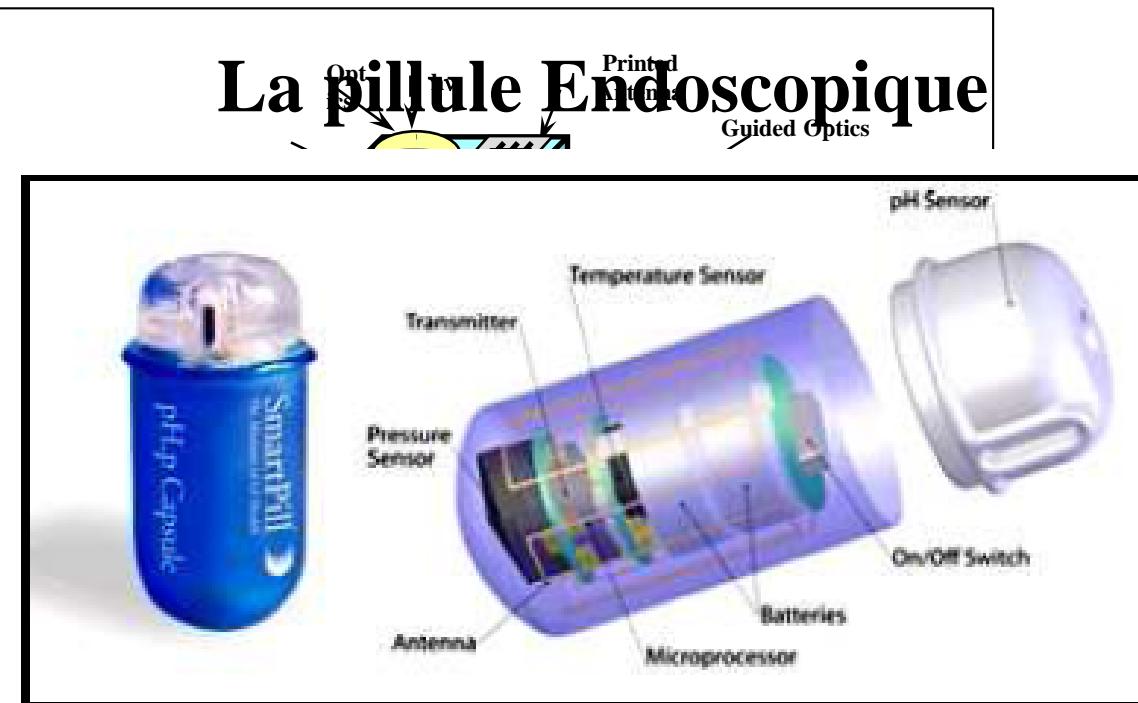
- Aucune limite à l'imagination...
 - ✓ Micromoteur, microturbine, micropropulseur pyrotechnique, puce à ADN,...
- ... à l'exception de la réalisation technologique (**intégration / compatibilité**)

Example of Microsystem



Exemple de Microsystème

- Les composants d'une pilule endoscopique :
 - 1, 2 et 3 : optiques
 - 4 : diodes
 - 5 : capteur
 - 6 : batterie MT9V
 - 7 et 8 : émetteur radiofréquence et l'antenne



Intérêt des Microsystèmes

Techno. CI

Intégration de multiples fonctions

Technologie de Précision

Amélioration des performances

Fabrication en série

Réduction des coûts de fabrication

Miniaturisation

Gain en portabilité

Réduction de la consommation

Remplacement rapide et peu coûteux

Comment s'organise la R&D
en Microtechnologies...

...en France et ailleurs ?

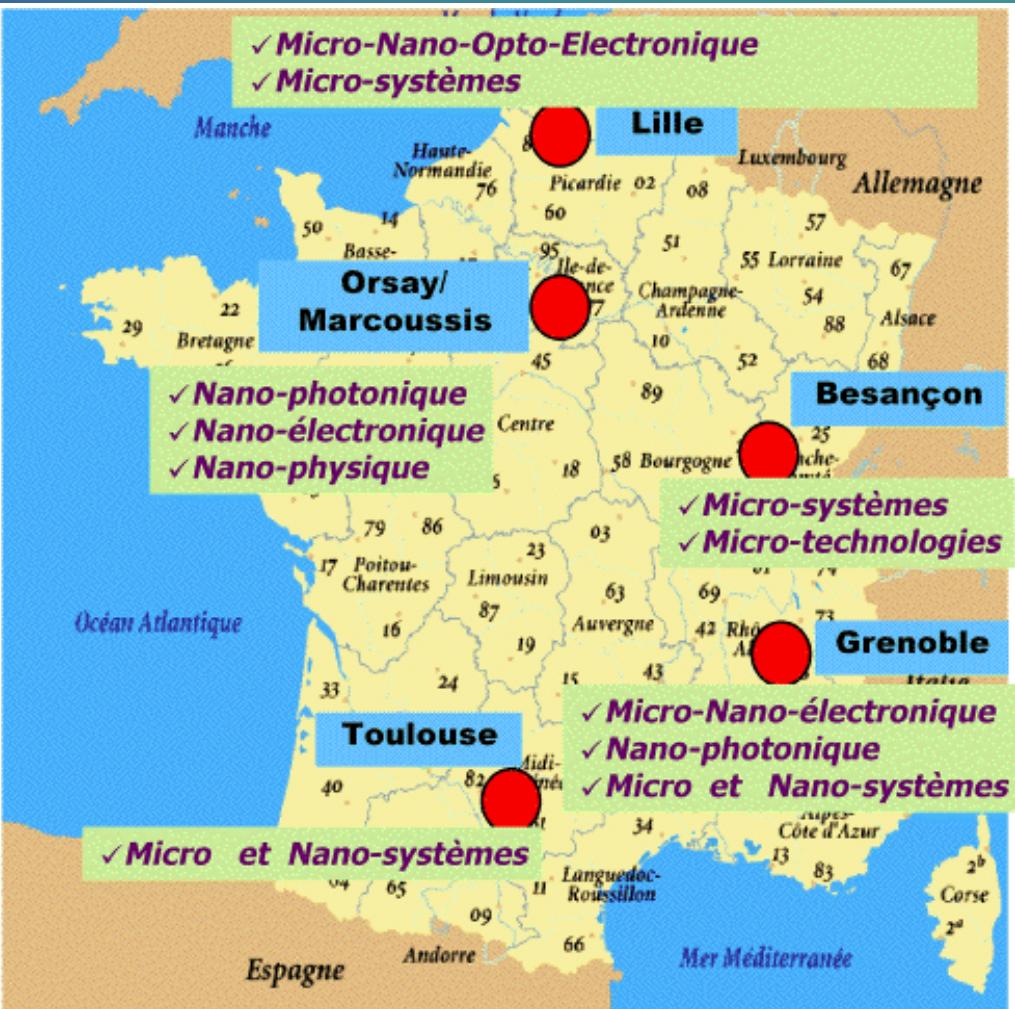
Réseau RENATECH :

Grandes centrales de technologie
pour la Recherche Technologique de Base
(RTB) initié en 2003 par MENSER

Obj: Répondre aux enjeux de μ et nano
technologie et nanosciences.

→ Mise en réseau de **7** centrales réparties
sur **5** pôles :

- Rhône-Alpes (CEA-LETI)
- Nord (IEMN)
- Sud-Ouest (LAAS)
- Ile de France (LPN et IEF)
- Grand Est (FEMTO) (2004)



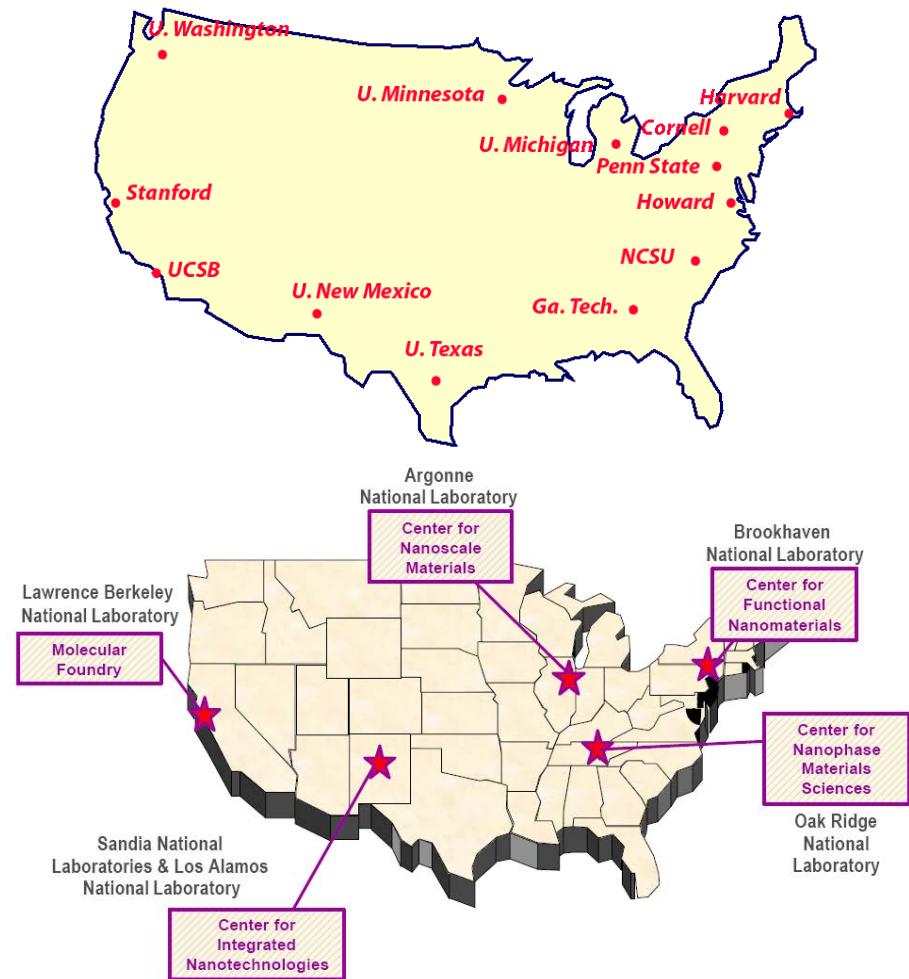
<http://www.rtb.cnrs.fr> --- <https://www.renatech.org/>

Grandes Centrales en Europe

- IMEC (Centre de Microélectronique de Louvain, [Belgique](#))
- CSEM ([Suisse](#))
- Centre de Recherche d'Eindhoven TNO ([Pays-Bas](#))
- TYNDALL, NMRC ([Irlande](#))
- SEMIFAB ([Ecosse](#))
- CNM (Centre National de Microélectronique, [Espagne](#), 3 sites)
- Alliance de 10 Fraunhofer (Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik)([Allemagne](#))
- MyFab ([Suède](#))
- NanoFab (Veneto Nanotech : [Italian](#) High Tech Cluster for Nanotechnologies ...)

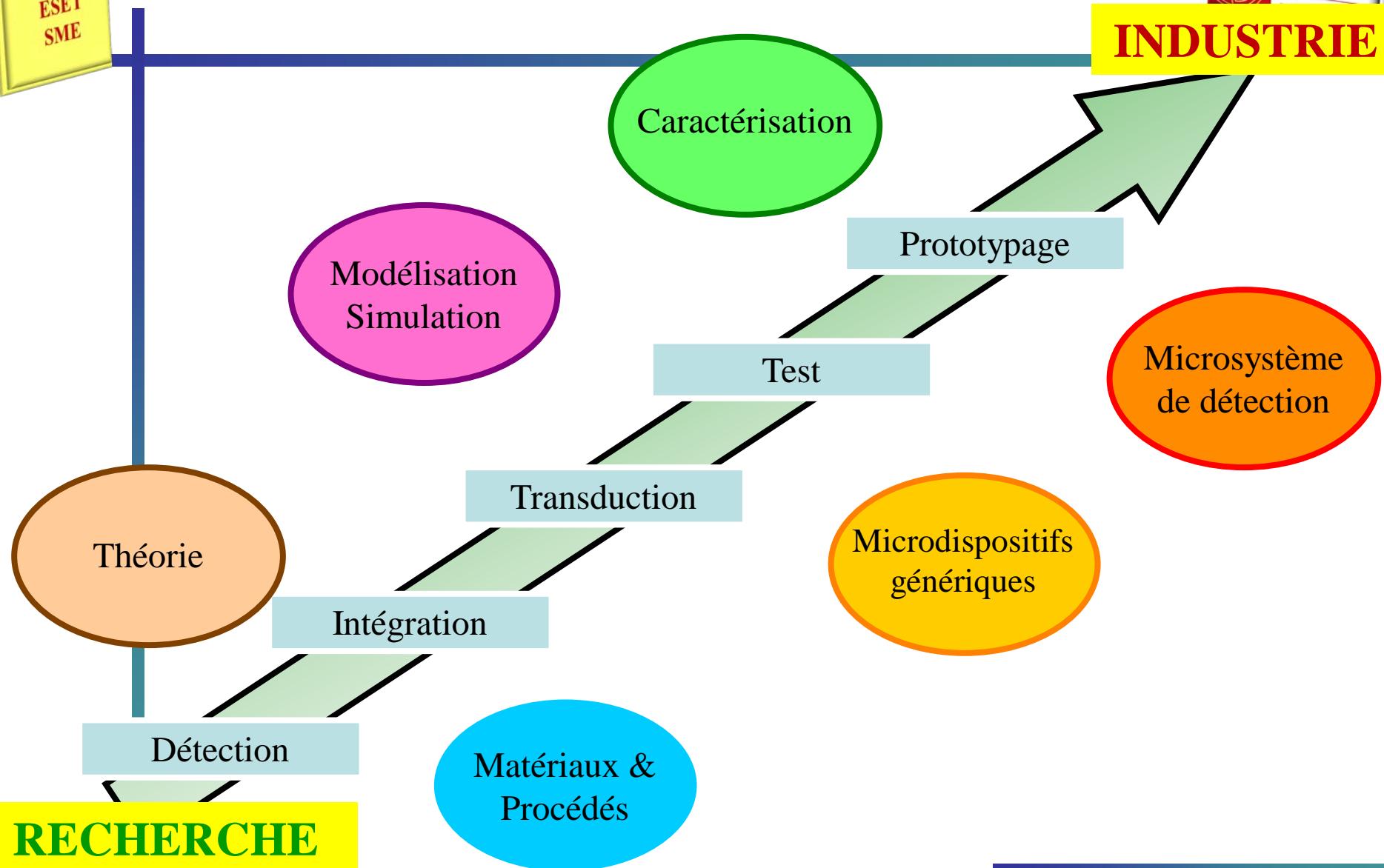
Grandes Centrales aux U.S.A.

- Réseau NNIN (National Nanotechnology Initiative Network) développé et soutenu par la NSF (National Science Foundation) qui regroupe **13 centres**
- Department of Energy, Defense, NASA and the National Institute of Standards and Technology (**5 centres**)

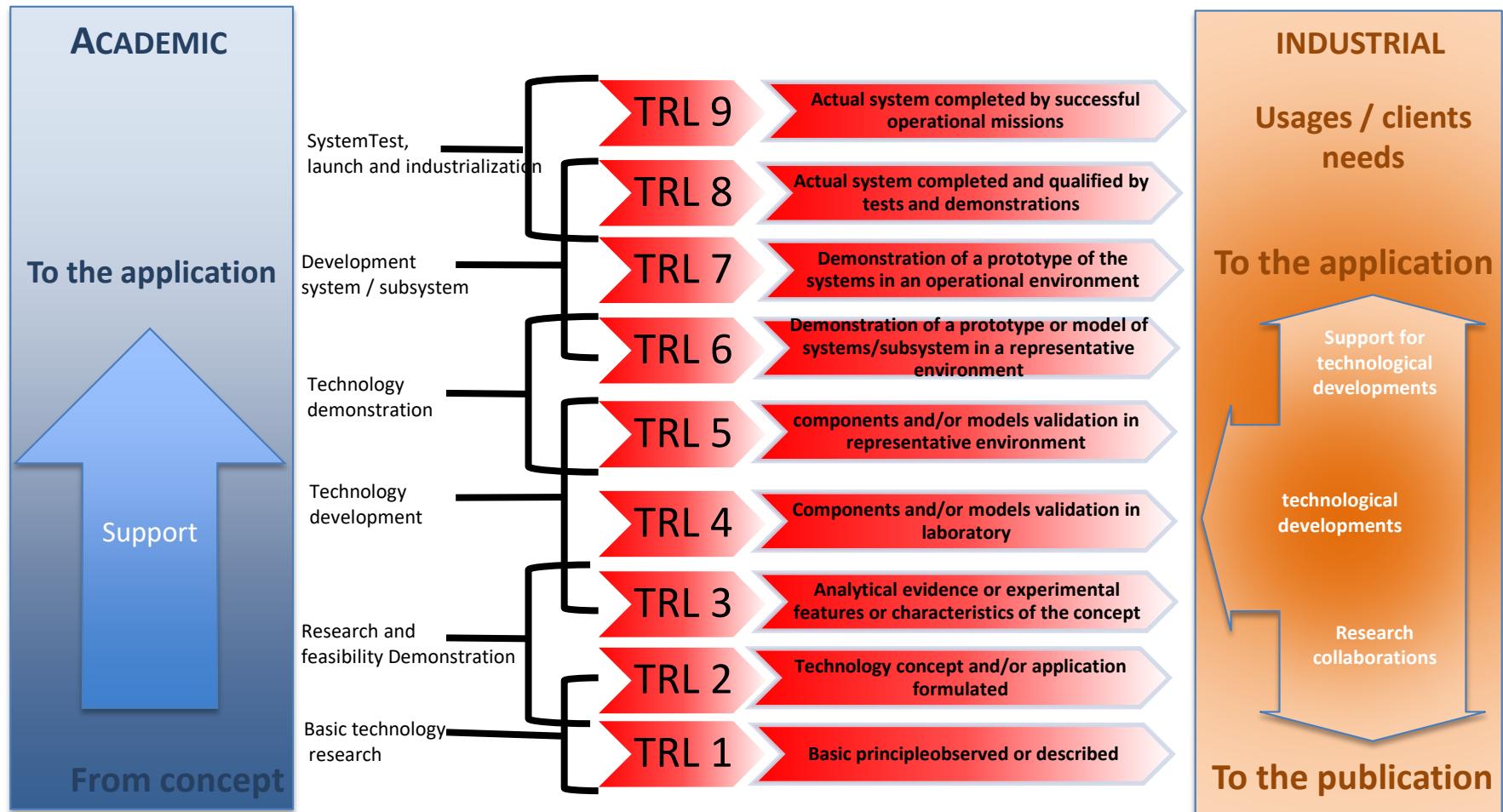


Grandes Centrales en Asie ?

- Chine (Guangzhou, Chongqing,...)
- Japon (LIMMS)
- Singapour (National Univ. Of Singapore, Nanyang Technological University (NTU), CINTRA (CNRS-UMI, NTU, Thales), HITACHI)
- Corée du sud (Sang Won Machinery, Overhoff Technology Corporation...)
- Taïwan (TSMC) : Taiwan Semiconductor Manufacturing Company)
-



Positioning to users



Transfert Industriel des Microsystèmes

➤ Stratégie de développement

- ✓ Réduction en taille de microstructures tridimensionnelles (nouvelles potentialités de détection et/ou d'actionnement...)
- ✓ Fabrication collective et faible coût
- ✓ Notion de consommation et de communication suivant des standards

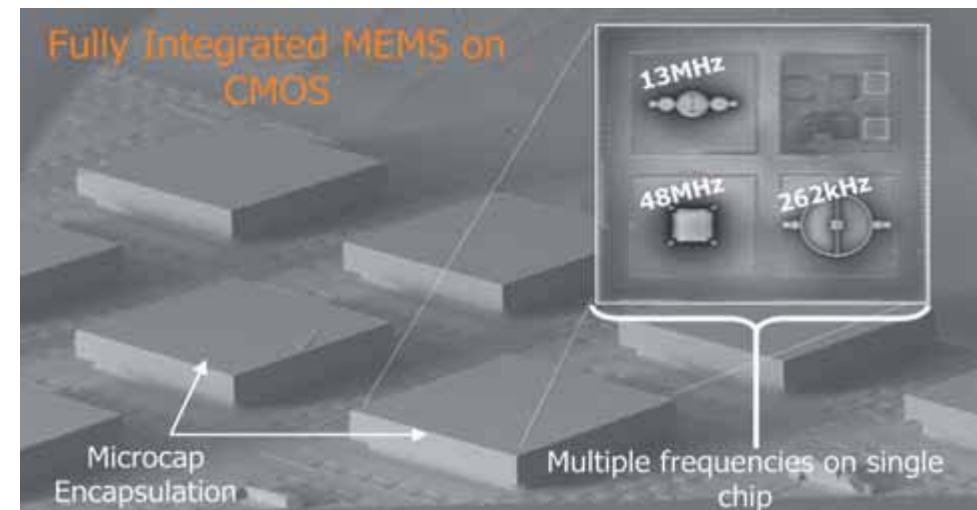
Solution: utilisation de la technologie silicium

- ✓ Utilisation des outils de la micro-électronique
- ✓ Compatibilité avec les technologies des circuits intégrés

➤ Problèmes liés à la compatibilité entre la microélectronique et le domaine analysé: compatibilités de fonctionnement

- ✓ Réalisation technologique
- ✓ Intégration monolithique ou hybride
- ✓ Encapsulation - Packaging
- ✓ Prise en compte des interfaces pluridisciplinaires

The company also recently acquired CMOS sensor maker ChipSensors (Limerick, Ireland), adding the startup's monolithic CMOS sensors for temperature, humidity and gases to its portfolio, for another path to adding more content per system.



www.silabs.com

www.globalfoundries.com

Le Marché Industriel des MEMS

Médical

- Capteur de pression sanguine
- Stimulateurs musculaires
- systèmes de diffusion transderm.

• Capteurs de pression intra-corporels

• Prothèses

• Instruments d'analyses miniaturisés

• Stimulateurs cardiaques



Electronique

• Têtes de lecture de disque

• Têtes d'impression pour imprimantes à jet d'encre

• Téléprojecteurs

• Capteurs sismiques

• DéTECTEURS de pression pour l'aérospatial

• Systèmes de stockage de données

Communication

• Commutateurs optiques ou photoniques

• Relais, commutateurs et filtres Radio-Fréquence

• Systèmes de projection pour téléphones portables

• Oscillateurs commandés sous tension (VCO)

• Diviseurs et coupleurs

• Lasers accordables

Automobile

• Capteurs de navigation embarqués

• Capteurs de compression du système de climatisation

• Capteurs de force de freinage & accéléromètres

• DéTECTEURS de niveau de carburant et de pression vapeur

• Capteurs pour airbags

• Capteurs gaz pour système AQS

Forte Progression du Marché Industriel des MEMS entre 2004 - 2011

MEMS (systems)

2004 : 11,5 Md\$

2006 : 40 Md\$

2011 : 72 Md\$

MEMS (devices)

2004 : 4.5 Md\$

2006 : 5.9 Md\$

2011 : 10.8 Md\$ (+13%/an)

Très gros marché (>10 Md\$):

- têtes de lecture-écriture, têtes imprimantes jet d'encre, afficheurs à micromirroirs

Marché Important (\approx 1 Md\$) :

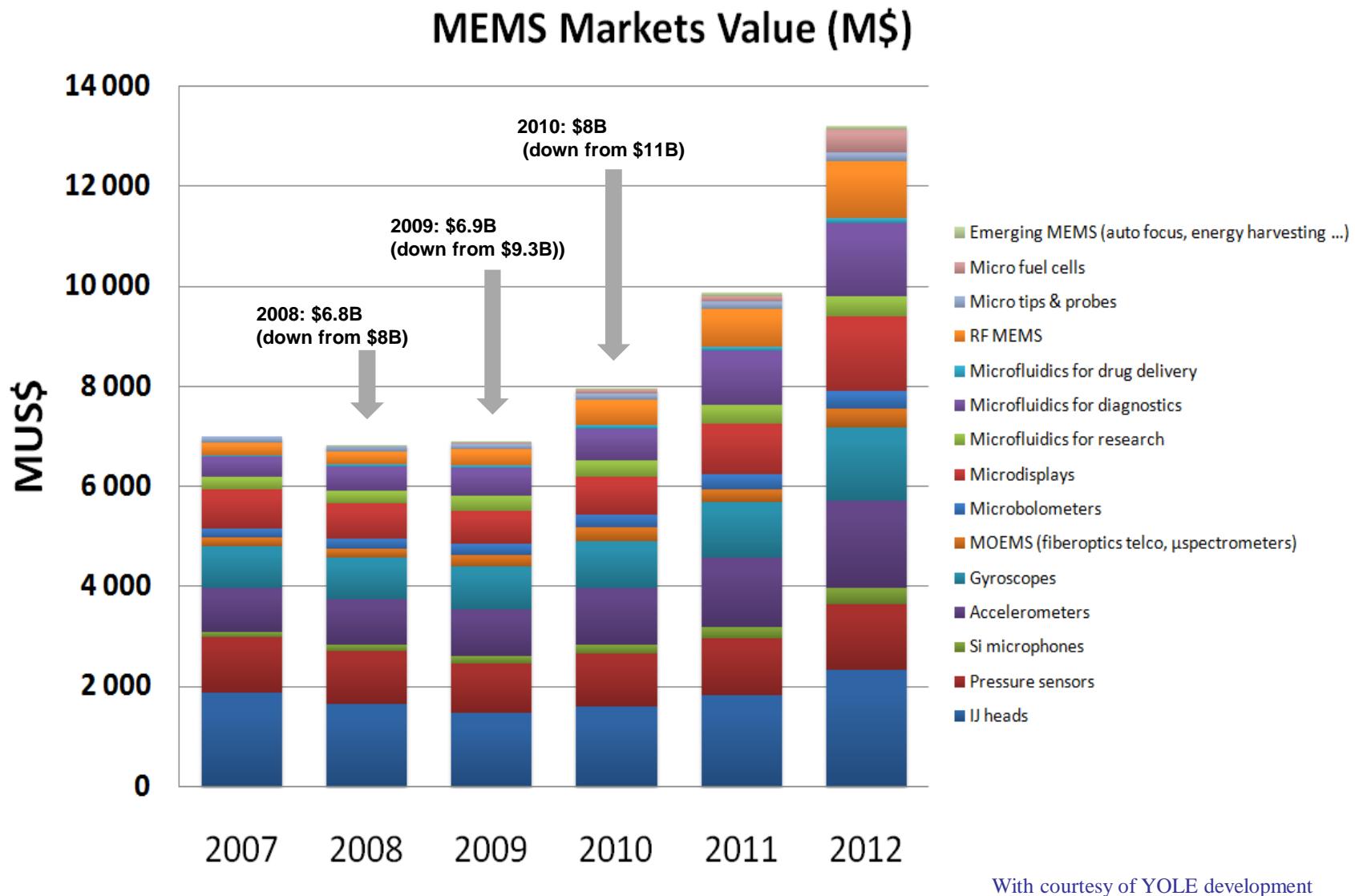
- Capteurs de pression, accélération, composants RF

Marché Significatif (qq 100 M\$) :

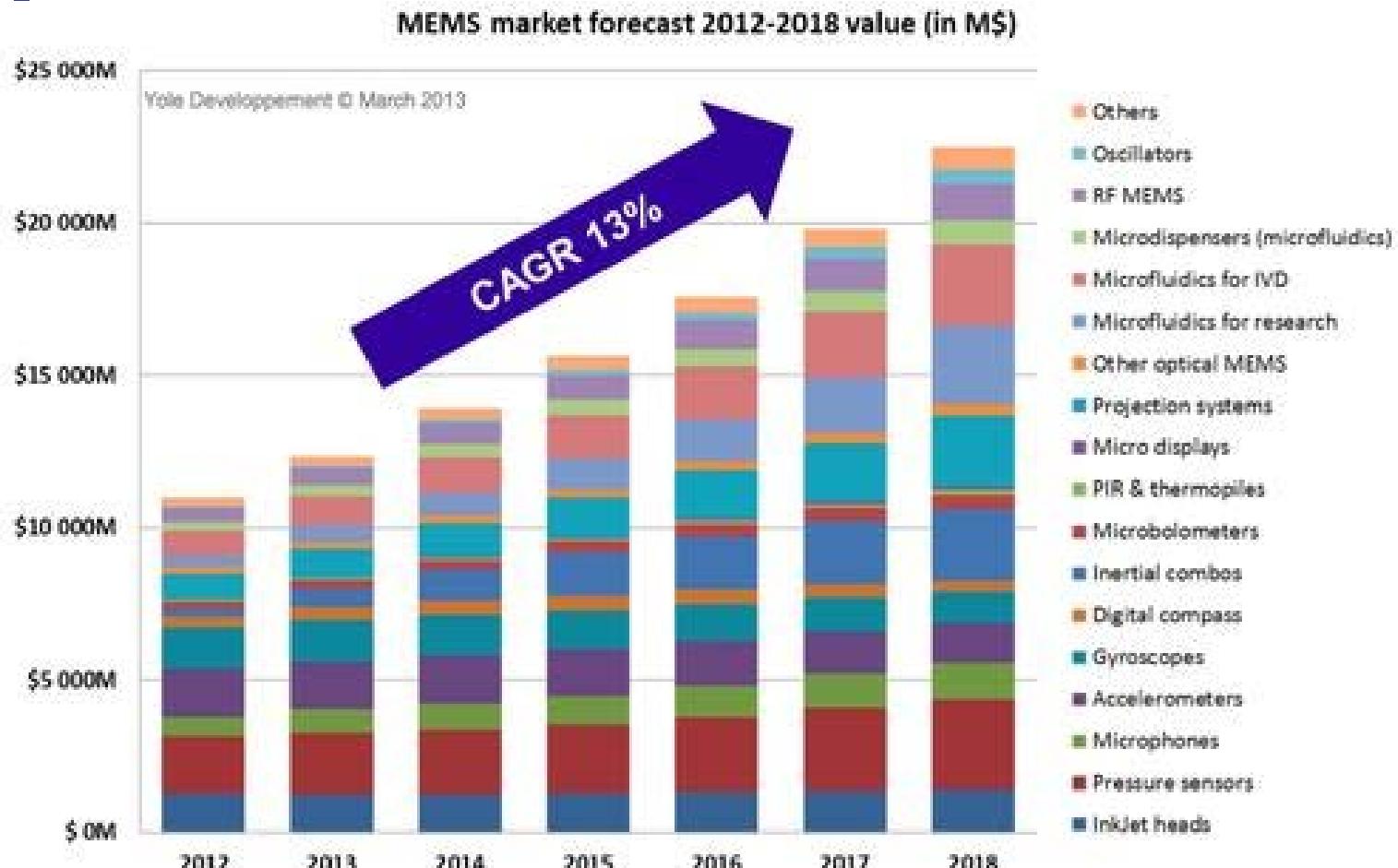
- Composants μfluidiques, Gyroscopes, μphones, actionneurs pour transfert de médicaments, capteurs IR, μsources d'énergie,...

Marché en devenir : μréacteurs, μpompes, Capteurs chimiques, microbolometres, Boussoles numériques & oscillateurs...

MEMS Forecast



MEMS Forecast



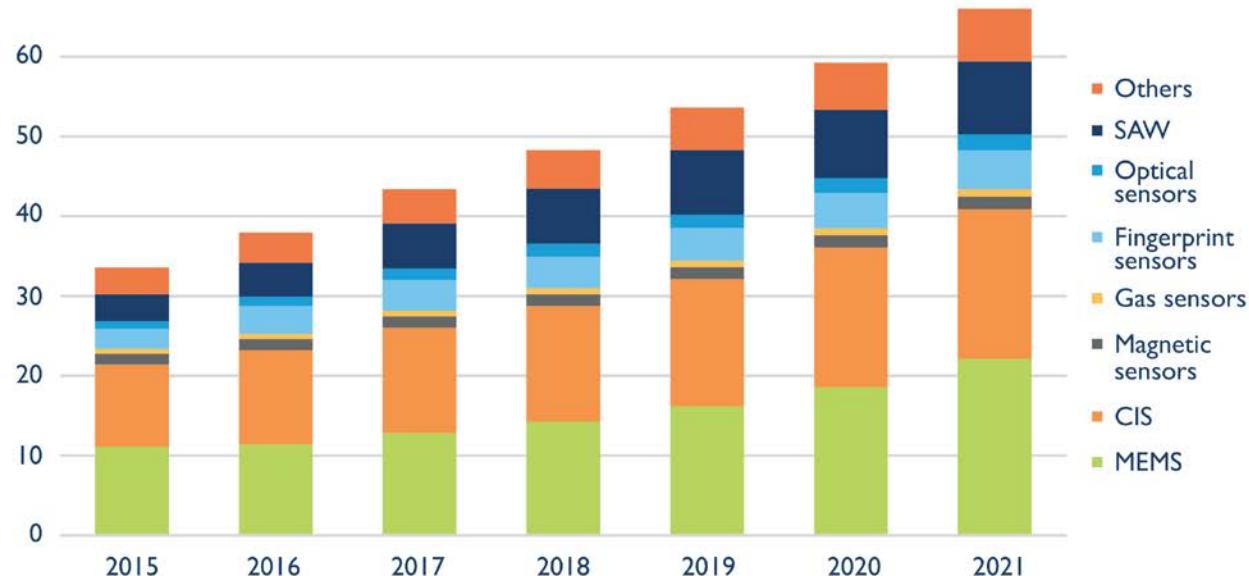
With courtesy of YOLE development

MEMS Forecast



MEMS and sensors revenue market in B\$

(Source : Status of the MEMS Industry 2017, June 2017, Yole Développement)



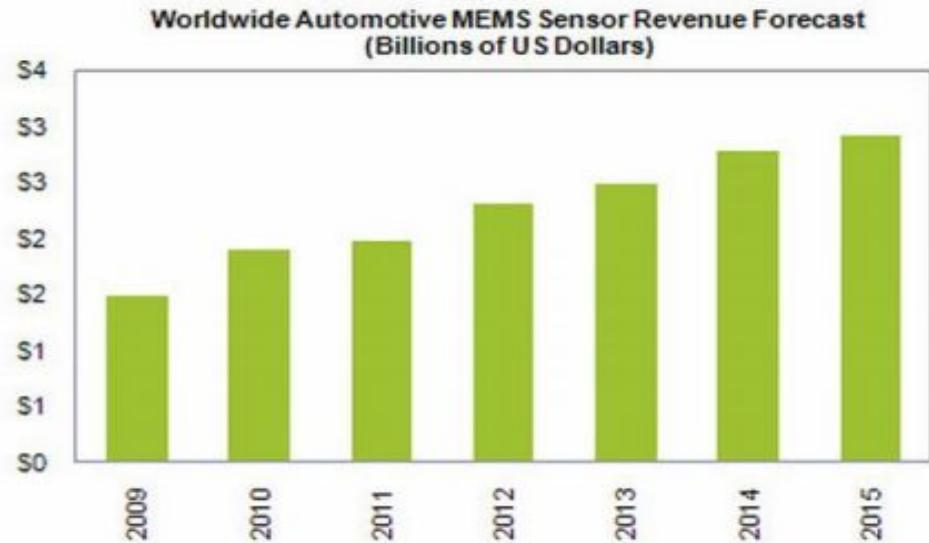
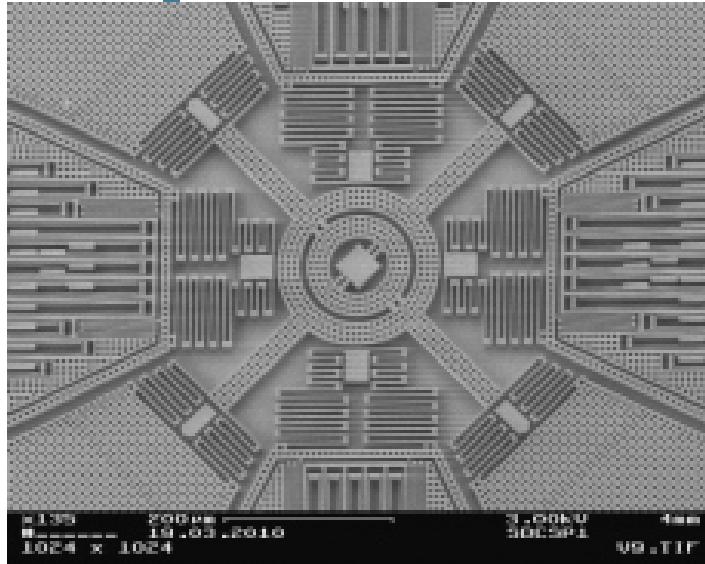
Yole Développement is part of Yole Group of Companies

©2017 - June 2017 - www.yole.fr - www.i-micronews.com

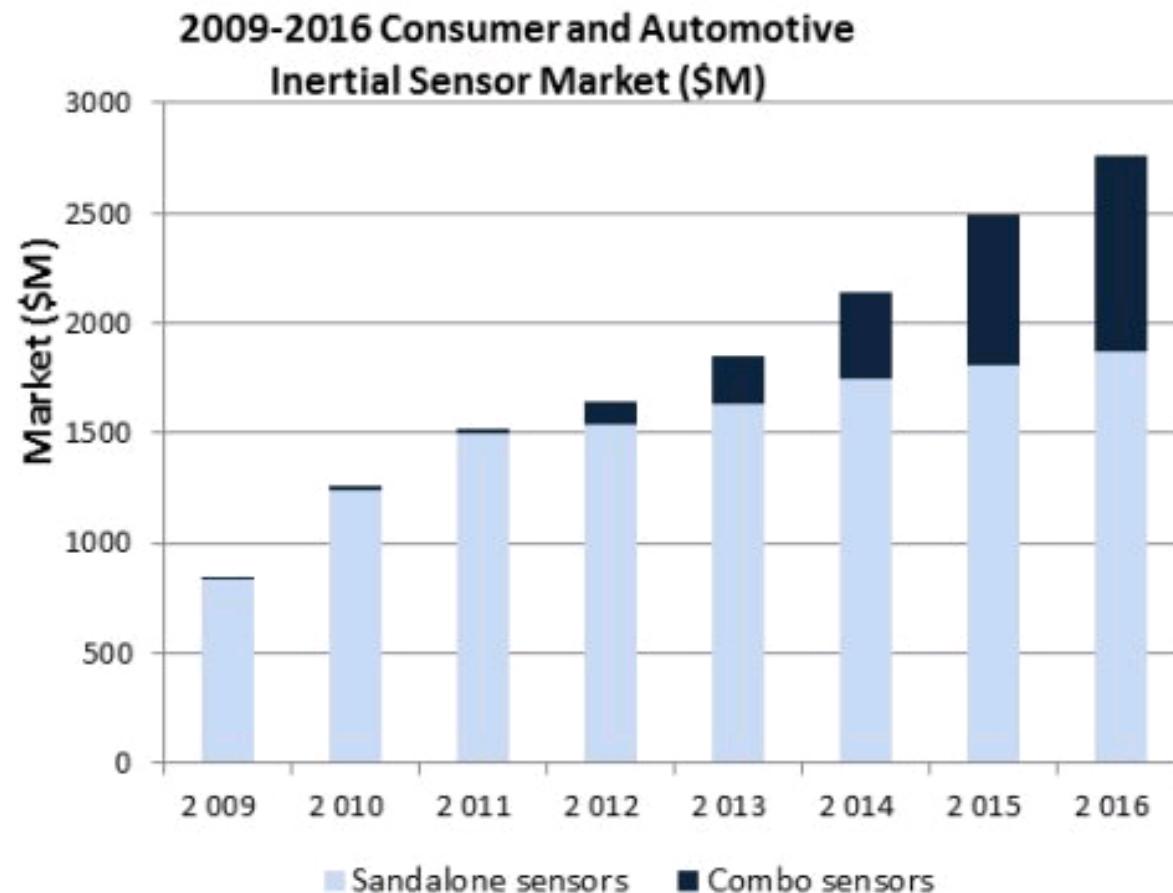
Capteurs MEMS pour l'Automobile

« Un contexte plutôt favorable à moyen terme pour les MEMS dédiés à l'automobile, si l'on en croit un rapport de IHS iSuppli. Ce dernier annonce ainsi une croissance de **+16 % de ce marché en 2012**, à 2,31 milliards de dollars, alors que ce marché ne devait progresser en valeur que de 4 % en 2011, à 1,99 milliard de dollars, à cause de la catastrophe japonaise (+9 % en volume en 2011, à 750,7 millions d'unités). Entre 2010 et 2015, l'analyste mise sur une **croissance annuelle moyenne de 9 %**, pour atteindre 2,93 milliards de dollars en 2015. **Dans l'automobile, rappelons que les MEMS trouvent principalement leur place dans les airbags, les dispositifs de surveillance de la pression des pneus, les systèmes de contrôle de la stabilisation des véhicules** ». Frédéric Rémond et Pascal Coutance, ElectroniqueS, le 24/8/2011

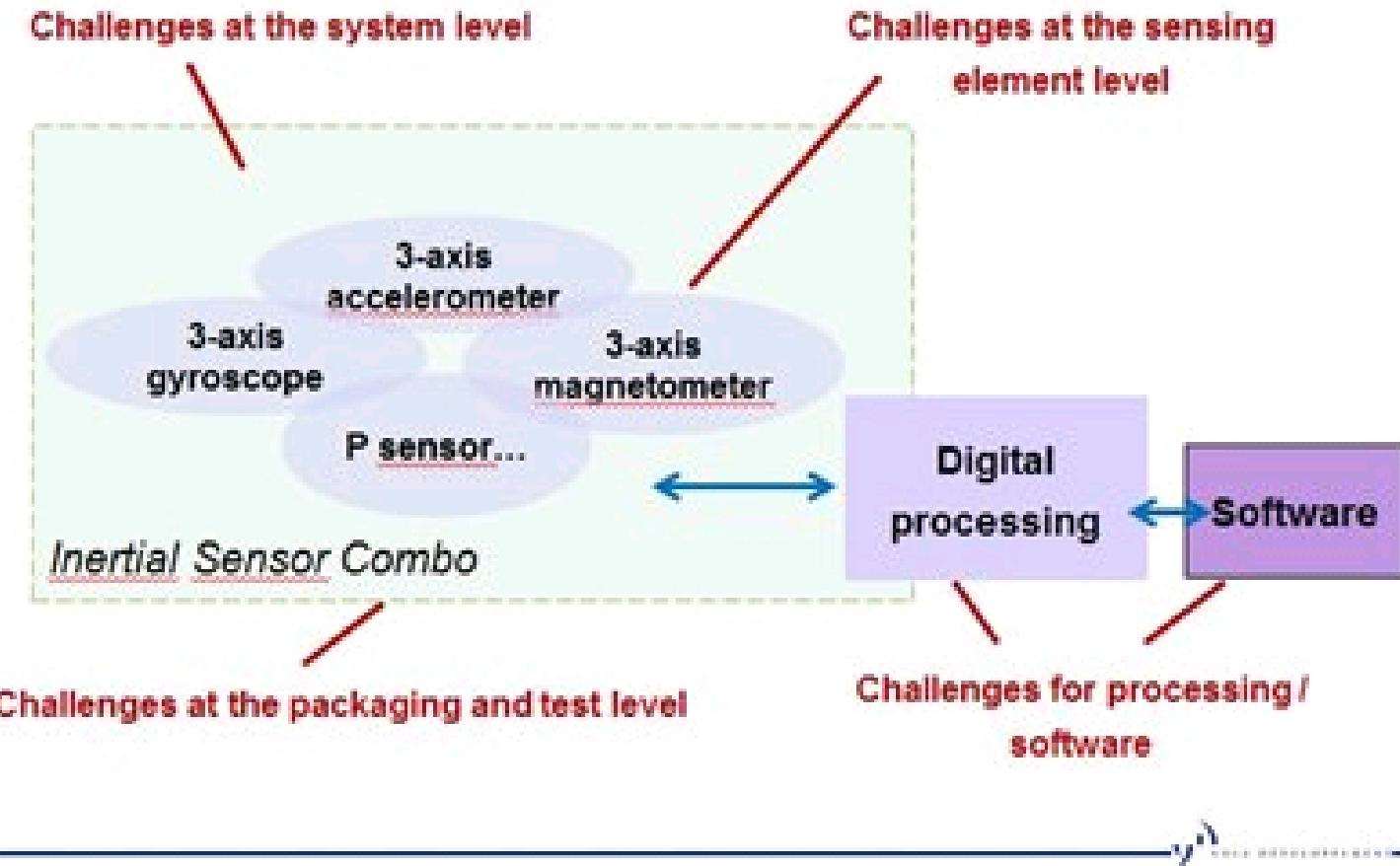
• Frédéric Rémond et Pascal Coutance, ElectroniqueS, le 24/8/2011



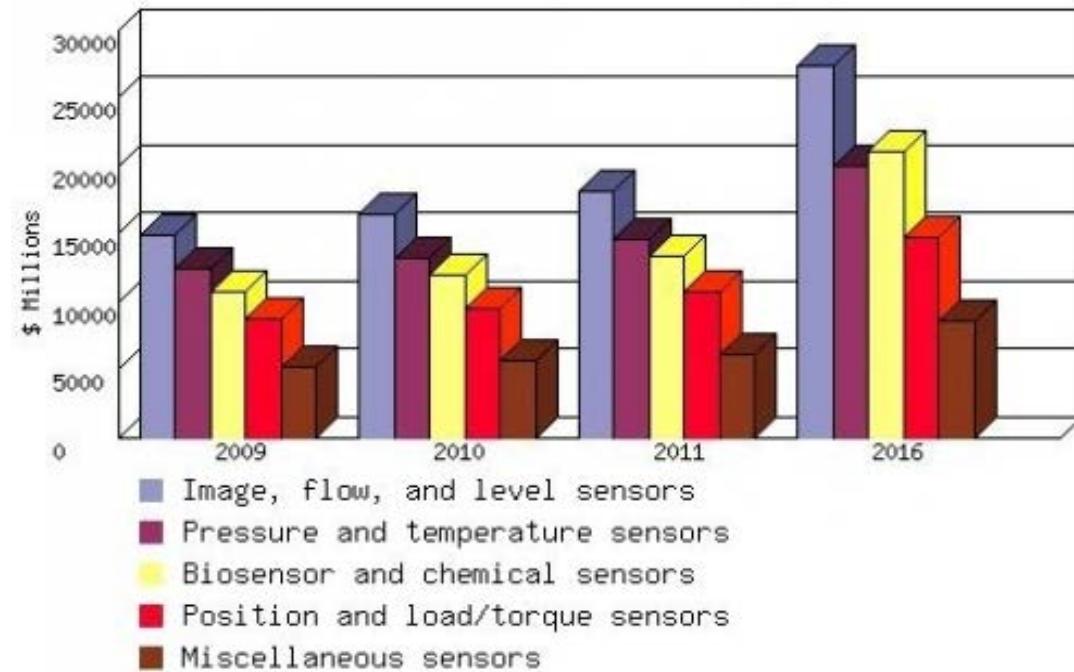
Capteurs MEMS pour l'Automobile



Challenges for Combo Sensors



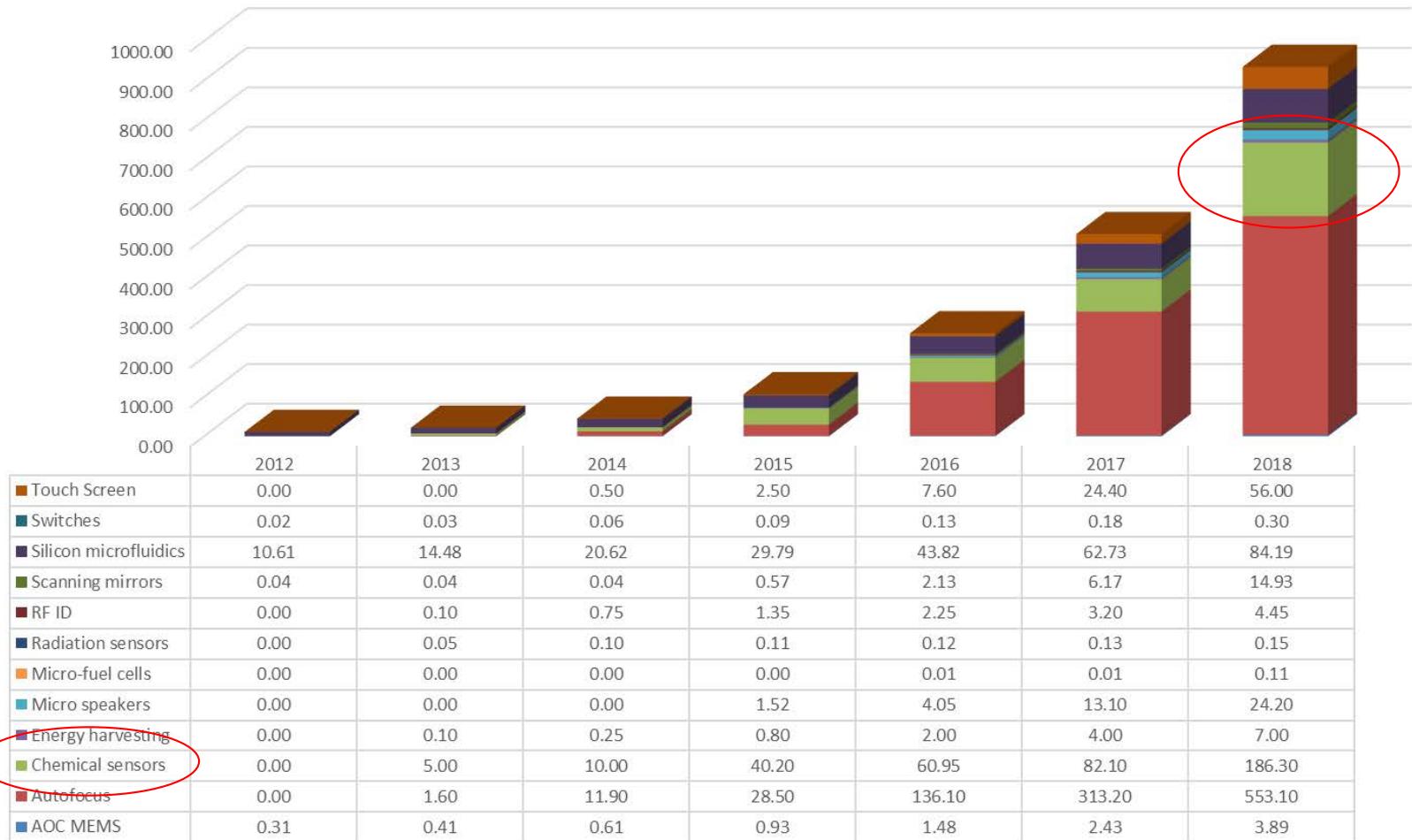
Etude de Marché Industriel des Capteurs 2009 - 2016



Evolution la + rapide : capteurs bio et chimiques : 9,6%/an

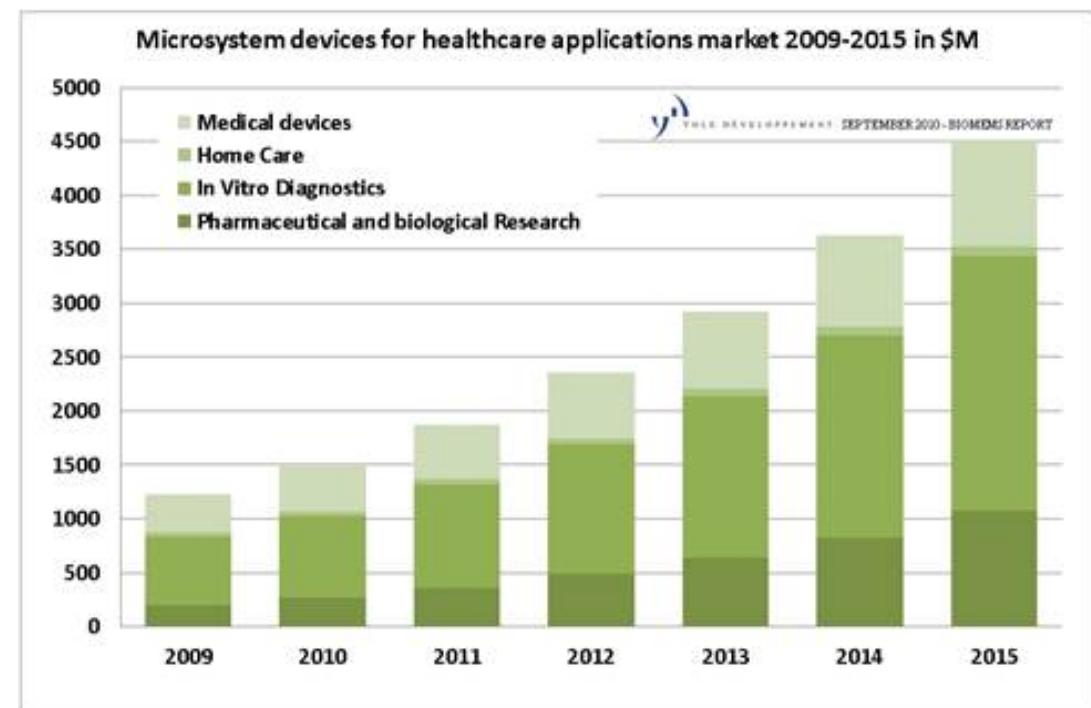
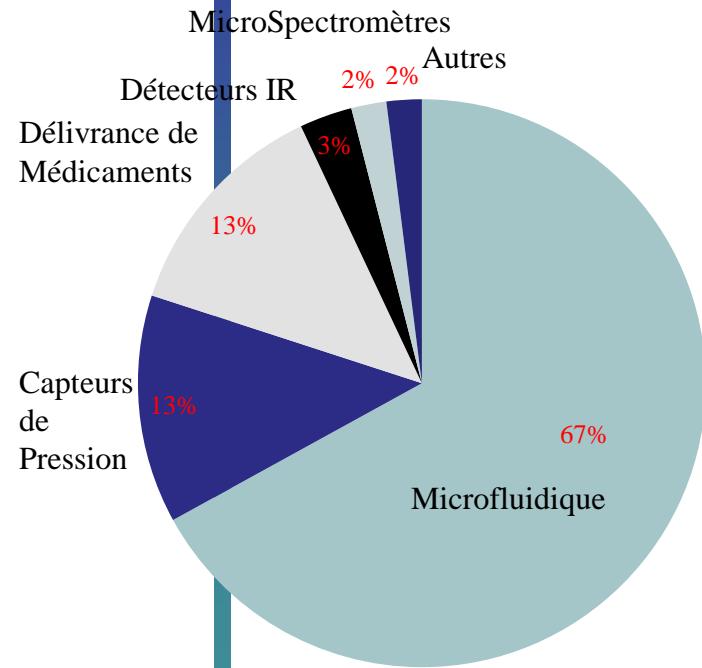
Source : www.bccresearch.com

Emerging MEMS Market 2012-2018 in Million Units



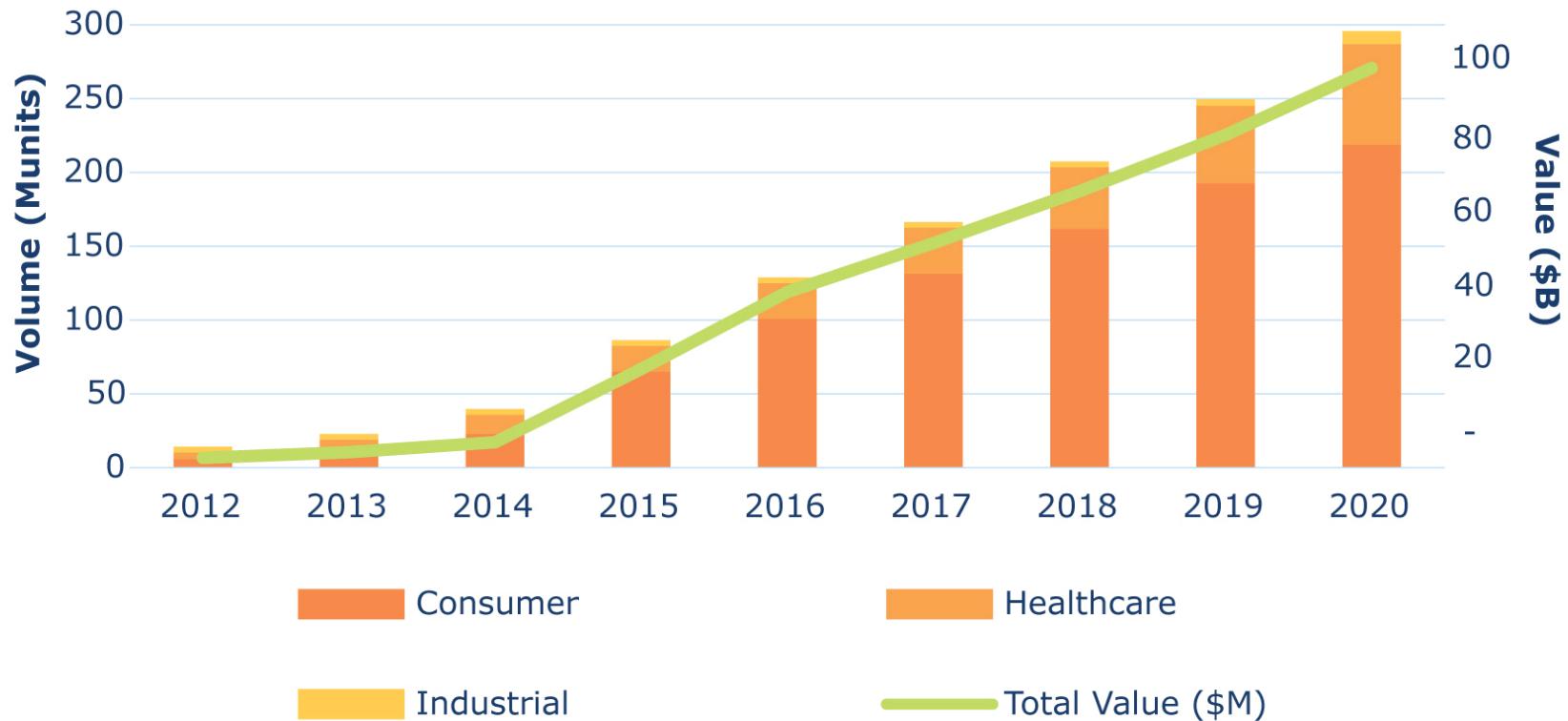
Marché MEMS : Médical

MEMS : Applications médicales (2009)



Wearable Applications Breakdown - 2012/2020

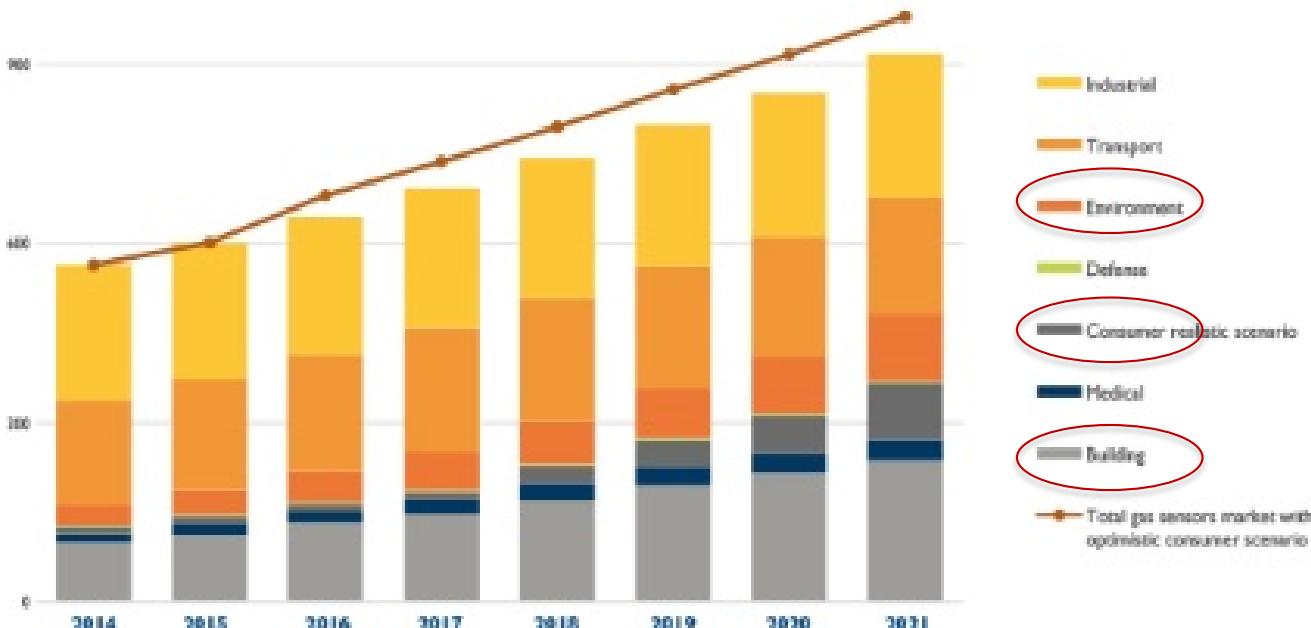
(Source: Sensors for Wearable Electronics & Mobile Healthcare, Yole Développement, July 2015)



Le Marché des capteurs de gaz

2014-2021 Gas sensors forecast In US\$M value

(Source: Gas Sensor Technology and Market Analysis, February 2016, Yole Développement)



Le marché se réparti en
6 domaines :

Grand Public : embarqué sur vêtement, smartphone, ou à la maison

HVAC : monitoring de la qualité de l'air intérieur

Environnement : pollution extérieure

Défense et sécurité
industrielle

Transport : contrôle moteur, échappements, habitacle, cabine, cabine passagers avion, train

Médical : détection de biomarqueurs dans l'haleine

02/2016 yole : « Consumer gas sensor market to skyrocket »

2/11/2016 Micronews : « Gas sensor market is about to change »

Marchés les plus importants : Chine, US, Allemagne

Tremendous growth over the next few years

MEMS & sensors expanding
from \$3.5B in 2009
to \$7.9B in 2015.

In particular, multi-axis motion sensing ***for Smartphones***
(\$1.19B in 2015, with a 25.3% CAGR*)

(**Compound Annual Growth Rate*, taux composé annuel moyen ou taux d'évolution annuel)

Several other emerging sensors have been identified,
with the potential to become new killer applications
in 5 to 10 years: **microspeakers, environmental sensors...**

TECHNOLOGY EVOLUTION WAVES



Technology x Performance



©2017 | www.yole.fr | Status of the MEMS Industry 2017

13

Les Principales Entreprises de Production Microsystèmes

USA

- **FREESCALE S-C** (ligne de production microsyst. Sur wafer 200mm usine de Oak Hill au Texas)
- **NEW SCALE**
- **Micralyne (Canada)**
- **IMT (Californie)**
- **DALSA S-C (Canada)**

Europe

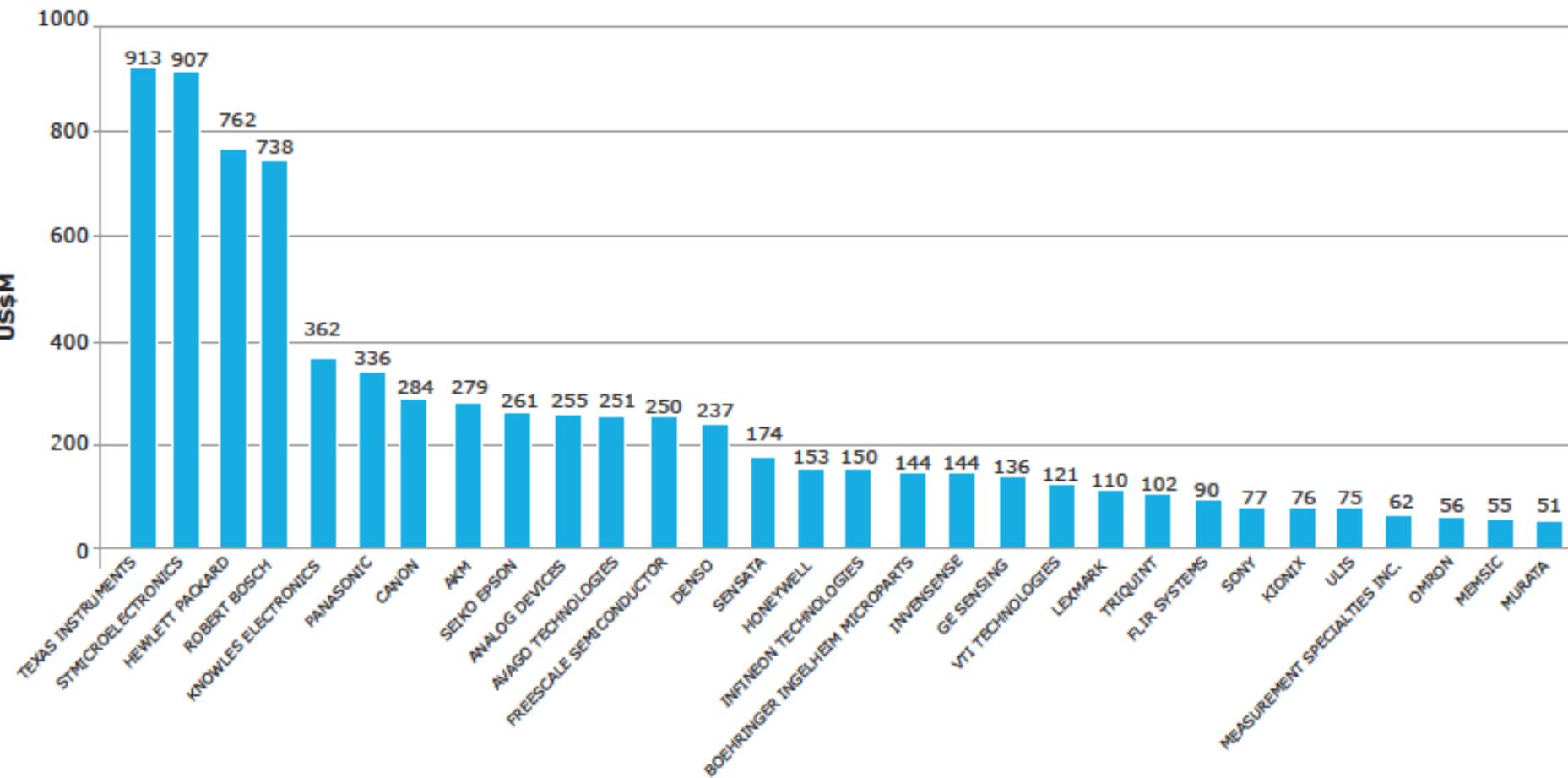
- **ST Microelectronics (Fr)**
- **MEMSCAP (Fr)**
- **TRONICS (Fr)**
- **PHS MEMS (Fr)**
- **COLYBRIS (Suisse)**
- **X-FAB (Allemagne)**
- **AUSTRIAMicroMEMS**
- **SILEX (Sweden)**

Asie

- **SONY S-C Kyushu Corporation (Japon)**
- **SONION (Vietnam)**
- **FIS (Japon)**
- **FIGARO (Japon)**
- **APM (Taïwan)**
- **TMT Touch Microsystem Technology, TSMC, Taïwan**
- **HITACHI (Singapore)**

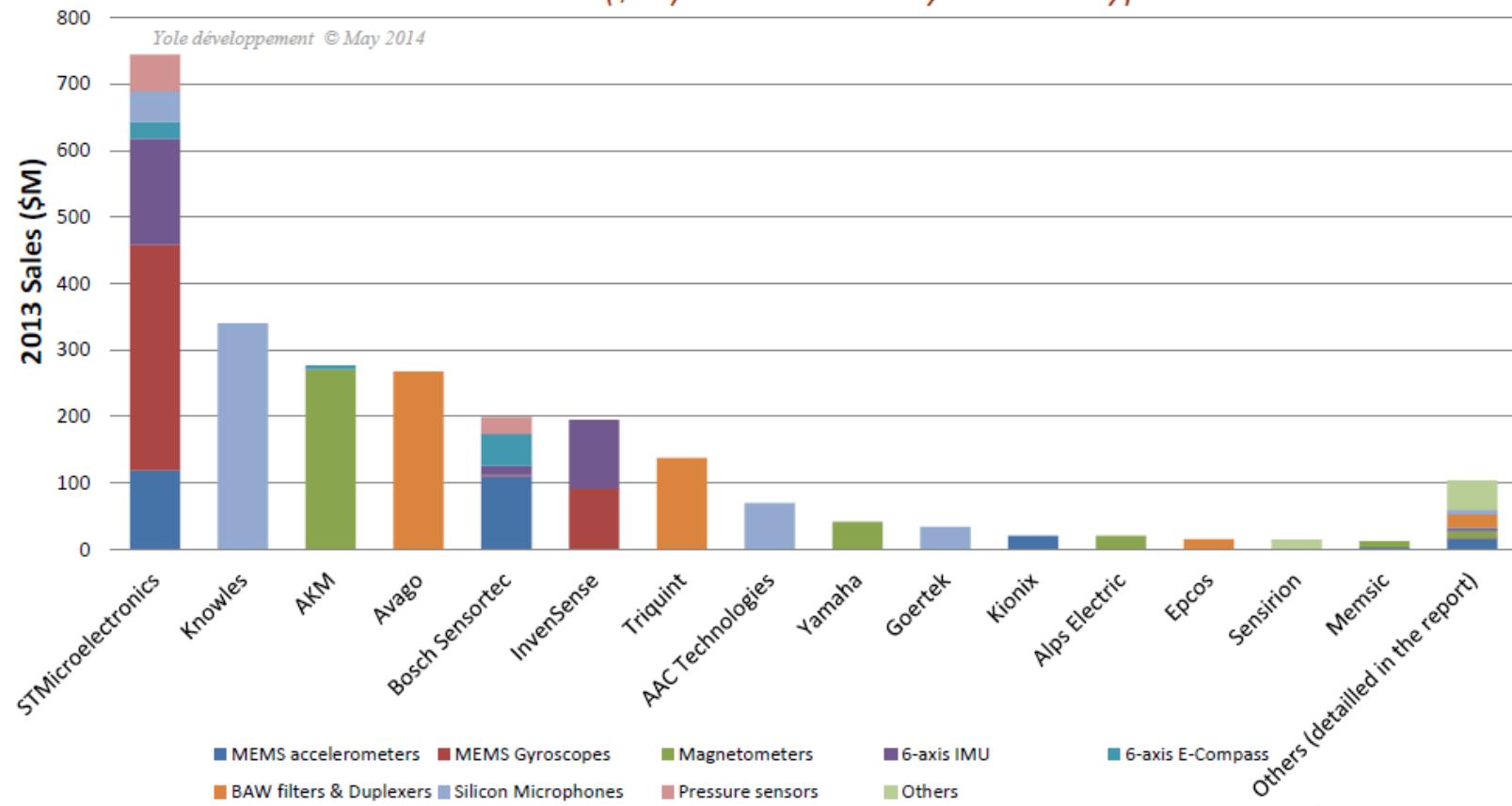
Top 30 worldwide MEMS companies ranking – 2011 Revenues

(Yole Développement estimates US M\$ – March 2012)

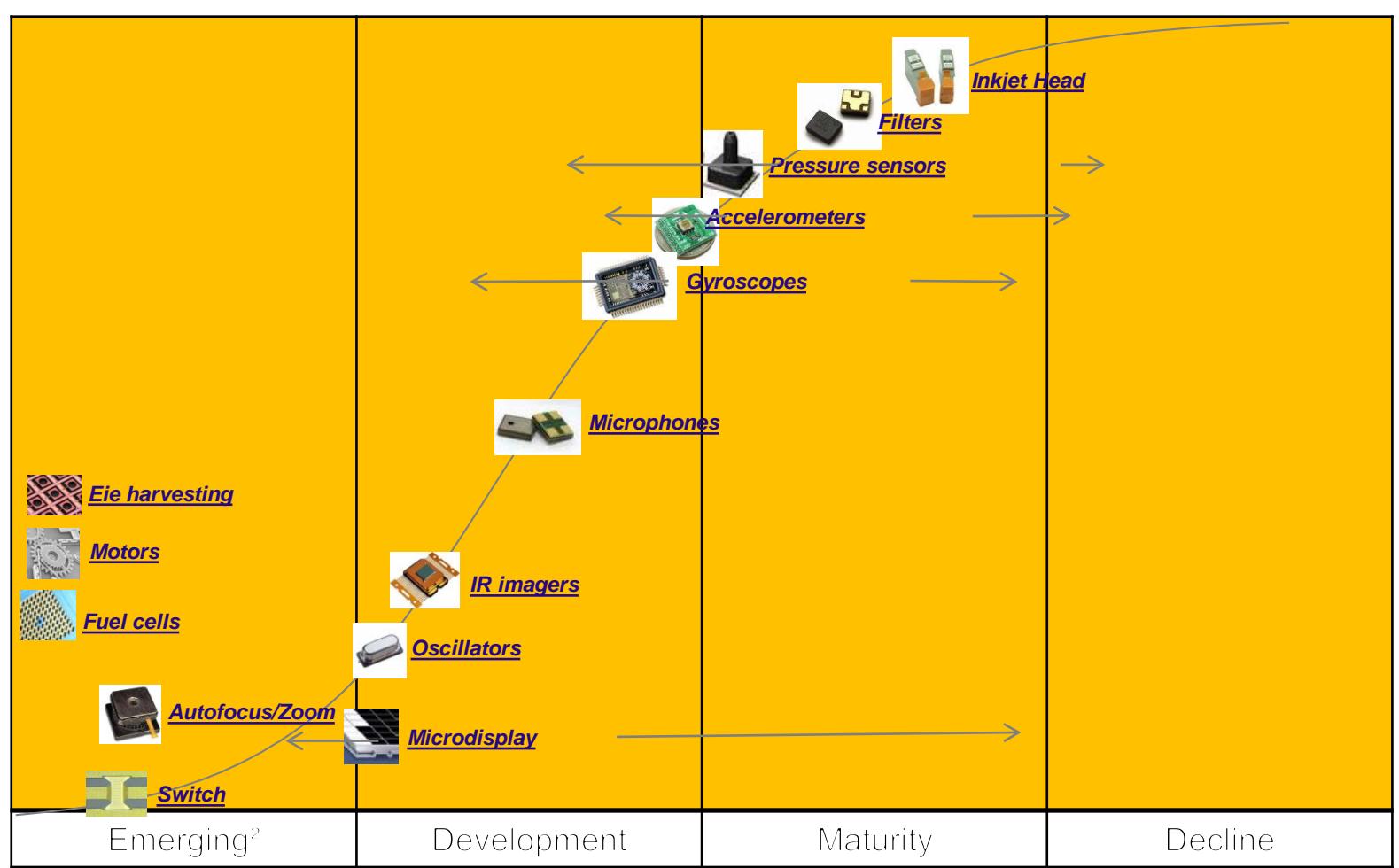


Top MEMS Suppliers in the Mobile Phone and Tablet Market

- 2013 Revenue (\$M) - Breakdown by Product Type -



MEMS products are in the development phase having successfully crossed the “Chasm”



Industrialisation des microcapteurs chimiques

➤ Critères économiques

- ✓ Production de masse, faible coût de fabrication
- ✓ Intelligence embarquée

➤ Solution: utilisation des microtechnologies

- ✓ Adaptation de la microélectronique
- ✓ Intégration hybride

➤ Propriétés recherchées

- ✓ La loi des « S »: Sensibilité, Sélectivité, Stabilité, Sûreté, "Speed", "Sampling", "\$",...

➤ Problématique: compatibilité entre les microtechnologies et le principe de détection...



Contexte économique des microcapteurs chimiques

- Existence d'un marché fractionné (propice aux PME-PMI...)
 - ✓ « Petite série » de fabrication: 10^3 - 10^6 microcapteurs par an
 - ✓ « Faible » rentabilité
 - ✓ « Faible » possibilité d'investissement...
- Adaptation de la microélectronique à la fabrication des capteurs chimiques
 - ✓ Utilisation des moyens lourds de la microélectronique
 - ✓ « Fort » investissement financier...
- Nécessité d'un compromis technico-économique...



Solution

➤ Développement de structures génériques de microcapteurs chimiques en technologie silicium

- ✓ Mutualisation des moyens lourds des microtechnologies entre différents partenaires industriels
- ✓ Mise en place de « grandes » séries de fabrication à faible coût
- ✓ Utilisation des composants standards de la microélectronique: résistance, capacité et transistor à effet de champ, jonction,...
- ✓ Utilisation des composants standards des microsystèmes électromécaniques (MEMS): micro-levier, micro-poutre, micro-membrane,...

➤ Adaptation et spécialisation en fonction de l'application

- ✓ **Intégration des matériaux de détection** (fabrication collective ou en grande série...)
- ✓ Intégration monolithique ou hybride
- ✓ Développement des techniques d'encapsulation et de conditionnement
- ✓ Développement d'un savoir-faire propre en la matière pour chaque partenaire (maîtrise de la propriété industrielle...)



Plan

1. Introduction Généralités
2. Les Technologies de Fabrication
3. Exemples De Micro-capteurs & actionneurs
4. Recherche sur les nez électroniques
5. Les Outils de Conception
6. Prospectives : Les Microsystèmes de demain...

Les technologies associées aux μsystèmes



- Procédés de fabrication sous environnement « propre » (salle blanche)
- Base des Technologies CI (fabrication de masse)
 - A partir de substrat S-C (Si, III-V,...)
- Développement des technologies MEMS

Pourquoi le Silicium ?

Etat physique du corps simple(25°C, 1 atm)

SOLIDE

LIQUIDE

GAZEUX

SYNTHESE

		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Lanthanides	60	69	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	# Actinides	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
1															18
1	H														He
1	1	2													2
2	Li	Be													Ne
2	3	4													10
3	Na	Mg													Ar
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	19
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Kr
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	36
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Xe
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	54
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	At
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	86
7	Fr	Ra	Act#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt						
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109						

Salle « blanche »

Définition donnée dans la norme ISO 14644-1 :

“Salle dans laquelle la concentration des particules en suspension dans l'air est maîtrisée et qui est construite et utilisée de façon à minimiser l'introduction, la production et la rétention des particules à l'intérieur de la pièce, et dans laquelle d'autres paramètres pertinents, tel que la température, l'humidité et la pression sont maîtrisés comme il convient”.



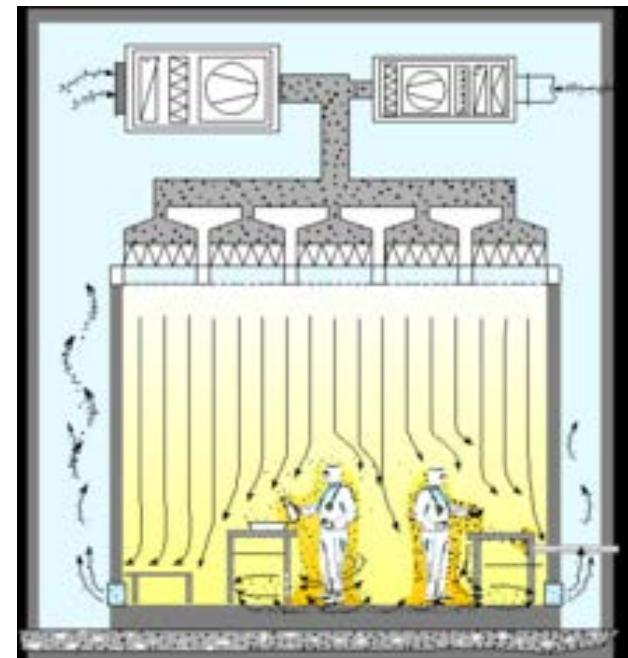
Salle « blanche »

- **Salle dépoussiérée en continu**

- Plafonds soufflants, surpression
- contrôle par ordinateur de la filtration (par secteur) (centrale de traitement d'air)
- Le personnel doit porter un sur-équipement et accéder à la salle blanche par un sas.
- L'équipement peut comporter une combinaison, un couvre cheveux (calotte), des gants, des chaussons, un masque, des sous-vêtements spécifiques, voir un scaphandre complet.
- Les outils utilisés à l'intérieur sont choisis pour produire le moins de particules possible.

- **Caractéristiques :**

- Salle climatisée (21°C, 30% RH)
- Surpression (15-20 Pascals)
- Taux de renouvellement d'air neuf (30%/h)
- ventilation (flux vertical laminaire)
- Classe : nb de particules dans 1 m³
 - LAAS :10000 (100 en zones propres)



Concentration max admissible

$$C = 10^N * \left(\frac{10^{-7}}{D} \right)^{2,08}$$

Classe ISO 3 = Classe 1 selon FS 209

Philippe MENINI

Salle « blanche »

- Salle dénussiérrée en continu**

Classe	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1 000	237	102	35	8	
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7				352 000	83 200	2 930
ISO 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO 9			35 200 000	8 320 000	293 000	

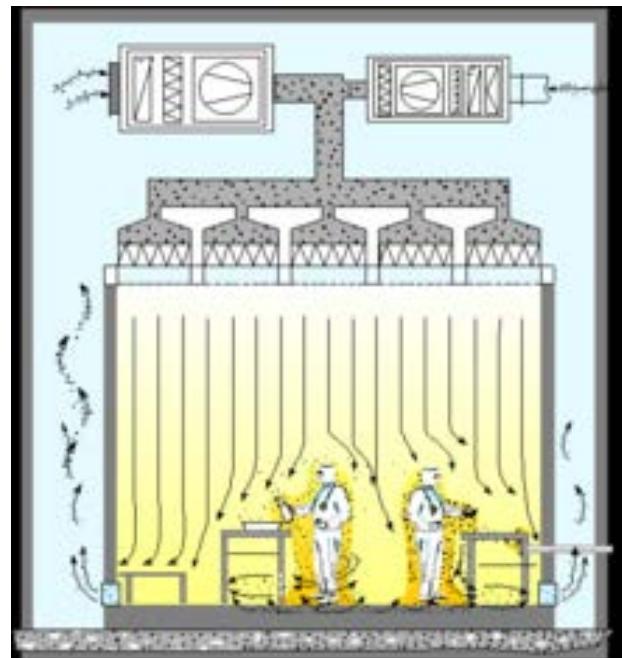
- Classe : nb d
 - LAAS : 10

Standard ISO 14644-1

Concentration max admissible

$$C = 10^N * \left(\frac{10^{-7}}{D} \right)^{2,08}$$

Classe ISO 3 = Classe 1 selon FS 209

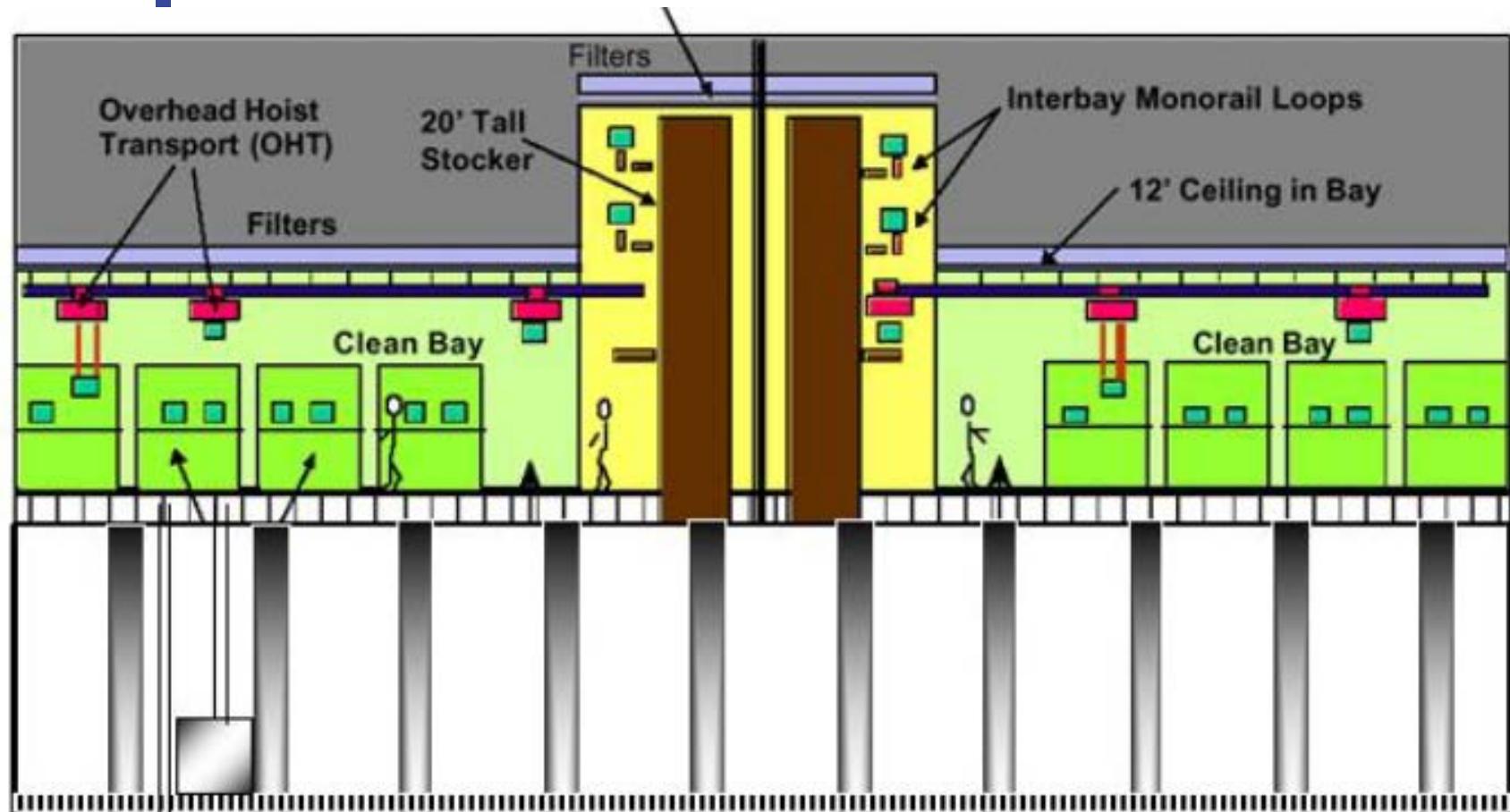


Norme spéc.
Biocontamination
ISO 14698

Philippe MENINI

Salle Blanche

Structures à 3 niveaux



Structure

- Zone propre / Zone grise / Zone technique

Les zones propres : Microélectronique

Zones blanches / Zones grises / Ballroom

Zone blanche



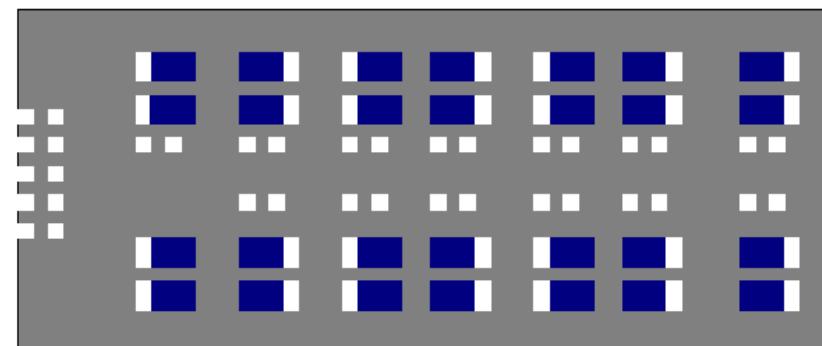
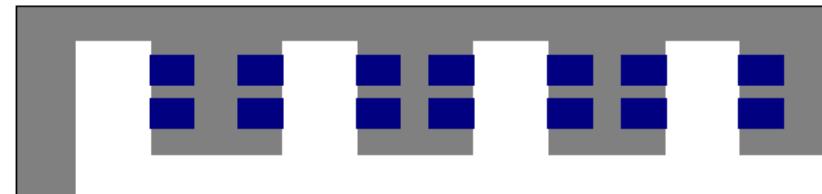
Zone grise



Equipement



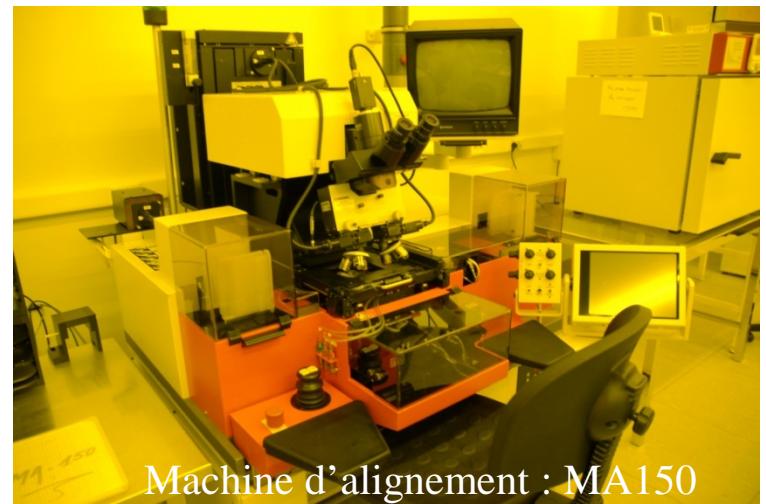
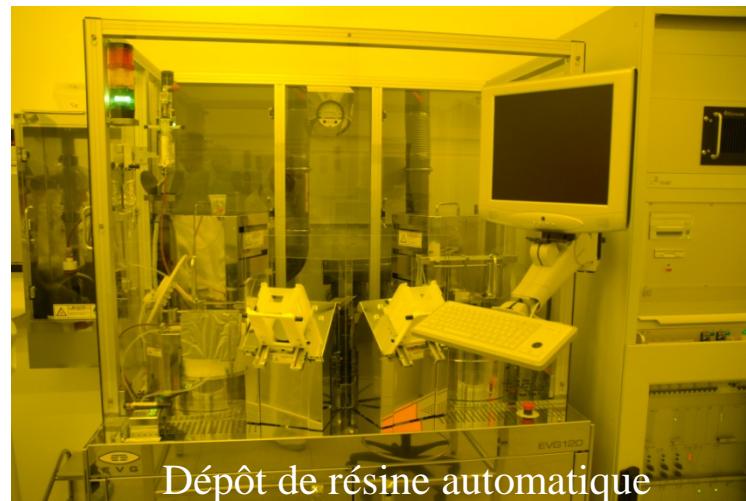
+	Volume d'air à traiter plus faible
+	Facilité d'accès à toutes les zones
-	Volume d'un lot multiplié par 3 entre 200 et 300 mm
-	Pas d'accès aux plaques hors équipement



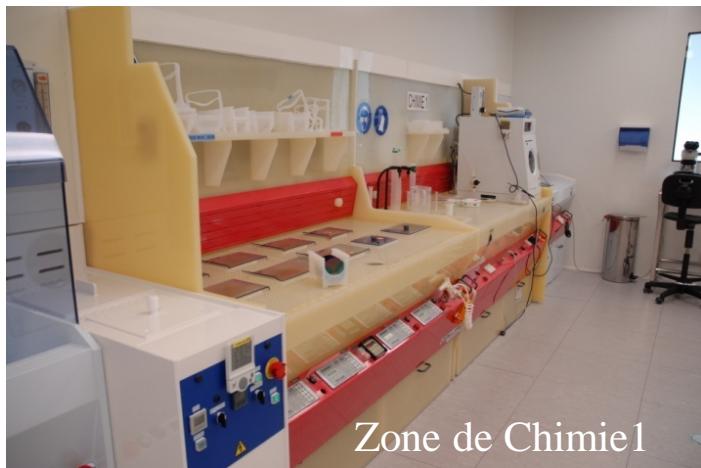
Salle blanche du LAAS



Salle blanche du LAAS



Salle blanche du LAAS



Zone de Chimie 1



Zone de Chimie 2



Zone de Fours

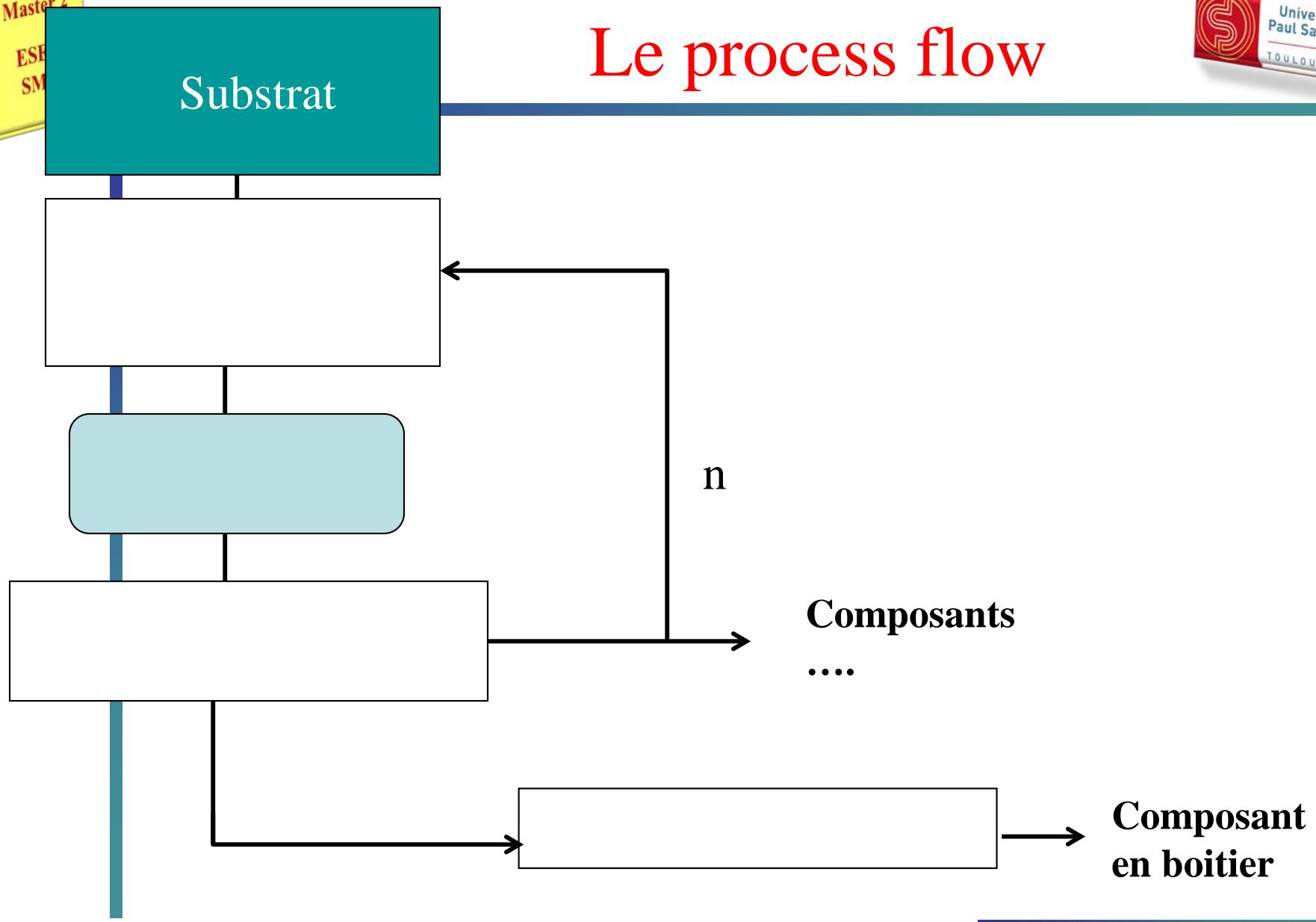


Implanteur Ionique

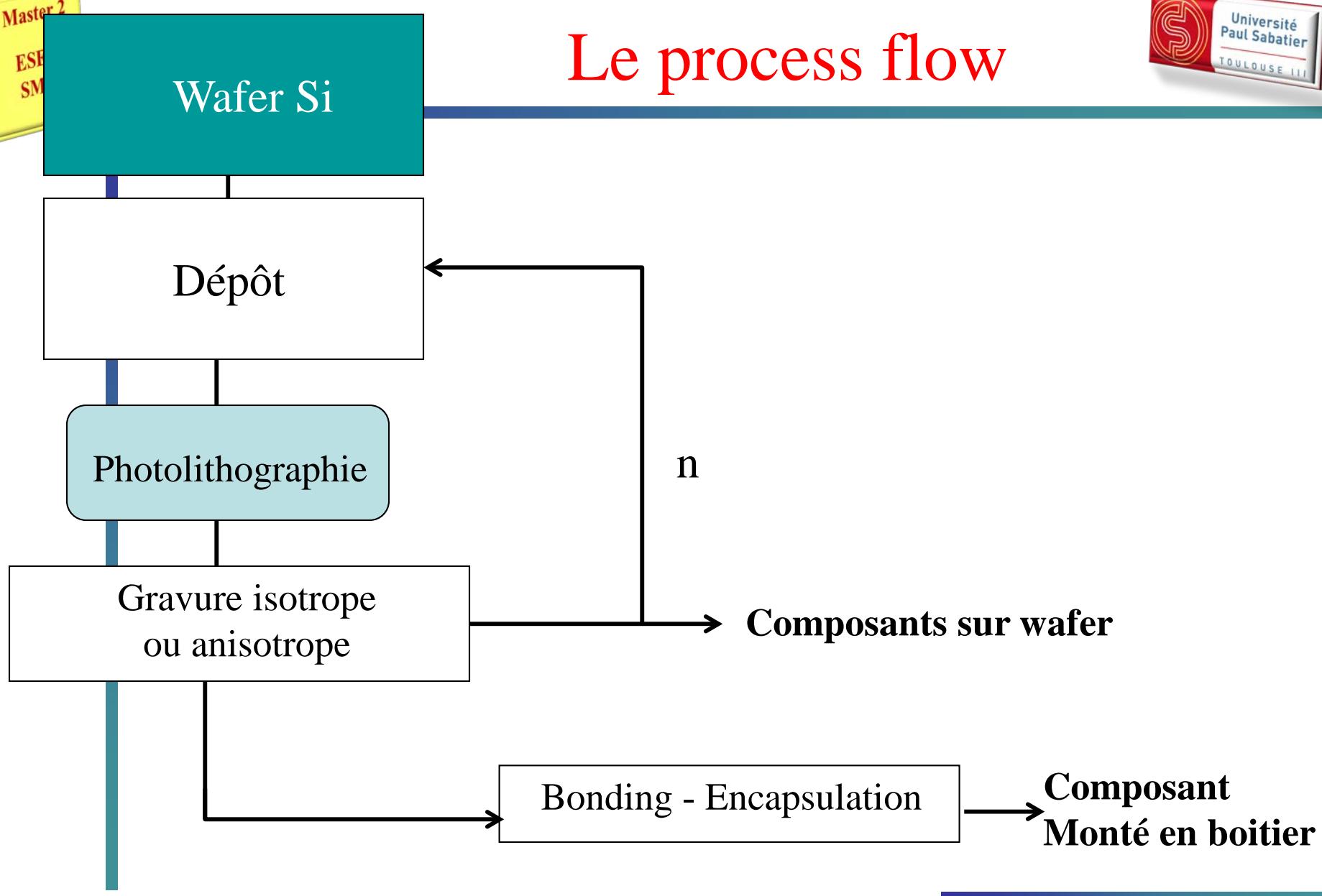
Salle blanche du LAAS



Le process flow



Le process flow



Procédés de fabrication (tradit.)

➤ Procédés de la micro-électronique classique

✓ Dépôts :

- ✓ Procédés thermiques: dépôts en couches minces (< 1 µm), (oxydations, recuits,...)
- ✓ Dépôts PVD
- ✓ Dépôts CVD
- ✓ Dépôts par EJM

✓ **Dopages** : Implantation ionique, diffusion

✓ **Usinage** de surface (Gravure humide ou sèche)

✓ Report, connectique, encapsulation

✓ **Photolithographie**



■

La photolithographie standard

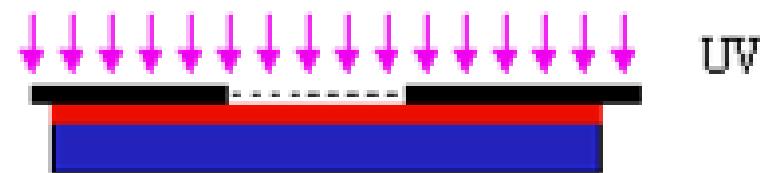
Substrat



Dépôt



Insolation



Traitement



Résine positive



Résine négative



La photolithographie standard

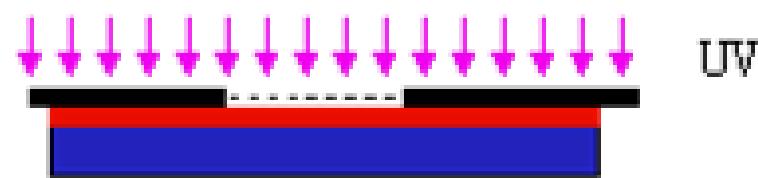
Substrat Si



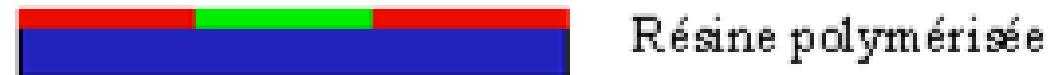
Dépôt de Résine



Insolation UV au
travers d'un masque



Traitement thermique



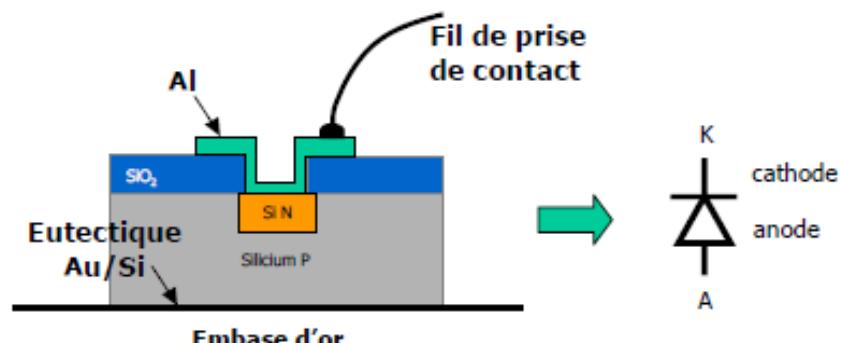
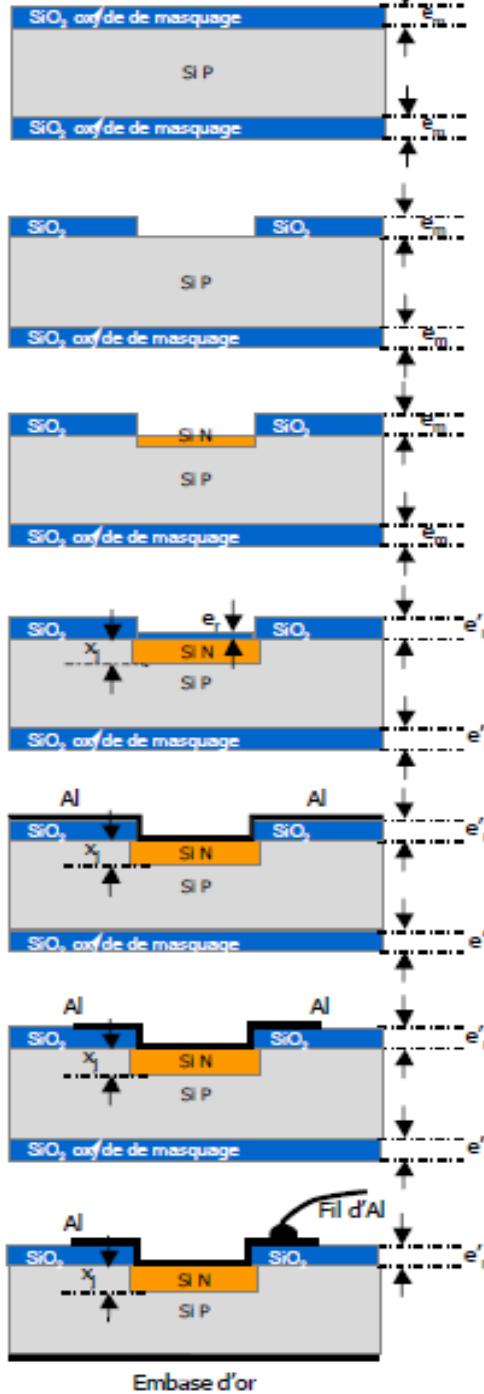
Révélation chimique



Résine positive



Résine négative



Photolithography at the nanoscale

The Stepper

For « Step and repeat camera »

Source : optical or laser

Resolution: 300 nm

Surface : 6 inches !

Laser photolithography

Source : Excimere laser ArF or KrF

Resolution: 193 - 248 nm

Surface : few inches

Electron beam lithography

Source : electron beam

Resolution: 20 nm

Surface : few mm²

Extreme UV Lithography

Patterning by reflective multilayers

Wavelength: 10-100 nm

Resolution: 20 nm

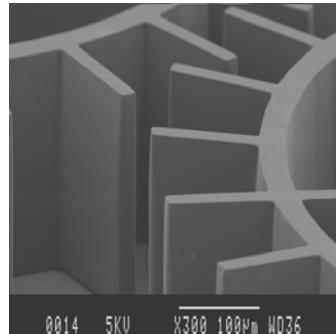
Surface : ?

- **Procédés classiques +**

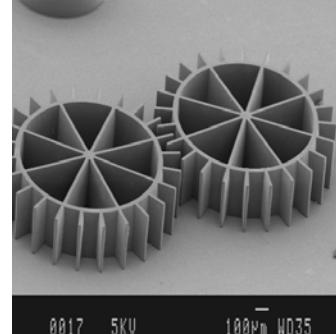
- Photolithographie **résines épaisses** (2 à 500 µm), double-face, 3D, MicroStereoLithographie
- Usinage de surface **Couches sacrificielles**
- Usinage de volume : **Gravure profonde (DRIE)**
- **LIGA**
- MIM (Metal Injection Molding)
- **Dépôts LPCVD, PECVD, OMCVD** (ferro/piezo)
- **Dépôts en couche épaisse** : électrodéposition, sérigraphie, jet-d'encre de divers matériaux
- Techniques de micro-impression, nanolithographie, Ablation Laser, Rodage (CMP), report, connectique, assemblage, encapsulation
 - Wafer bonding
 - Assemblage hybride / monolithique
- Intégration multimatériaux (« hors CMOS »)

Polymer micromachining: direct lithography

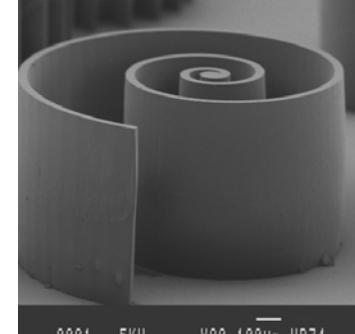
Negative Photoresist (SU 8)



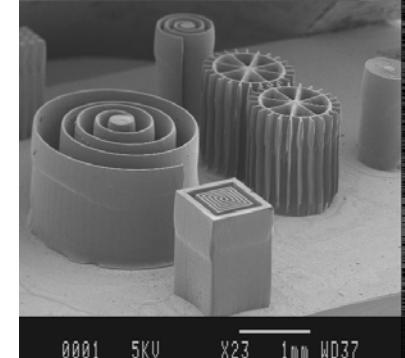
E=200µm



E=300µm

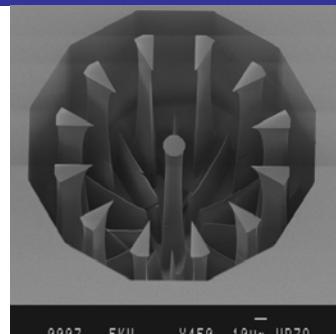


E=500µm

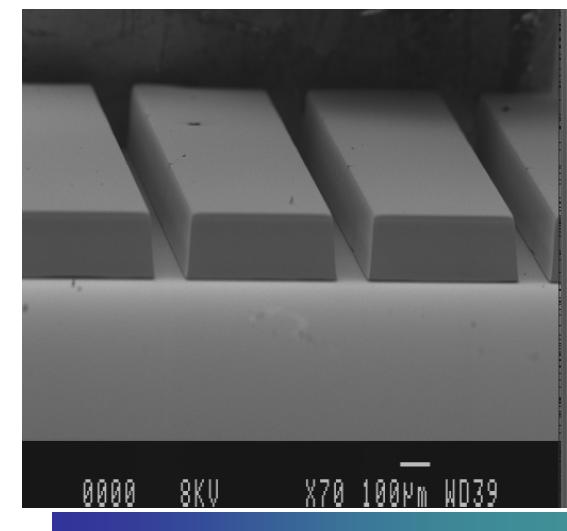
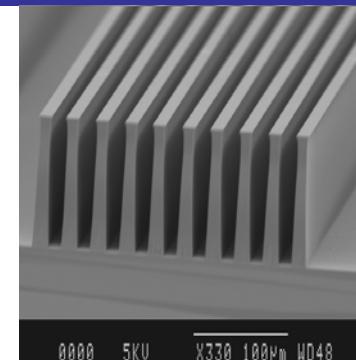


E=1,2mm

Positive Photoresist (AZ 9260)



e=100µm



La gravure isotrope pour l'usinage en surface

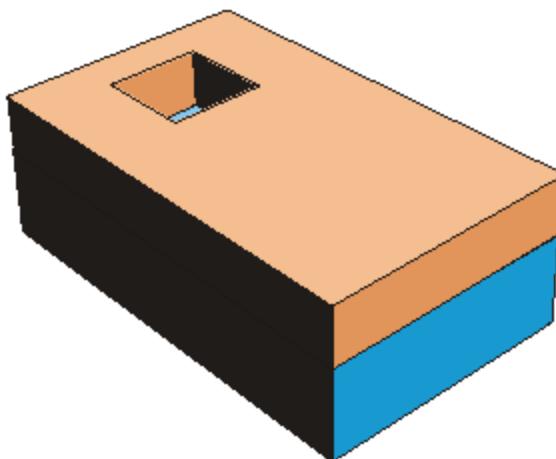
Oxyde de silicium

- Solution
- Vitesse de gravure SiO_2 therm.: $\sim 1000\text{\AA}/\text{min}$
- Très bonne sélectivité SiO_2/Si (rapport >100)
- Utilisée pour définir des zones de masquage ou graver une couche sacrificielle

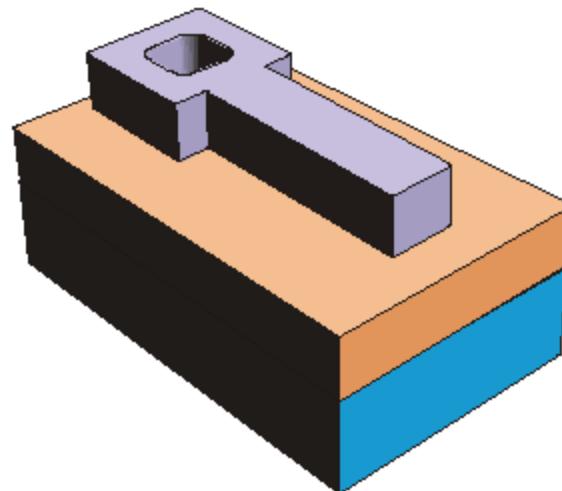
Germanium...

- Solution :

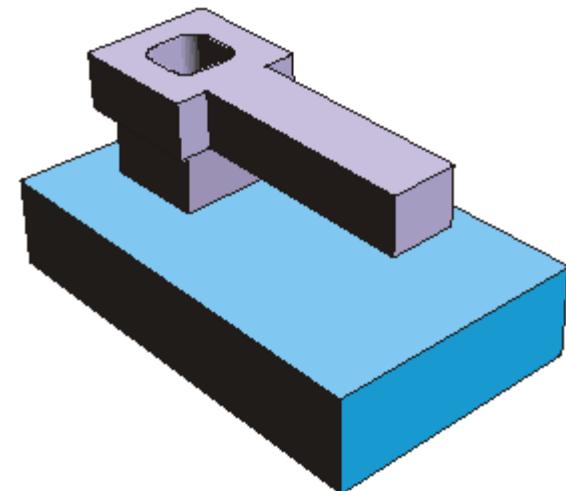
L'usinage en surface



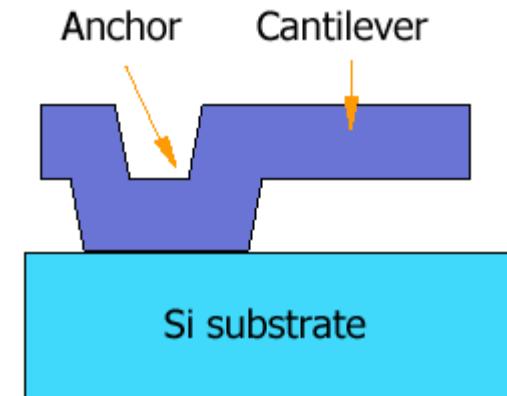
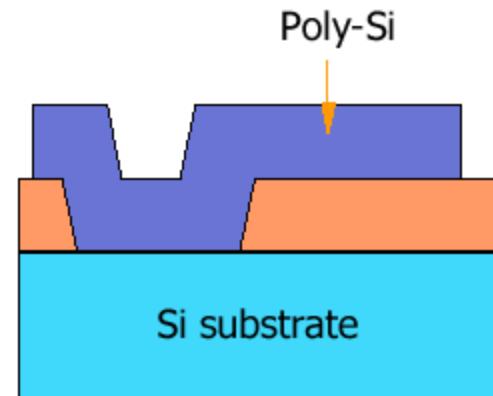
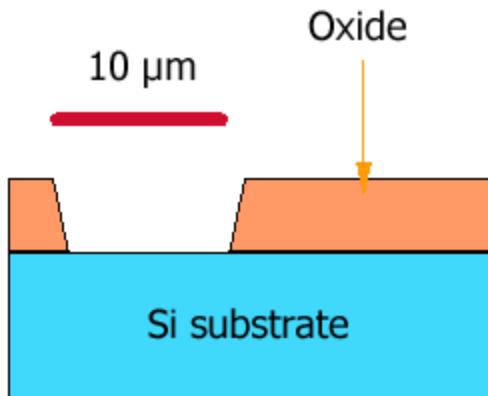
Deposit & pattern oxide



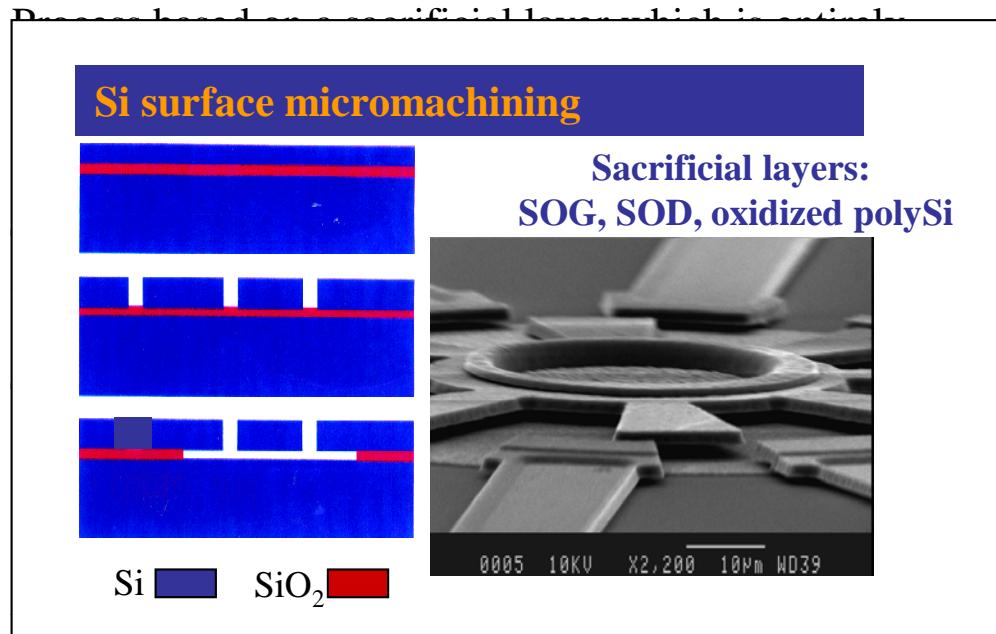
Deposit & pattern poly



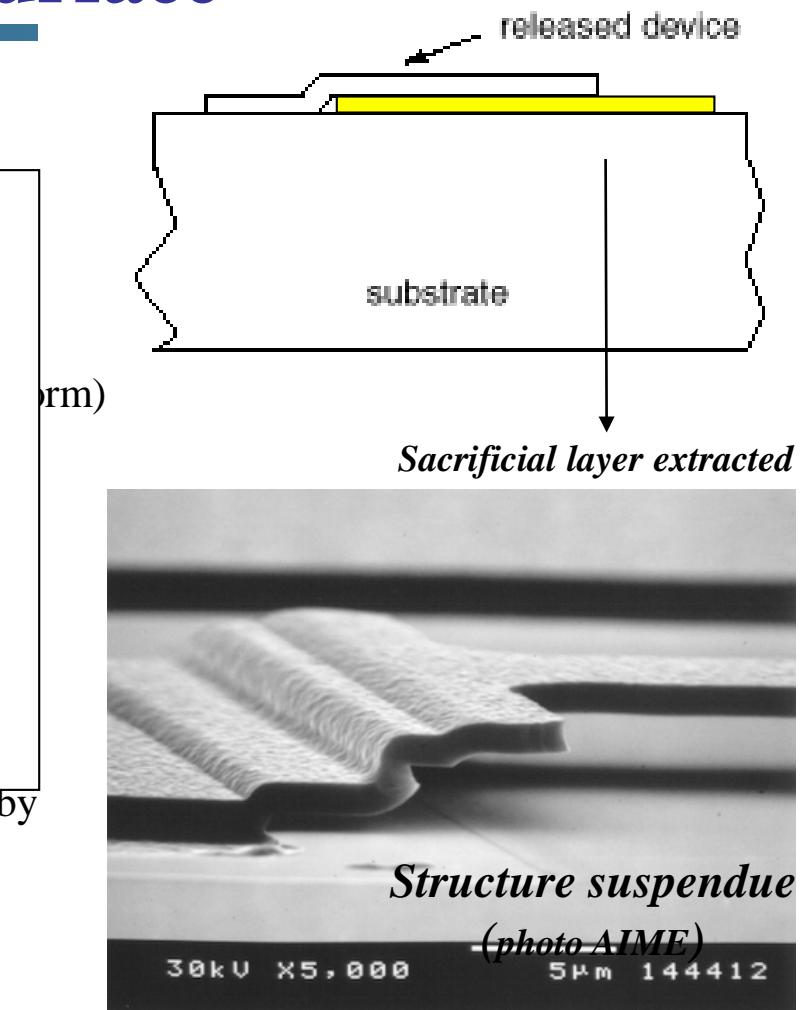
Sacrificial etch



Usinage de surface



sacrificial layer and metal as released shapes, as done by Texas Instruments for making micro-mirror displays



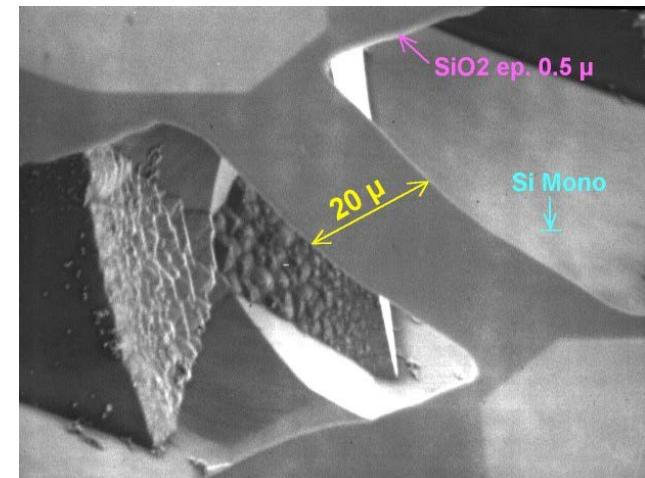
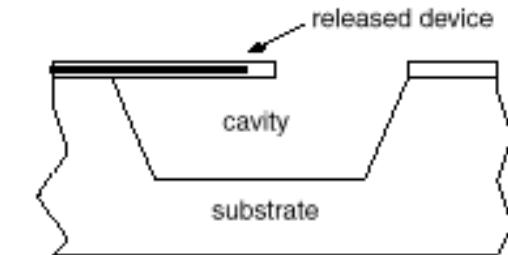
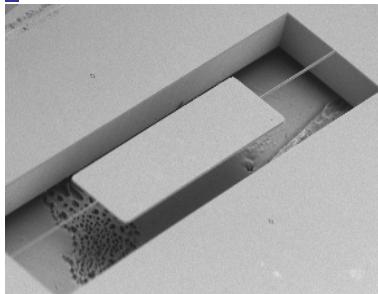
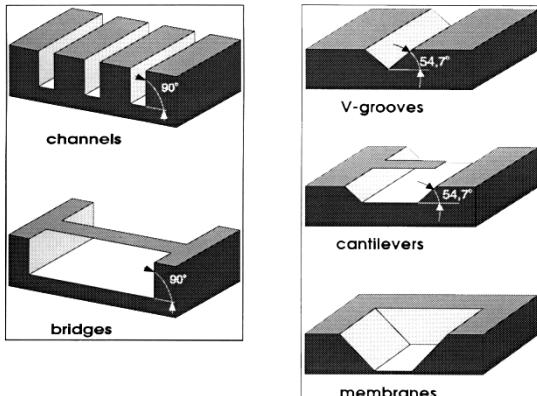
Much information is available on sacrificial oxide process, thanks to the initiative of a laboratory formerly known as MCNC (now CRONOS and the MUMPS process which is a reference for everyone interested in surface micromachining).

Usinage de volume

Usinage de volume depuis la surface

Cavities are made in the substrate by means of anisotropic etching through holes in a protective layer

Si wet etching KOH



...ers at low cost the possibility of obtaining a sensor with the signal processing circuit on the same chip

Main Drawback: Chemicals involved can be harmful for the human (EDP) or for the MOS clean room (KOH).

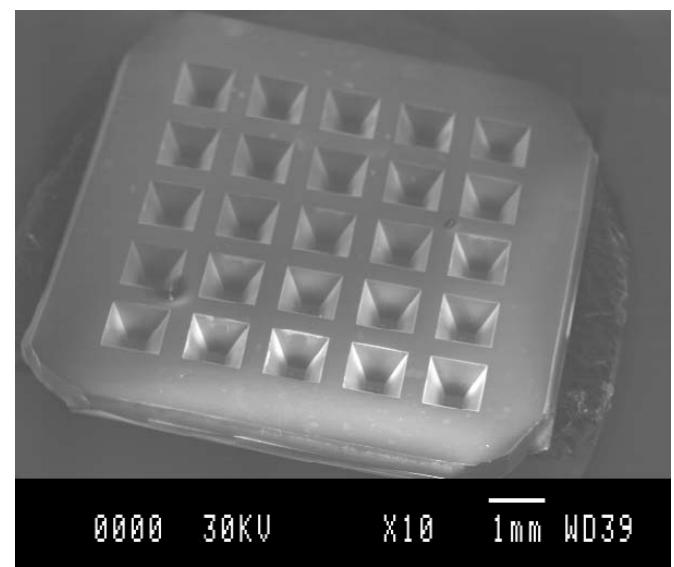
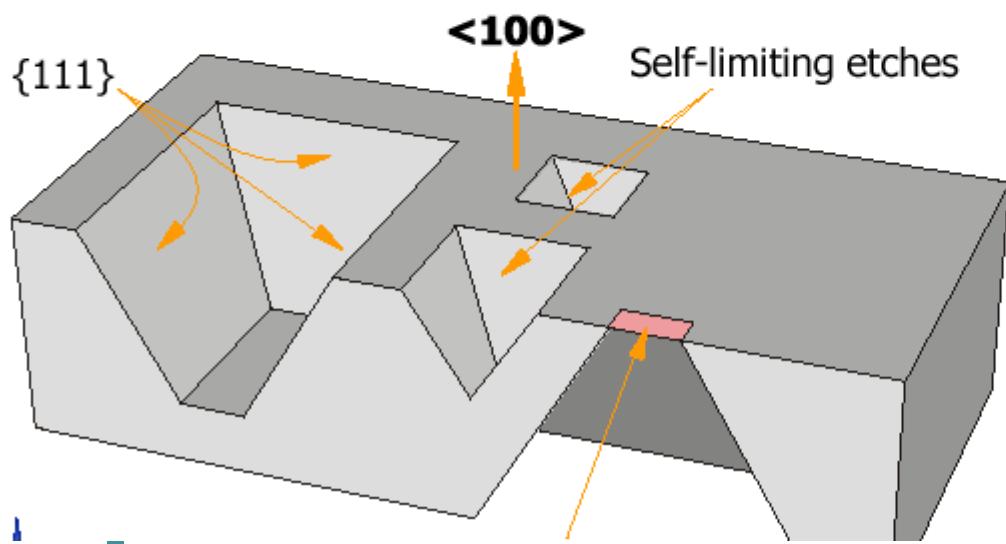
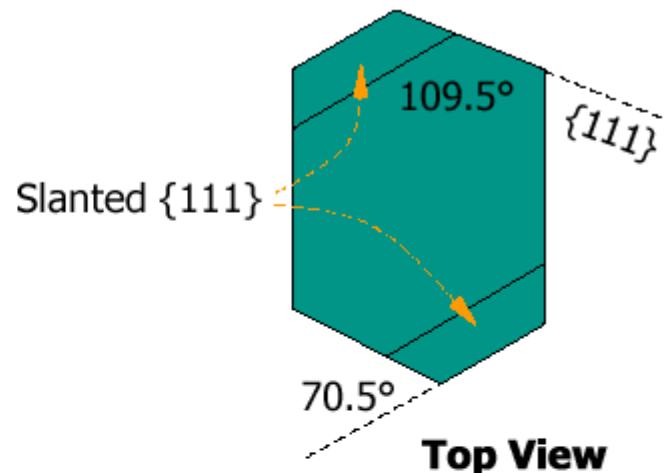
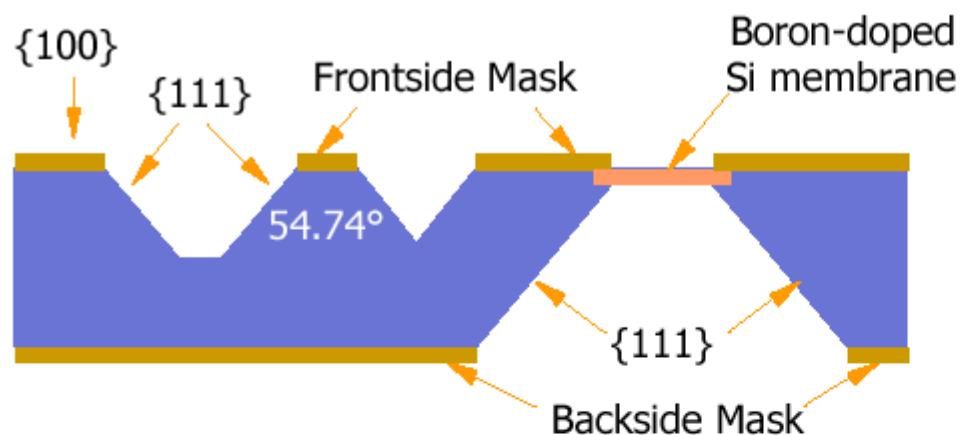
La gravure du Si anisotrope humide

Bain de gravure : KOH, TMAH, EDP

Potassium Hydroxide, Tetramethylammonium hydroxide, solution of ethylene diamine and pyrocatechol

PRINCIPE :

- Vitesse de gravure plan <111> lente
- Vitesse de gravure plan <100> rapide
- Sélectivité > 400
- Couche de masquage : SiO_2 , Si_3N_4
- Bain $T \sim 90^\circ\text{C}$
- Vitesse de gravure (KOH) $\sim 1.5\mu\text{m} / \text{min}$



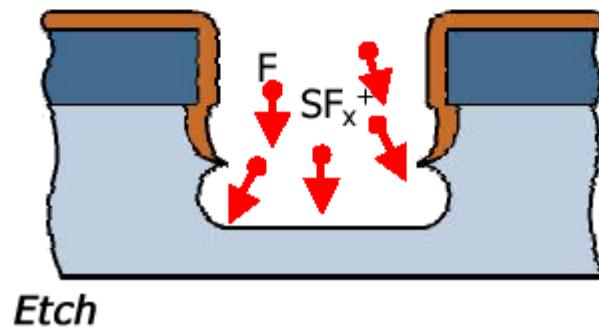
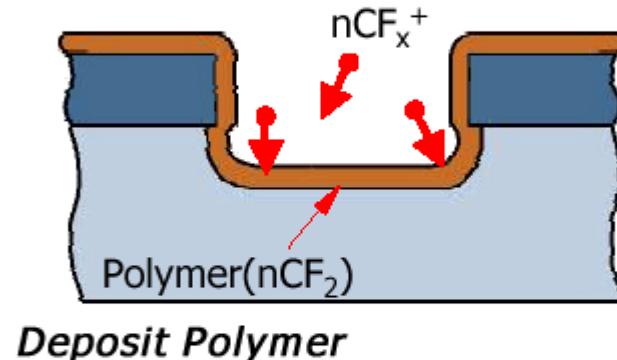
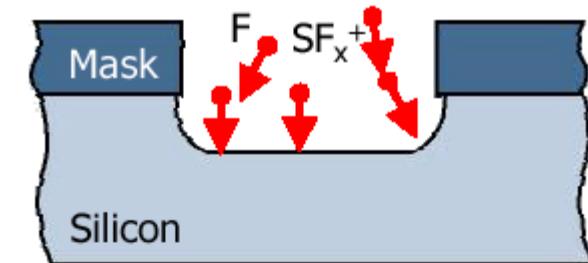
La gravure sèche (RIE)

RIE :

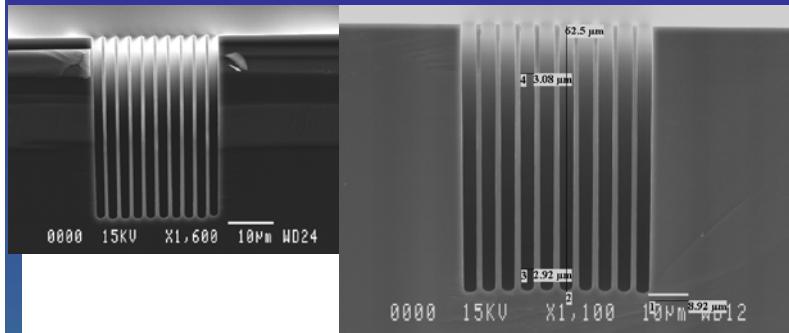
DRIE :

PRINCIPE :

- Cycles successifs
 - gravure du Si par ions SF₆
 - passivation des flans par des ions CF₄
- Couche de masquage : SiO₂, métal, Résine
- Vitesse de gravure RIE ~ 0.8µm /min
- DRIE : ~ 2.5µm /min

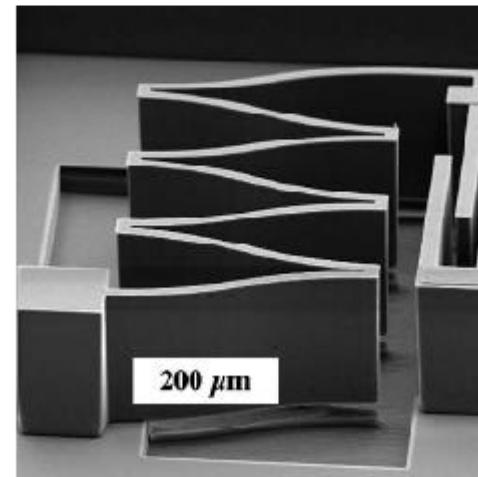
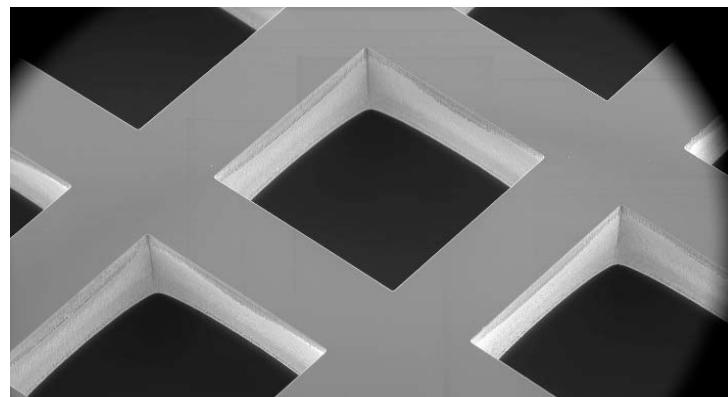


Si DRIE for non linear capacitance



20 μm

Trenches - *Surface Technology Systems*

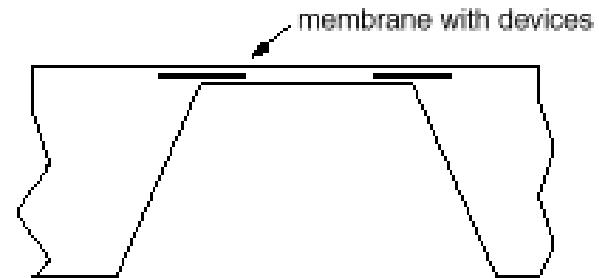


200 μm

Spring - Klaassen, et al, 1995
Philippe MENINI

Usinage de volume depuis la face arrière

It's also an application of anisotropic etching.



This is the preferred solution for making pressure sensors, and is also applicable to high-Q RF inductors, chemical sensor heaters and some accelerometers.

Process already widespread in the industry

the double-side alignment machine,

Main advantage :

The main feature of this approach is the possibility of obtaining monocrystalline silicon membranes including conductive elements

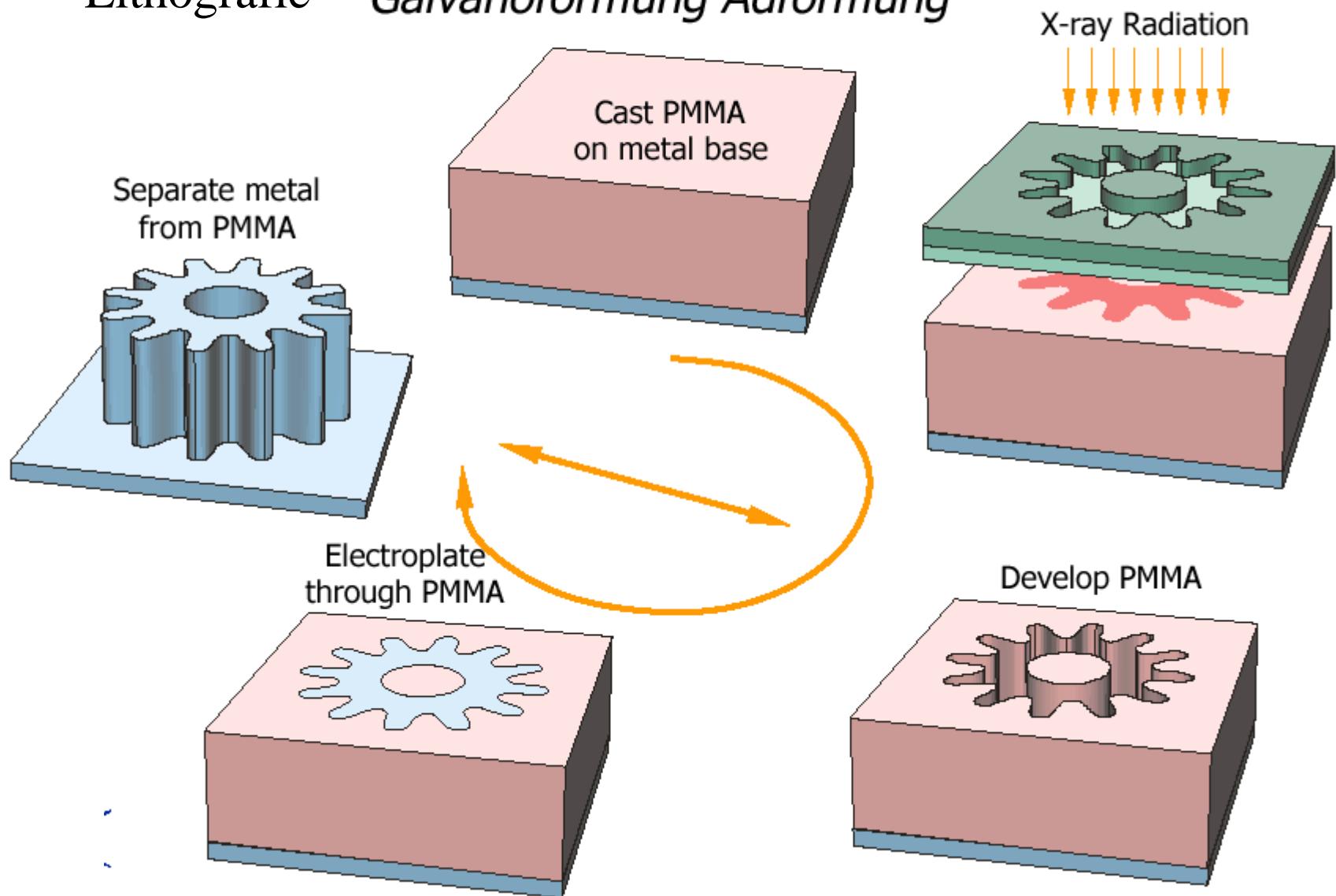
One Drawback (for teaching):

Need for the double-side alignment machine (very expensive)

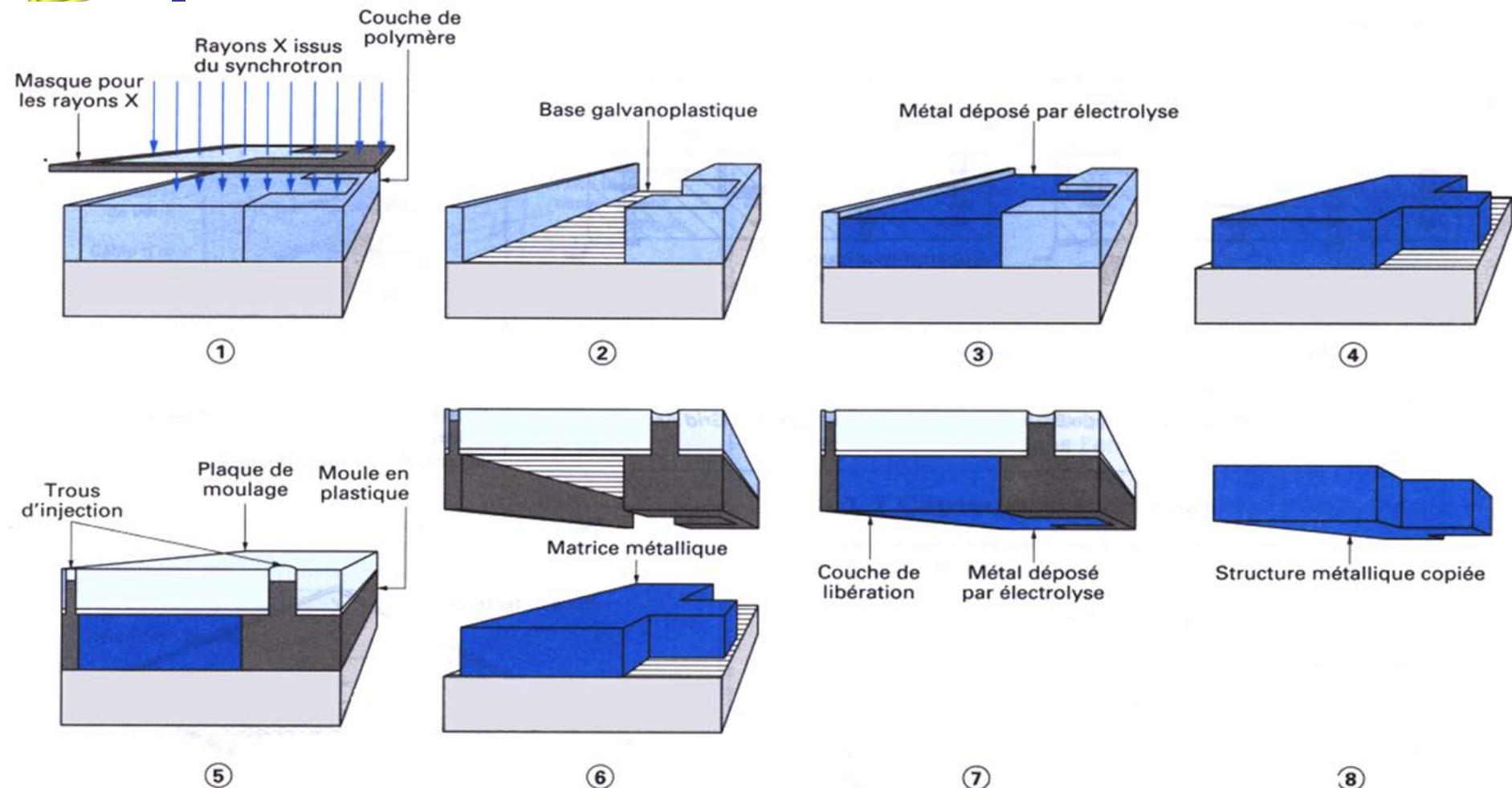
LIGA Process

Lithografie

Galvanoformung Adformung



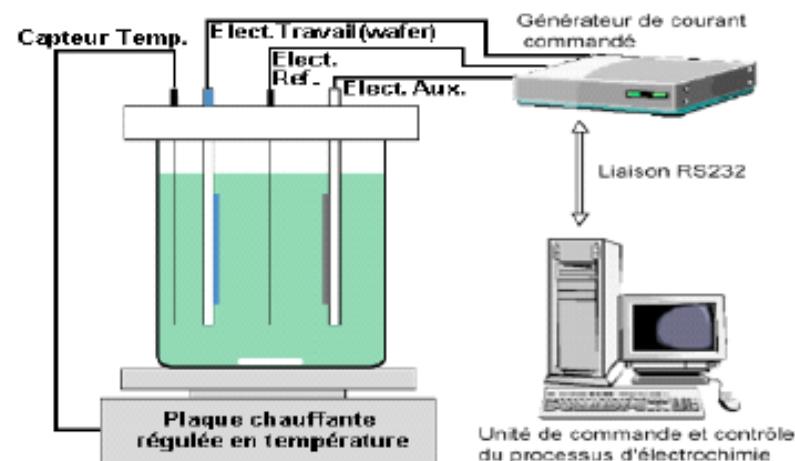
MEMS Technology : LIGA Process



Electrodeposition

Electroplating of metals

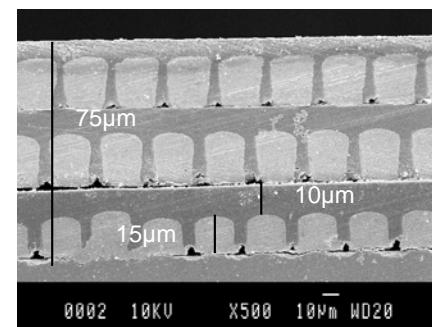
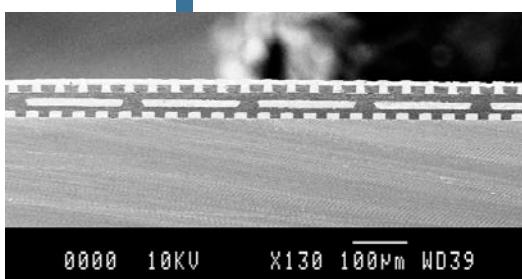
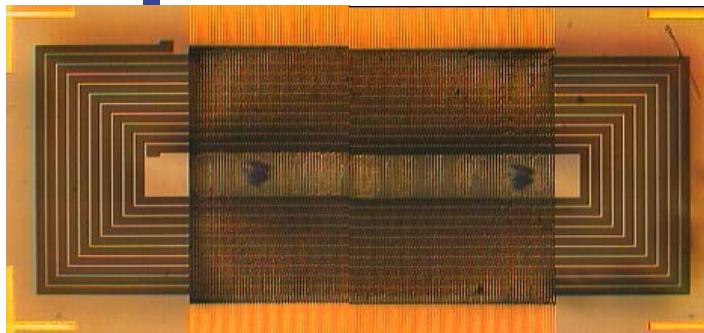
In the electroplating process **the substrate is placed in a liquid solution** (electrolyte). When an electrical potential is applied between a conducting area on the substrate and a counter electrode (usually platinum) in the liquid, a **chemical red-ox process takes place** resulting in the **formation of a layer** of material **on the substrate** and usually some gas generation at the counter electrode. This process is also known as "electroplating" and is typically **restricted to electrically conductive materials**. We can plate in the entire wafer or in resist molds **from several microns to several hundred microns**.



**Vue schématique d'un système
d'électrodéposition manuel**

Electrodeposition

Magnetic coupling



Coil: Cu

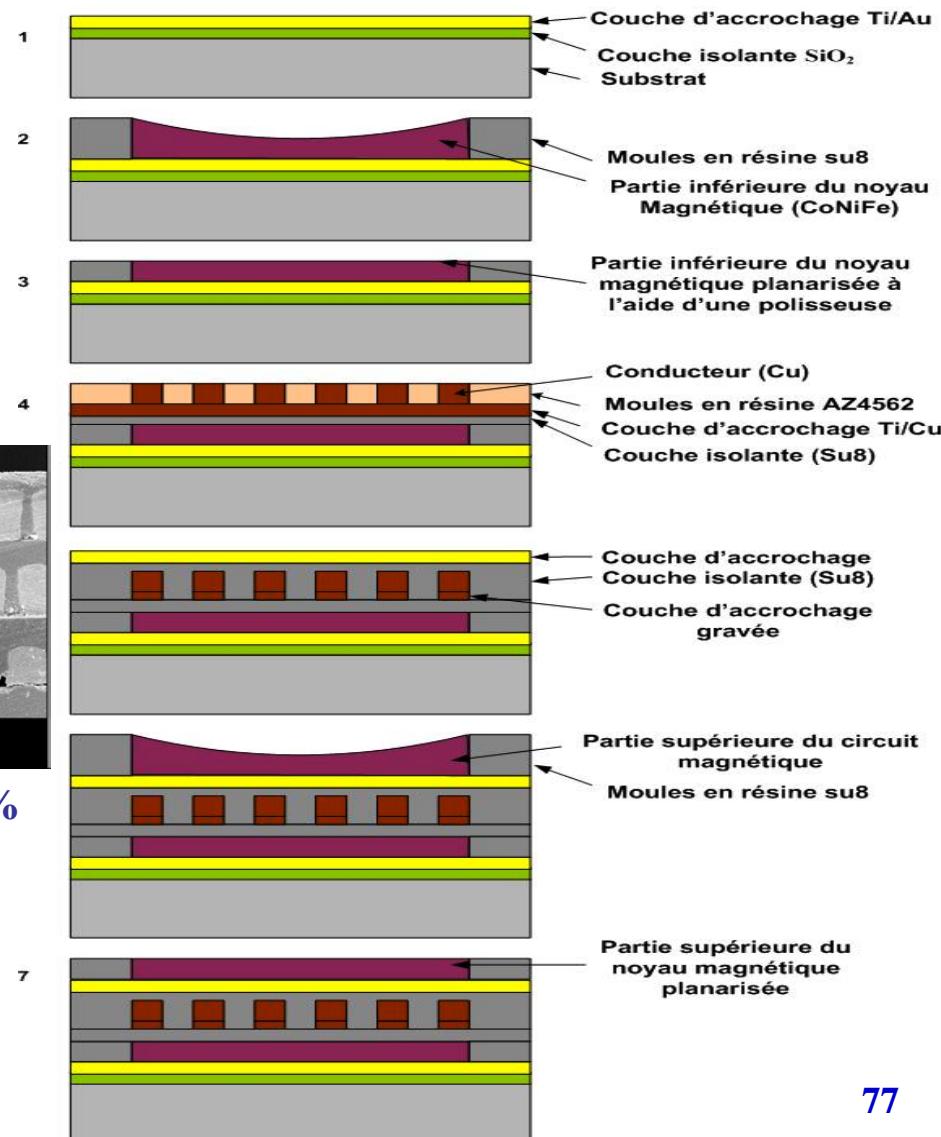
Roughness : 20A

$e=20\mu\text{m}$ to several hundred

Magnetic circuit: $\text{Fe}_{25}\text{Co}_{60}\text{Ni}_{15}$

Homogeneity : 5%

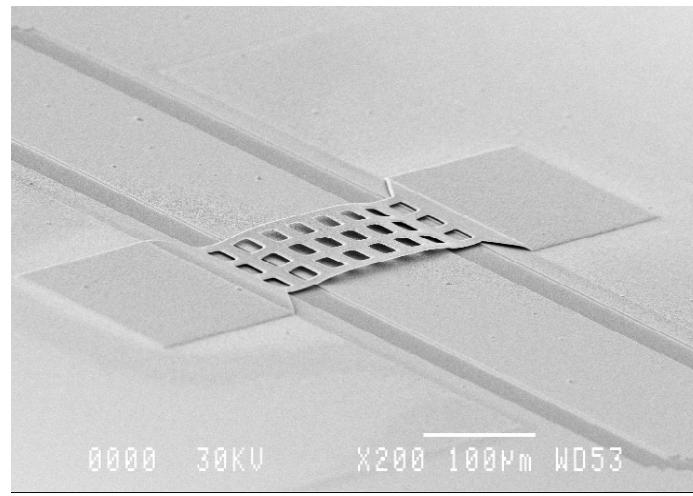
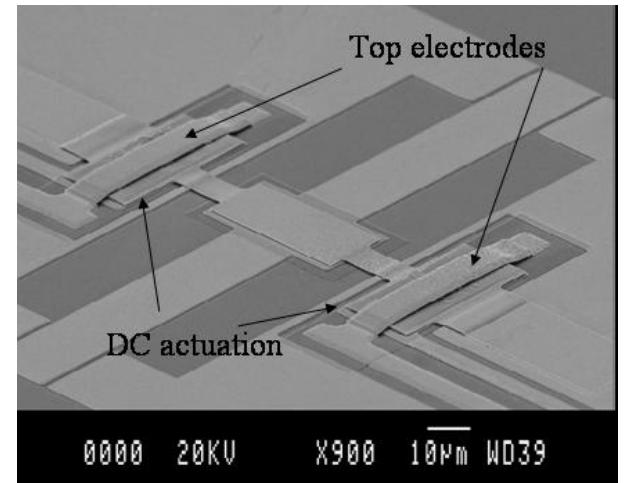
Stress : 5 MPa



Electrodeposition

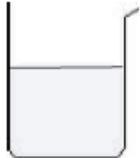
RF MEMS

- **Wafer level gold deposition**
- **e= 10µm**
- **Homogeneity : 5%**
- **Roughness : 20A**
- **Stress : 10 MPa**



Procédé de dépôt par Electroless

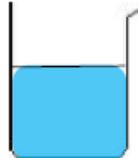
- Principe de fonctionnement



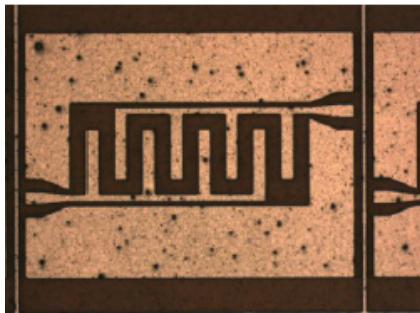
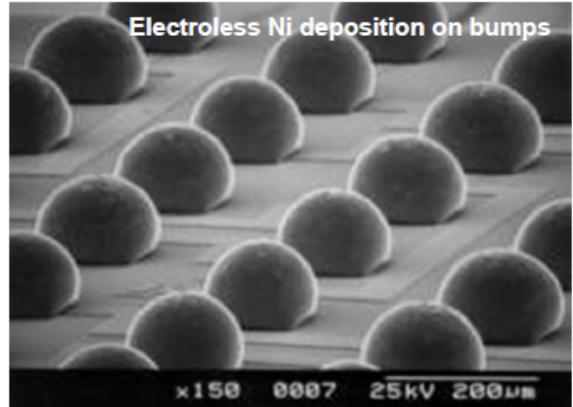
Nettoyage /
altération de
la surface à
métalliser



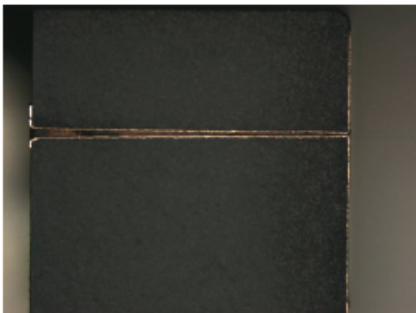
Activation de la
surface par
greffage de
catalyseurs
(Sn et Pd)



Dépôt
métallique
Ni, Cu



Dépôt electroless de Ni sur du
Kapton



Dépôt electroless de Cu dans un
via d'une couche polymère

Principale applications

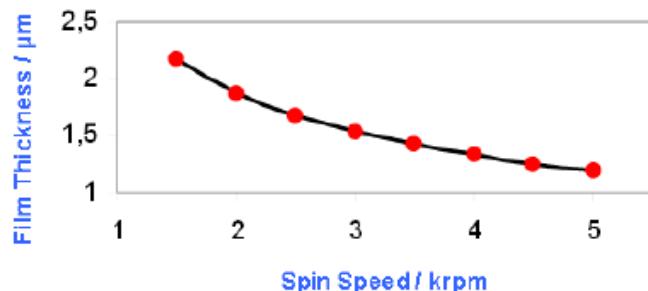
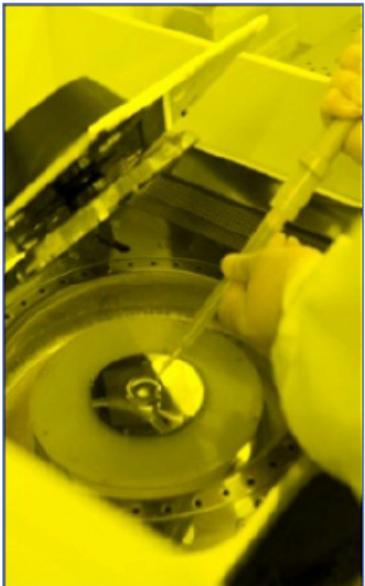
- Dépôt de film métallique sur un substrat conducteur ou non

Avantages / limites

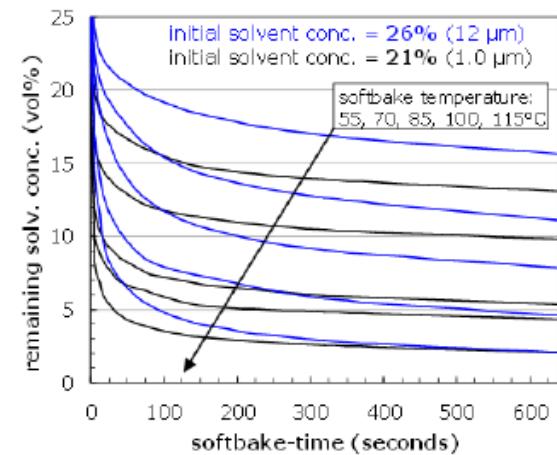
- Pas de problème d'alimentation
- Pas de restriction concernant la géométrie du substrat
- Technique demandant un équipement très simple
- Pré-traitement de la surface indispensable et qualité des différents bains critiques

Procédé de dépôt par centrifugation

Dépôt d'un produit liquide par centrifugation :



Influence de la vitesse de rotation de la tournette sur l'épaisseur du photoresist ECI 3012



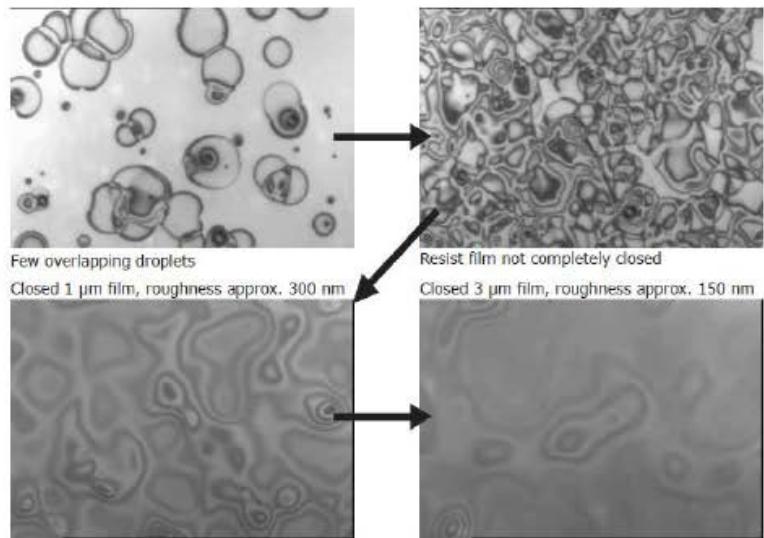
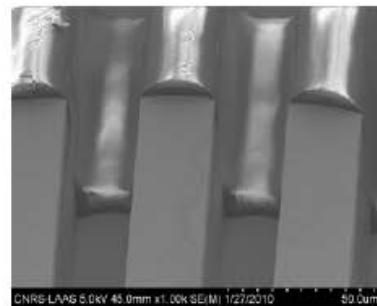
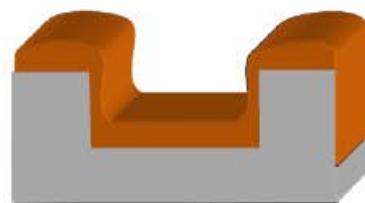
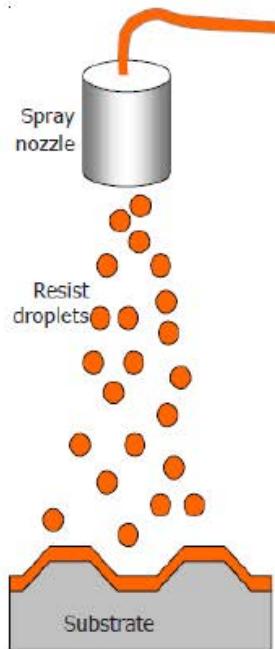
Taux de solvant résiduel en fonction du recuit

Le dépôt est suivi par un recuit thermique permettant l'évaporation des solvants.

Formation du dépôt solide. (Polymère pour la photolithographie,...)

Procédé de dépôt par SPRAY

Dépôt d'un produit liquide sous forme de gouttes obtenus après sa nébulisation, $\leq 10\mu\text{m}$.



The figures above show snapshots during the formation of a resist film via spray coating.

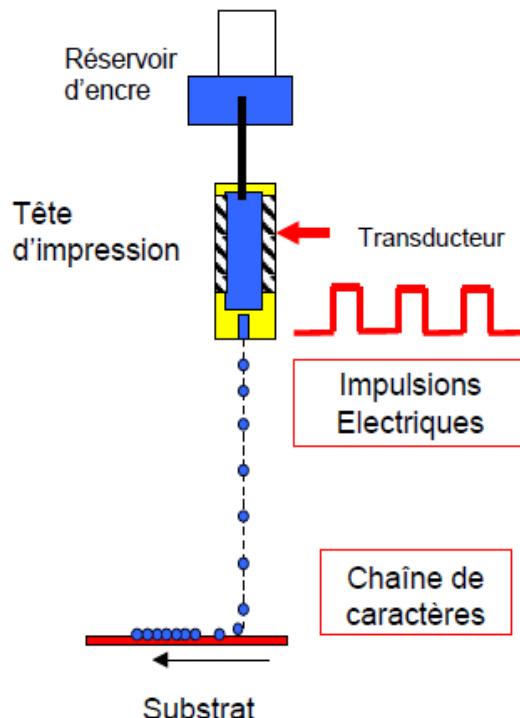


Autres techniques de dépôt épais

Le dépôt jet d'encre

Goutte à la demande (DOD)

Un matériau piézoélectrique se déforme sous l'effet d'un champ créant une surpression dans le liquide et permettant la formation d'une goutte.



Principe de fonctionnement

- Une encre est éjectée sur un échantillon réalisant dans la même étape le dépôt et la structuration
- à contrôler : formation des gouttes / chutes des gouttes / atterrissage / évaporation du solvant / séchage ou recuit

Caractéristiques Physiques d'une Encre:
viscosité, tension de surface

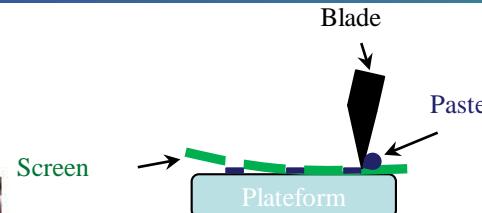
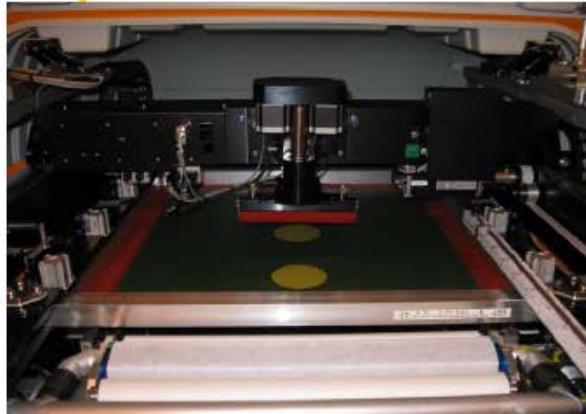
Elaboration des encres

Compositions classiques :

- solvant, nanoparticules, tensio-actif optionnel (ex nanoparticules de ZnO dans éthylène glycol, nanotubes de carbone)
- dans eau solvant, chaînes polymères (ex : pedot) - monomères pour la création d'un polymère, solvant optionnel (ex: encre synthétisée par Jean Baptiste)

Autres techniques de dépôt épais

La sérigraphie



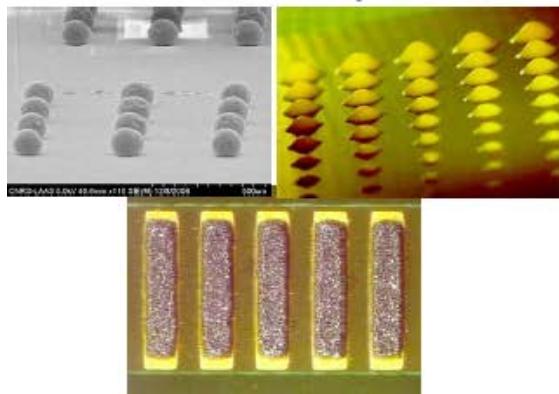
Principe :

Dépôt d'un volume précis de matière à travers des ouvertures localisées d'un pochoir sur un substrat.



Applications :

connexions électriques, tenue mécanique, protection (colle enrobage), dépôt de couches minces ou épaisses.



Réalisation de pates

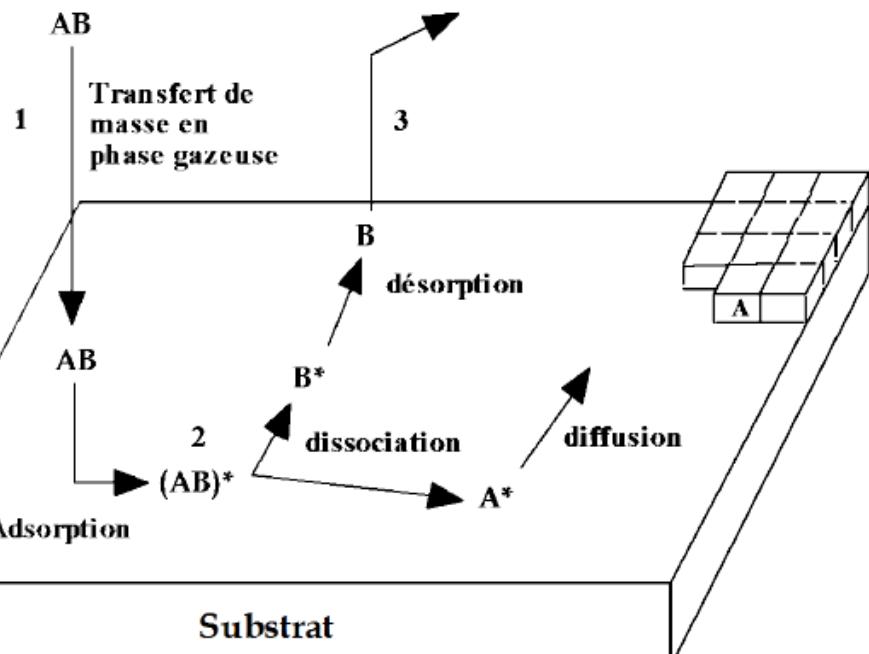
Possibilité de faire une pâte de sérigraphie conforme avec un matériau sous forme de poudre mélangé avec des produits commerciaux.

Formulation type:

- Véhicule (solvant, liant, plastifiant, dispersant)
- Poudre
- Agent thixotrope

Dépôts fins (<1µm)

Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD)



Procédé dans lequel les constituants chimiques réagissent en phase vapeur sur un substrat chauffé pour former un dépôt solide.

Matériaux obtenus :

- Conducteur
- Semi-conducteur
- Isolant

Plusieurs techniques:

- LPCVD
- CCPECVD
- ALD
- ICPECVD (Technique de dépôt et de mise en forme)

Représentation schématique des mécanismes de dépôt en phase vapeur

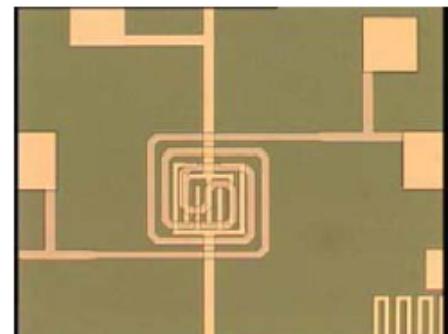
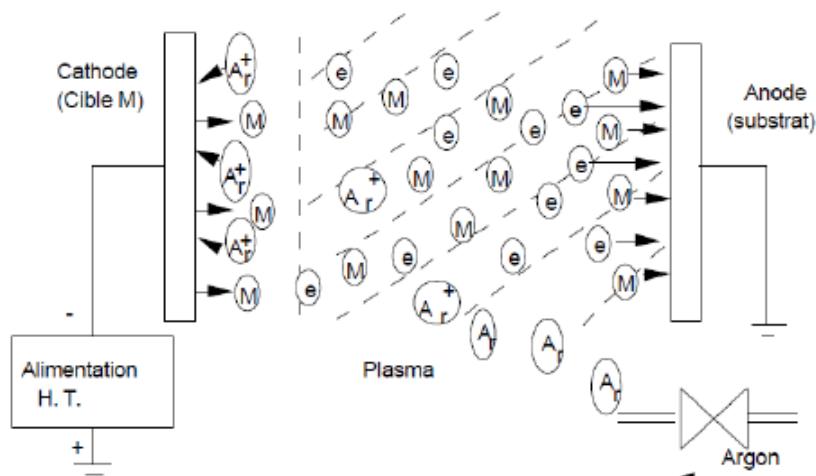
Dépôts fins (<1µm)

Dépôt Physique en phase Vapeur (PVD)

Principe : Réaction physique Phase solide → Phase gazeuse
Condensation des espèces gazeuses sur le substrat

Evaporation Thermique, Pulvérisation Cathodique

Schéma de principe de la Pulvérisation Cathodique



Capteur de gaz
Réalisation d'une
résistance chauffante Ta/Pt

Phénomène d'éjection des particules à partir de la surface d'un matériau sous l'impact d'un bombardement d'un flux de particules énergétiques.
(Modèle de la boule de billard)

Procédés / Dimensions

Nano

Épaisseurs

<10nm

Micron

50µm

Lithographie e-beam

Lithographies Laser / UV

Nanoimpression

PVD (lift-off)

Electrochimie

Sérigraphie

Epitaxie, ALD, Oxydation, ICPECVD, Diffusion, LPCVD, PECVD

Gravure Humide

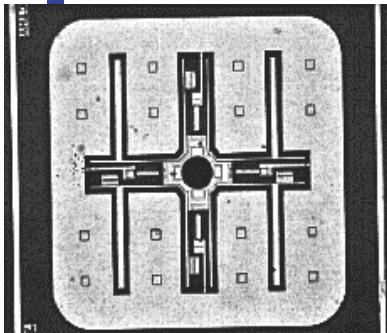
Gravure Plasma

Gravure FIB

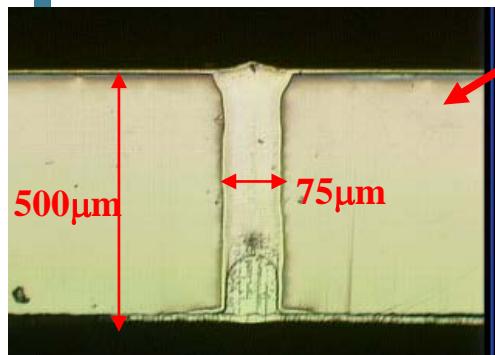
Jet d'encre

Double-side processes

At the beginning ...

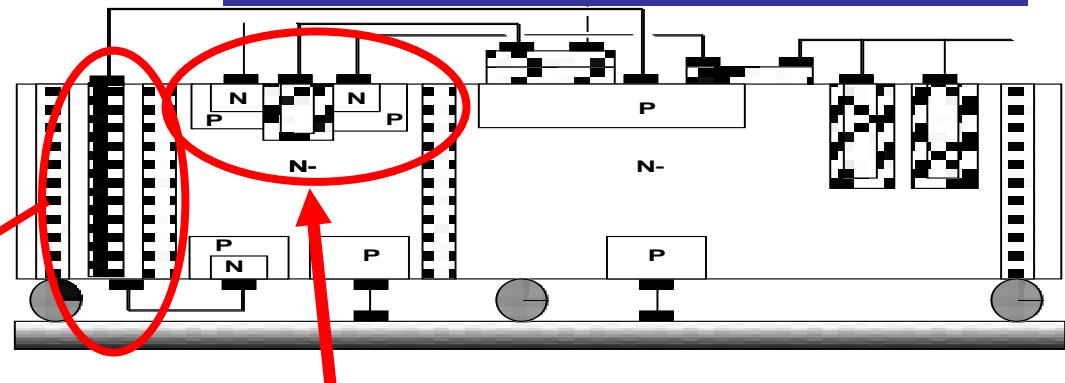


Optically driven thyristor 1980

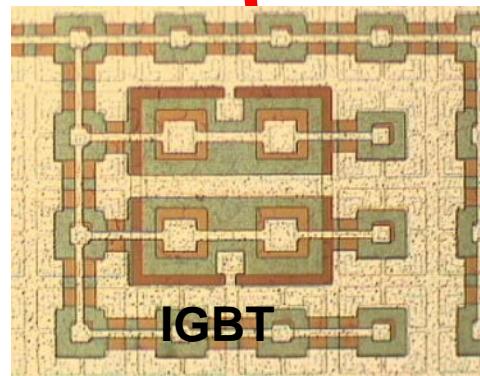


Thru-wafer vias :

- thru-wafer DRIE
- Al thermomigration
- Specific vertical LPCVD furnace

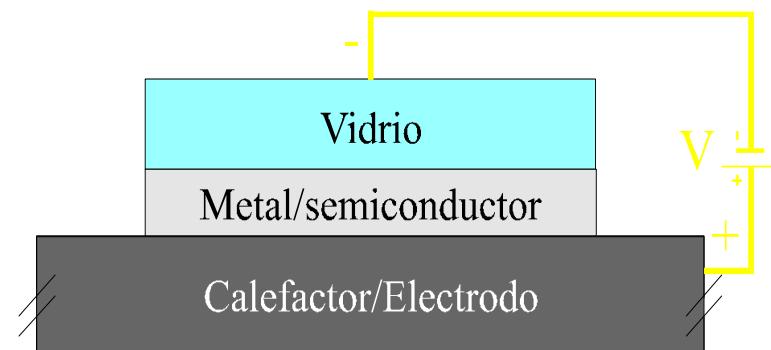
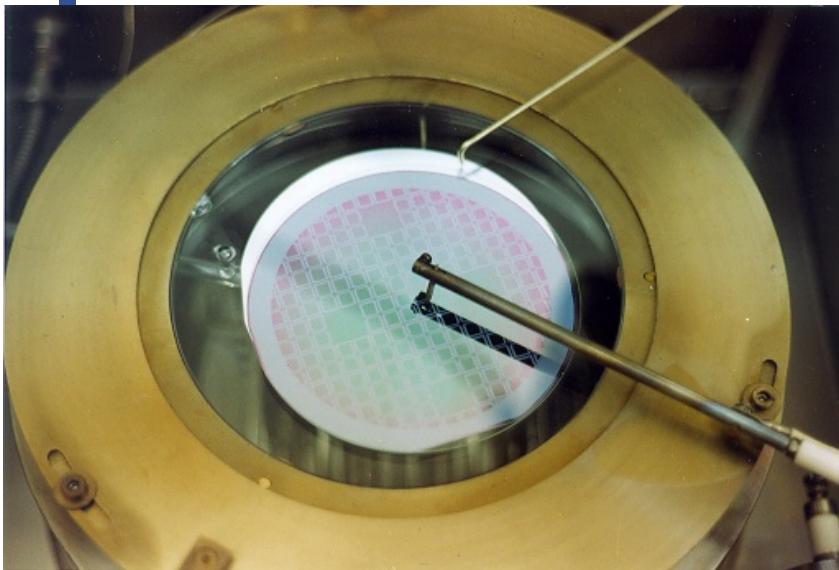


2004

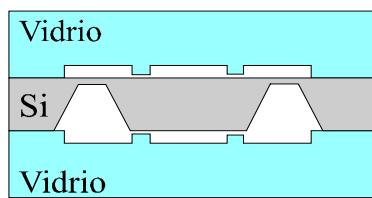


Wafer bonding

Si/Si and Glass/SI Bondings



300-400 °C, 400-1000 V



- Sensor Packaging
- Microfluidics

- First direct bonding of SiC–Si and GaN–Si at room temperature

MHI's bonding machine uses a method to bond atoms of various materials at room temperature by activating the surface of the materials with ion beam radiation in a vacuum. It can bond various materials, for which optimized ion beam is a critical factor. Roomtemperature bonding of SiC, GaN and sapphire, respectively, with silicon were achieved through optimized precise ion radiation. For all three materials, solid and rigid bonding has been confirmed

“Due to its high-voltage durability and suitability for high-speed and high-efficiency switching, SiC has been in the spotlight for applications for nextgeneration power semiconductor devices, including as a component of inverters for electric vehicles. The application of GaN for blue LEDs, as well as highfrequency and low-loss power devices, has also been growing. Sapphire, which is growing in use as a material in optical devices, can also be used as a substrate for high-frequency circuits when bonded with silicon to produce silicon on sapphire (SOS).”



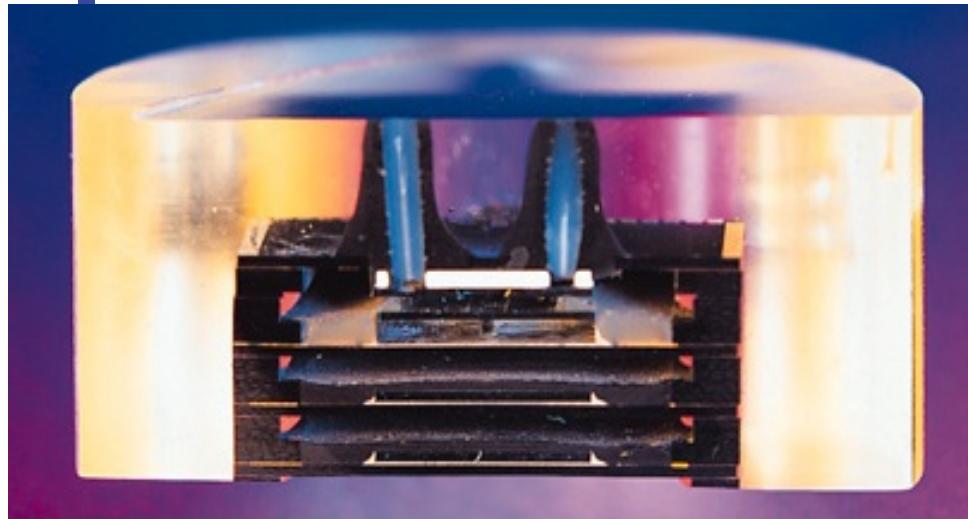
Wafer bonding machine

www.mhi.co.jp

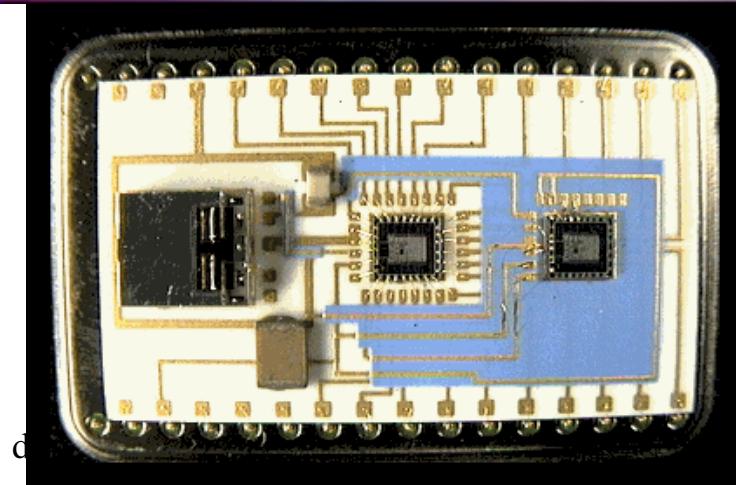
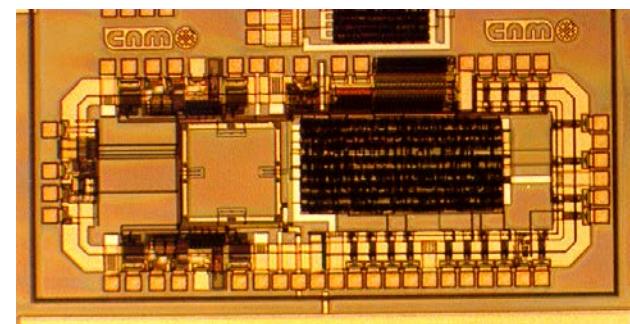
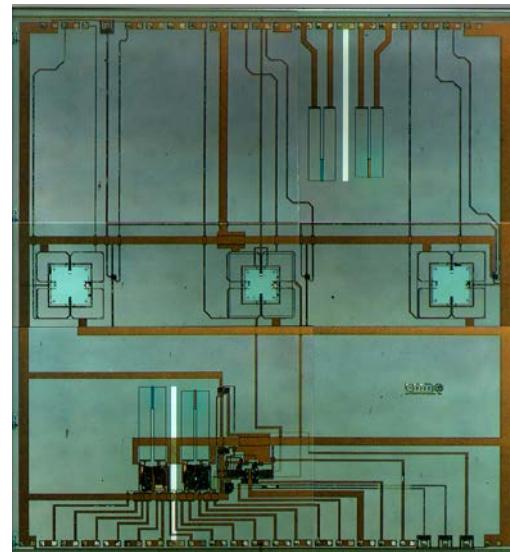
Micronews sept.2010

Microsystems Integration : Examples of combination of sensors, actuators and electronics

Hybrid



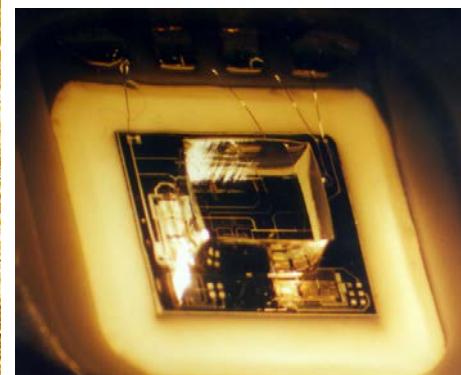
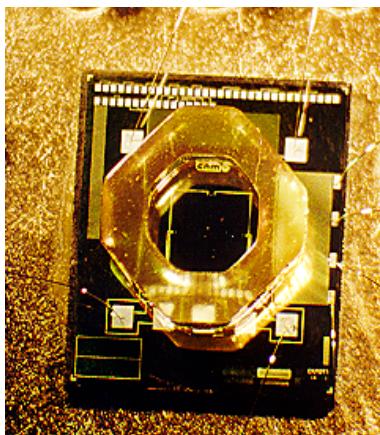
Monolithic



Microsystems: Technologies of fabrication

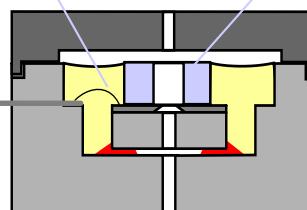
Special Packaging

Surface protection by a photocurable polymer

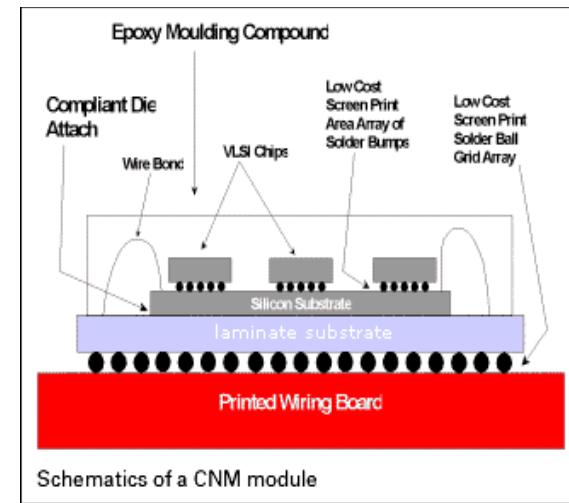


Silicone gel filling to protect wires

Silicone rubber deposited and UV-structured in a wafer-level process



Multichip Modules MCM



➤ Matériaux de construction

- ✓ Matériaux issus de la micro-électronique silicium et dérivés: polysilicium, oxyde de silicium SiO_2 , nitrule de silicium Si_3N_4 , oxynitrule de silicium SiO_xN_y ,...
- ✓ Autres matériaux semi-conducteurs: IV-IV(SiGe, SiC), III-V(GaAs), II-VI (ZnO),...
- ✓ Verres, Polymères (amorphes, S-C, conducteur (ITO))...

➤ Matériaux de détection

- ✓ Matériaux conducteurs/semi-conducteurs chimiquement sensible (oxydes Métalliques)
- ✓ Matériaux piézorésistifs et piézoélectriques
- ✓ Matériaux magnétiques, diélectriques, thermo-électriques,...
- ✓ Matériaux organiques, couches enzymatiques, micro-organismes vivants (cellules...) (bio-capteurs)
- ✓ Polymères...

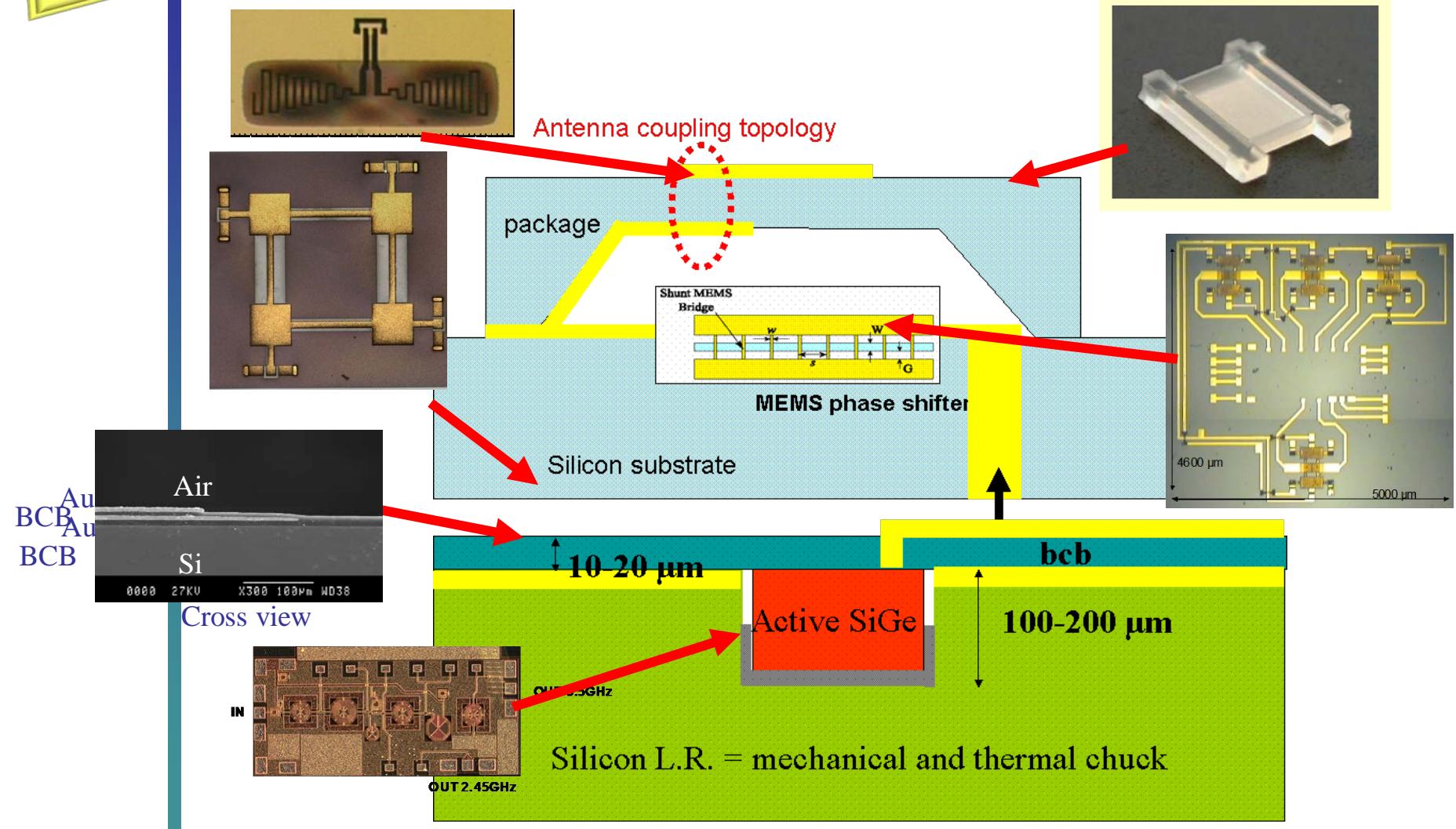
➤ Matériaux d'encapsulation

- ✓ Verres, Polymères...

Plan

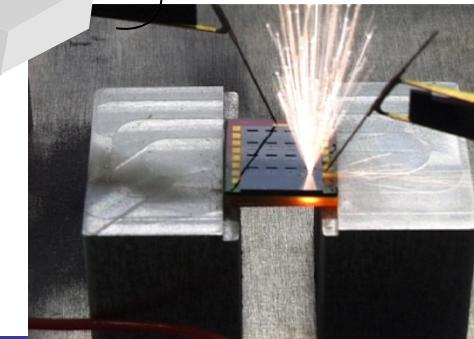
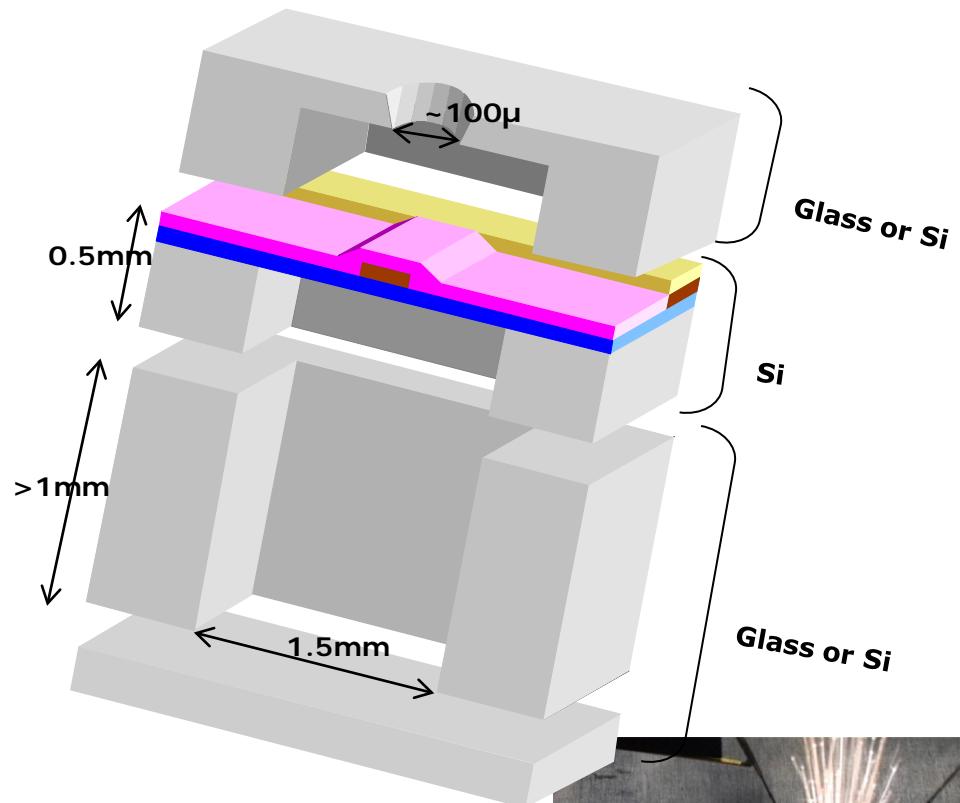
1. Introduction Généralités
2. Les Technologies de Fabrication
- 3. Exemples De Micro-capteurs & actionneurs**
4. Les Outils de Conception
5. Prospectives : Les Microsystèmes de demain...

RF Heterogeneous integration



Microthruster with Solid propergol

- 3 main parts :
 - Propulsion nozzle
 - Heater (thermal initiator)
 - tank
- Silicon,
photosensitive glass
- 3D Assembly

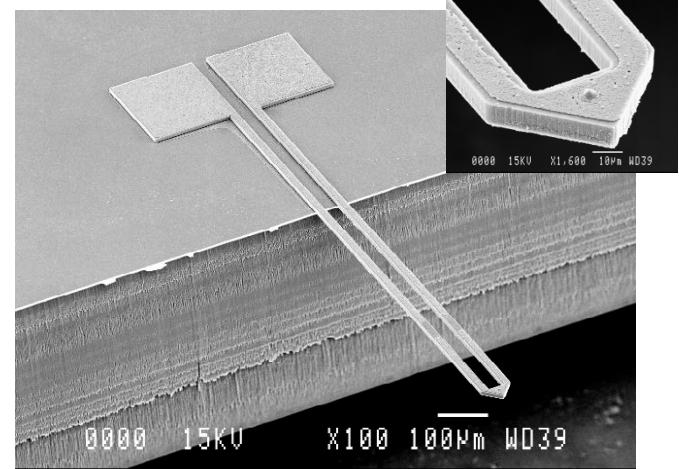
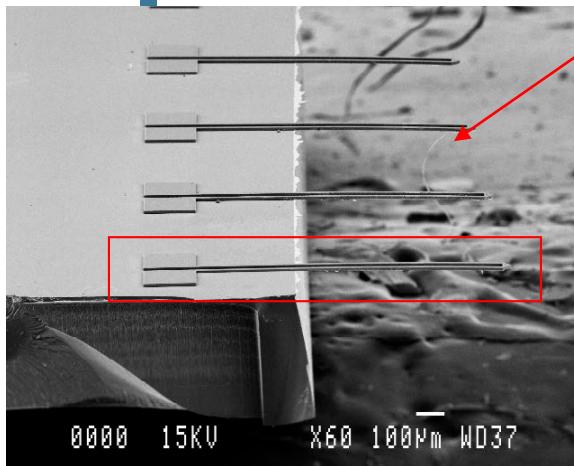
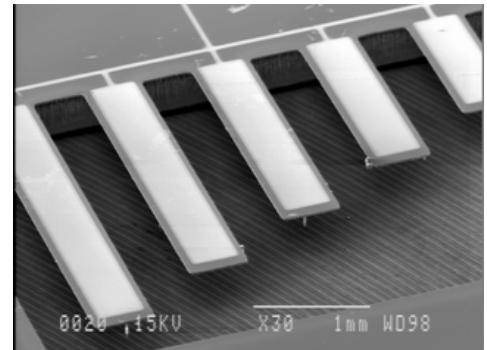
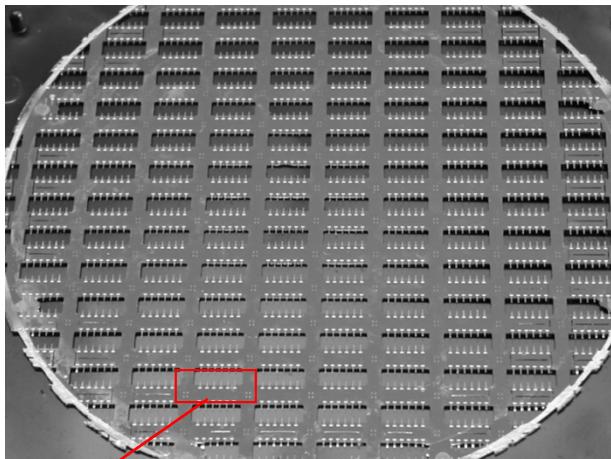


rossi@laas.fr

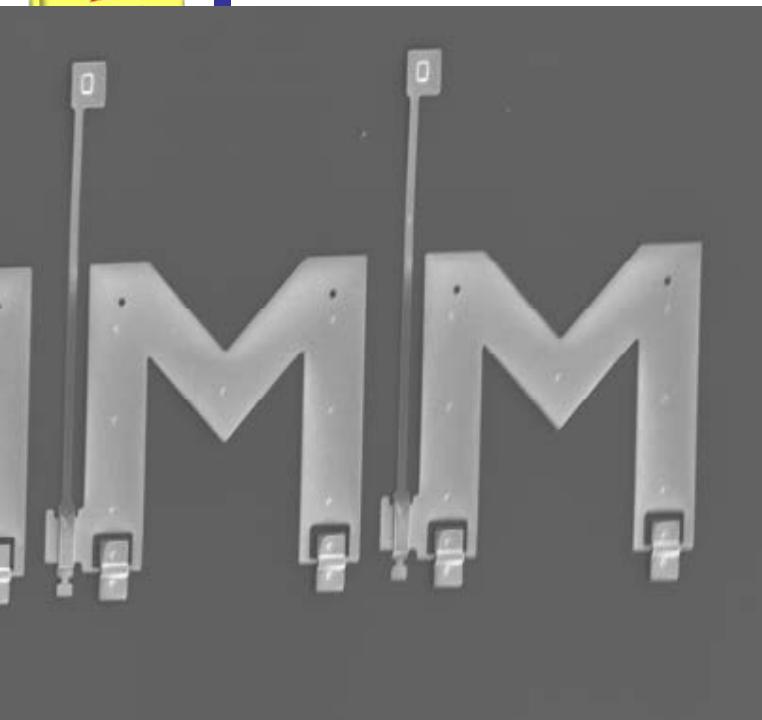
Mobile Structures

Matricial piezoresistive cantilevers

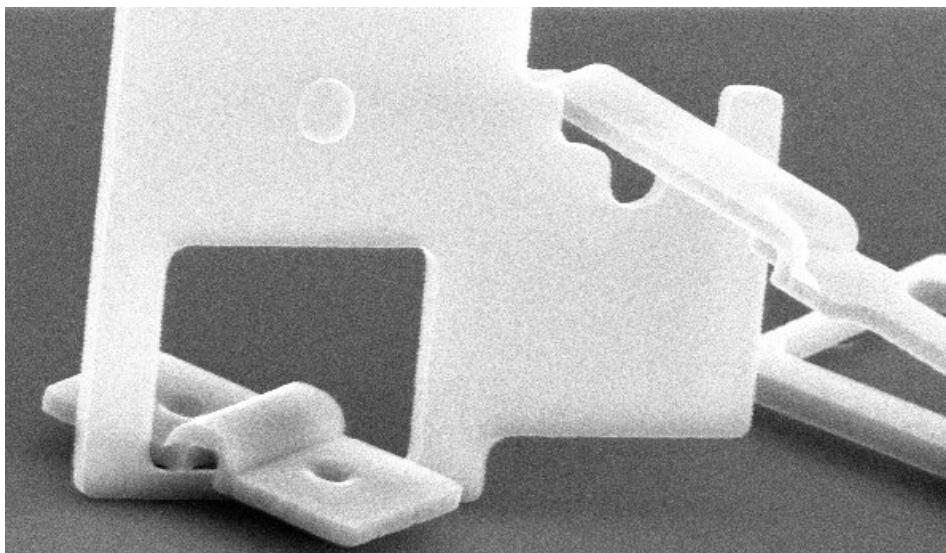
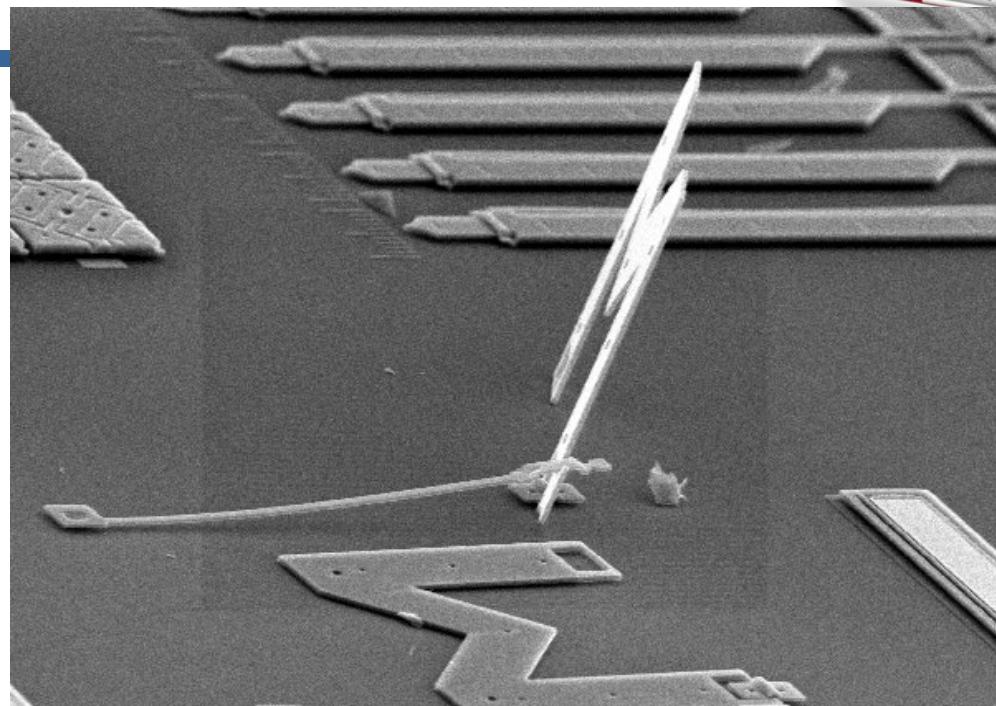
Photo LAAS (technologie LAAS)
Contact: bergaud@laas.fr



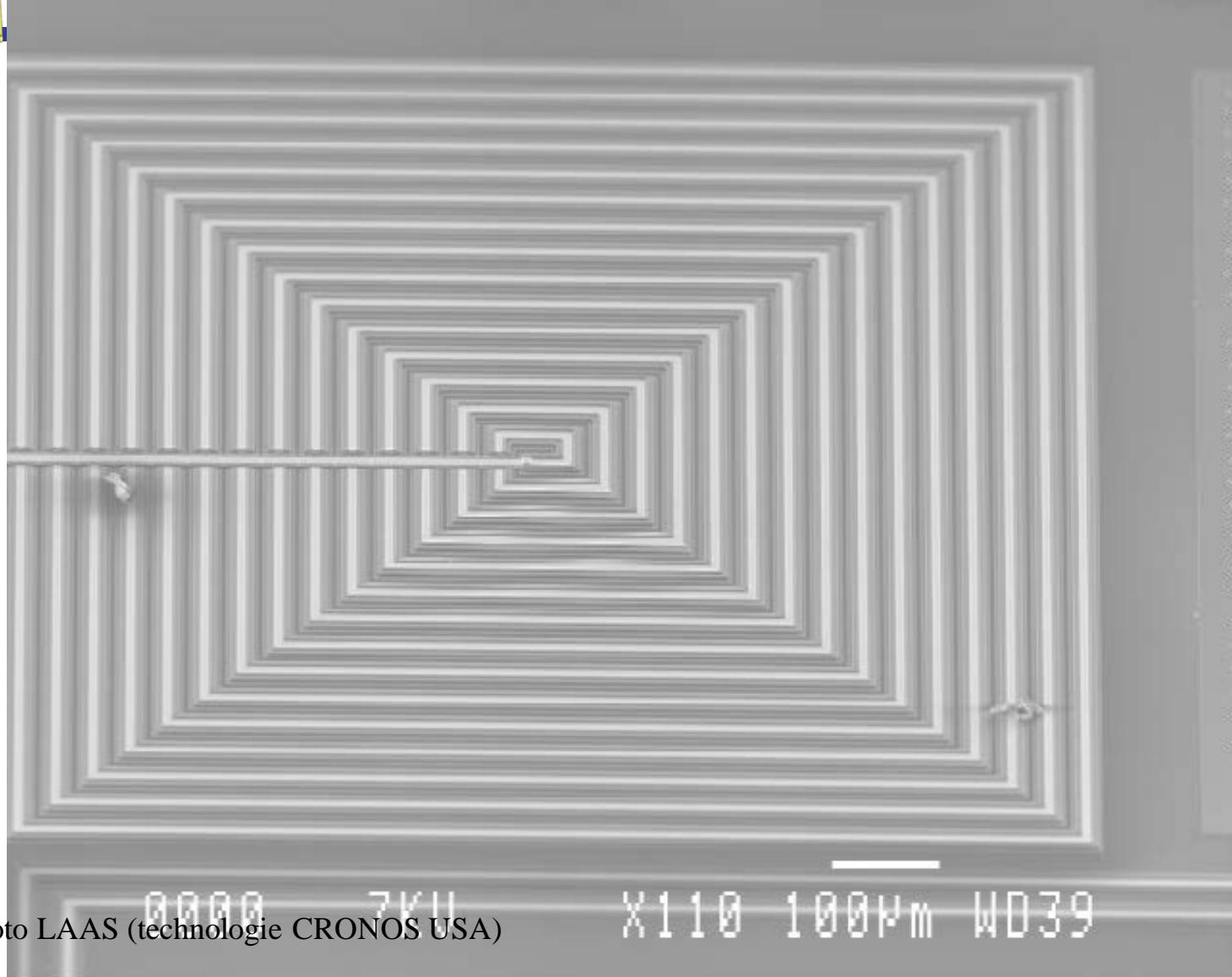
Mobile structures



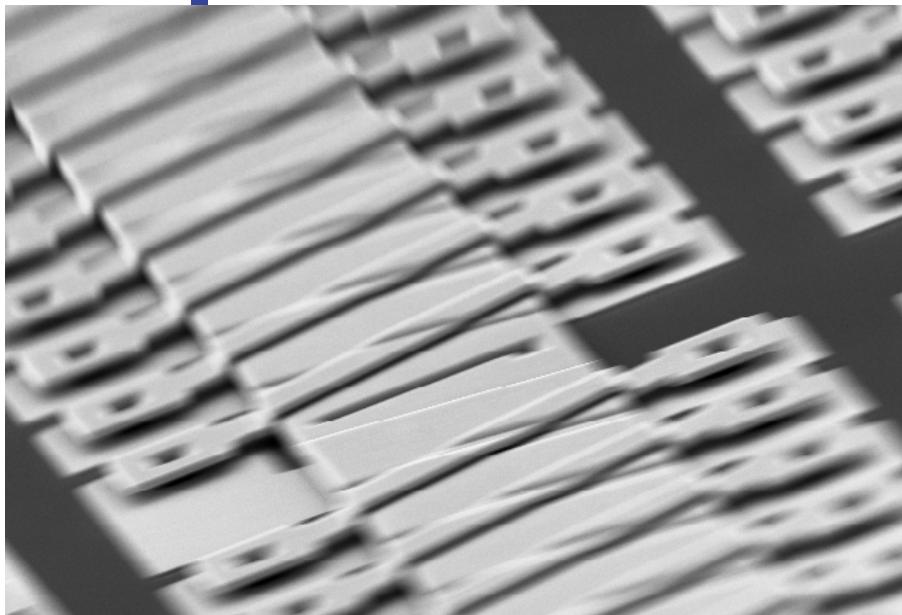
8KV X220 100µm WD39



Inductances and antenna

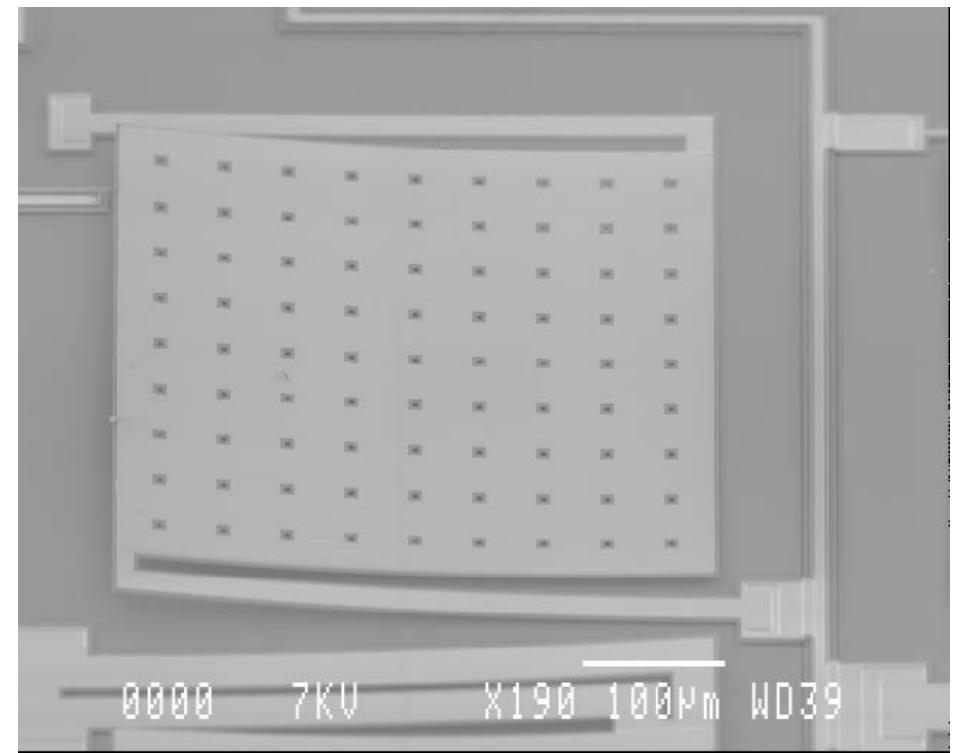


Inductance



0000 13KV X800 10µm WD28

Variable Capacitor



0000 7KV X190 100µm WD39

Mobile Polysilicon ...bimetallic strip

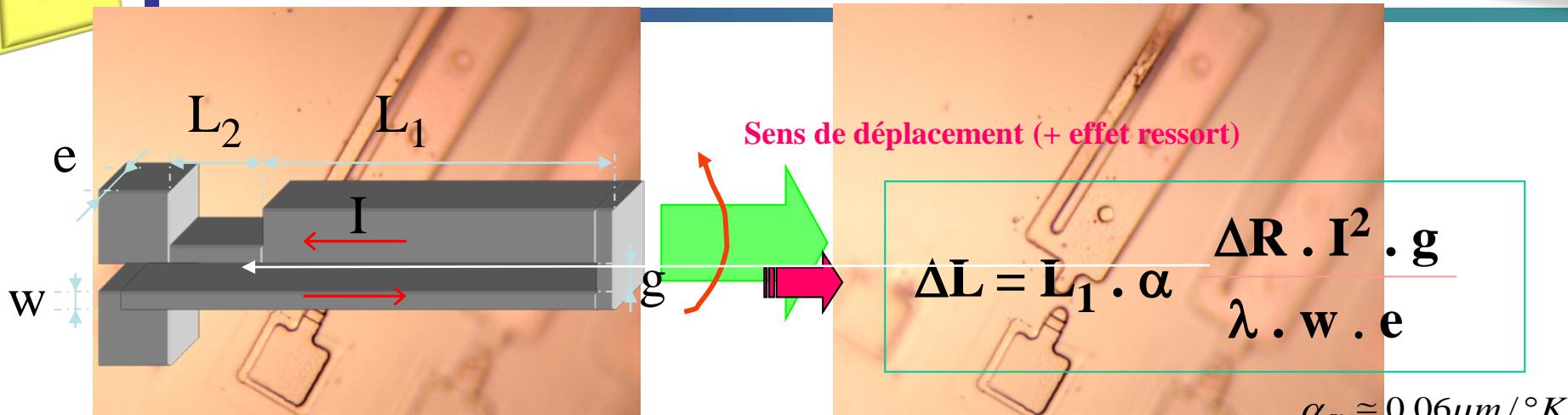
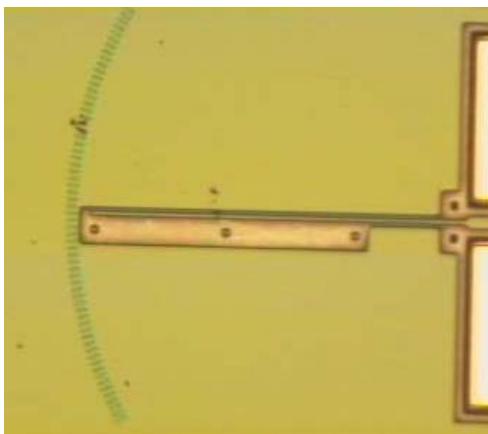
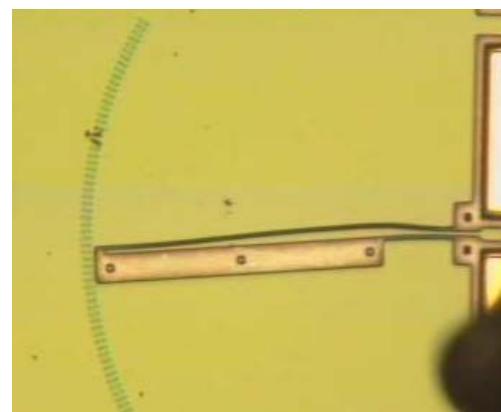


Photo AIME (technologie AIME)

Contact: noulet@aime.insa-tlse.fr



Actuator at rest



Deformation-deviation when powered

Micromechanic : gears

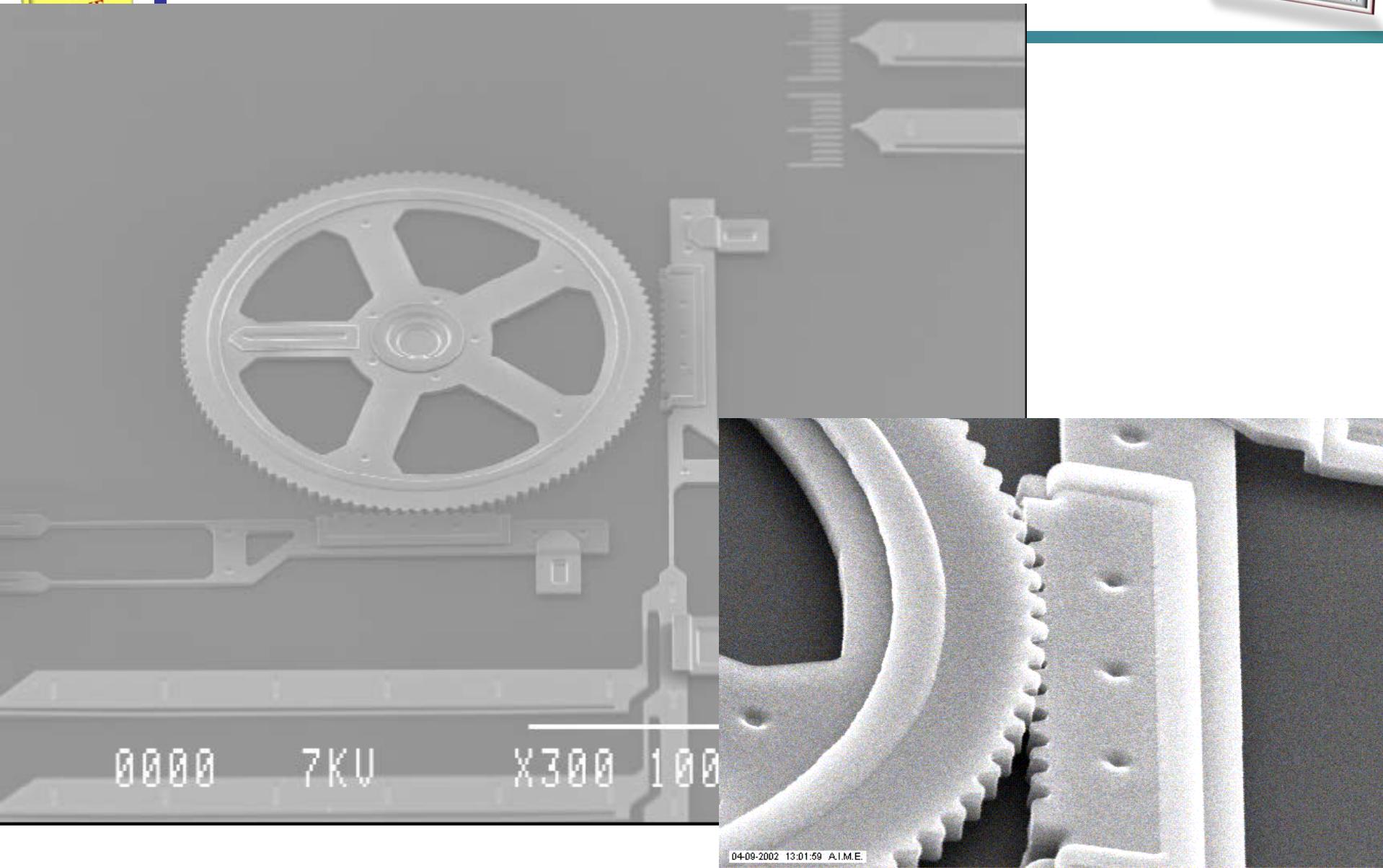
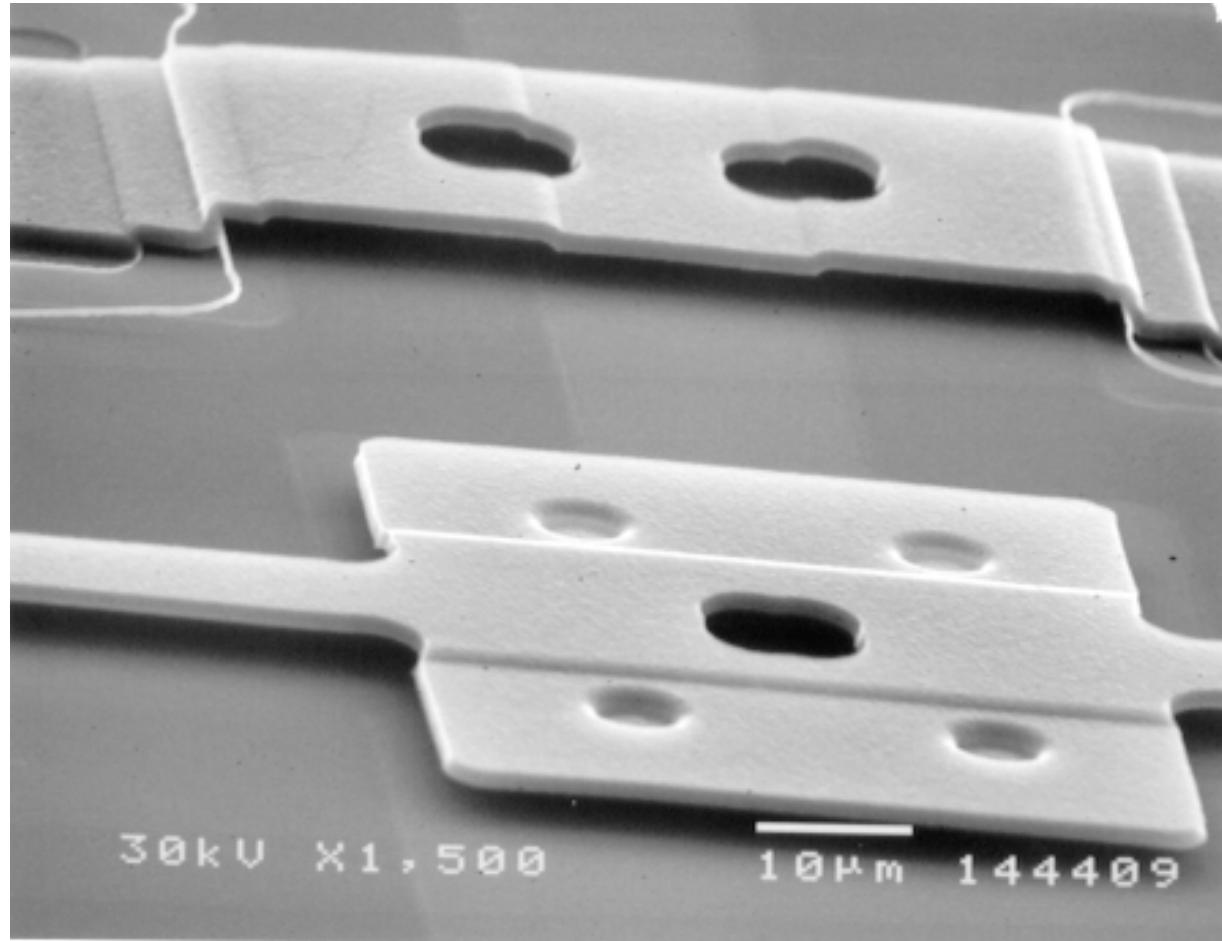


Photo LAAS (technologie CRONOS USA)r

Philippe MENINI

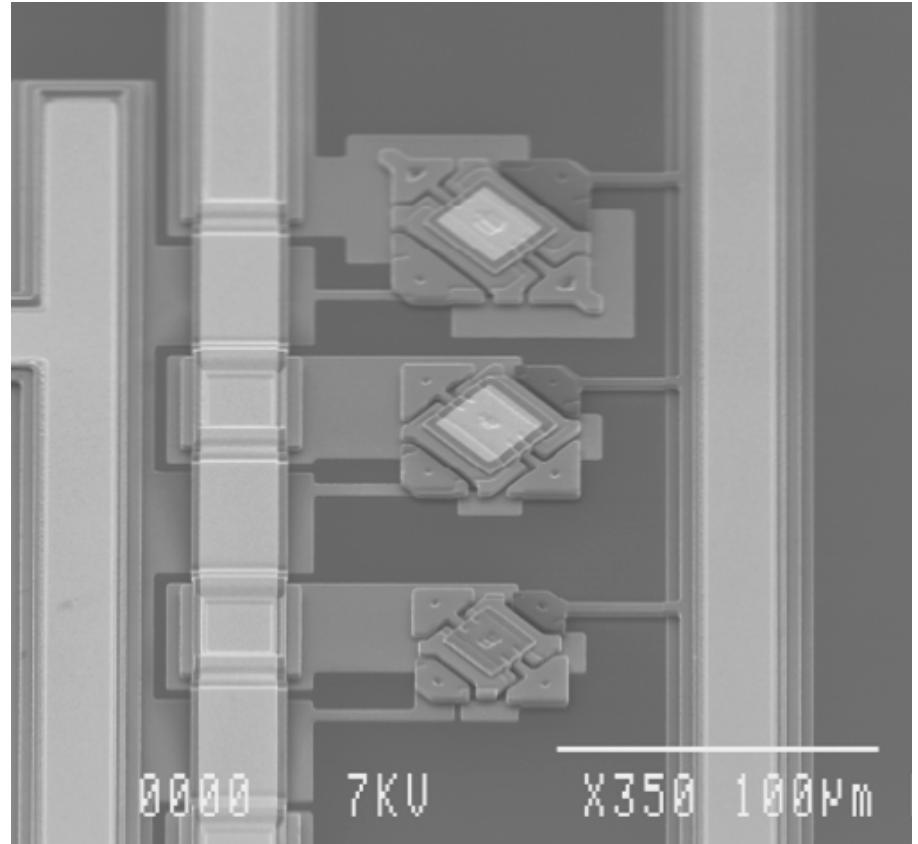
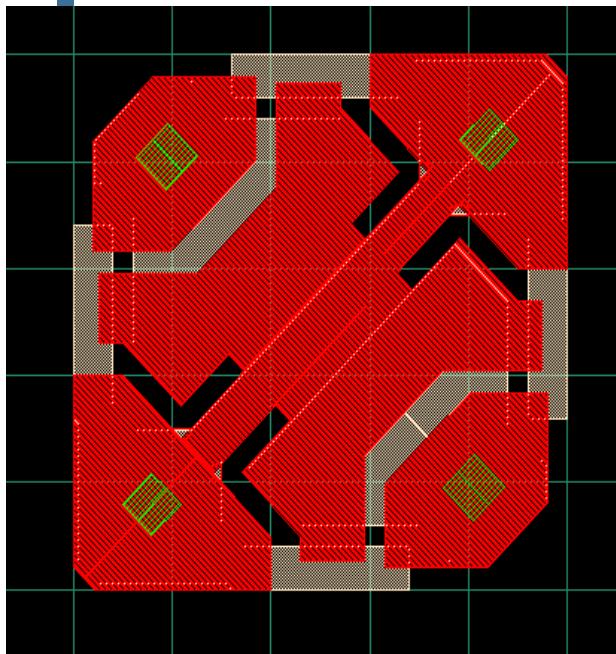
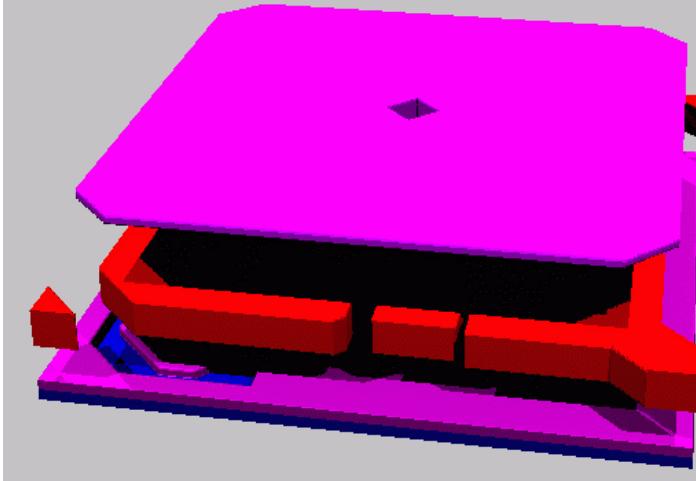
Electrostatic Actuation (photo AIME)



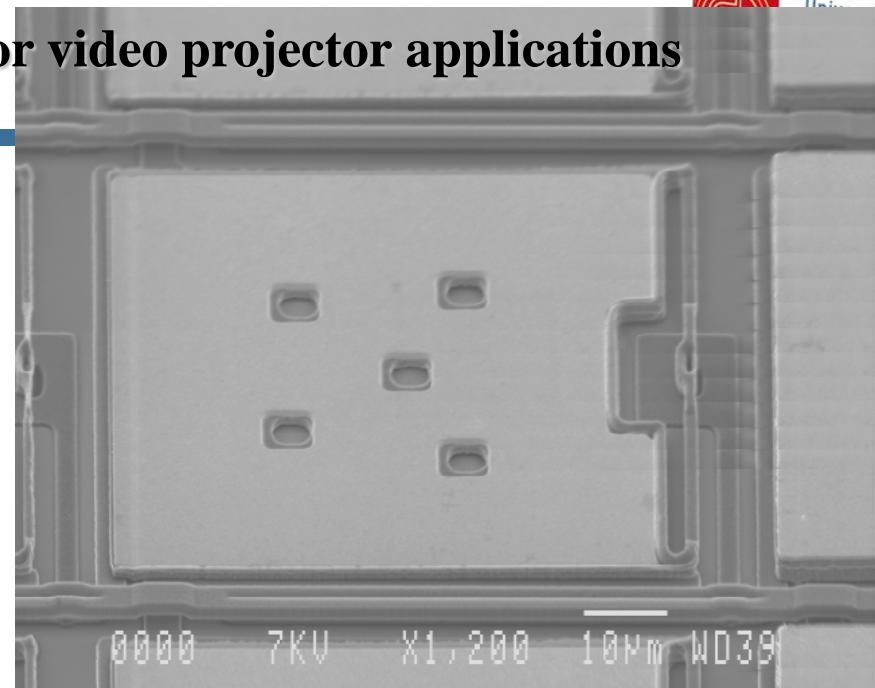
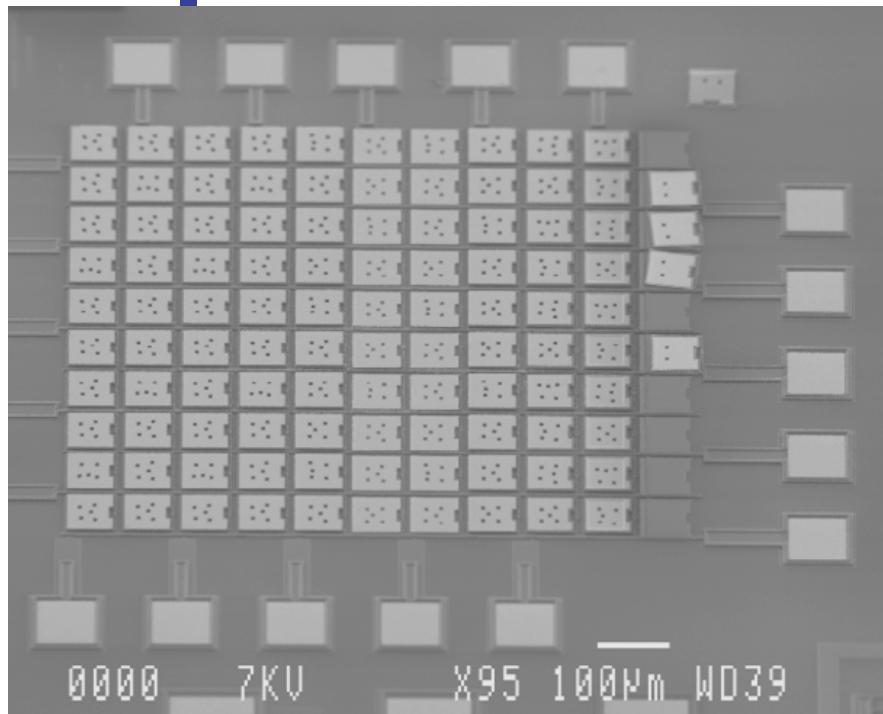
Electrostatic switch (photo AIME)

Philippe MENINI

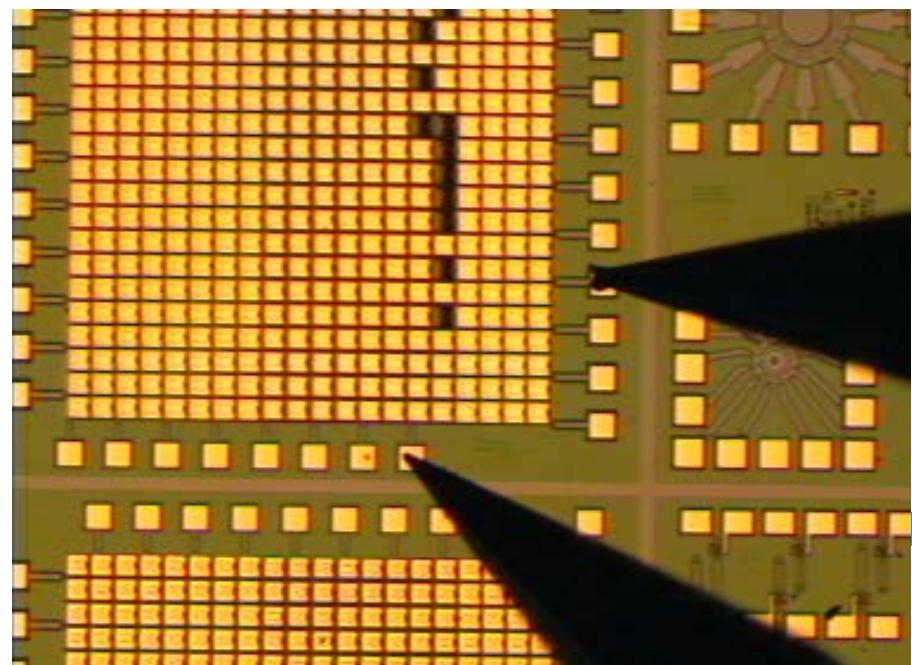
metallized Mirror



Pixel Addressing for video projector applications



Photos LAAS
(technology CRONOS, USA)



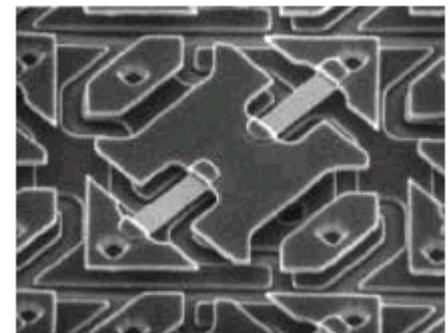
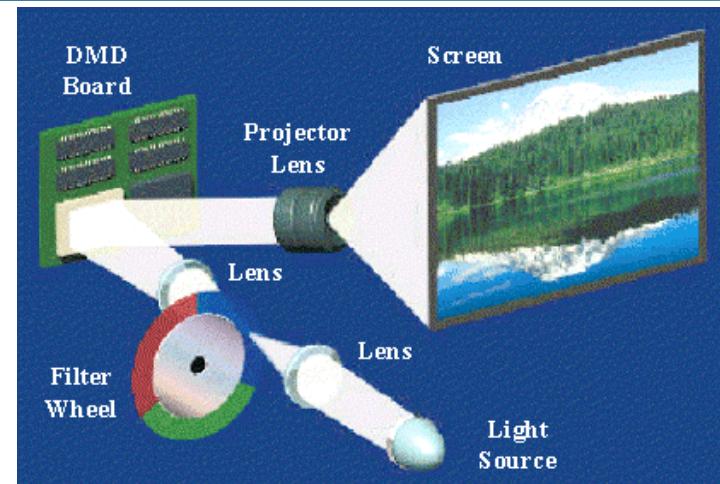
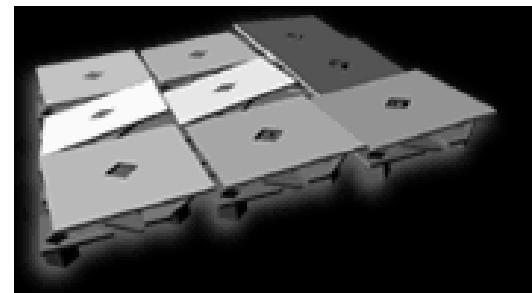
Système de projection d'images de Texas-Instruments



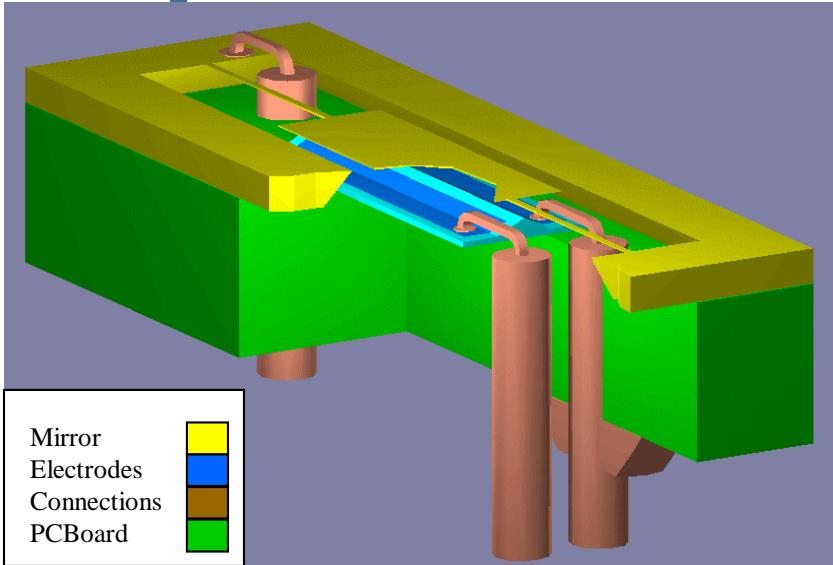
DMD : Digital Mirror
Devices (MOEMS)



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



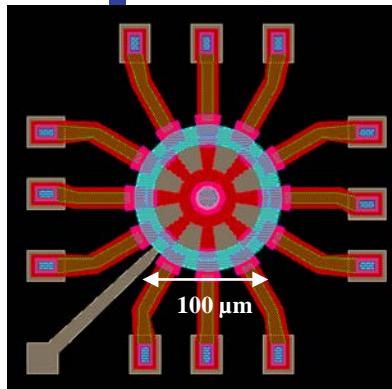
Micromirror



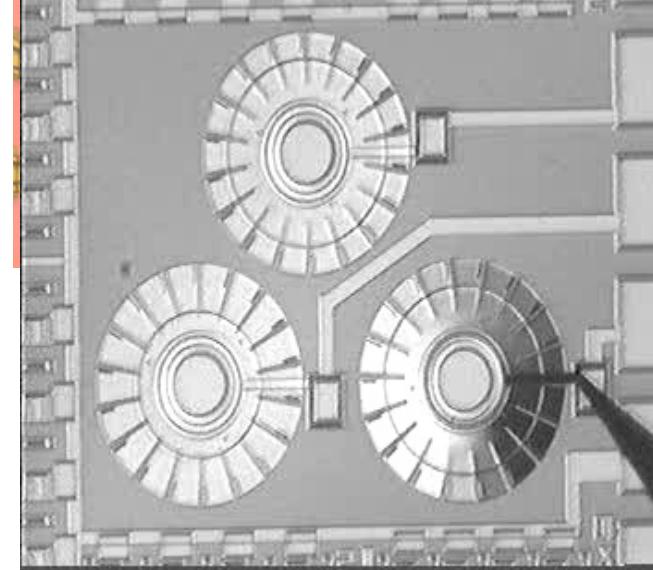
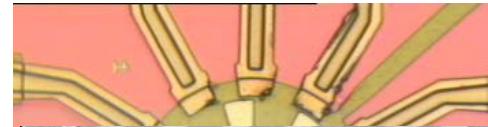
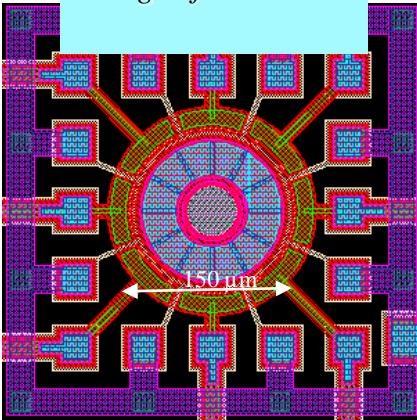
Photos LAAS (technologie LAAS)
Contact : camon@laas.fr



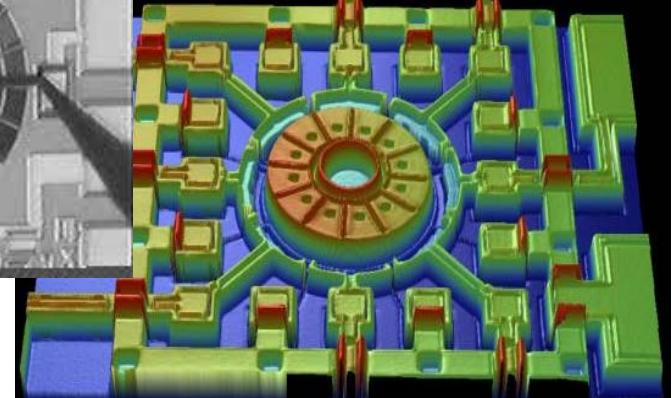
Electrostatic Micromotor



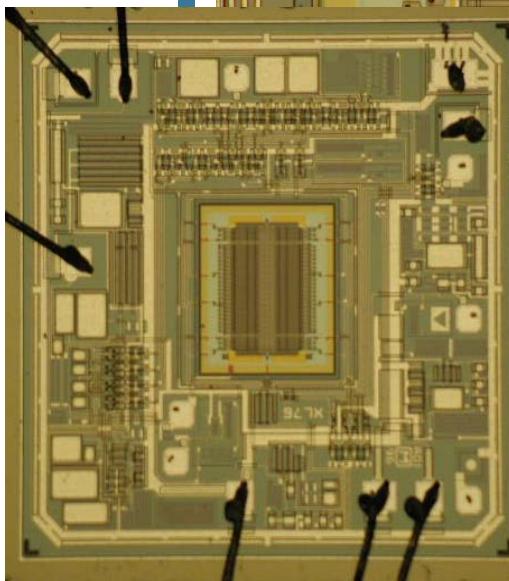
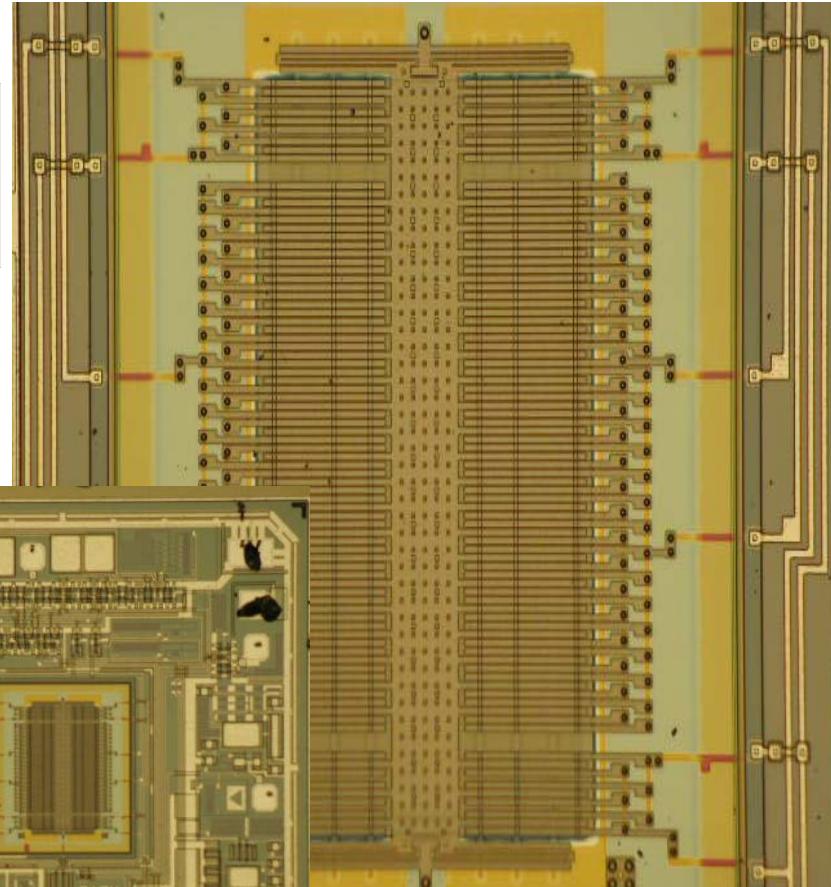
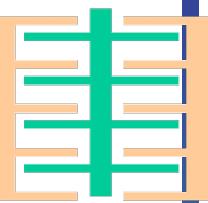
Design of structures



Optical profilometry

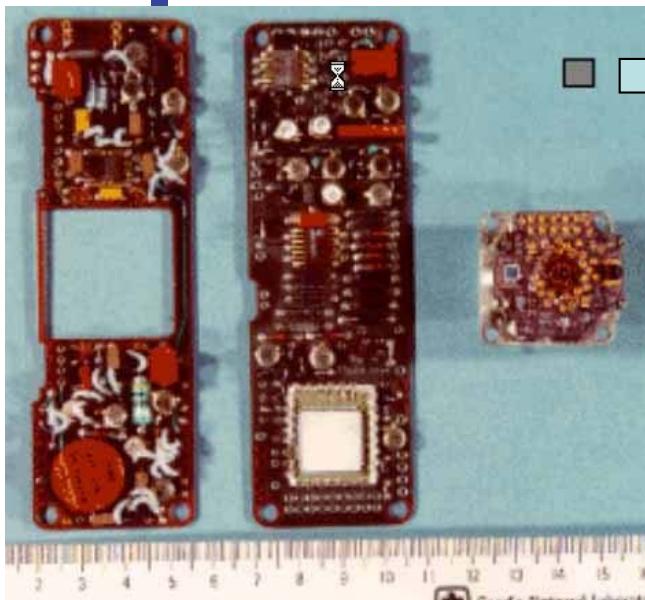


AIRBAG...=> Accelerometer

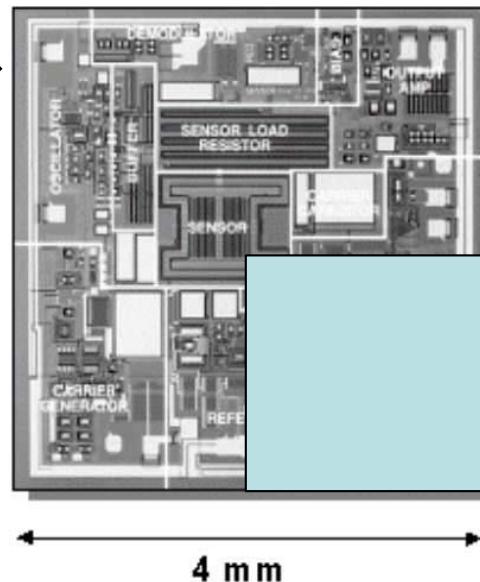


Historique de l'accéléromètre pour Airbag...

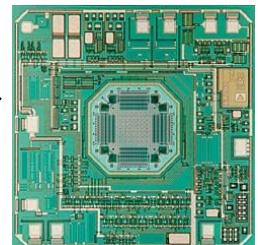
Objectif Miniaturisation ...



1980 : Carte 50cm²



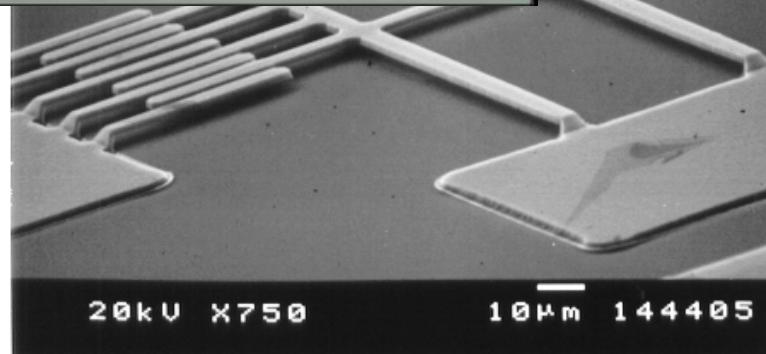
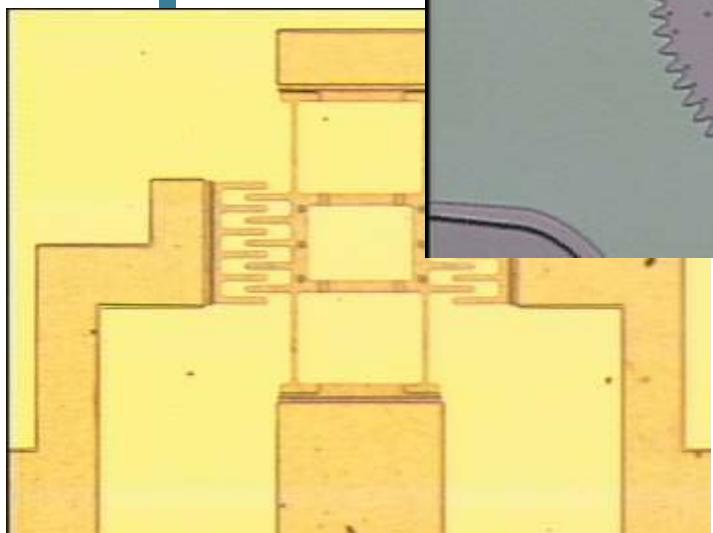
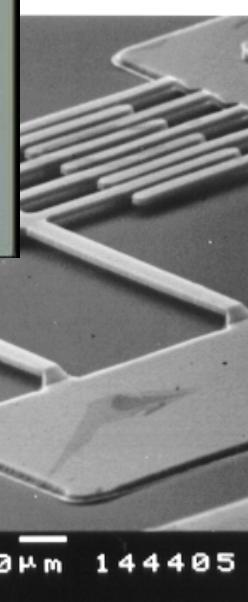
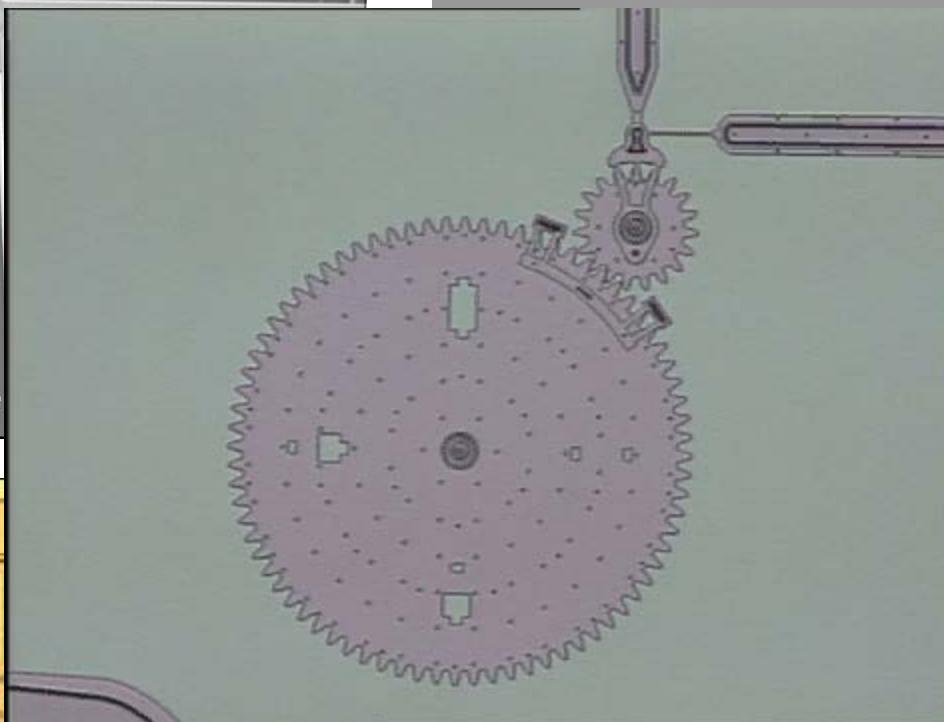
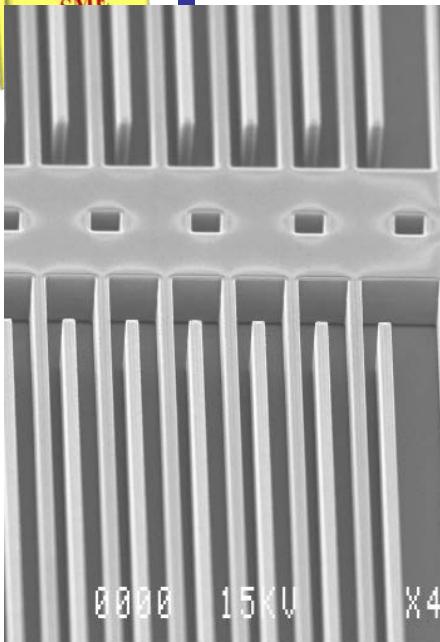
1995 : Carte 16mm² 1D
ADXL-50



2002 : 3 mm²(2D)
ADXL-202

Other examples of accelerometers

Photos LAAS
(TRONICS')



More and more applications...



© Sony



© Omron



© Renault



© Dassault



© Cartier



© Apple

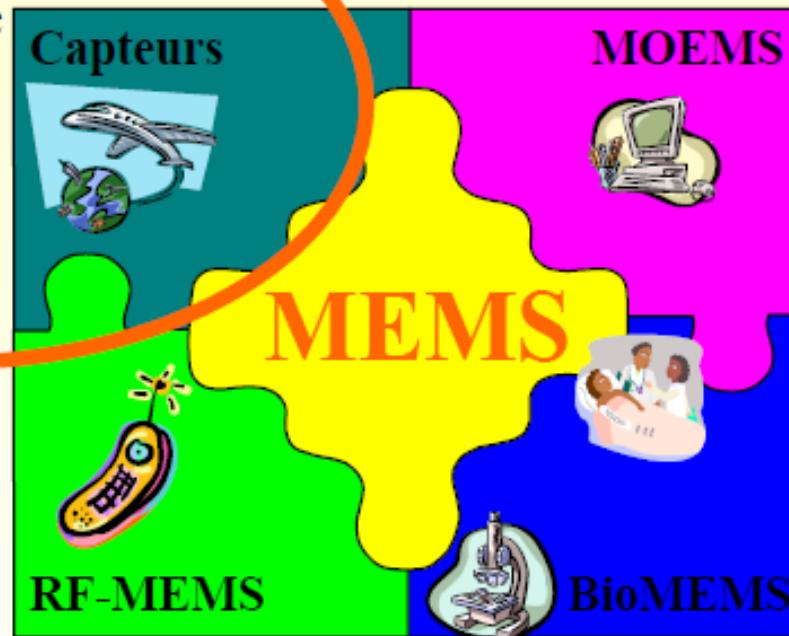


© JVC



© ESA

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

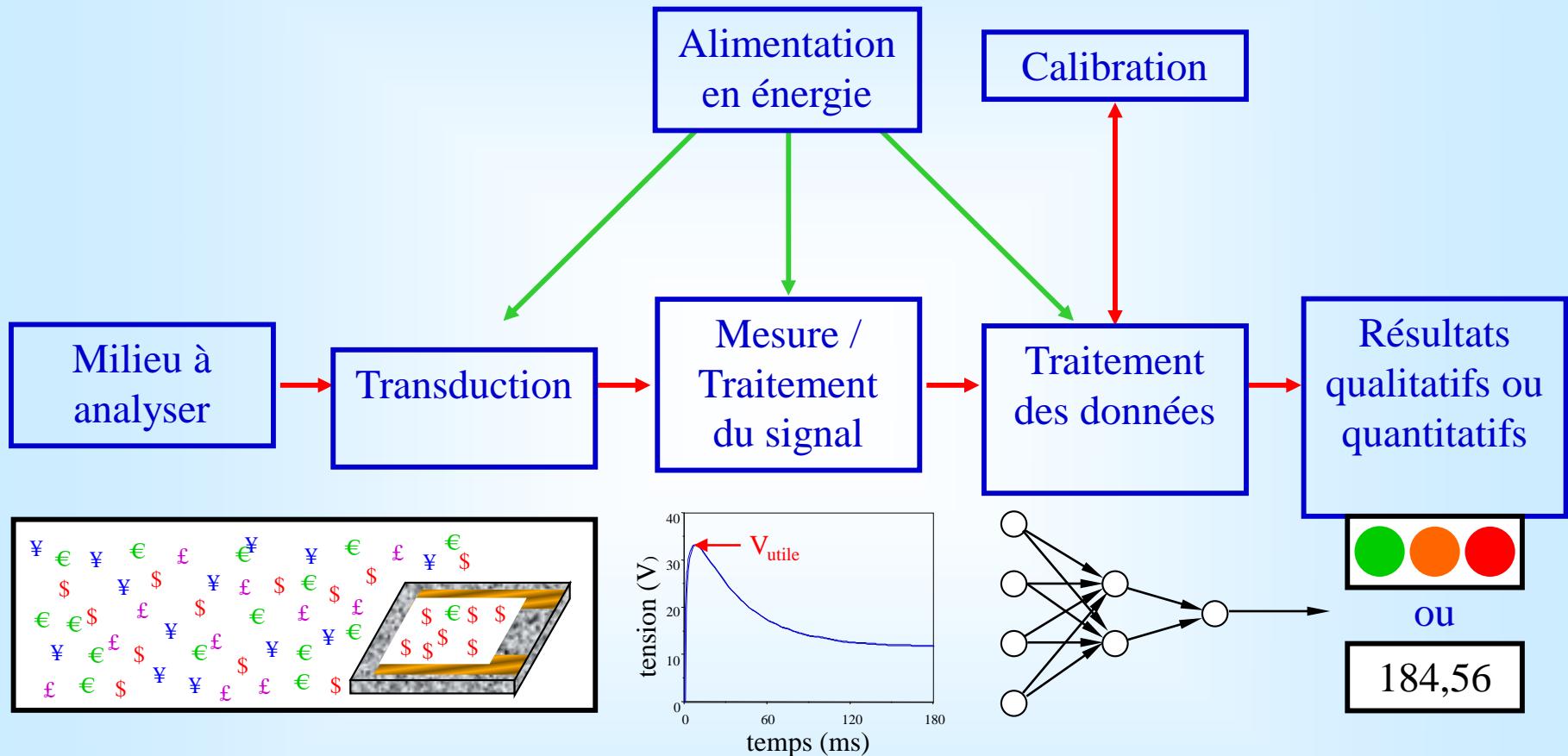


- Switch RF
- Composants passives variables
- Resonateur
- Filtres, antennes

- Micromirroirs
- Switchs optiques
- Cavité optique

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

Structure d'un capteur « intelligent »

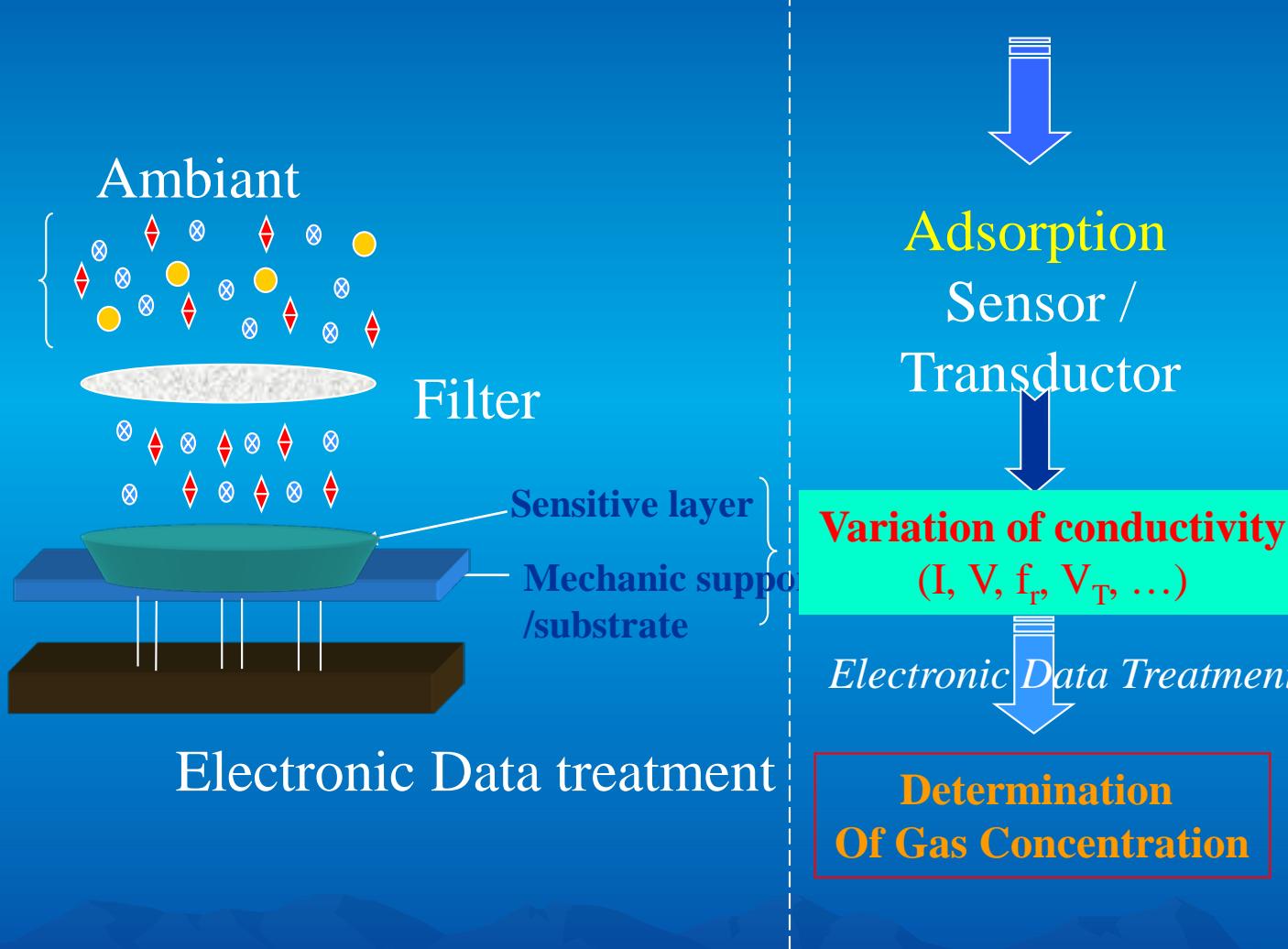


Les capteurs Chimiques & Nez Electroniques

Domaines des microcapteurs chimiques

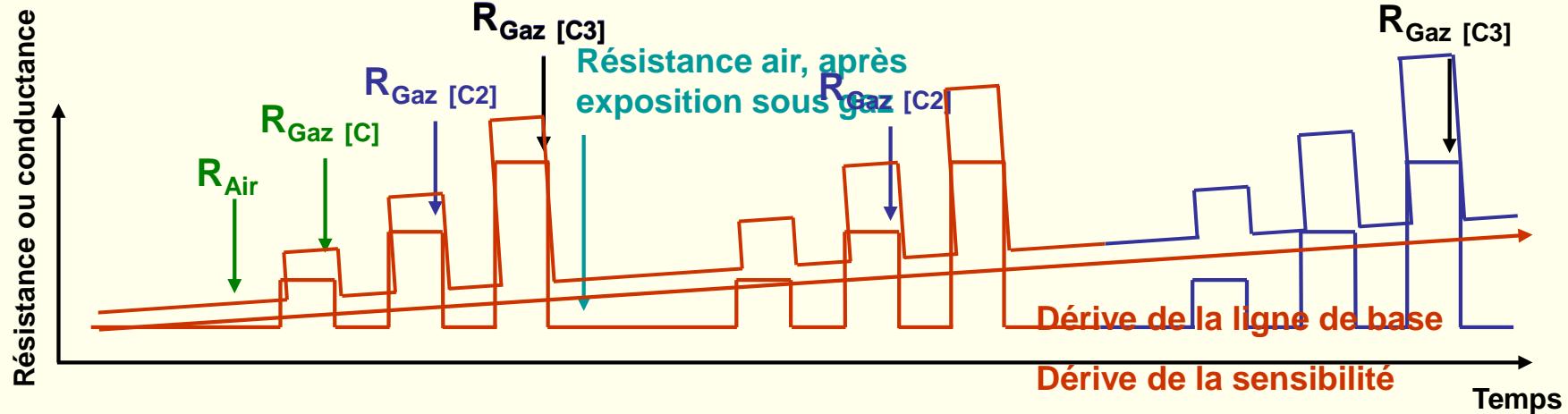


What's a S-C chemical Sensor ?



Key Elements :

- Sensitivity
- Selectivity
- Stability
- Response time
- Consumption
- Low-cost sensor

Réponse schématique d'un capteur de gaz
Température constante
Gaz 1
Gaz 2

✓ Signal de mesure : R_{air} , R_{gaz}

✓ Réponse Normalisée à concentration

fixe : $Rn\% = [R_{gaz} - R_{air}] / R_{air}$

✓ Sensibilité (définition linéaire par morceau) :
 $S = \Delta Rn\% / \Delta [C]$

✓ Sélectivité (à $[C]$ identique) :
 $Rn_{gaz1[C3]} / Rn_{gaz2[C3]}$

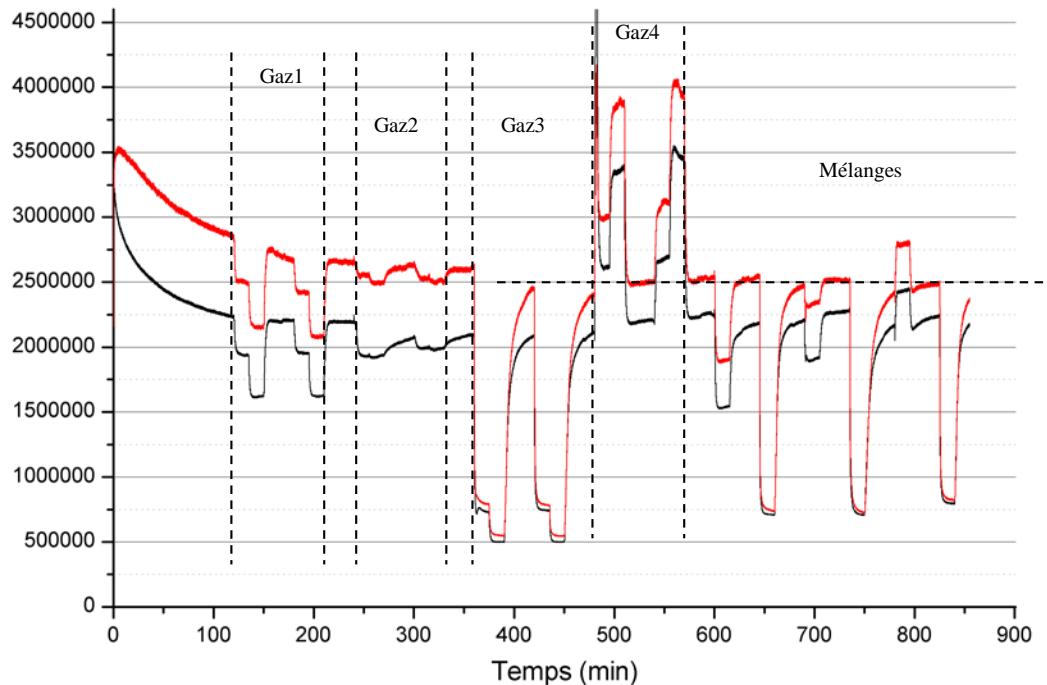
✓ Répétitivité : résistance et sensibilité

✓ Réversibilité : retour à la ligne de base

✓ Stabilité : dérive à court/long terme de la ligne de base et de la sensibilité

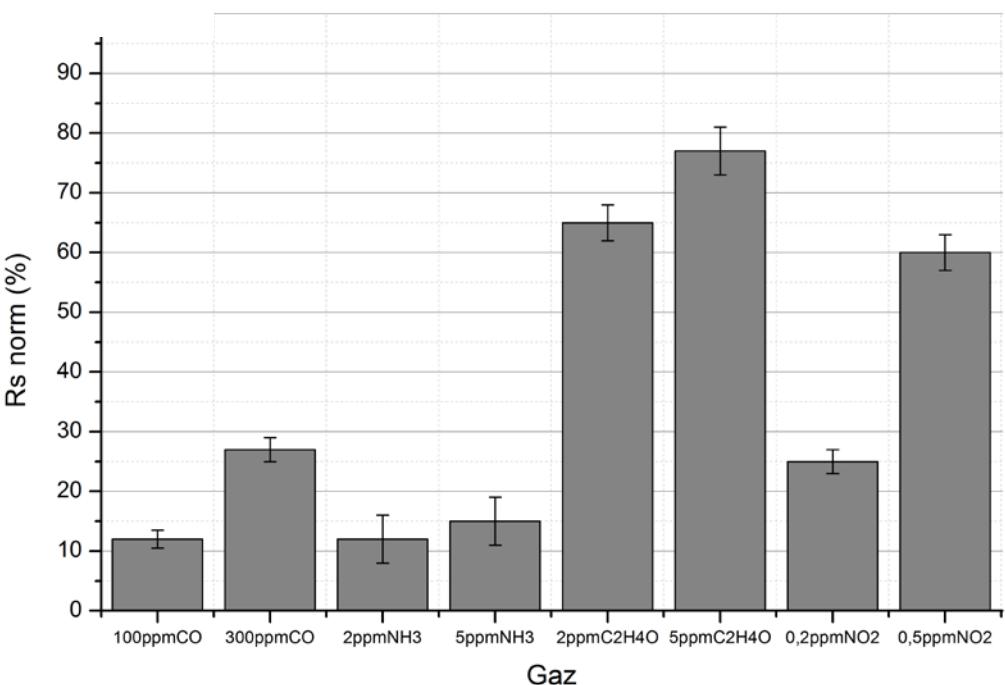
SnO₂ LCC stat - Ph=5mW - I_s=100nA
Comparaison avant et après tests banc CERTAM

R_s (ohms)

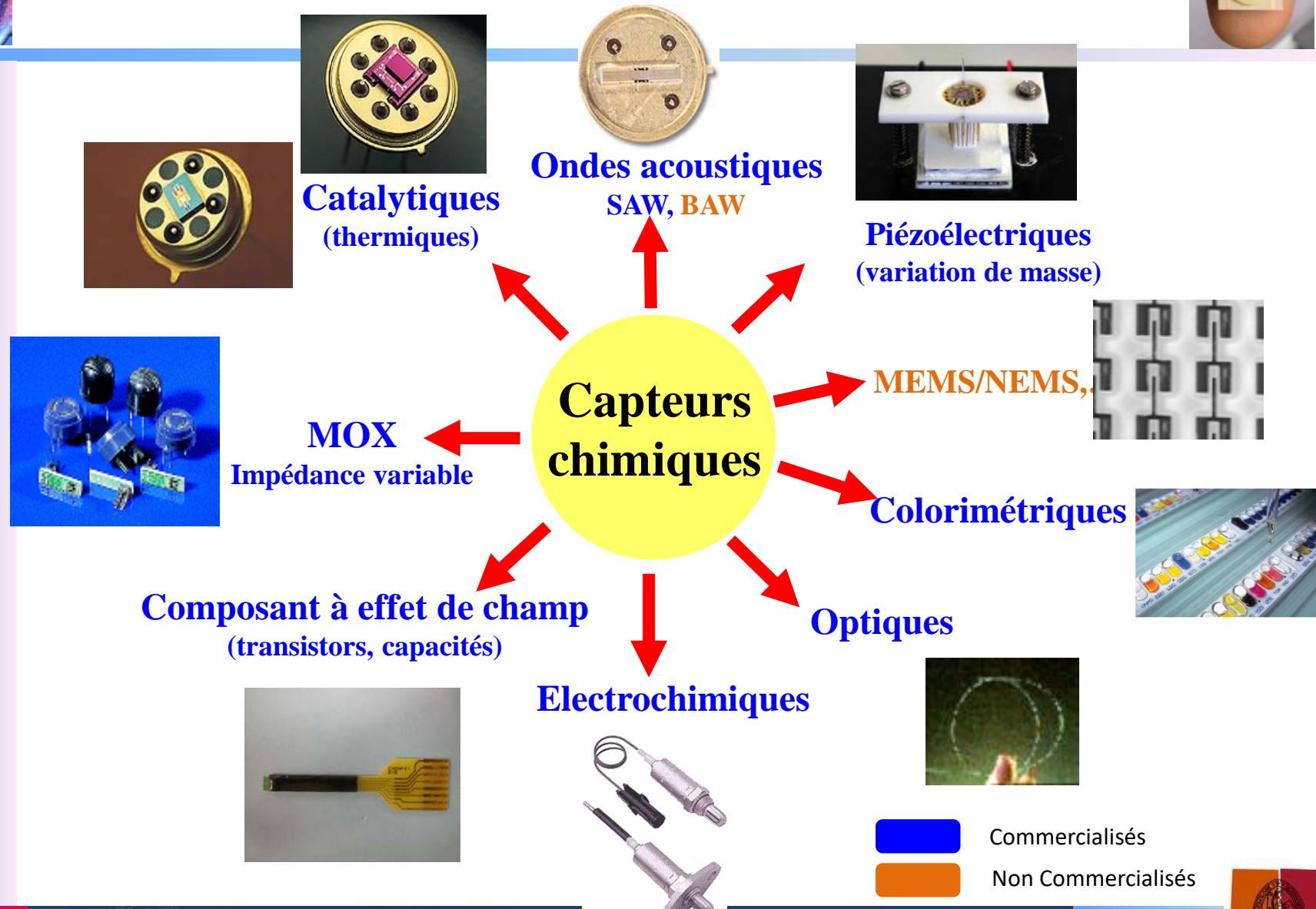


$$R_n = \Delta R / R_0$$

$$S = ?$$



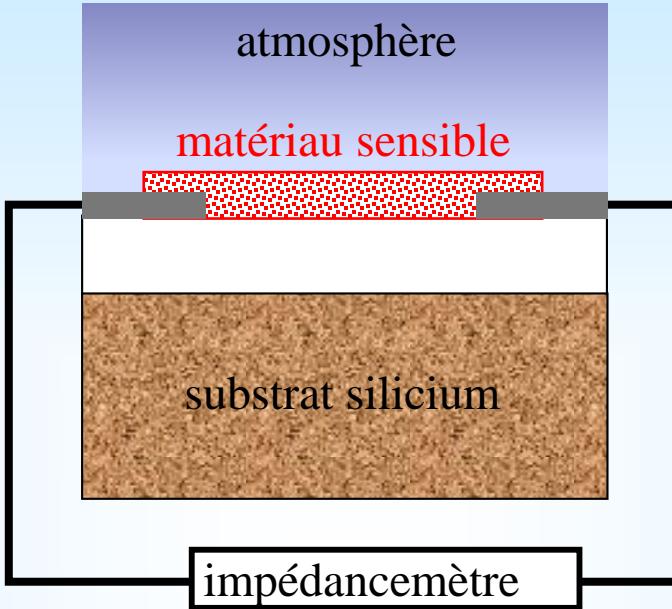
Le monde des microcapteurs chimiques



Développement des microtechnologies pour les capteurs chimiques

- Développement de structures génériques de microcapteurs chimiques
 - Les résistances
 - Les microélectrodes
 - Les transistors à effet de champ
 - Les microstructures électromécaniques
 - Les capteurs à ondes acoustiques
- Intégration des matériaux de détection et d'encapsulation

Présentation des résistances sensibles

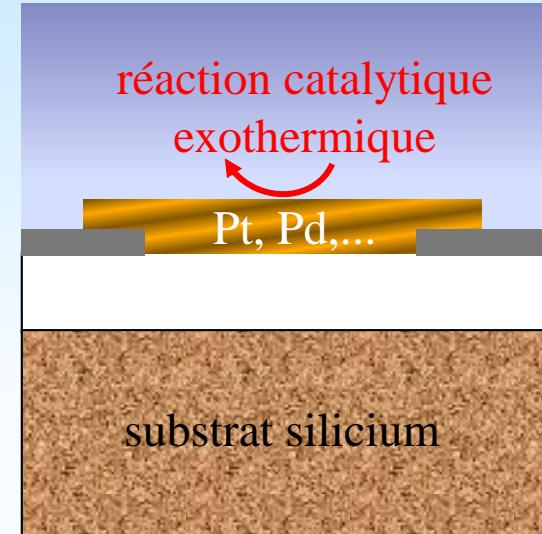


➤ Principe de détection

- ✓ Variation de la conductivité d'un matériau en présence d'une espèce chimique
- ✓ Détection conductimétrique et/ou impédancemétrique
- ✓ Utilisation en tant que capteurs de gaz

➤ Inconvénient: non-utilisable en milieu conducteur (liquide...)

Capteurs à combustion catalytique: pellistors



➤ Principe de fonctionnement

- ✓ Utilisation d'une réaction catalytique de combustion exothermique
- ✓ Augmentation de la température
- ✓ Variation de la résistivité du catalyseur métallique (Pt, Pd,...)

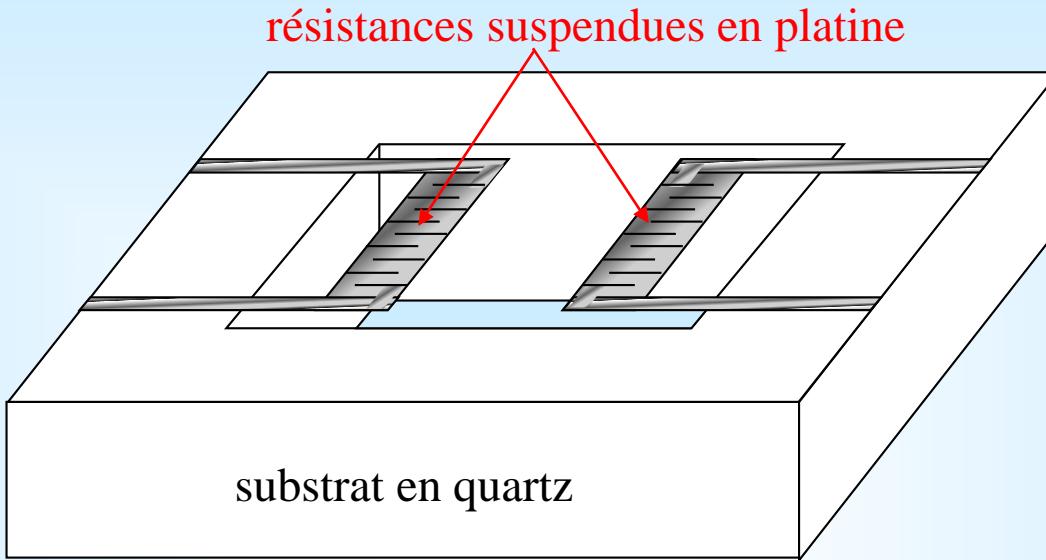
➤ Détection de l'hydrogène, des alcanes C_nH_{2n+2} et de leurs dérivés

- ✓ Cas général: gaz + O_2 -----> produit + énergie
- ✓ Cas de l'hydrogène: $2H_2 + O_2$ -----> $2H_2O$ + énergie
- ✓ Cas du méthane: $CH_4 + 2O_2$ -----> $CO_2 + 2H_2O$ + énergie

➤ Avantages

- ✓ Simplicité de fonctionnement
- ✓ Gamme de détection élevée: 0,1 - 10%

Intégration des pellistors (1)

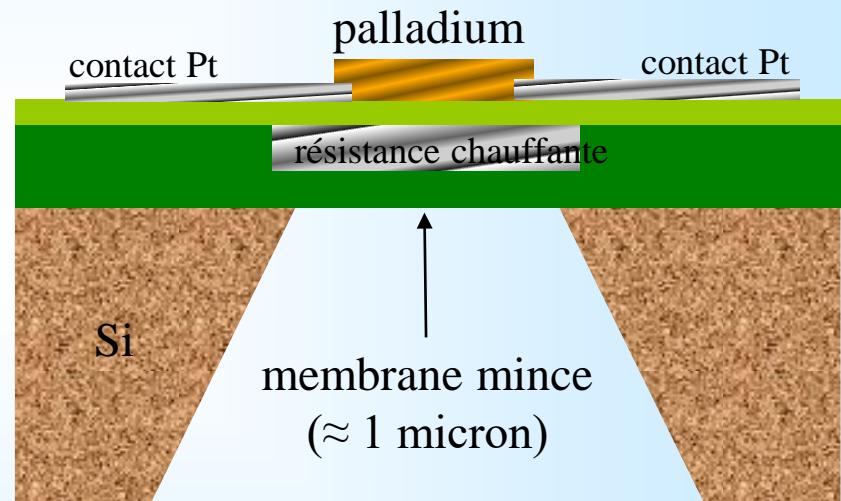


- Contrainte: fonctionnement à haute température ($T \geq 500^\circ\text{C}$...)
- Solution technologique
 - ✓ Fabrication d'une résistance suspendue en platine
 - ✓ Chauffage de la résistance en platine par effet joule: activation de la réaction catalytique
 - ✓ Imbrication des parties chauffage et mesure...

Intégration des pellistors

- Contrainte: fonctionnement à haute température ($T \geq 500^\circ\text{C}$...)
- Solution technologique

- ✓ Fabrication d'une résistance en palladium
- ✓ Utilisation de contacts en platine
- ✓ Ajout d'une résistance de chauffage en platine (activation de la réaction catalytique par effet joule)
- ✓ Intégration de l'ensemble sur une membrane diélectrique mince afin d'assurer une bonne isolation thermique et électrique
- ✓ Séparation de la partie chauffage et mesure



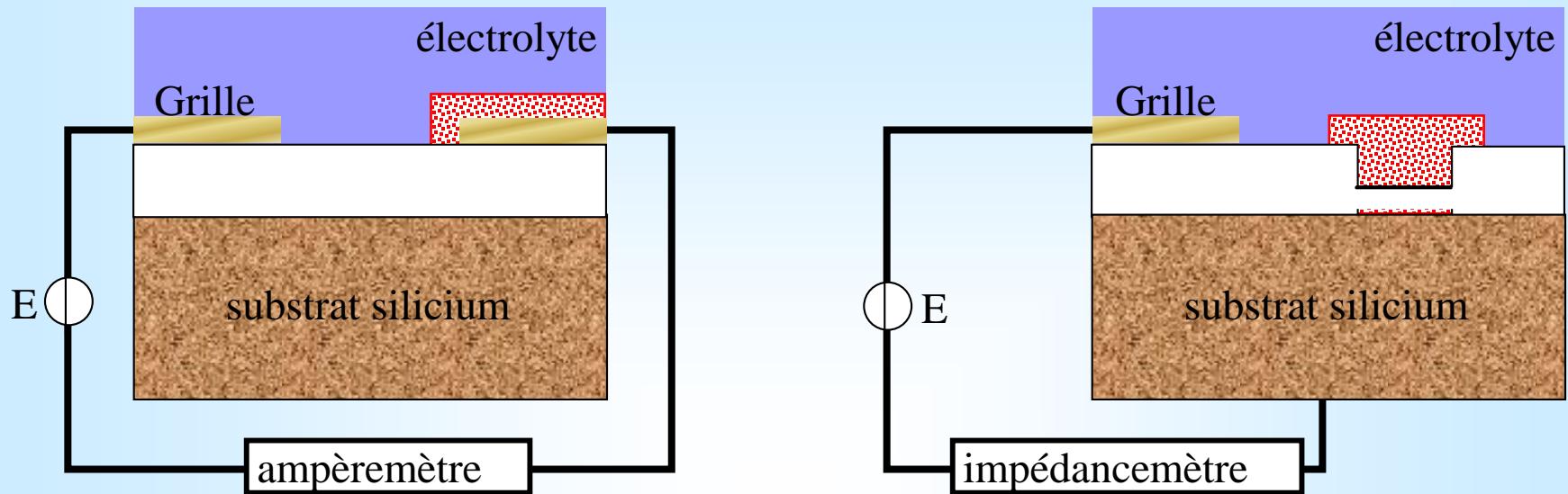
Application en domotique: détection des gaz méthane (GPL), propane, butane,...

- ✓ Détection du méthane CH_4 : $35 \text{ mV}/\%\text{CH}_4$ à 900°C

Inconvénients des pellistors

- Fonctionnement en atmosphère oxydante ou riche en oxygène O₂
 - ✓ Réaction instable à forte concentration, risque d'explosion (coup de grisou...)
- Faible sélectivité de détection
 - ✓ Existence de nombreuses réactions catalytiques concurrentes...
 - ✓ Discrimination entre gaz obtenue par variation de la température de fonctionnement
 - ✓ Développement de systèmes multi-capteurs
- Empoisonnement du catalyseur: limitation de la durée de vie
 - ✓ Protection du pellistor à l'aide de filtres actifs

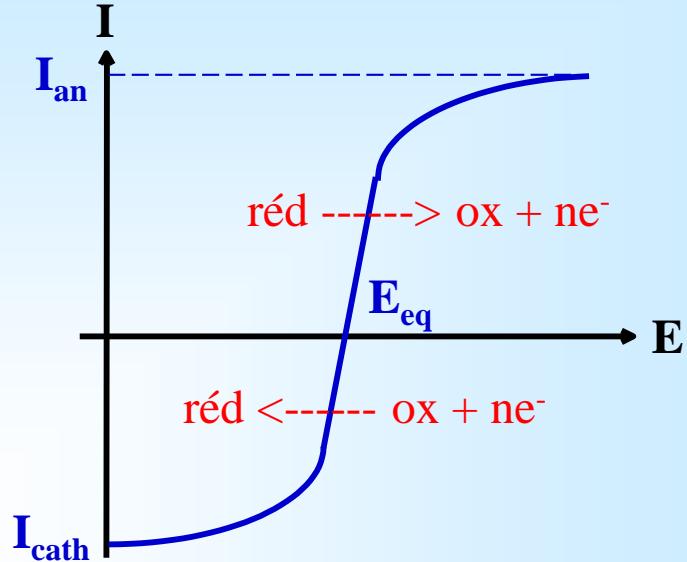
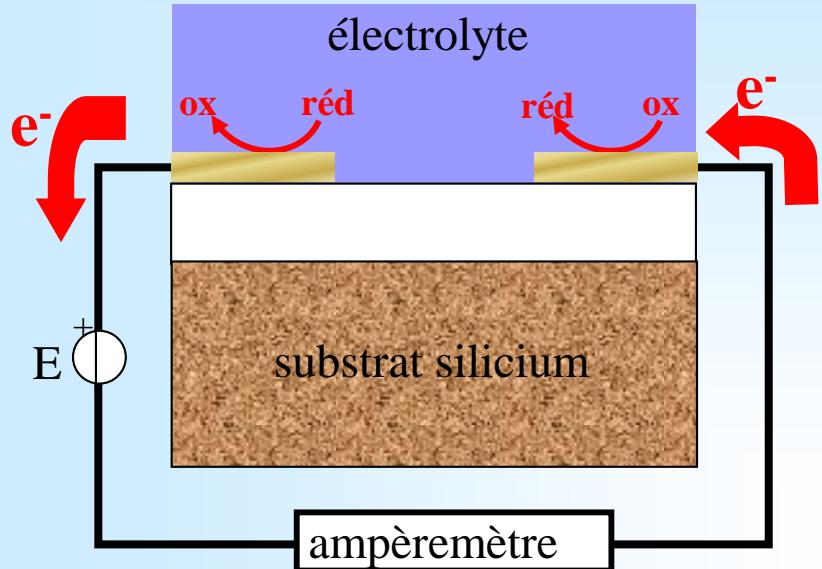
Présentation des micro-électrodes



➤ Développement de composants électriques prenant en compte le milieu liquide et l'interface biochimique

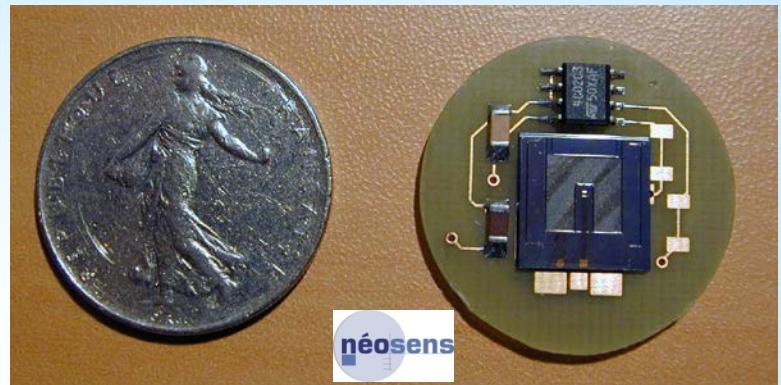
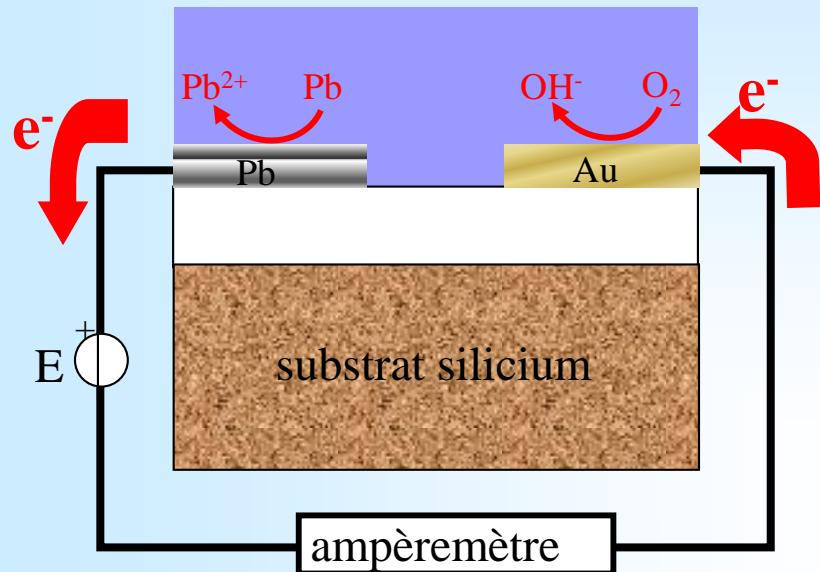
- ✓ Composants électriquement actifs: piles ou cellules électrochimiques
- ✓ Composants électriquement passifs: impédances
 - structure métal/électrolyte/**matériau biochimiquement sensible**/métal
 - structure métal/électrolyte/**matériau biochimiquement sensible**/isolant/semi-conducteur: capacité chimique (à effet de champ) ChemFEC

Piles ou cellules électrochimiques



- Principe de fonctionnement: suivi d'une réaction d'oxydo-réduction
 - ✓ Oxydation sur l'électrode de travail: réducteur -----> oxydant + e⁻
 - ✓ Réduction sur la contre-électrode: oxydant + e⁻ -----> réducteur
 - ✓ Détection ampérométrique (proportionnalité entre courant et concentration) en présence ou non d'une tension appliquée
- Inconvénients: consommation de l'électrode de travail

Capteur ampérométrique pour l'oxygène dissous

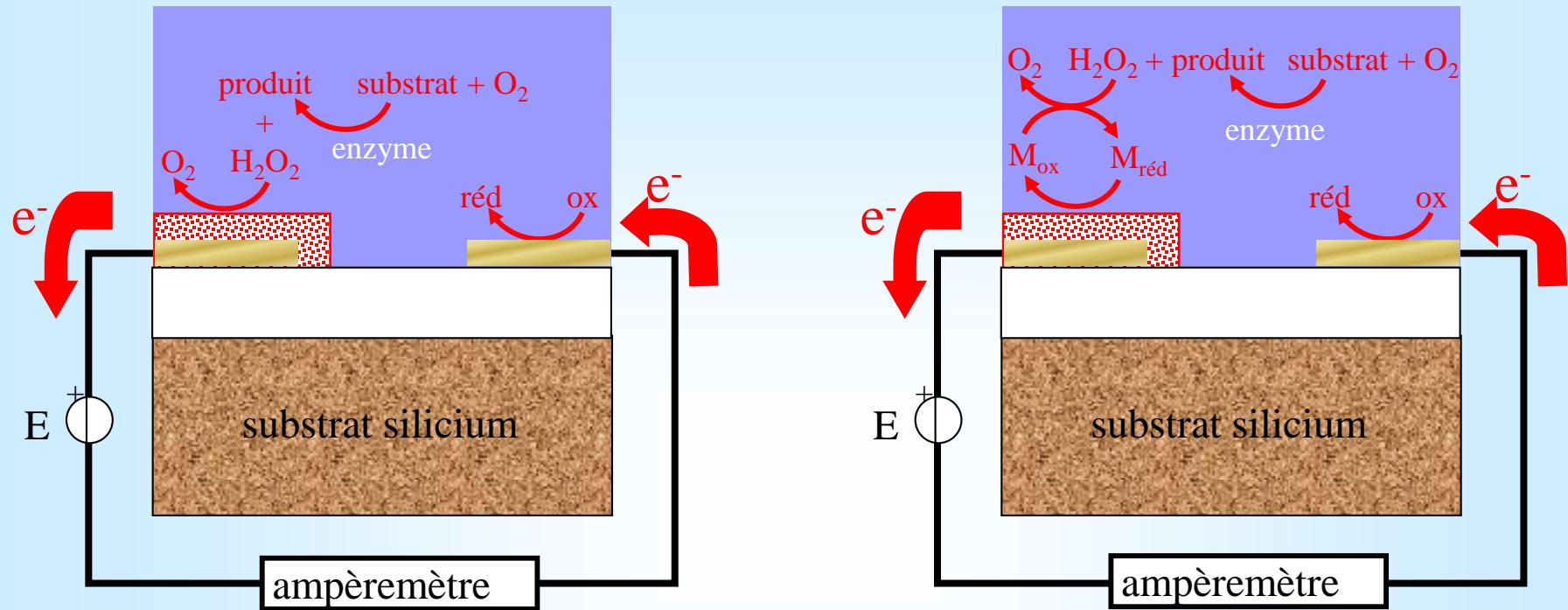


➤ Mécanismes de détection

- ✓ Réduction de l'oxygène dissous sur l'électrode en or: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$
- ✓ oxydation de l'électrode en plomb: $\text{Pb} \longrightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$

➤ Caractéristiques: $\approx 200 \text{ nA/ppm}$ entre 0,01 et 10 ppm d' O_2 dissous

Applications à la biochimie



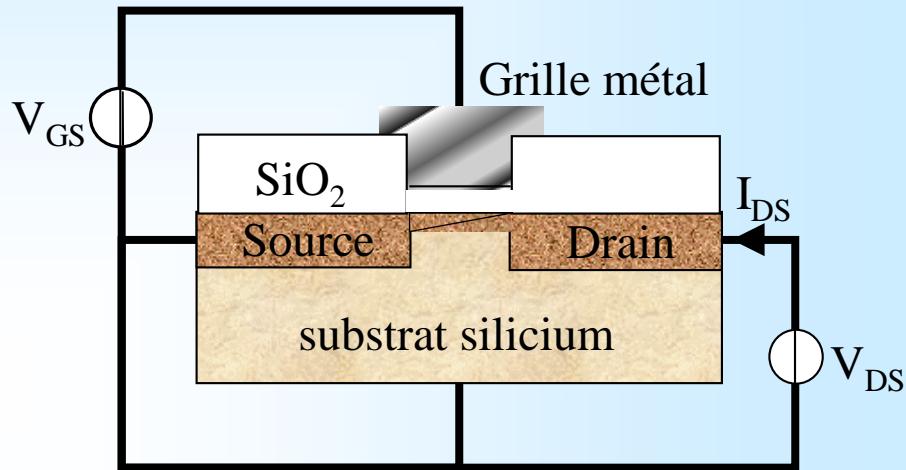
➤ Utilisation de réactions oxydo-réductrices, acido-basiques et/ou enzymatiques liées à la biochimie

- ✓ Intégration de couches biochimiquement actives...
- ✓ Développement de systèmes amplificateurs: amélioration de la sensibilité
- ✓ Spécification de l'espèce détectée: amélioration de la sélectivité

Rappel: fonctionnement du MOSFET

➤ Principe de fonctionnement

- ✓ Polarisation électrique de la structure MOS (métal/SiO₂/semiconducteur)
- ✓ Inversion de la population des porteurs dans le semi-conducteur
- ✓ Formation d'un canal conducteur entre les contacts source et drain
- ✓ Variation du courant drain-source I_{DS} en fonction de la tension grille-source V_{GS}



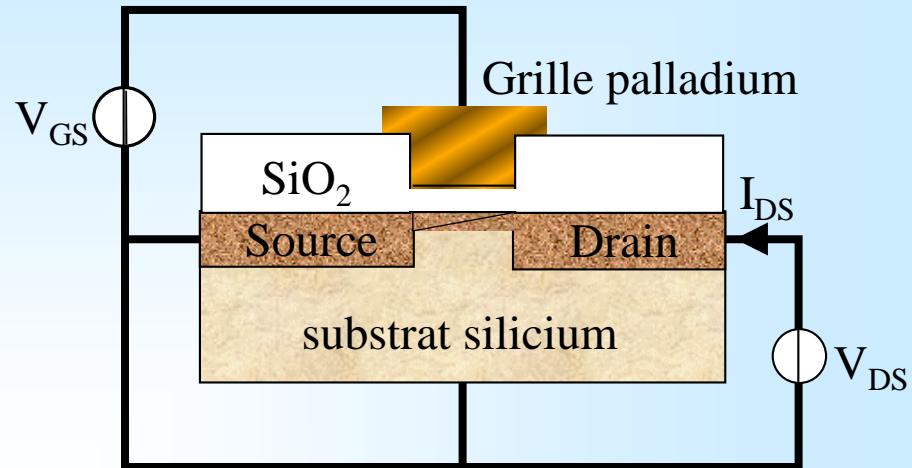
➤ Cas du transistor MOSFET canal N à enrichissement

- ✓ Fonctionnement en saturation: $I_{DS} = K(V_{GS} - V_T)^2$
- ✓ V_T est la tension de seuil du transistor MOSFET

Présentation des GasFETs

➤ Principe de fonctionnement

- ✓ Utilisation d'une grille en palladium
- ✓ Piégeage des espèces hydrogénées et formation de dipôles électriques à l'interface Pd/SiO₂
- ✓ Variation de la tension de seuil V_T* du transistor



➤ GasFET canal N à enrichissement

- ✓ Fonctionnement en saturation: $I_{DS} = K(V_{GS} - V_T^*)^2$
- ✓ Variation du courant drain-source I_{DS} en fonction de pC pour une tension grille-source V_{GS} constante (ou vice-versa...)

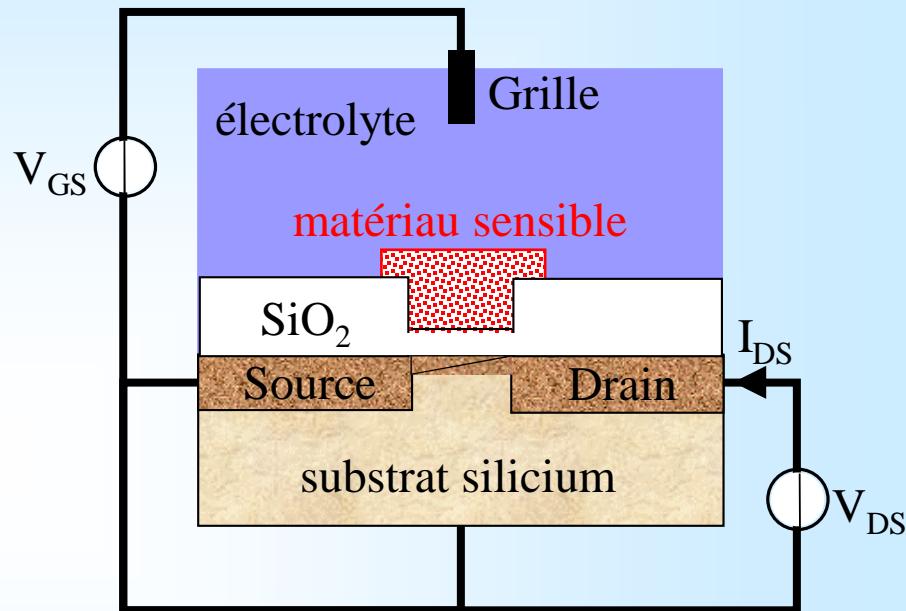
➤ Inconvénients

- ✓ Limitation au palladium pour la détection de l'hydrogène H₂ et de diverses espèces hydrogénées (SH₂, NH₃, C_xH_y,...)

Présentation des ChemFETs

- ChemFET: chemical field effect transistor
- Adaptation du transistor à effet de champ MOSFET à la détection en milieu liquide

- ✓ Remplacement de la grille métallique par un matériau (bio)chimiquement sensible



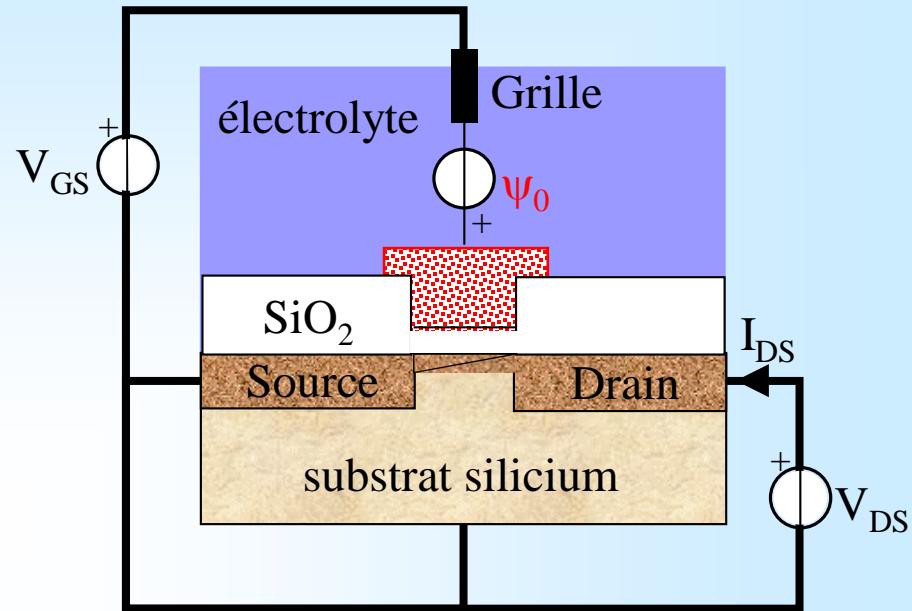
- Utilisation d'une structure électrolyte/isolant/semiconducteur (EIS) en tant que commande de grille
- ✓ Polarisation de l'électrolyte par une électrode (si possible de référence...)

Fonctionnement du ChemFET

- Variation de la tension de seuil du transistor en fonction du potentiel ψ_0 créé à l'interface solide/liquide:

- $V_T^* = V_T - \psi_0$

- ✓ Détection potentiométrique
 - ✓ Loi de Nernst pour un ion noté I^{n+} :
$$\psi_0 = (\ln 10)kT/nq (pC_{pcn} - pC)$$
 - ✓ Proportionnalité avec le logarithme pC de la concentration en ions I (Loi de Nernst): $s = (\ln 10)kT/nq$

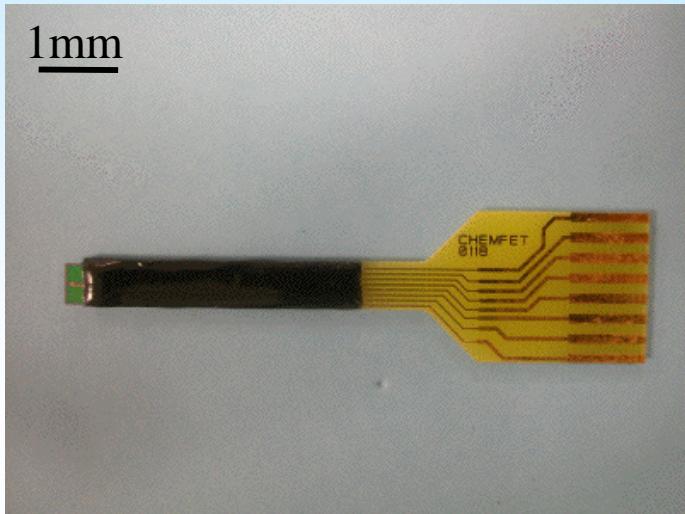
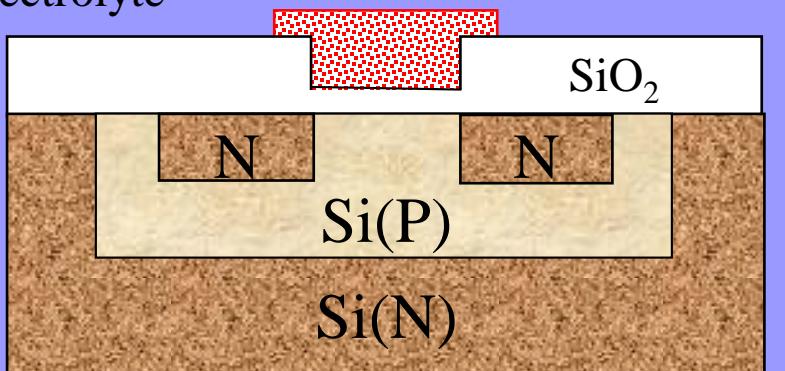


- ChemFET canal N à enrichissement

- ✓ Fonctionnement en saturation: $I_{DS} = K(V_{GS} - V_T^*)^2$
 - ✓ Variation du courant drain-source I_{DS} en fonction de pC pour une tension grille-source V_{GS} constante (ou vice-versa...)

Isolation électrique technologique

électrolyte



➤ Utilisation des techniques de la microélectronique silicium

- ✓ Développement de ChemFETs à isolation par caisson

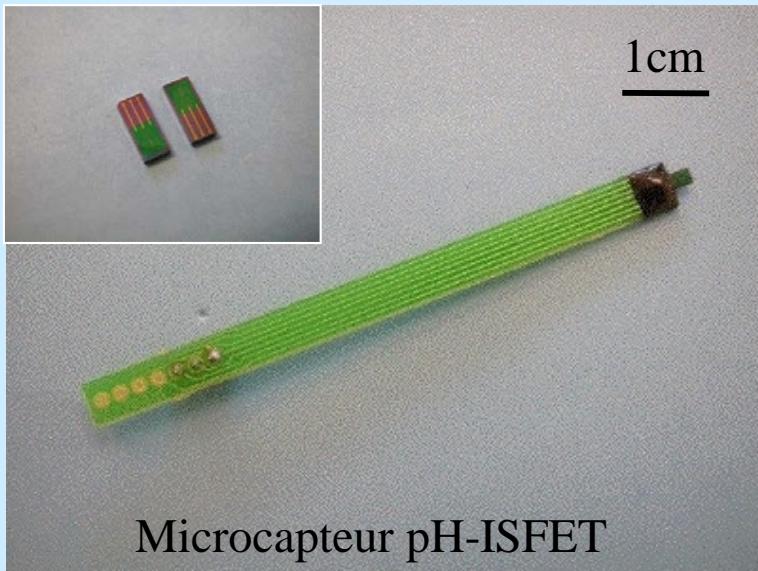
➤ Développement des techniques de conditionnement

- ✓ Report sur circuit imprimé, connectique et encapsulation (époxy, silicone,...)

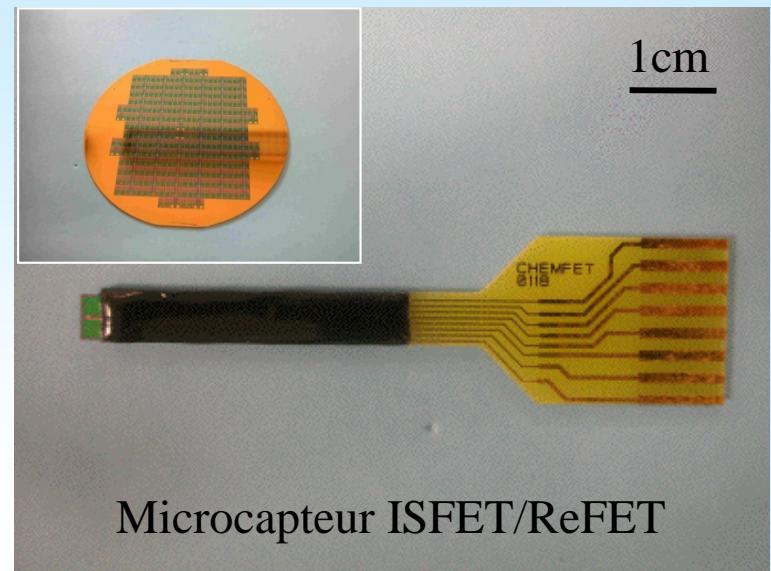
Applications

- **Leit-motiv: détection potentiométrique due à un piégeage d'espèces biochimiques électriquement chargées...**
- Développement (industriel) d'une structure générique de pH-ISFET
 - ✓ Matériau sensible pour la détection de l'ion H⁺: le nitre de silicium Si₃N₄
 - ✓ Autres matériaux sensibles pour la détection de l'ion H⁺: Al₂O₃, Ta₂O₅,...
- Développement d'ISFETs
 - ✓ Intégration de matériaux sensibles et/ou d'ionophores
 - ✓ Détection des ions K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, Cl⁻,...
- Développement des pH-ISFETs pour les applications biochimiques
 - ✓ Développement des techniques de pH-ISFET-métrie
 - ✓ Suivi de réactions enzymatiques à variation de pH: vers la notion d'EnFETs...

Technologie générique de pH-ISFET



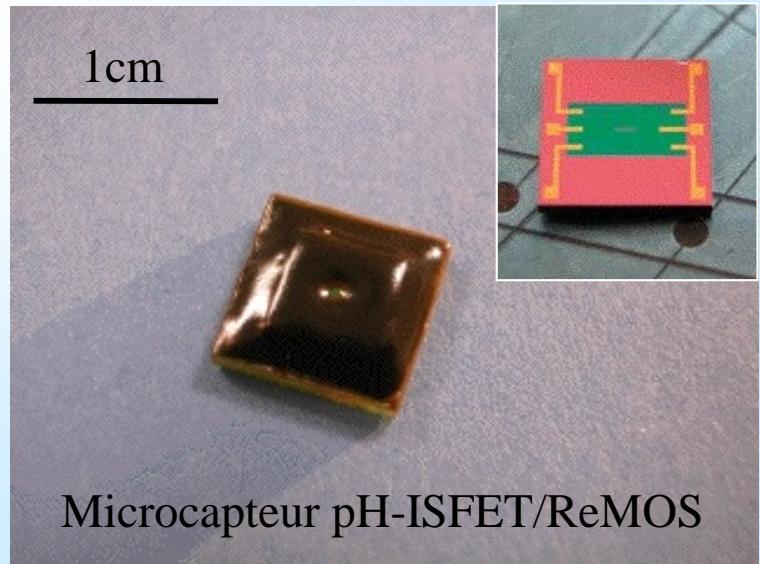
Microcapteur pH-ISFET



Microcapteur ISFET/ReFET

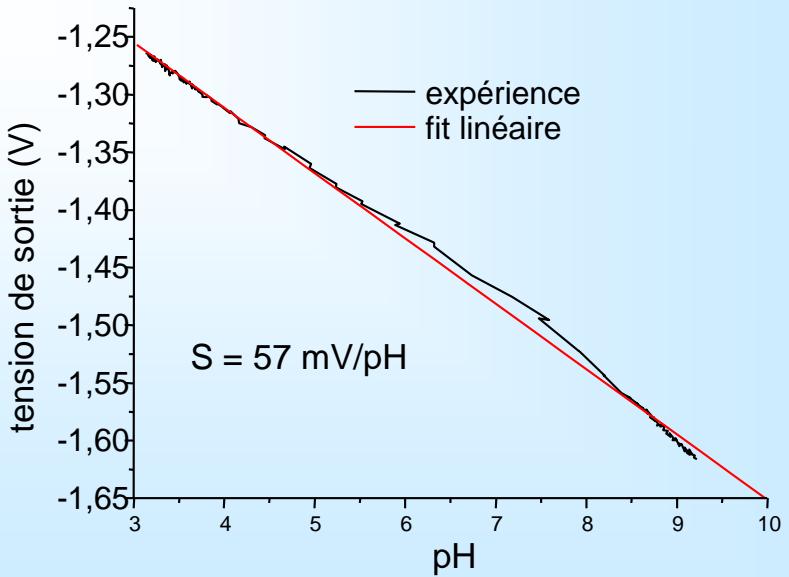
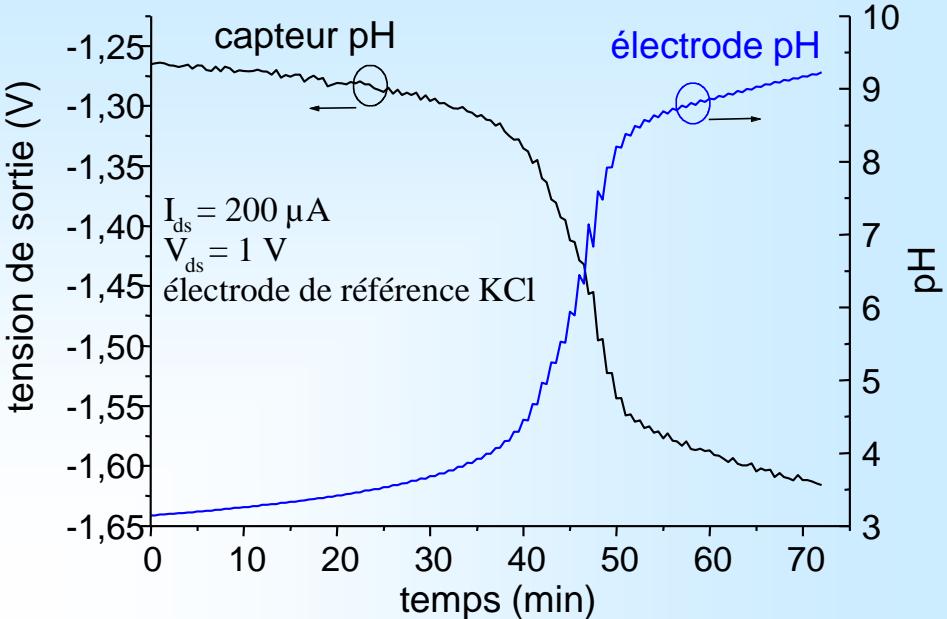
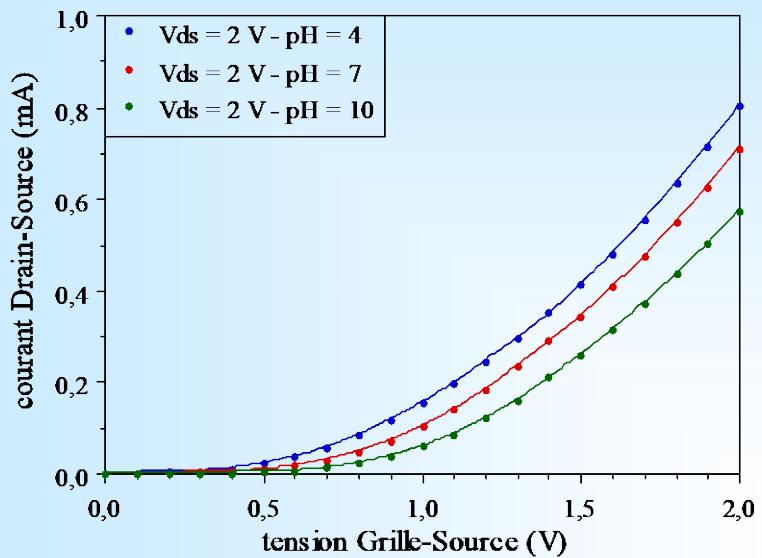
➤ Développement de N-pH-ISFETs

- ✓ Substrat type N (oxyde de champ de 800 nm)
- ✓ Isolation par caisson P (anneau de garde P+)
- ✓ Technologie canal non préformé et préformé
- ✓ Longueur de grille: 10 - 30 microns
- ✓ Grille: SiO_2 (30nm)/ Si_3N_4 (80nm)
- ✓ Métallisations Ti/Au
- ✓ Report, câblage, encapsulation et conditionnement à la phase liquide



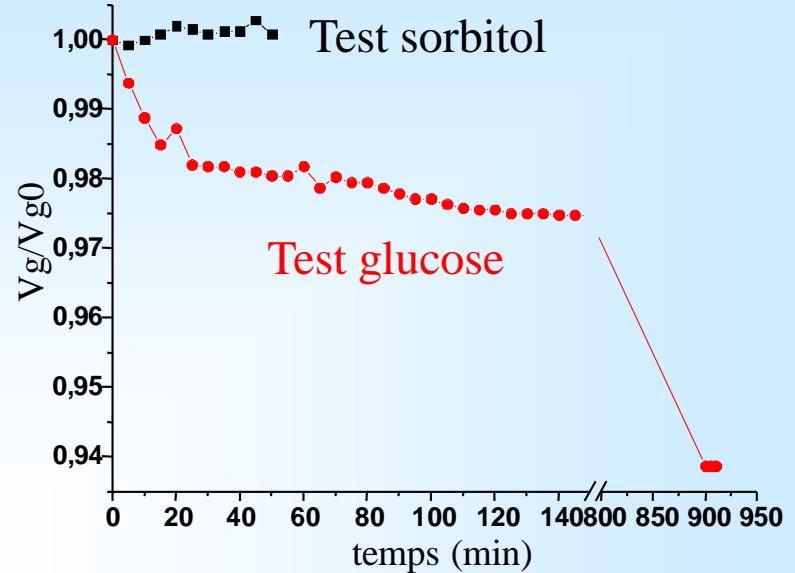
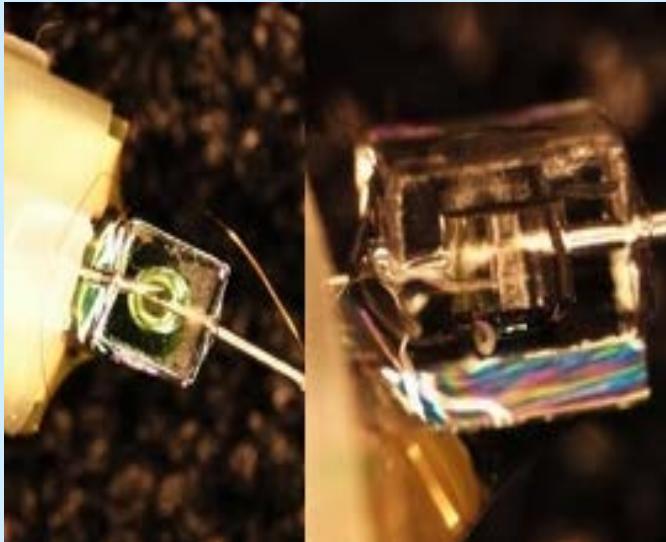
Microcapteur pH-ISFET/ReMOS

Mesure du pH



- Caractérisation I(V)
- Mesure en temps réel des variations de la tension de seuil du pH-ISFET

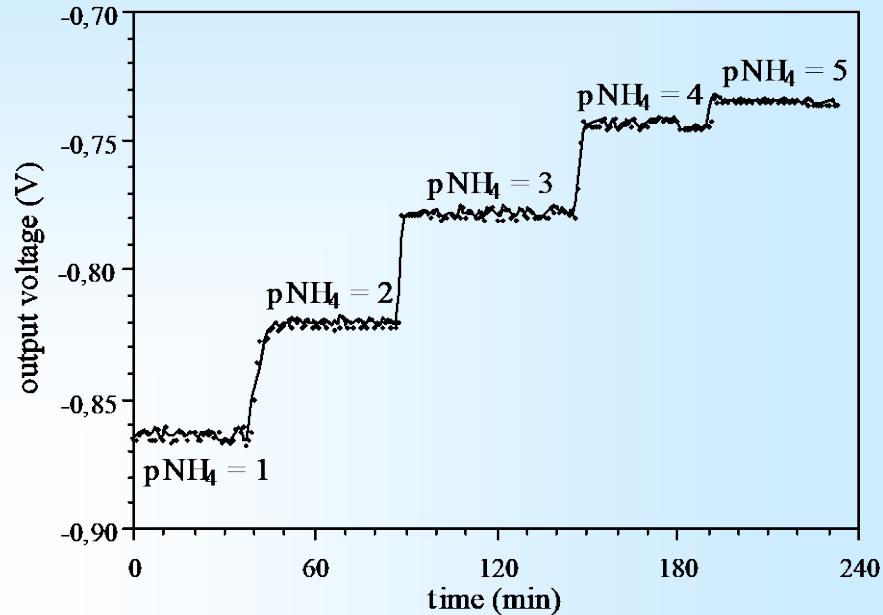
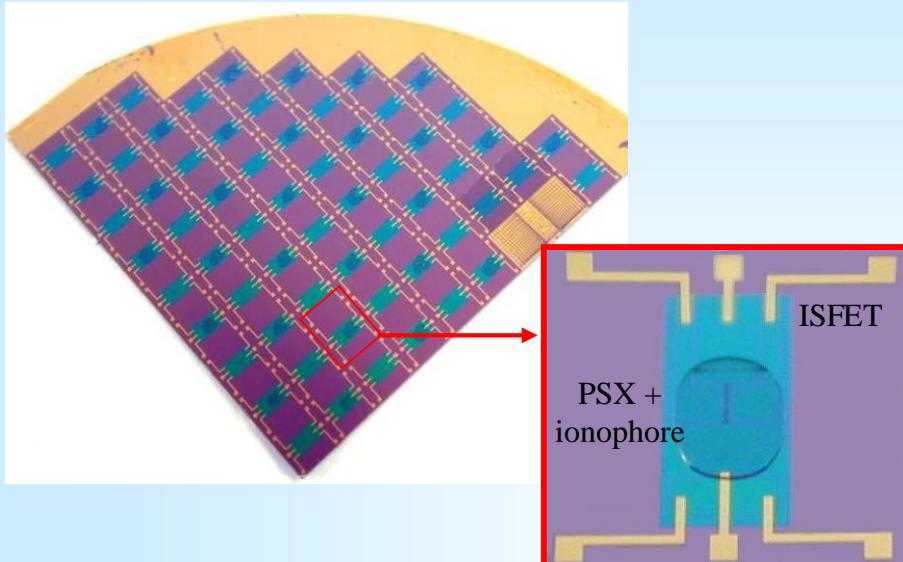
Techniques de pH-ISFET-métrie



➤ Détection de l'activité de *lactobacillus acidophilus* par mesure de pH dans des microvolumes

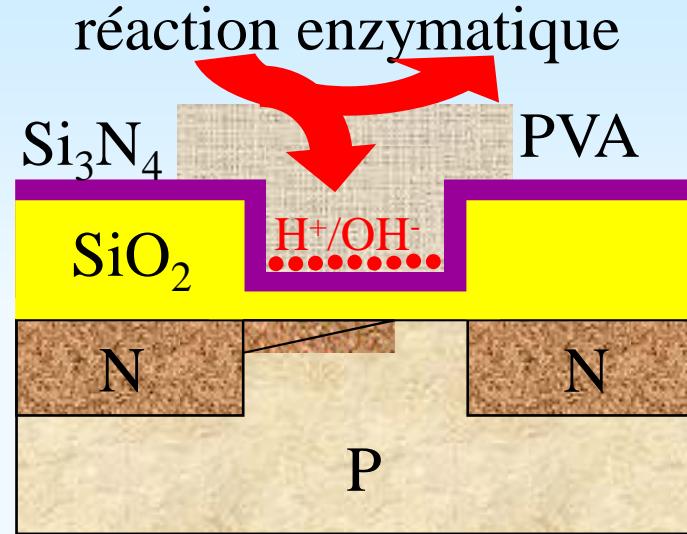
- ✓ Diminution du volume d'analyse ($\approx 1 \text{ mm}^3$ voire moins...)
- ✓ Diminution du temps de réponse: $d\text{pH}/dt \propto a/V$ où « a » est l'activité bactérienne
- ✓ Consommation de glucose: fabrication d'acide lactique et variation du pH (< 1>)
- ✓ Non-consommation de sorbitol: pas de variation de pH (< 0>)

Application à la détection d'ions



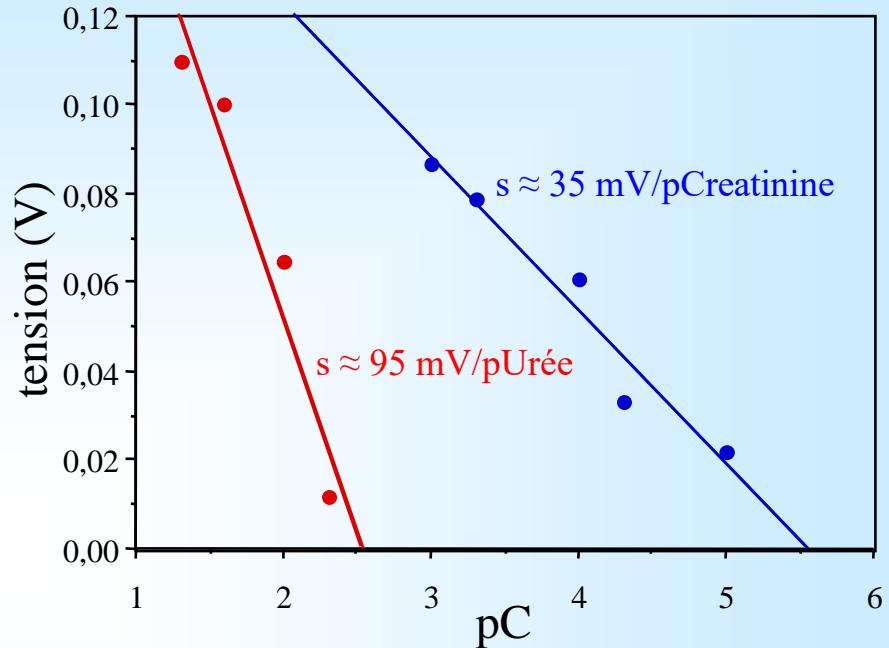
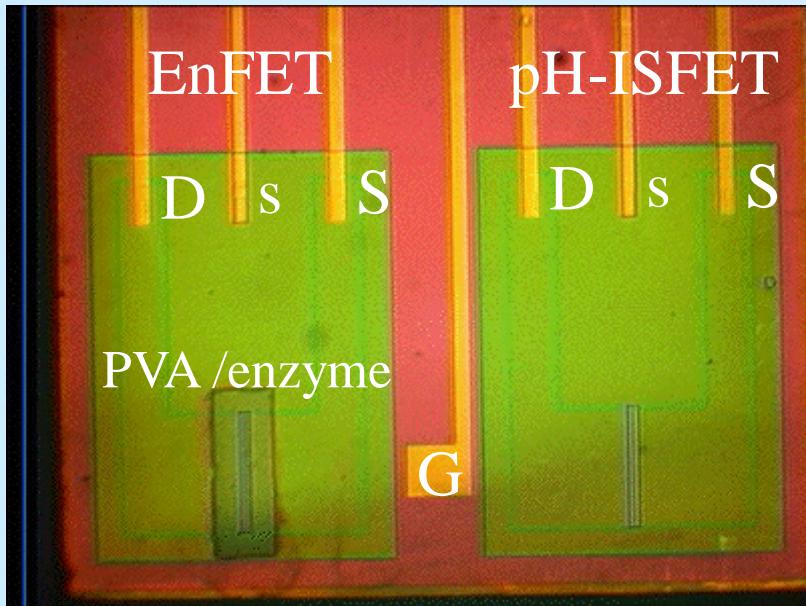
- Fabrication collective de couches ionosensibles à base de polysiloxane (PSX) par dépôt à la tournette et photolithographie UV
- Réalisation d'ISFETs pour la détection de l'ion ammonium NH_4^+
 - ✓ Utilisation de la nonactine en tant qu'ionophore
 - ✓ $p\text{NH}_4$ -ISFET: 45 mV/ $p\text{NH}_4$ dans la gamme de $p\text{NH}_4$ [1 - 4]

Application à la biochimie



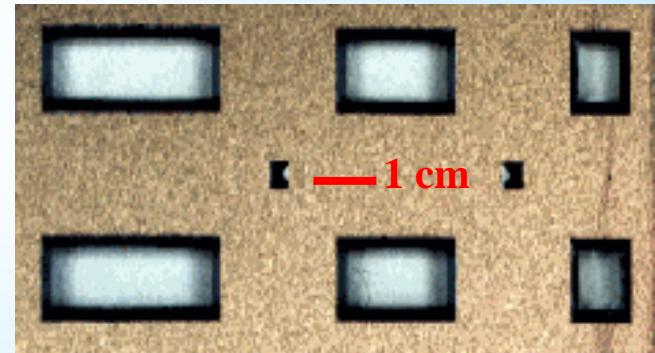
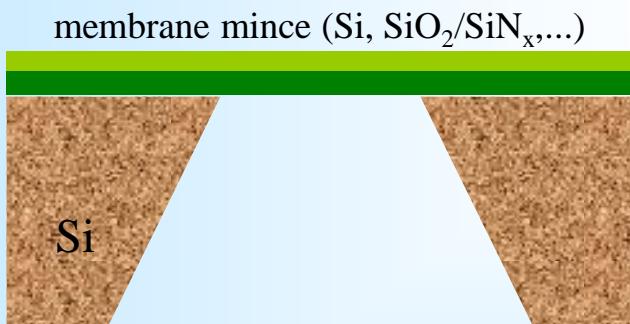
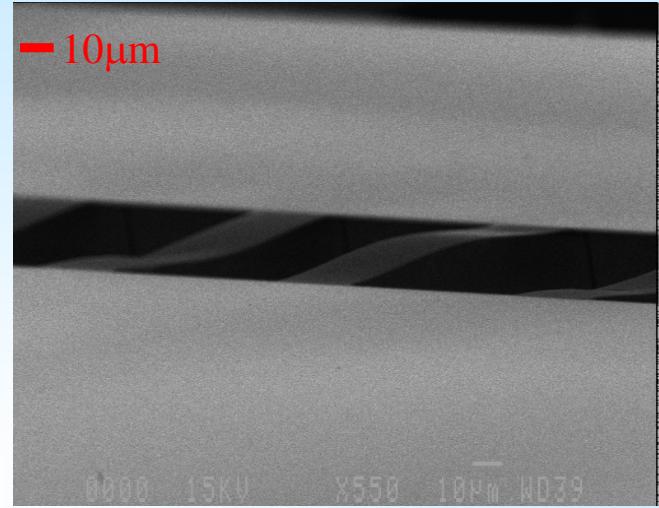
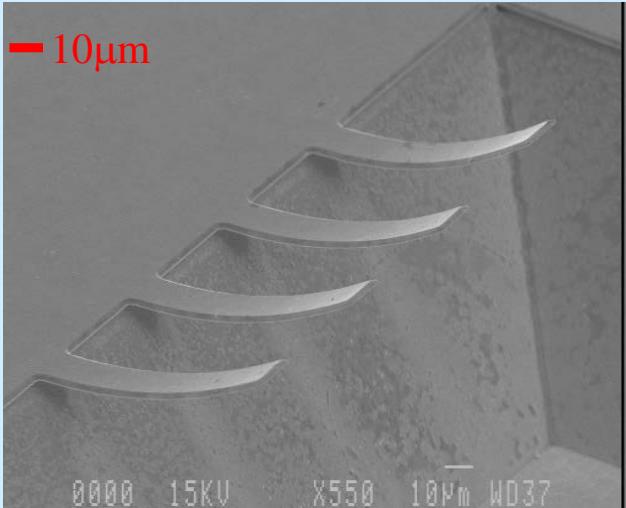
- Intégration de couches enzymatiques en poly vinyl alcool (PVA) sur la grille du pH-ISFET: développement d'EnFETs
- Utilisation de réactions enzymatiques à variation de pH pour la détection d'espèces chimiques et biochimiques
 - ✓ Uréase: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (urée) + $\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$
 - ✓ Créatinine déiminase: créatinine + $\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{N-méthyl-hydantoïne} + \text{NH}_3$
 - ✓ Autres hydrolases...

Application à l'hémodialyse



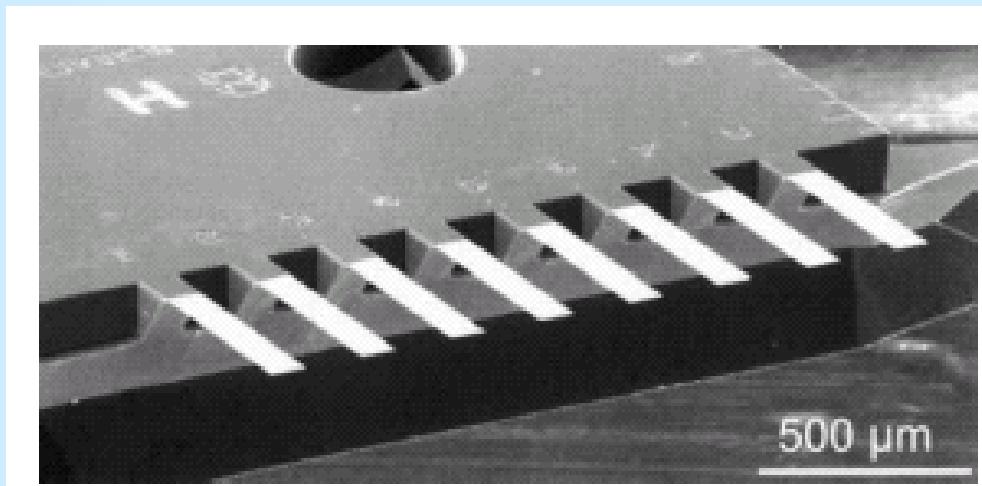
- Réalisation d'EnFETs pour la détection de l'urée et de la créatinine
 - ✓ Uréase-EnFET: 95 mV/pUrée dans la gamme [5 - 50 mmol/L]
 - ✓ Crétatbine-déiminase-EnFET: 35 mV/pCrétatbine dans la gamme [0,01 - 1 mmol/L]
- Limitations liées à la durée de vie et au stockage des enzymes

Utilisation des MEMS pour la détection chimique

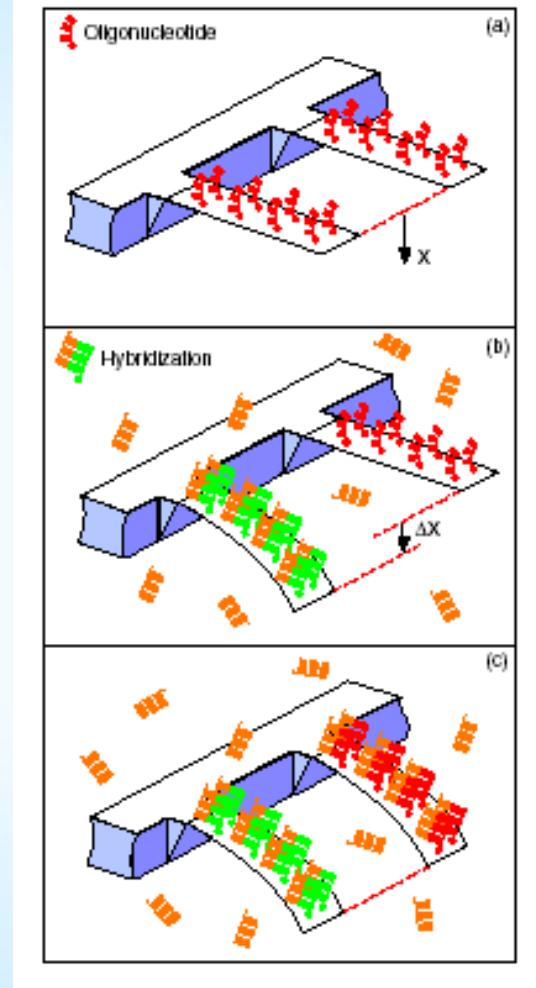


- Utilisation de microstructures mécaniques (microlevier, micropoutre, membrane micronique) pour la détection biochimique/biologique

Détection en statique



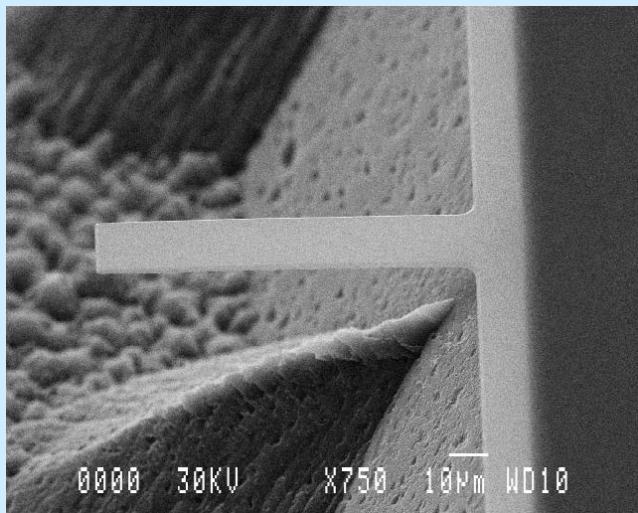
Fabrication de micropoutres
(IBM Zurich Research laboratory)



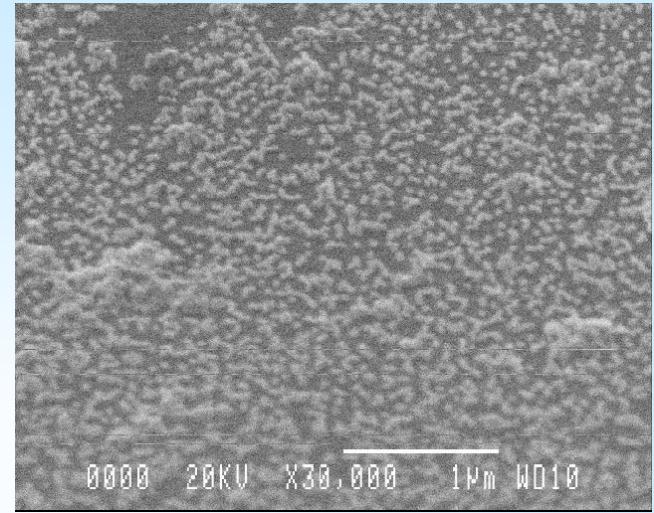
➤ Principe de détection

- ✓ Contraintes mécaniques $\delta\sigma$ induites par une interaction biochimique et/ou biologique
- ✓ Déformation des microstructures mécaniques δz proportionnelle à $\delta\sigma$

Détection en dynamique



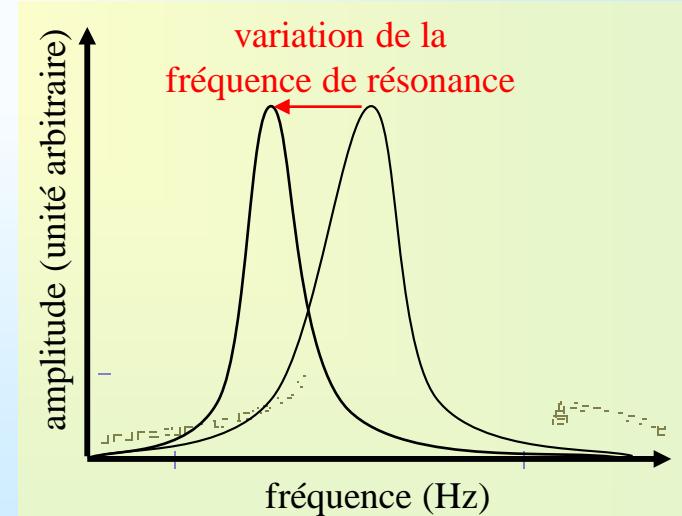
Fabrication de micropoutres
(bicouche SiO₂/Au)



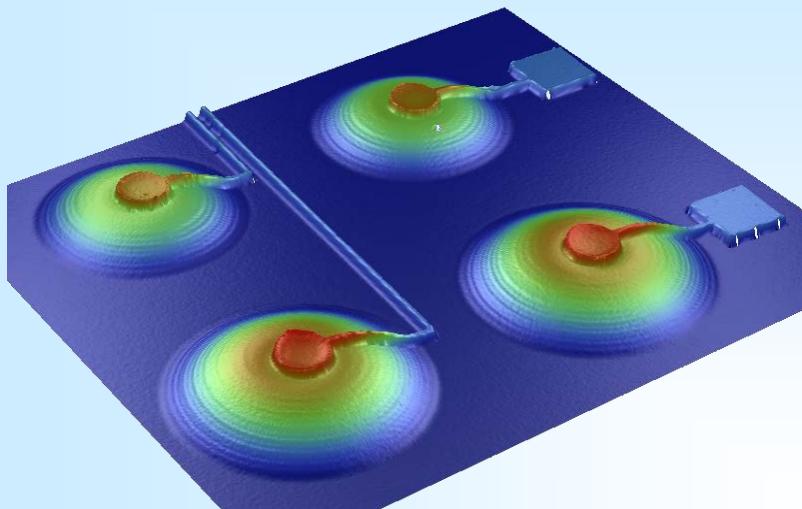
Fonctionnalisation biochimique du film d'or
et adsorption de colloïdes d'or ($f \approx 40\text{nm}$)

➤ Principe de détection

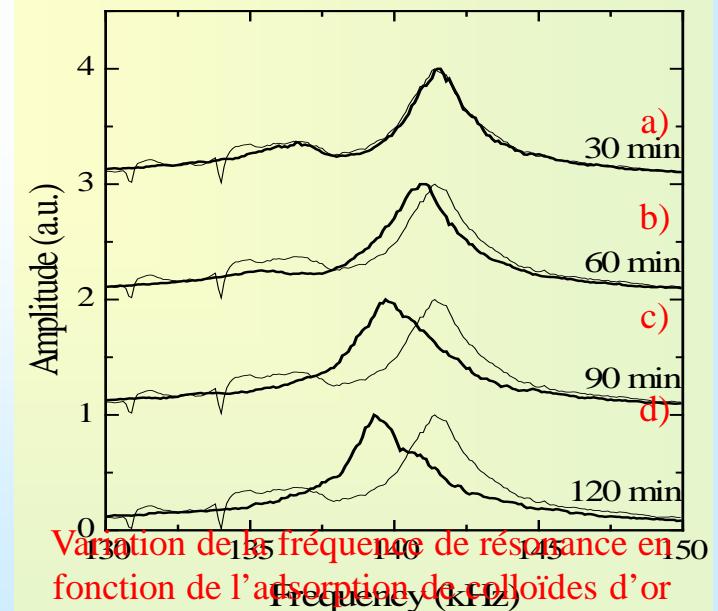
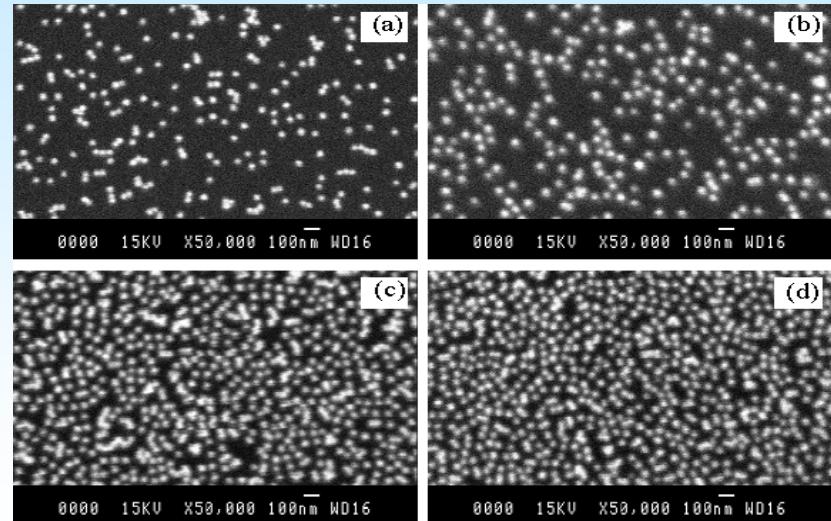
- ✓ Variation de masse δm due à une interaction biochimique et/ou biologique
- ✓ Variation de la fréquence de résonance δf proportionnelle à $\delta m/Q$ où Q est le facteur de qualité du résonateur



Actionnement et détection en dynamique



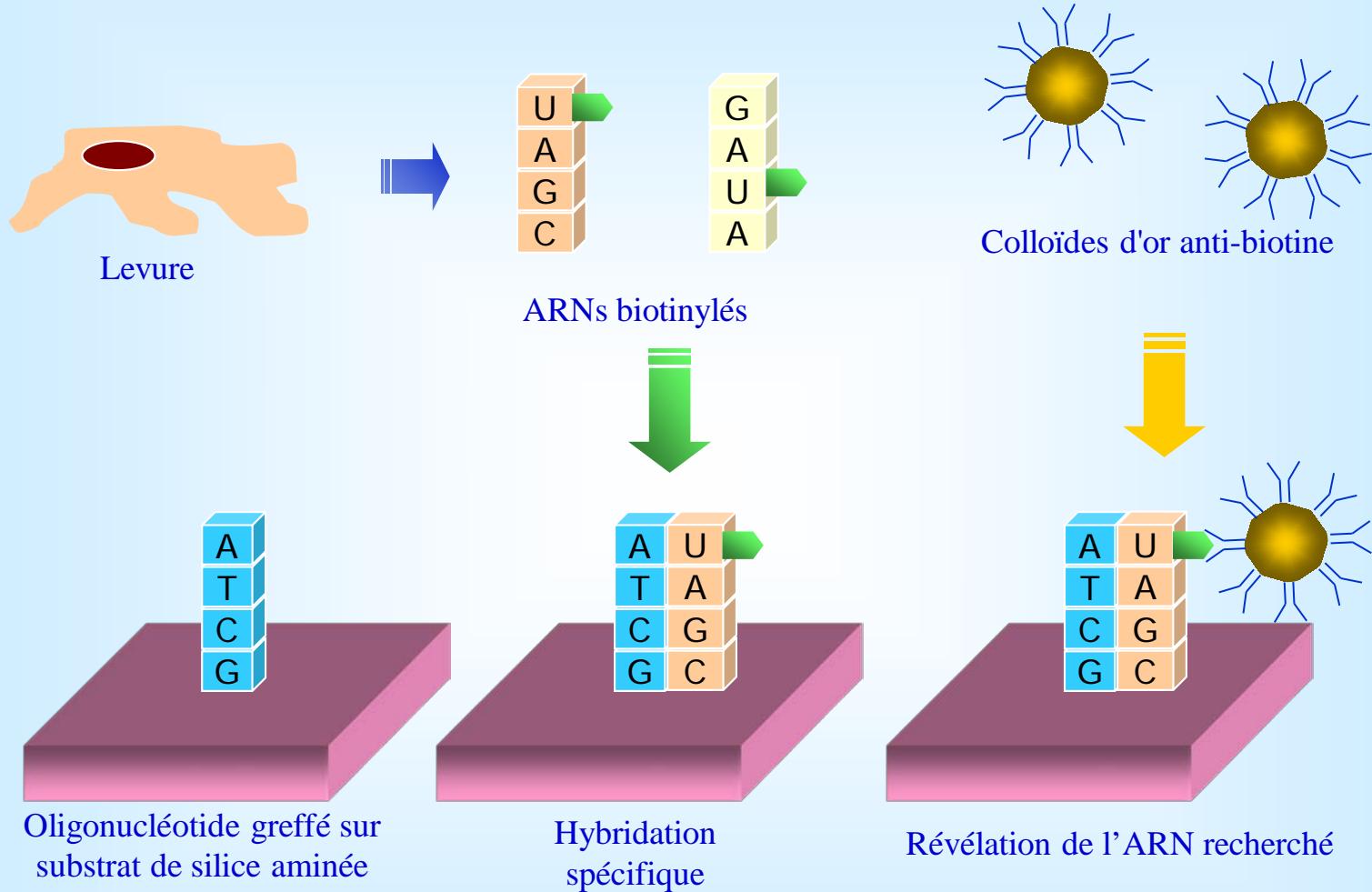
Fabrication de membranes piezoélectriques
(image par profilométrie optique)



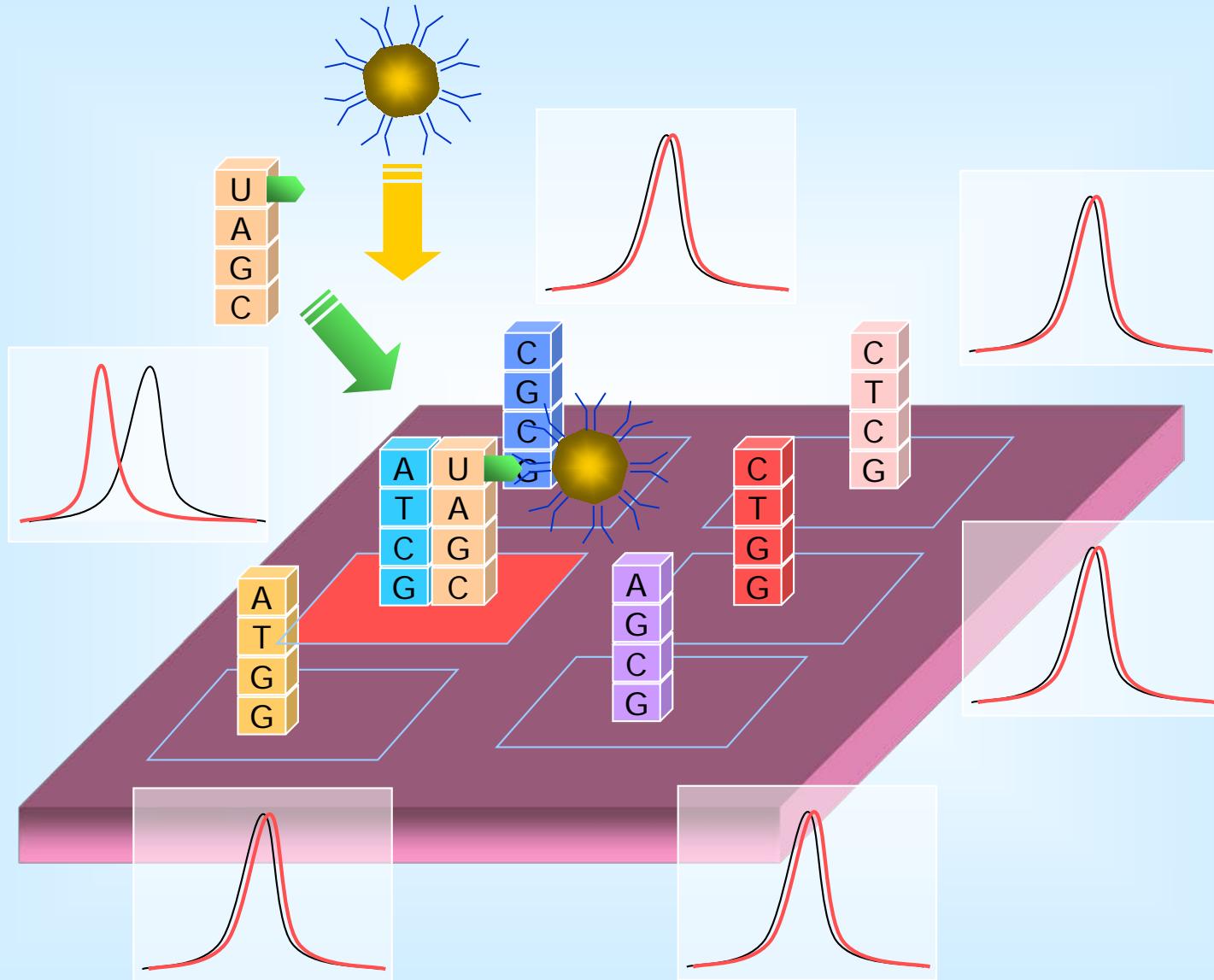
➤ Principe de détection

- ✓ Variation de masse δm due à une interaction biochimique et/ou biologique
- ✓ Variation de la fréquence de résonance δf proportionnelle à $\delta m/Q$ où Q est le facteur de qualité du résonateur

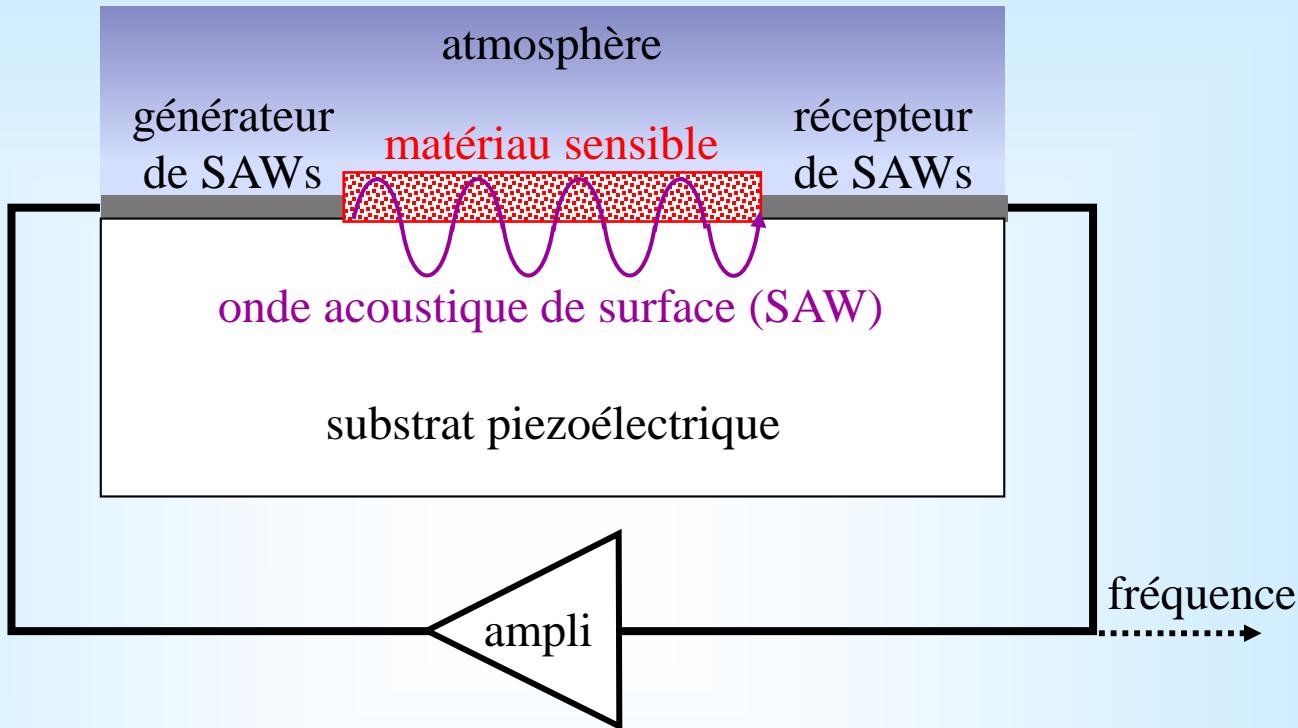
Application: vers la biopuce...



Application: vers la biopuce...



Présentation des capteurs à ondes acoustiques



➤ Principe de détection

- ✓ Propagation d'une onde acoustique de surface SAW dans un matériau piezoélectrique (quartz SiO_2 , céramiques perovskites: BaTiO_3 , LiNbO_3 , PbZrTiO_3 ,...)
- ✓ Retard et/ou atténuation de l'onde acoustique de surface en présence d'une espèce chimique: réalisation d'une ligne à retard chimiquement sensible
- ✓ Détection fréquentielle: développement d'oscillateurs à ondes élastiques

Mode de propagation des ondes SAWs

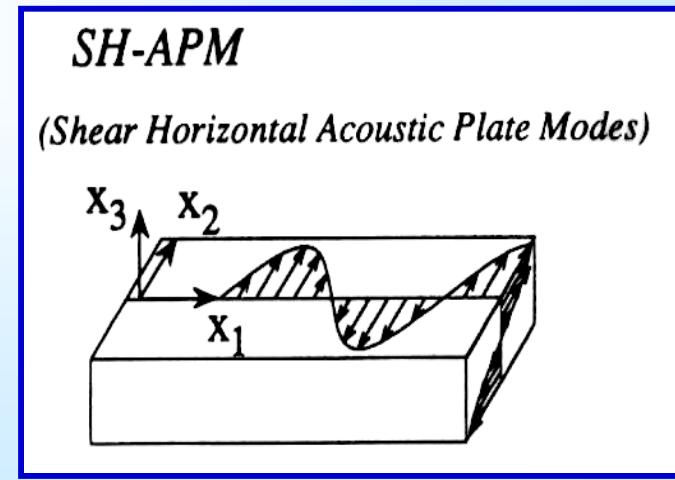
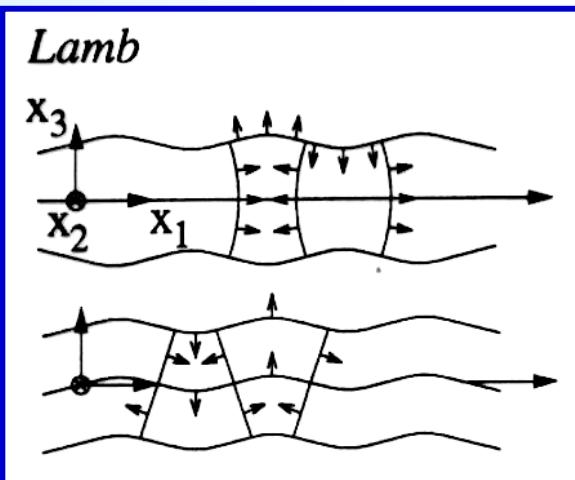
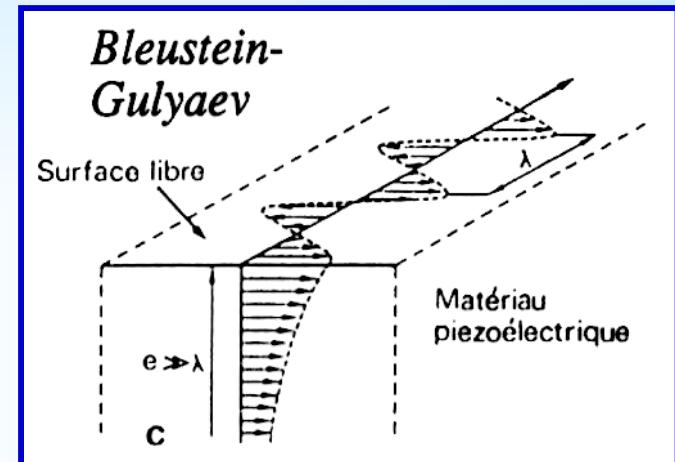
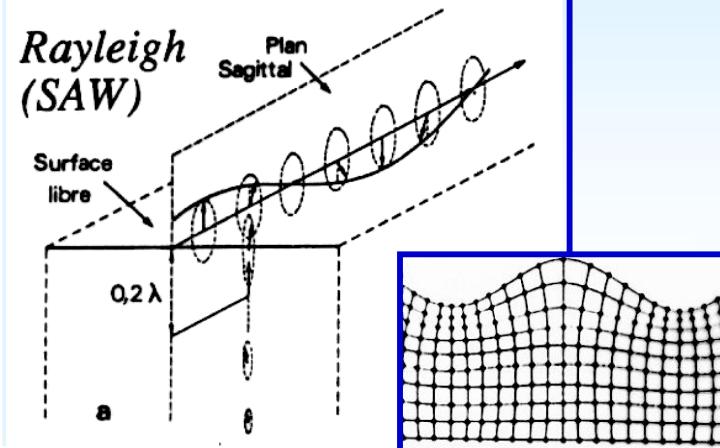
Polarisation

substrat
semi-infini

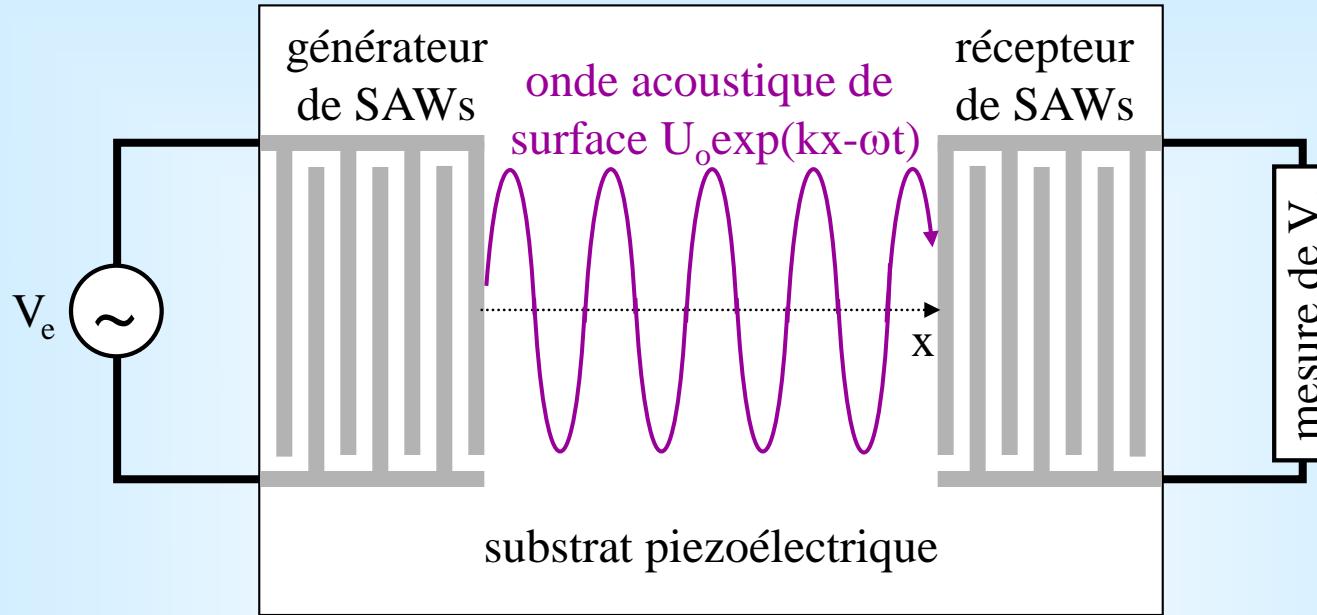
substrat mince
(membrane)

Transverse Verticale
+ Longitudinale

Transverse Horizontale
(utilisable en milieu liquide)



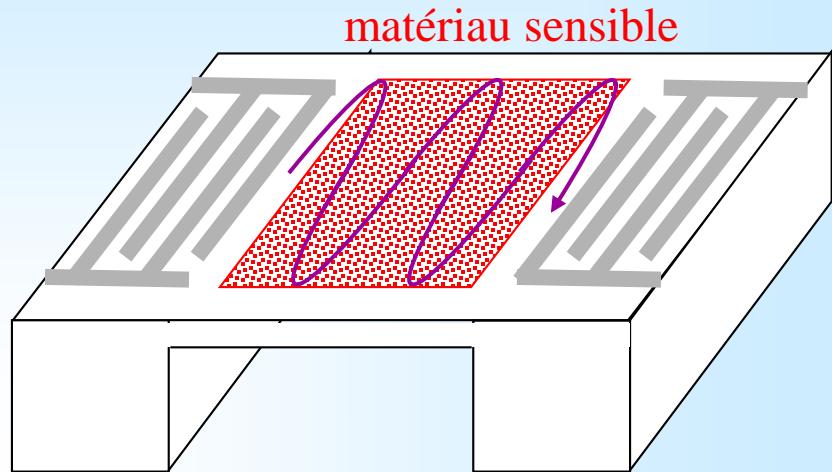
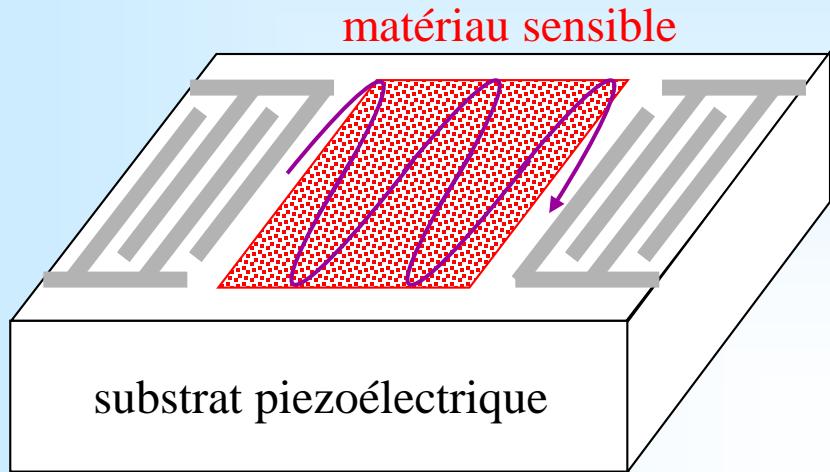
Générateurs/récepteurs intégrés d'ondes SAWs



➤ Développement de micro-électrodes métalliques interdigitées (généralement en aluminium)

- ✓ Corrélations entre les géométries de la micro-électrode et du substrat: définition du mode de propagation et de la direction de l'onde
- ✓ Distance entre doigts: définition du vecteur k de l'onde
- ✓ Polarisation par la tension alternative V_e : définition de la pulsation ω de l'onde

Intégration des capteurs à ondes acoustiques



- Développement sur substrat piezoélectrique massif (onde de Rayleigh, onde de Bleustein-Gulyaev)
- Développement sur membrane piezoélectrique (onde de Lamb, onde de cisaillement horizontal plane)
 - ✓ Usinage localisé du substrat piezoélectrique

Les MicroCapteurs de Gaz : Contexte International

Marché:

- Industrialisation capteurs **MOX** (Sensibles, peu couteux, instables, peu sélectifs)
- Intégration/Miniaturisation des **détecteurs IR** (sélectifs, chers, forte consom.)
- Développement de capteurs **SAW** (sensibles, difficiles à conditionner et à exploiter, consom. élevée)
- Développement marginal de capteurs MEMS : **cantilever** (très sensibles, peu robuste, consom. élevée pour les résonnantes, peu sélectifs)

Recherche:

- Bcp de développement de capteurs MOX : **Nx matériaux Nanostructurés** (NP, NF, NB, avec CNT, quantum dots, composites, dopages,...)
- Matrices de capteurs, **nez électroniques** (sélectivité)
- MEMS, **NEMS** (cantilevers, fonctionnalisation en matrice)
- **Capteurs à Tamb** : calorimétriques / fluorescents, cataluminescence (faible sensibilité)

Les Objectifs en Recherche

- Miniaturisation
- Sensibilité : Détection de traces (limites de détection)
- Sélectivité (contrôle de la sensibilité)
 - Matériaux
 - Multicapteurs
 - Mode de fonctionnement
- Technologie robuste et à faible coût
- Capteurs embarqués communicants ...
 - Mode de Fonctionnement multicapteurs
 - Electronique adaptée
 - Autocompensation des dérives
 - Gestion de la consommation
 - Stockage des données
 - Traitement des données capteurs (local ou pas)
 - Communication

Différentes possibilités de Transduction pour la détection de Gaz

- Modification d'une tension seuil de T MOS (**GasFET**)
- Variation ou transfert d'énergie (**Pellistors**)
- Modification d'une onde (**SAW, BAW, Optique, RF**)
- Transfert de charges (réactions oxydo-réduction)
=> variation de conductivité ou d'impédance (**MOX**)
- Modification de masse ou volume (**QMB**, capt. Polym)
- Absorption optique (**capteurs IR**)
- ...

MOX Functioning Principle

- Principe:

- Adsorption – Désorption de gaz à la surface de la couche sensible par chauffage de ce matériau (température > 200°C)

⇒ Variation de la conductivité de l'élément sensible

At high temperatures:

Phase 1: Oxygen Adsorption

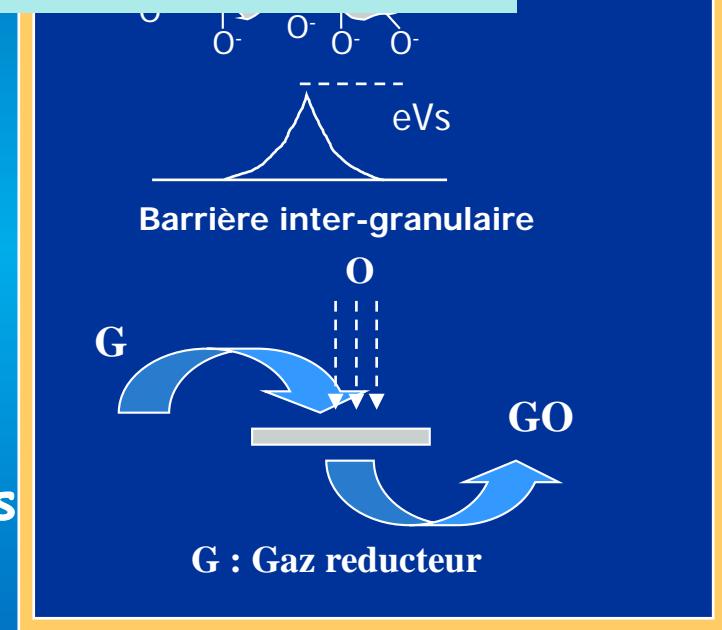


Phase 2 : Reaction with reductive gases



➡ ρ decreases

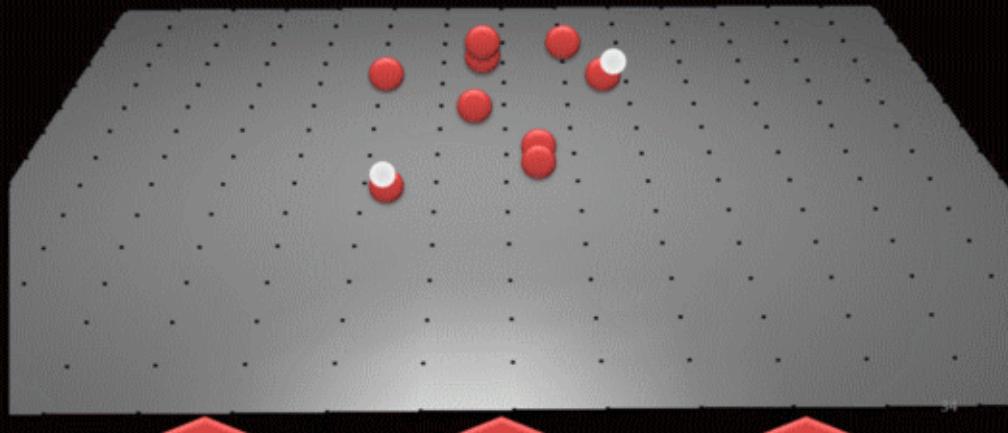
(opposite for oxidative gases)



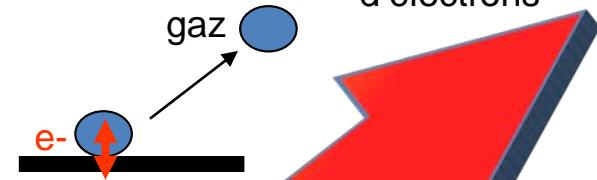
Température > 450°C

Désorption

fonnement MOX

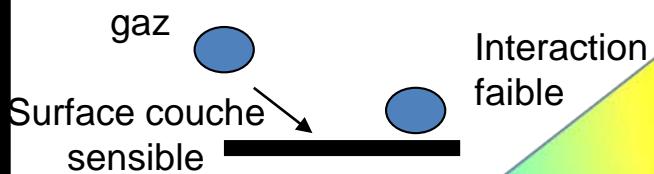


➤ Désorption Consommation ou injection d'électrons



500 – 550°C

➤ Physisorption (<150°C)

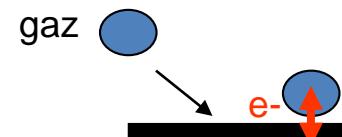


Température ambiante

>
150°C

➤ Chimisorption

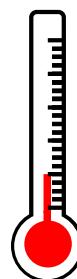
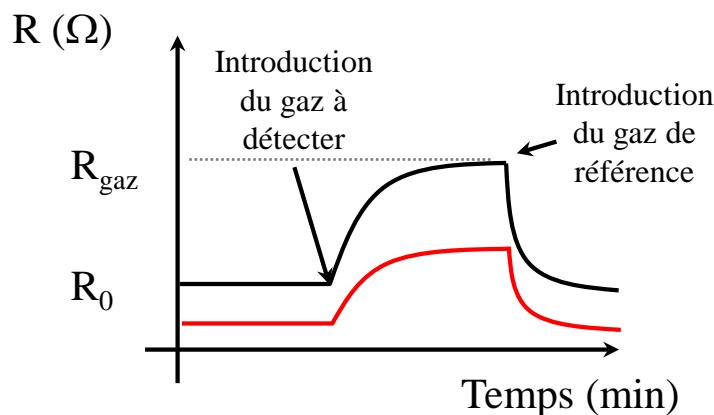
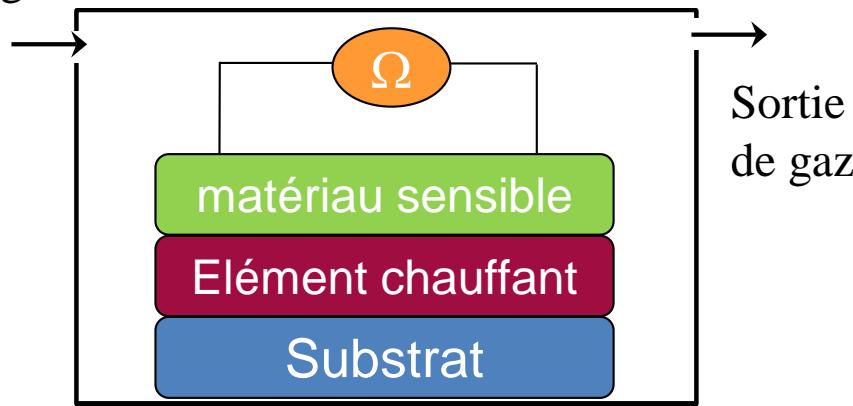
Interaction forte



(Thèse de C. Tropis)

Capteur de gaz conductimétrique ?

Entrée
de gaz



matériaux sensibles

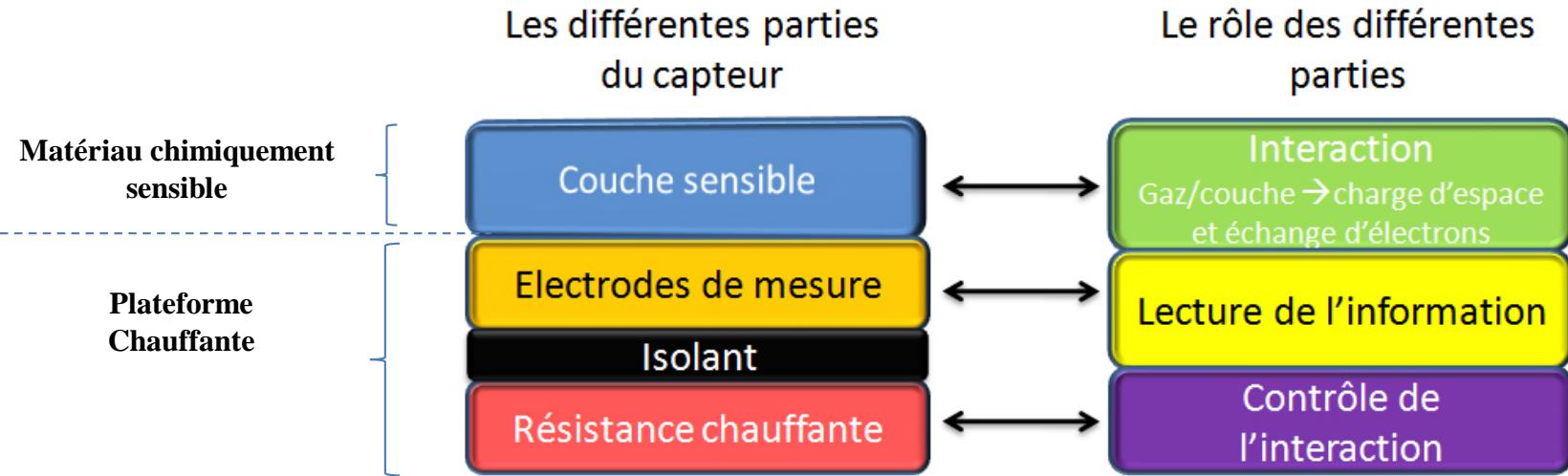
Oxydes métalliques

polymères

composites...

Structure d'un capteur MOX

Schéma Fonctionnel



The “ideal” SC Gas sensor

- **Sensitive layer**
 - Very Porous
 - Great thermo-mechanical stability
 - Integrability with Si technology
- **Plateform (Micro-hotplate)**
 - Heater/membrane : good thermo-electrical efficiency
 - Low consumption
- **Sensor**
 - Good sensitivity (from 1ppm to 1%)
 - Low cost (less than 1€)
 - Selectivity, Stability (long life time up to 10years) and reproducibility
 - Low Response time

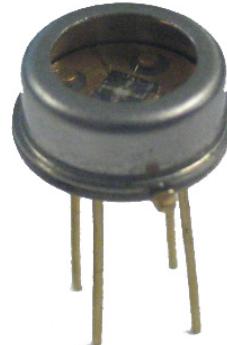


Les capteurs de gaz à base d'oxyde métallique



Avantages:

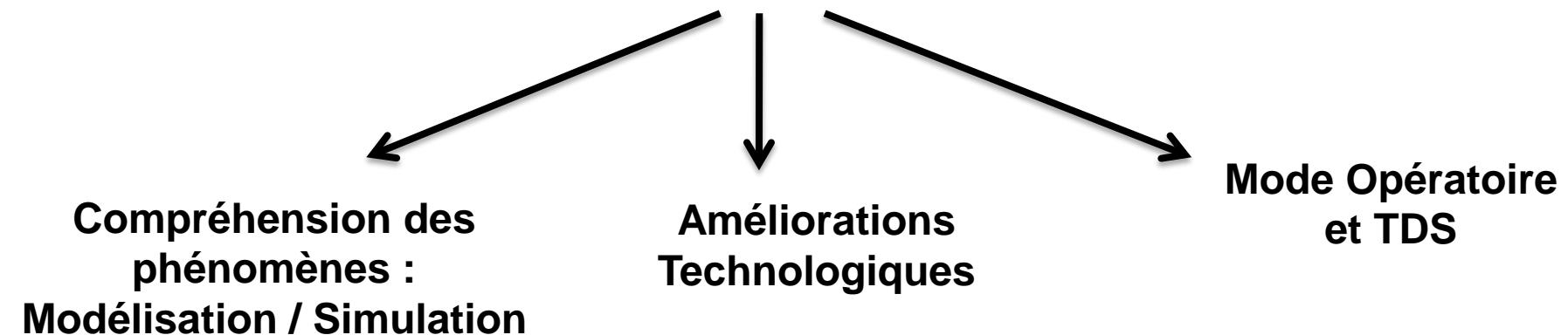
- Simples...
- Bonne sensibilité
- Peu cher



Inconvénients:

- Faible Sélectivité
- Dérive des performances

Besoin d'améliorer les performances



Technologie : Principaux objectifs

- Plateforme Chauffante

- Être capable de monter à **haute température**
- Avoir la meilleure **homogénéité en température** possible
- **Minimiser la consommation** en puissance
- Avoir un **bon comportement thermo-mécanique**
- Si possible avoir **une faible inertie thermique**

Choix :

- structure
- matériaux
- géométrie

- Intégration d'une couche chimiquement sensible

- Procédé compatible avec la technologie de la plateforme chauffante
- **Intégration de manière contrôlée et reproductible**
 - Contrôle en morphologie, géométrie,...

Choix :

- matériau sensible
- procédé de synthèse
- procédé d'intégration





Le capteur de gaz : MOX

2 parties:

- **Plateforme:** résistance chauffante +
Electrodes de mesure
- **Couche sensible**

Couche sensible



Épaisseur < 10μm

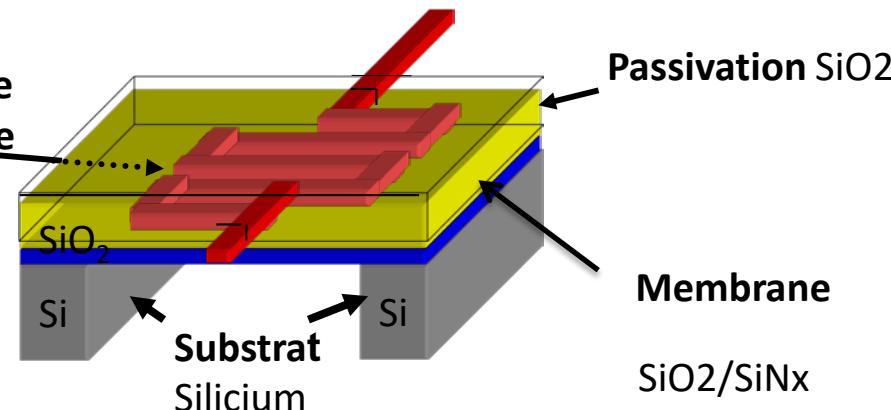
Electrodes

Ti/Pt



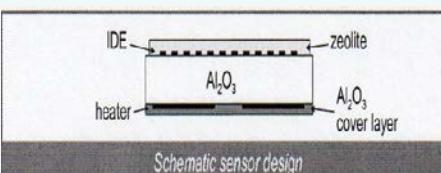
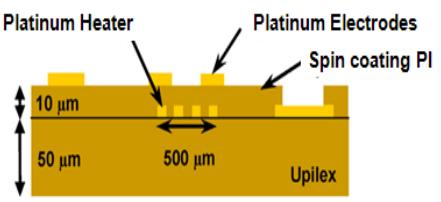
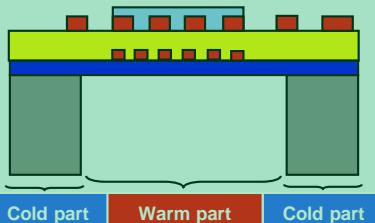
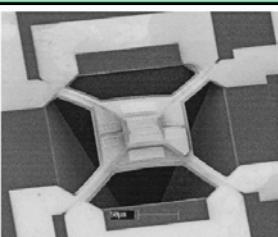
**Résistance
chauffante**

Ti/Pt



“Heater” : Structures Existantes

- “Plateforme chauffante” : résistance chauffante – isolant – électrodes

Structures	Illustrations	Avantages	Inconvénients
Substrat Massif : Isolant céramique (alumine) + 2 métallisations Pt		Simplicité Dispo. commerciale Homogénéité en T° stabilité	Dimensions Puissance consommée Inertie thermique
Substrat Massif : Isolant Polymère + métallisations Pt		Substrat souple	Tmax 350°C Non commercial
Membrane fermée : résistance chauff. Intégrée PolySi ou Ti/Pt		Dispo. Commerciale Faible inertie Robustesse Faible consommation	Homogénéité en T° Dérives
Membrane suspendue : résistance chauff. Intégrée Ti/Pt		Très faible consommation Homogénéité en T°	Non commercial Robustesse - Tmax

PROCÉDÉ TECHNOLOGIQUE

I. Présentation des plateformes du LAAS

II. Amélioration des performances de la plateforme

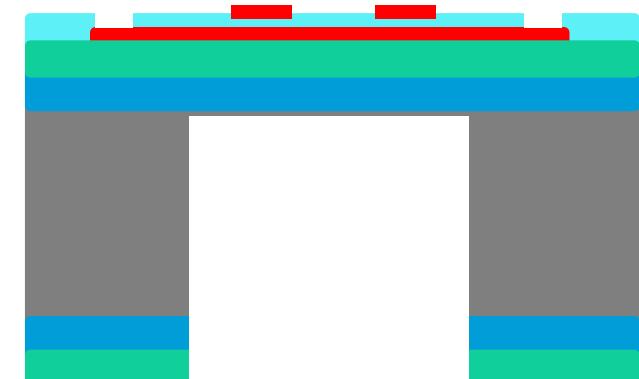
III. Caractérisations

IV. Intégration de l'élément sensible

Conclusions & Perspectives

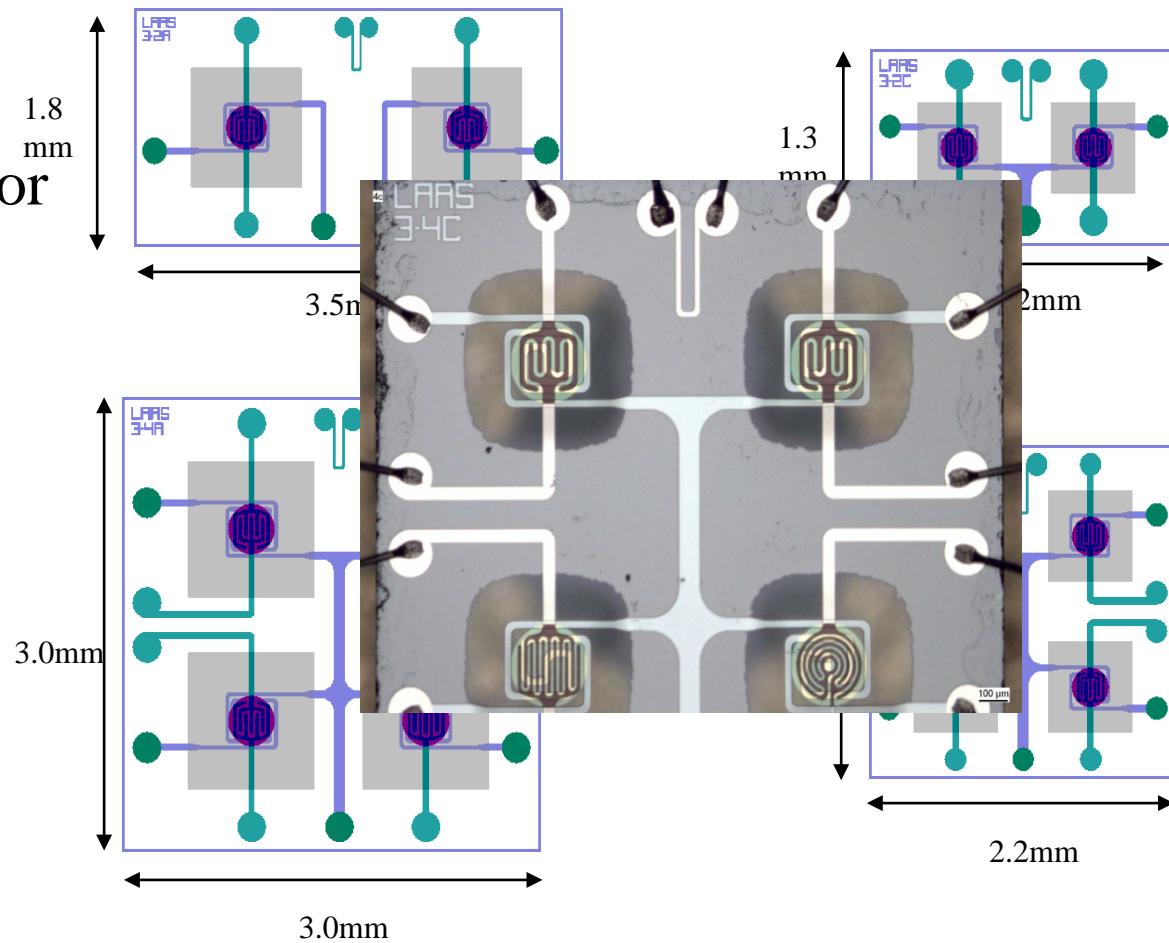
◎ 6 étapes, 4 niveaux de masque (Thèse Habib Chalabi) :

1. Croissance thermique (SiO_2) et dépôt **LPCVD** (SiN_x) : membrane
2. Dépôt **PVD** de résistance chauffante ou heater (Ti/Pt) (évaporation)
3. Dépôt SiO_2 (**PECVD**) : passivation électrique
4. **Gravure humide** de l'oxyde (buffer HF) : ouverture de contact
5. Dépôt **PVD** des électrodes de mesure (Ti/Pt) (évaporation)
6. Libération de la membrane par gravure face arrière :
 - **RIE** $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$
 - **DRIE Si**



Design of Multisensors (membranes and heaters independant)

Double sensor

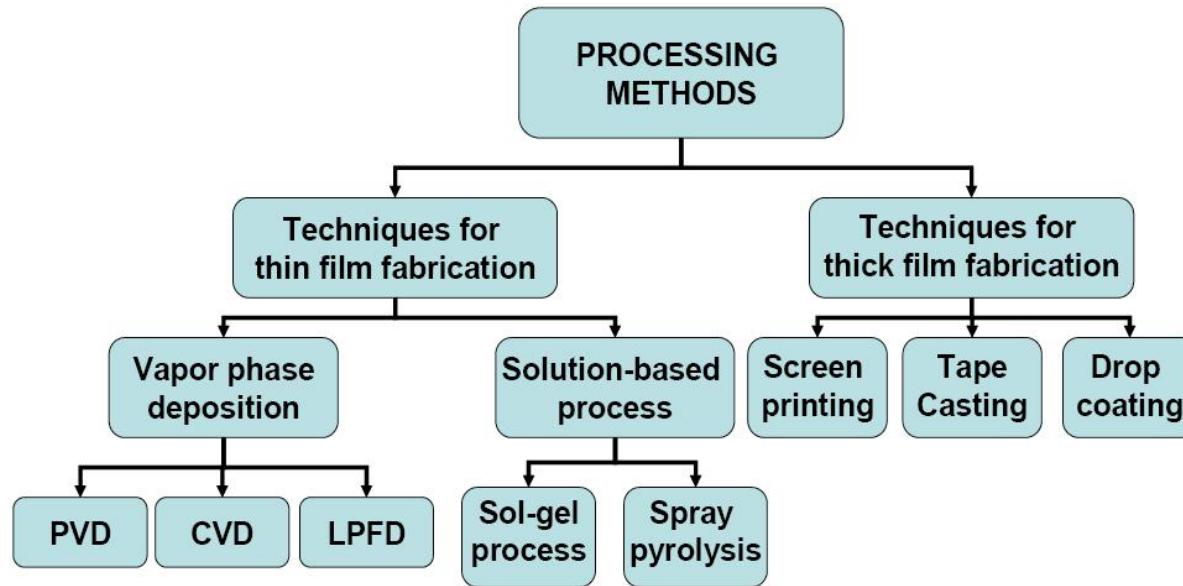


Array of
4 sensors

To go to the smart nose...



Différentes techniques pour l'intégration de couches sensibles



Le choix de la méthode de synthèse du matériau ET la technique de dépôt vont définir :

- Sa morphologie
- Ses propriétés de détection

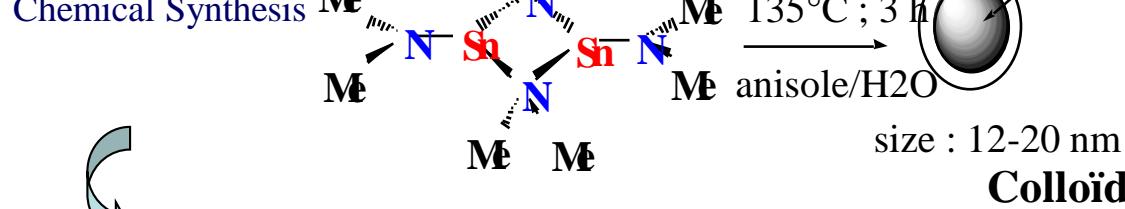


Matériaux Chimiquement Sensibles

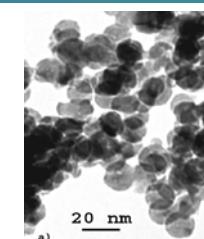
CMC2

LCC-CNRS : nanostructured metal oxides

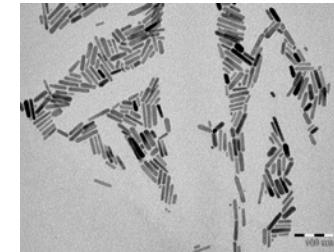
SnO_2 , In_2O_3 , ZnO , RuO_2



Drop deposition by micro-injector



Nanoparticles

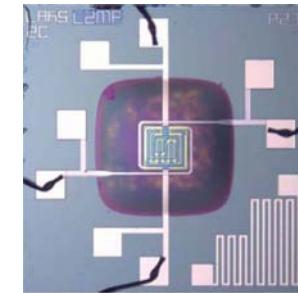


Nanorods

IN2MP-Marseille : WO_3



sputtering (reactive RF magnetron sputtering)
30 nm of thickness



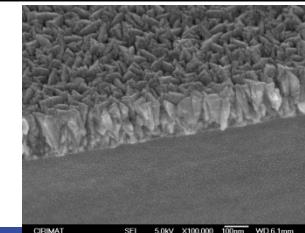
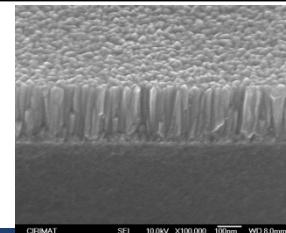
CIRIMAT-Toulouse : AB_2O_4



sputtering

CuFe_2O_4 , ZnFe_2O_4

25 nm of thickness



LAAS

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes



La Rochelle,
3-7 octobre 2011

Jet d'encre : l'équipement du LAAS

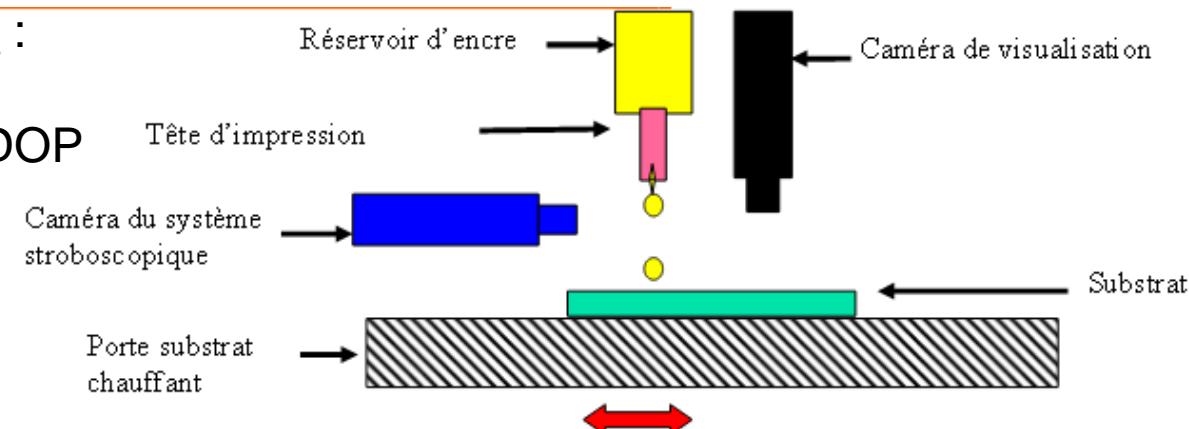
AltaDrop



Contact : Fabien Mesnilgrente / Véronique Conédéra

2 méthodes de dépôt :

- On The Fly OTF
- Drop On Position DOP



Jet d'encre : les différentes étapes

1 Mise en suspension des poudres (savoir-faire du LAAS)

Quantité de poudre < 1g



Solvant : **éthylène glycol** + faible % diéthylène glycol (pour l'homogénéité du dépôt)

Suspension concentrée en poudre : **5 à 10% en masse**

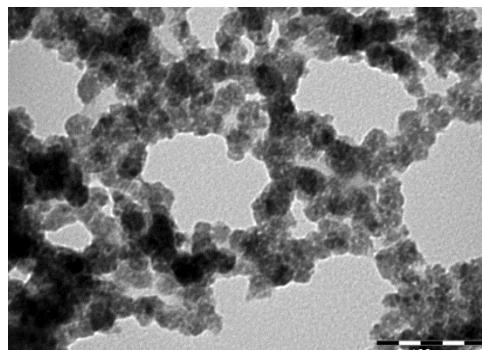
Epaisseur des dépôts :

- Nombre de gouttes déposées
- Concentration de la suspension

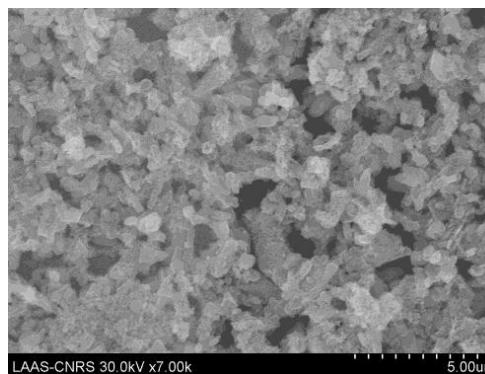
Jet d'encre : les différentes étapes

1 Mise en suspension des poudres

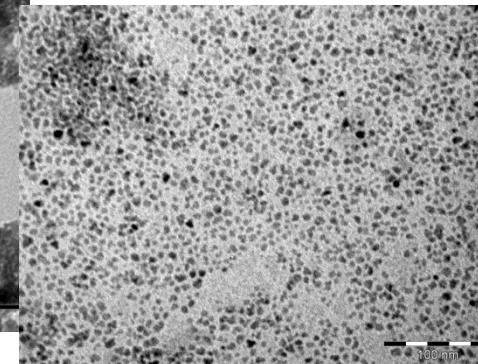
ZnO cailloux



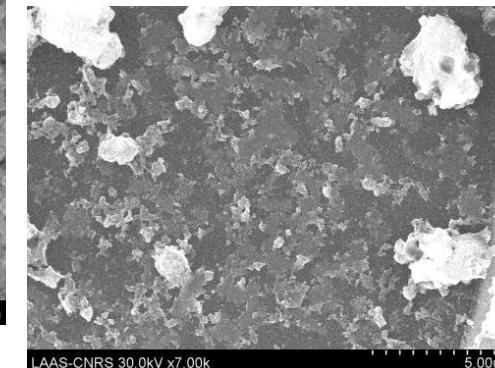
CuO



ZnO isotrope



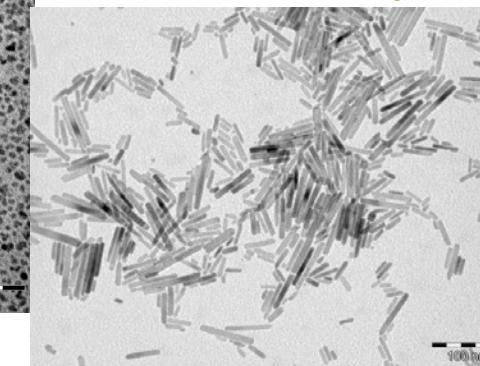
SnO₂



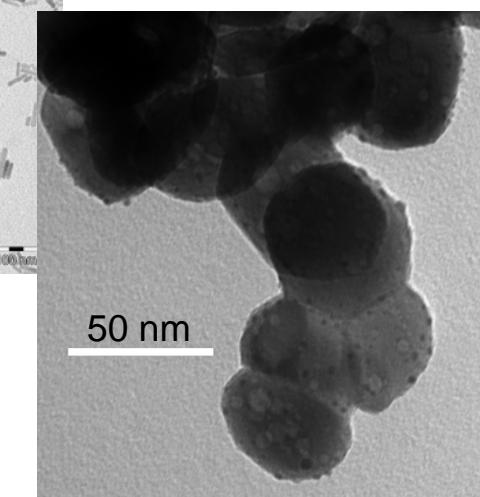
→ Commerciales (ex : ZnO)

Nanoparticulaires synthétisées par un autre laboratoire (LCC)

ZnO anisotrope



Au:ZnO

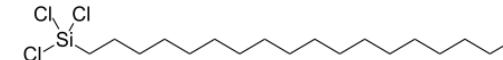


Jet d'encre : les différentes étapes

1 Mise en suspension des poudres (savoir-faire du LAAS)

2 Intégration des matériaux sur plateforme

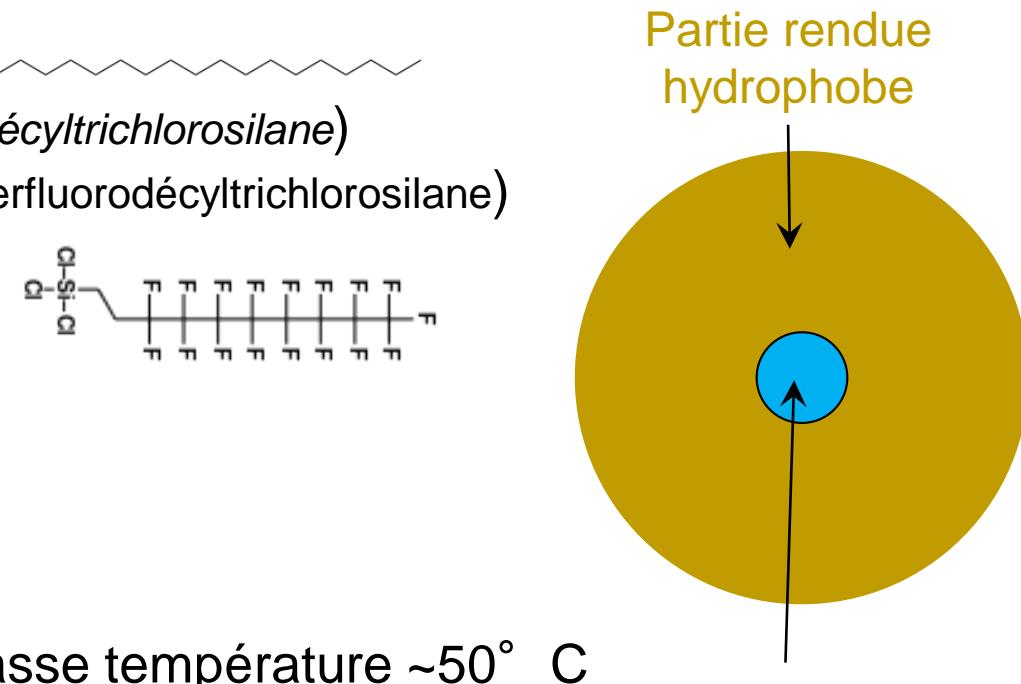
-Traitement de surface



- ❖ phase liquide OTS (*Octadécyltrichlorosilane*)
 - ❖ phase gazeuse FDTs (*Perfluorodécyltrichlorosilane*)

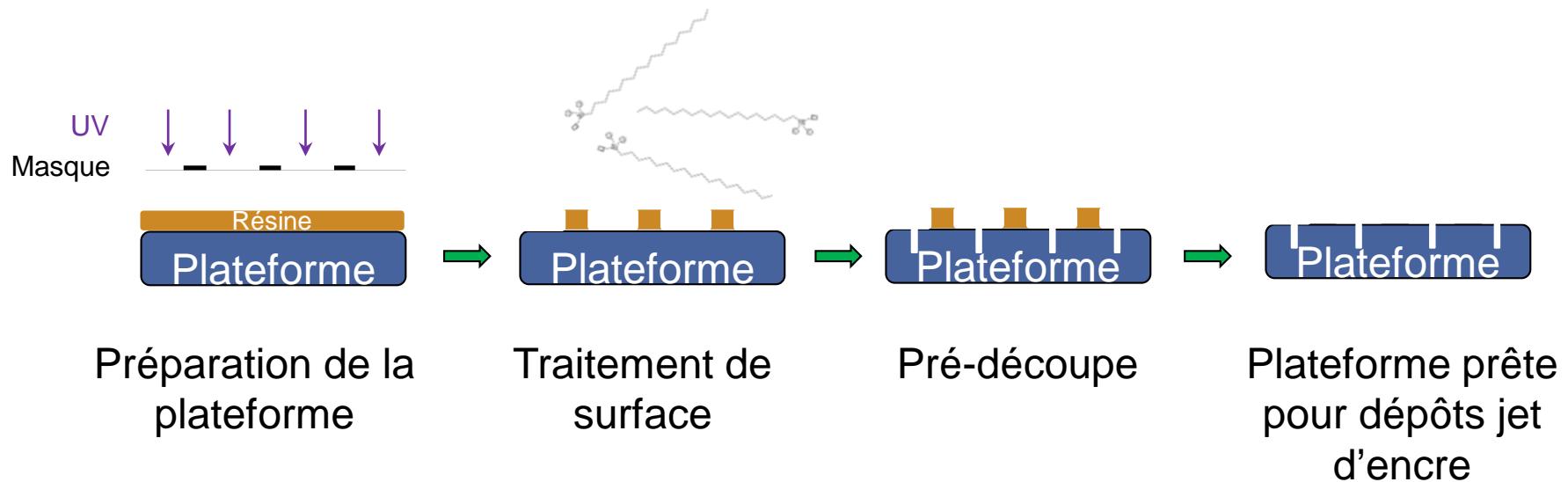
-Dépôts

3 Evaporation des solvants à basse température ~50° C



Jet d'encre : les différentes étapes

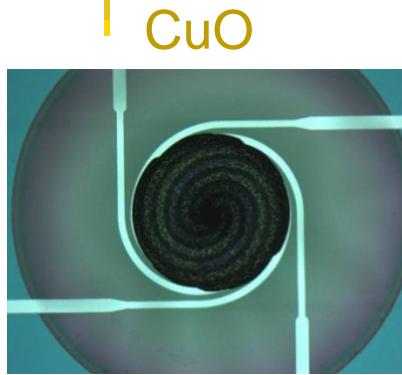
- 1 Mise en suspension des poudres (savoir-faire du LAAS)
- 2 Intégration des matériaux sur plateforme
 - ❖ Traitement de surface OTS/FDTS
 - ❖ **Verrou** : le dépôt ne résiste pas à une étape de photolithographie
 - ❖ **Solution** : étape de pré-découpe pendant le traitement de surface



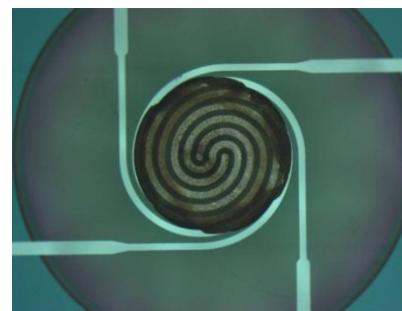
Jet d'encre : les différentes étapes

- 1 Mise en suspension des poudres (savoir-faire du LAAS)
- 2 Intégration des matériaux sur plateforme
 - ❖ Traitement de surface OTS/FDTS
 - ❖ Difficulté : le dépôt ne résiste pas à une étape de photolithographie
 - ❖ Solution : étape de prédécoupe pendant le traitement de surface
- 3 Evaporation des solvants à basse température ~50° C

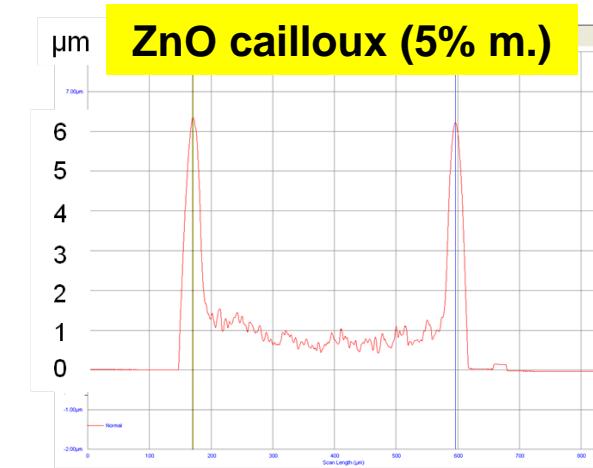
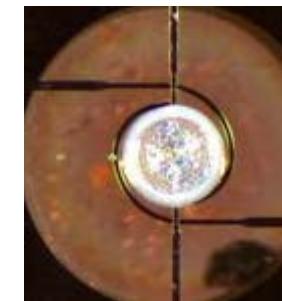
Jet d'encre : quelques résultats



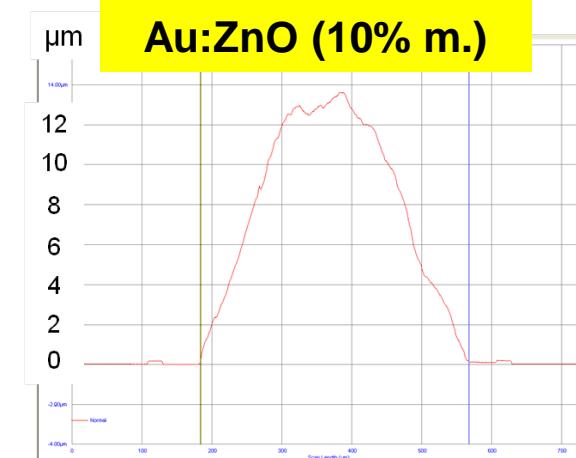
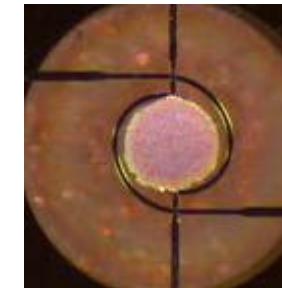
ZnO comm



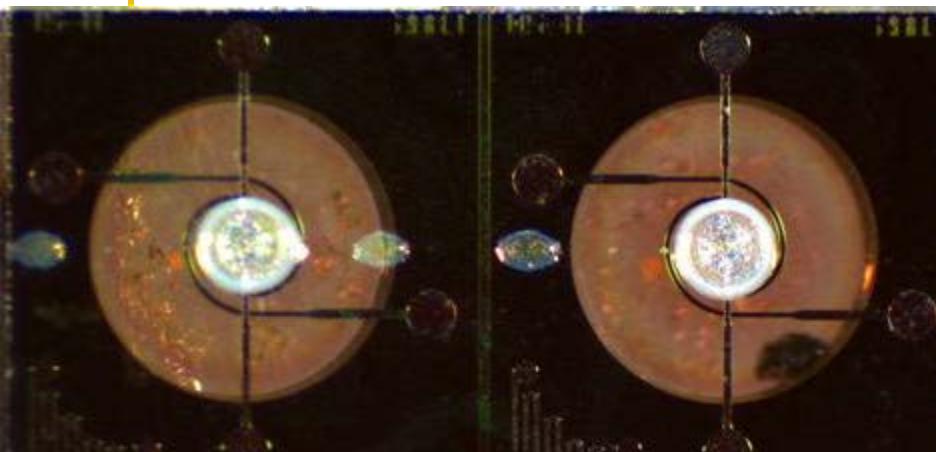
ZnO cailloux



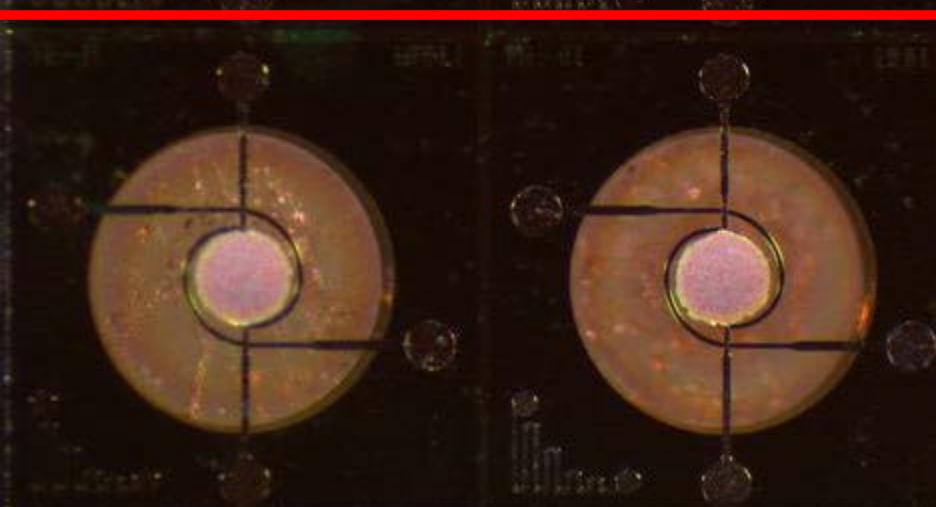
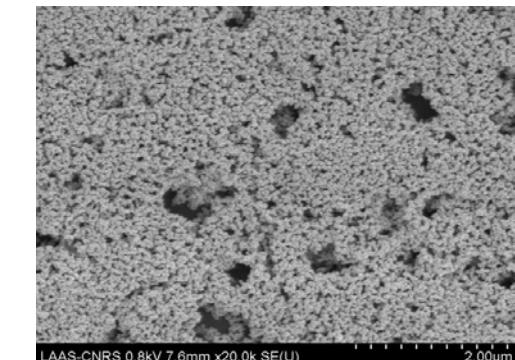
Au:ZnO



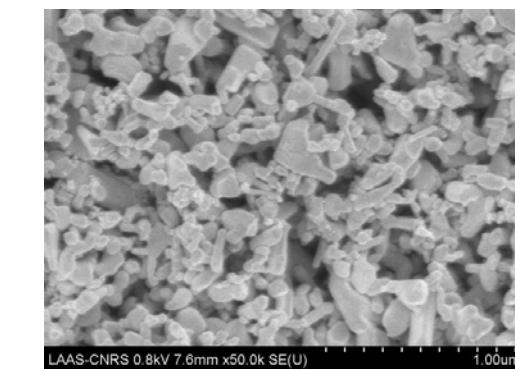
Observations des dépôts jet d'encre



Couche chimiquement sensible : ZnO cailloux



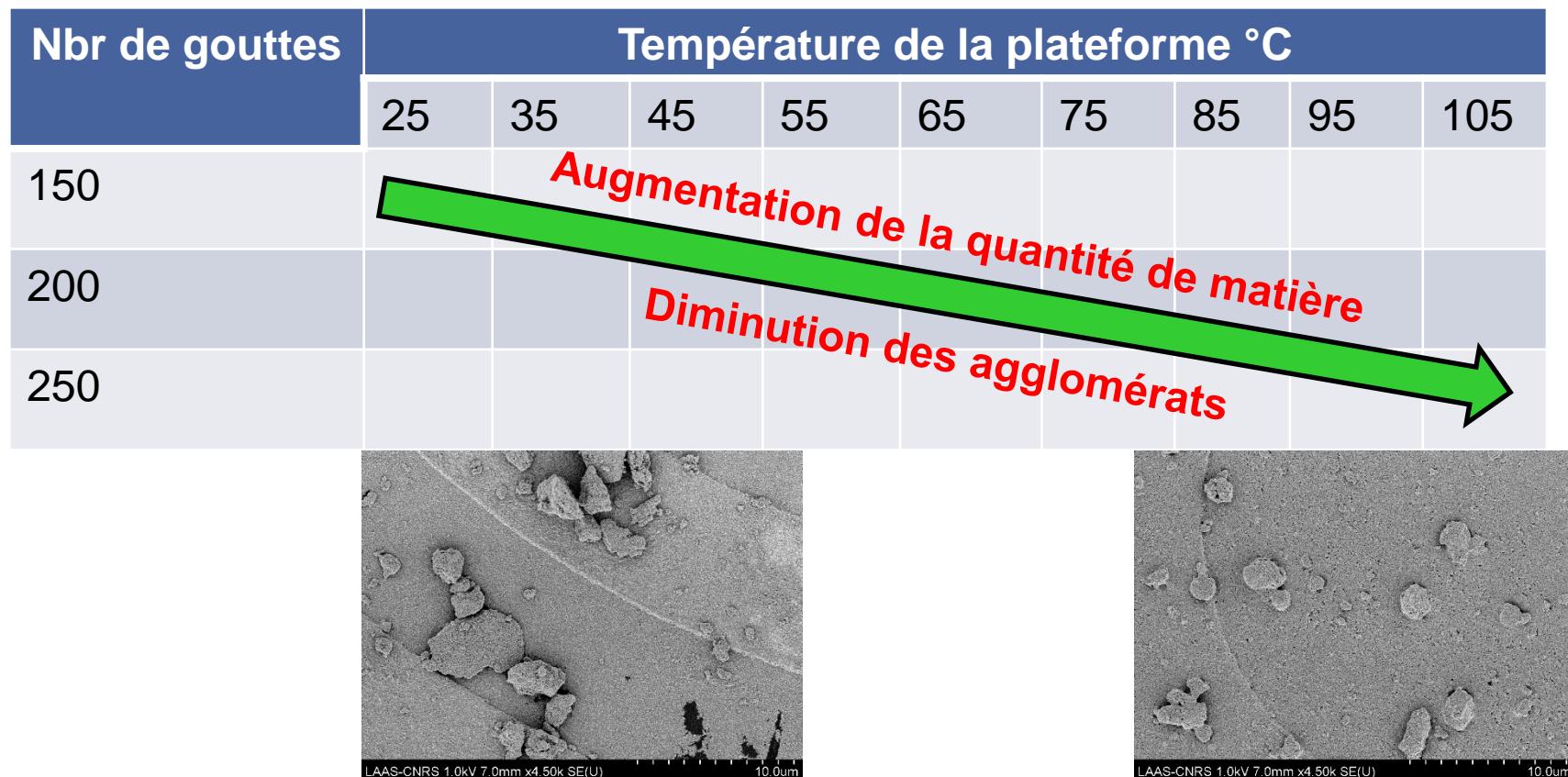
Filtre catalytique : Au:ZnO



- Zone de dépôt parfaitement définie et reproductible
- Couche très poreuse pour les 2 matériaux

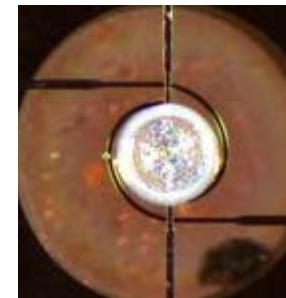
Observations des dépôts jet d'encre

- ✓ ZnO isotrope (présence d'agglomérats)
- ✓ ZnO anisotrope

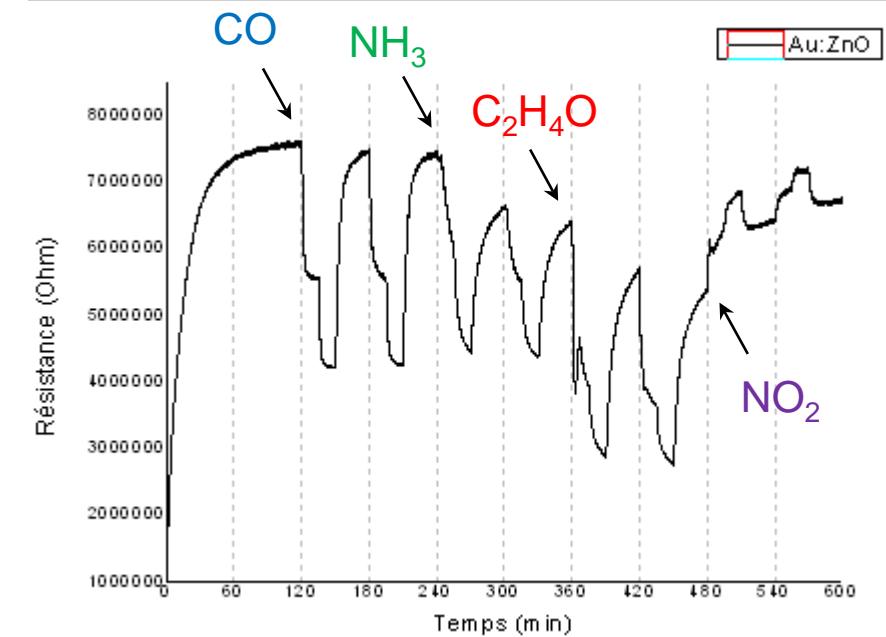
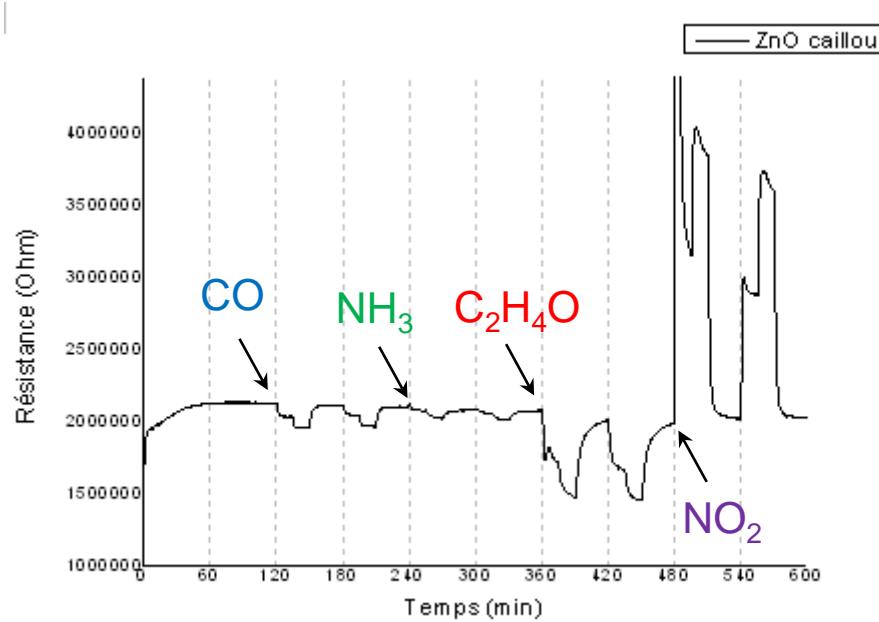
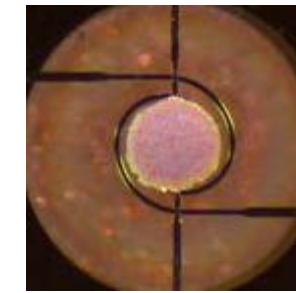


Jet d'encre : tests sous gaz

ZnO cailloux

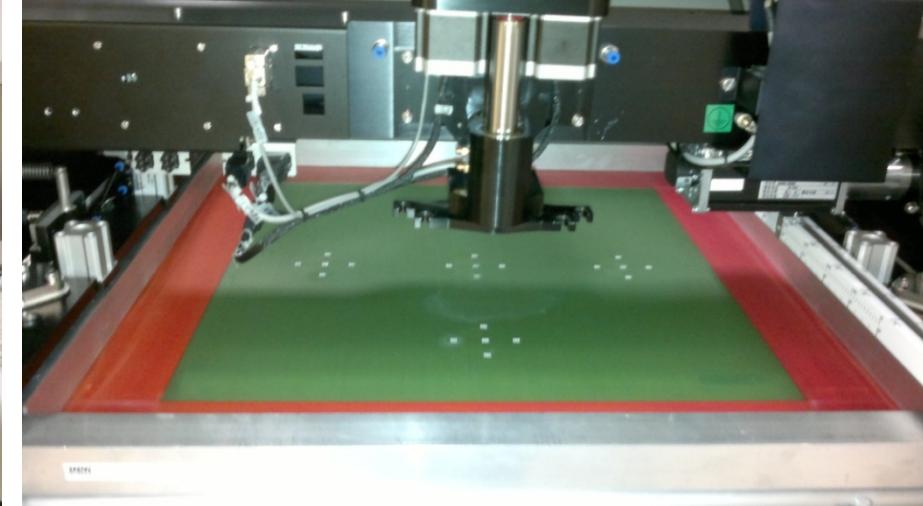


Au:ZnO



Sérigraphie : l'équipement du LAAS

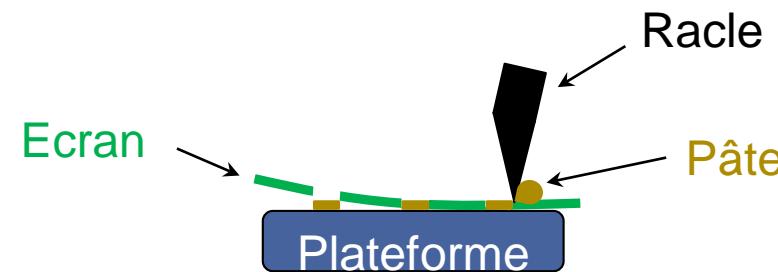
DEK Horizon 01i



Contact : Samuel Charlot / David Colin / Monique Dilhan

Matière de l'écran :

- Polyester
- Inox



2 types de racle :

- PU shore 70 α 60°
- Inox α 45 et 60°

Sérigraphie : les différentes étapes

1 Préparation des pâtes de sérigraphie (sous-traitance)

ESL

Poudres commerciales

Quantité de poudre ~ 50g

LAPLACE

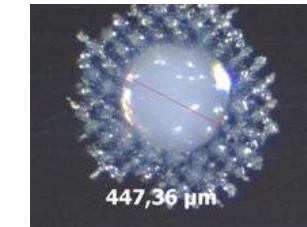
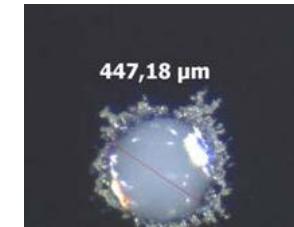
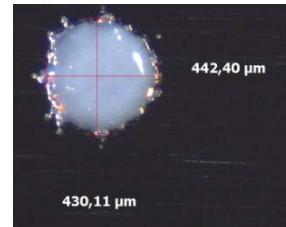
Poudres « exotiques »

Quantité de poudre < 10g

- ❖ Poudre + Liant + Plastifiant + Dispersant
- ❖ Pâte concentrée en poudre : **30% en masse**

2 Optimisation des propriétés rhéologiques des pâtes de sérigraphie

... en termes de viscosité et de tixotropie

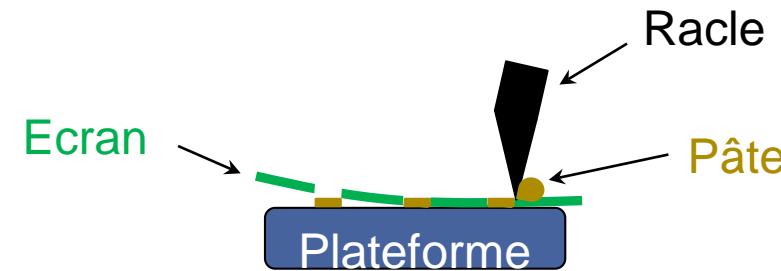


Sérigraphie : les différentes étapes

Optimisation des paramètres de dépôt sur l'équipement

Variation de 3 paramètres :

- Hors contact (distance entre la plateforme et l'écran)
- Pression de la racle
- Vitesse de la racle

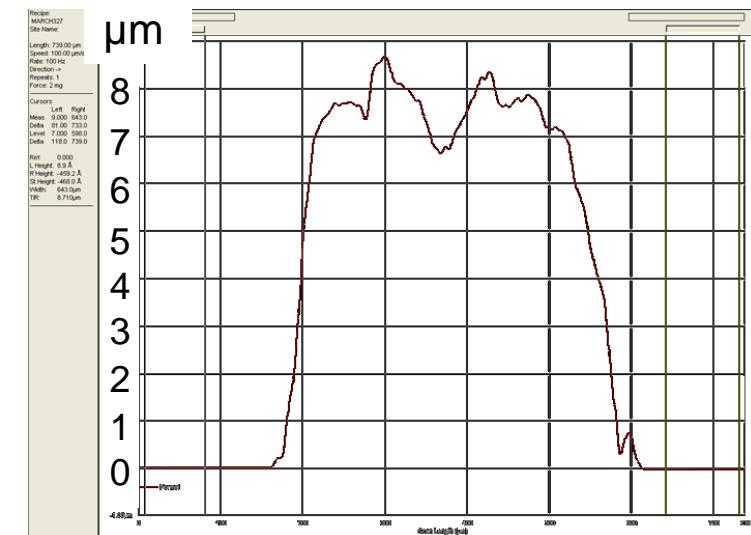
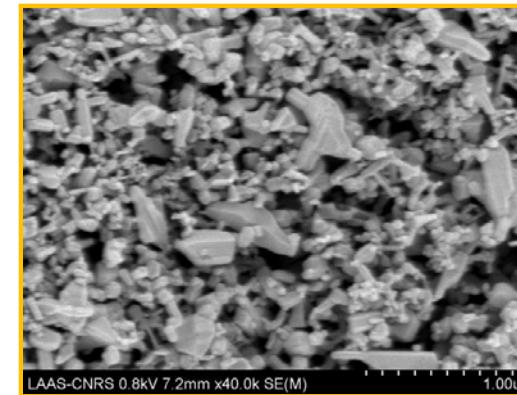
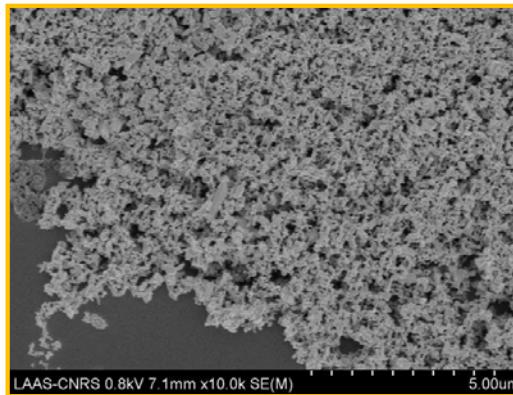


Mais fonction de la rhéologie de la pâte....

Sérigraphie : les différentes étapes

- 1 Préparation des pâtes de sérigraphie (sous-traitance)
 - 2 Optimisation des propriétés rhéologiques des pâtes de sérigraphie
 - 3 Optimisation des paramètres de dépôt sur l'équipement
 - 4 Evaporation du liant / plastifiant / dispersant à haute température

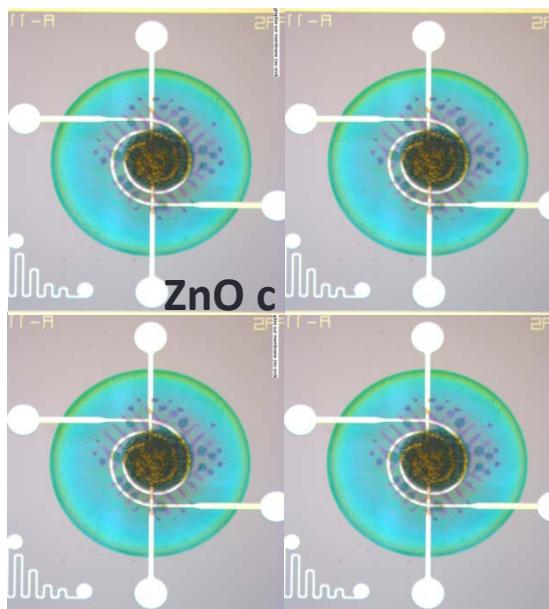
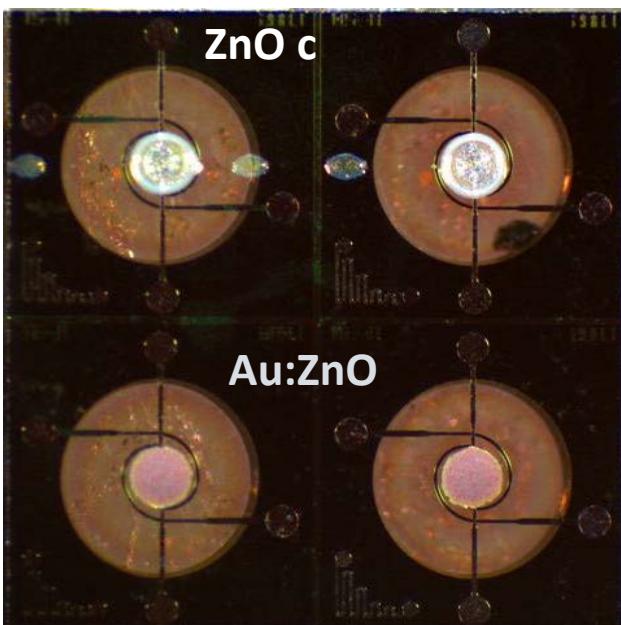
$\sim 220^\circ \text{ C}$ $\sim 230^\circ \text{ C}$ $\sim 350^\circ \text{ C}$



Dépôts par jet d'encre



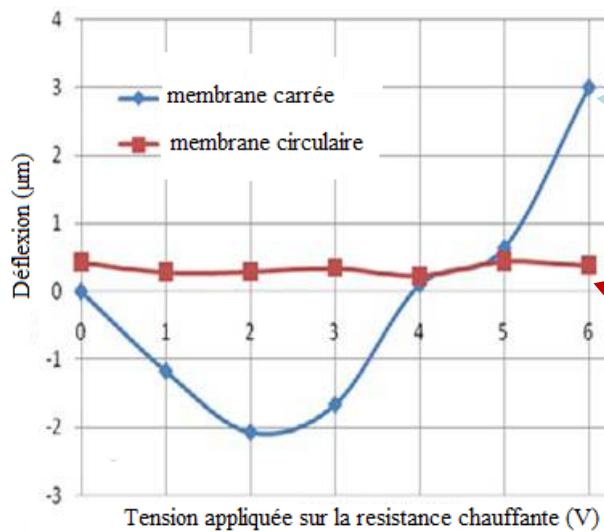
Dépôts par sérigraphie



Technologie : Principaux Résultats

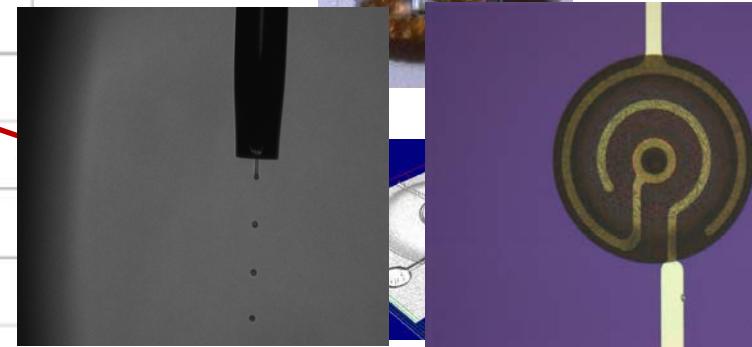
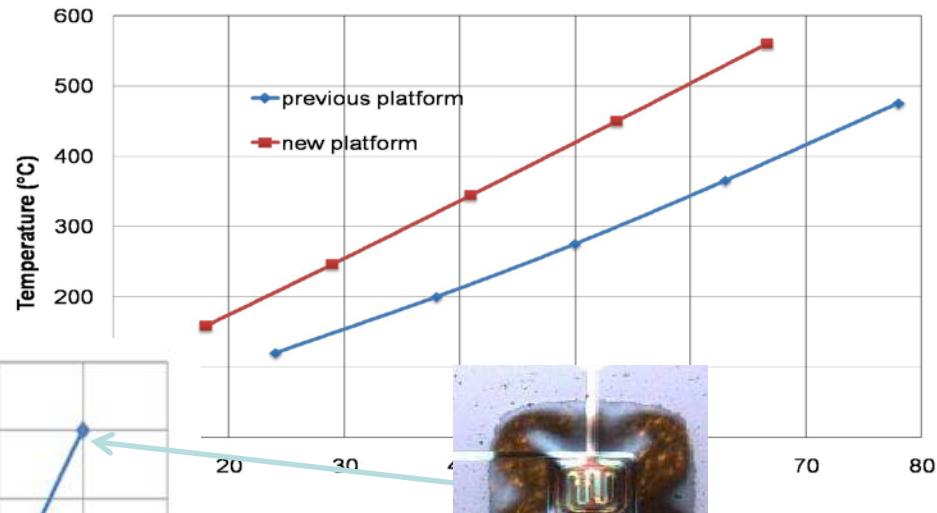
• Micro hotplate

- High operating T° (650°C)
- Low power Consumption (< 100mW)
- Mechanical stability



• Sensing I

Contrôle
layer : sha
reproduc



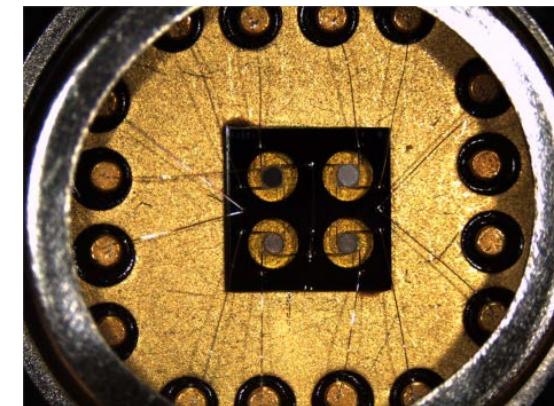
Modes de fonctionnement des MOX



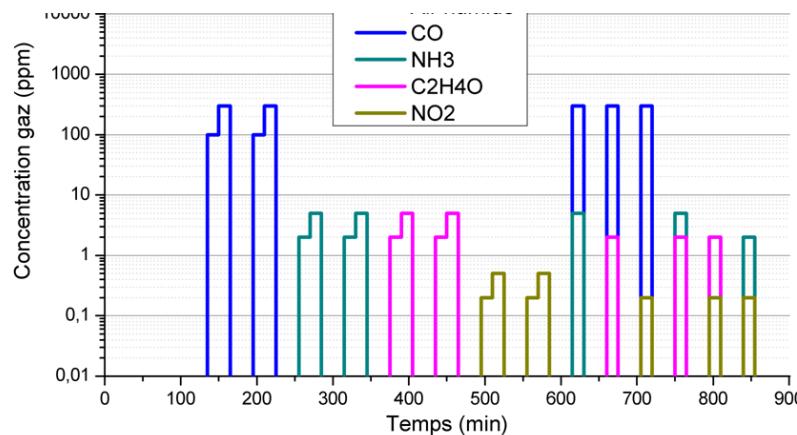
Modes de fonctionnement et Traitement du signal

Objectifs

- Faire varier tous les paramètres influents sur la détection :
 - Différents matériaux
 - Température (statique / dynamique)
 - Polarisation (variable)
 - illumination UV (variable)
- Variation de Sensibilité = Sélectivité

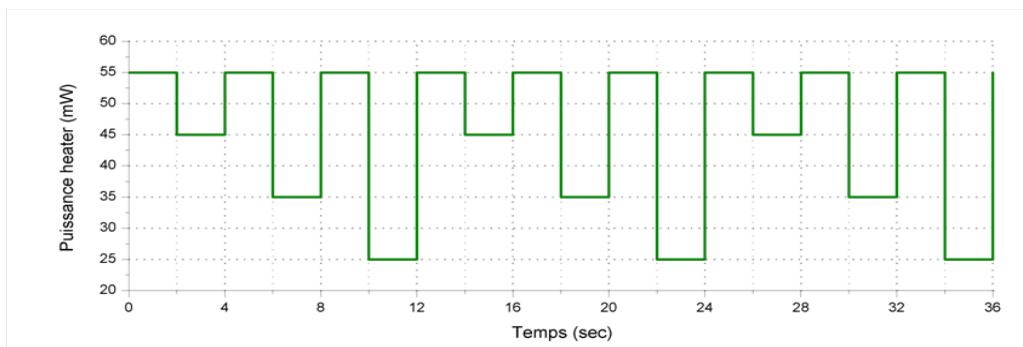


Dynamique Rh et Rs	CuO	ZnO	Dynamique Rh et Rs
Dynamique Rh et Rs	SnO_2 LCC	SnO_2 LCC	Statique 55 mW – 100 nA



- 4 gaz, 2concentrations
CO, NO₂, C₂H₄O, NH₃
+ des mélanges 2 à 2

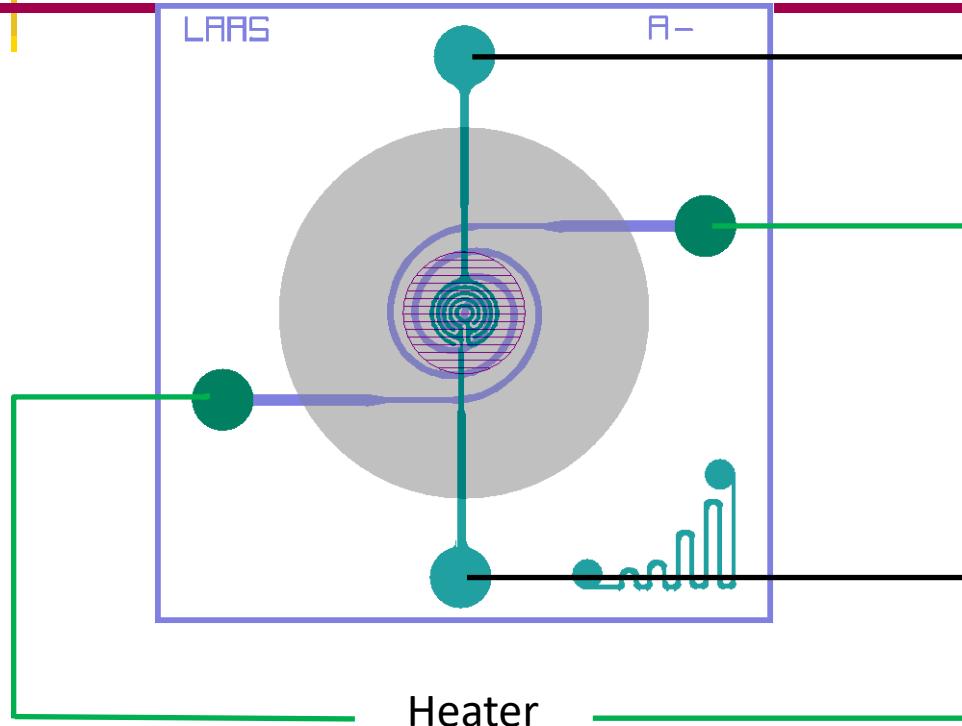
- **Mode statique** : isotherme
 - Permet d'évaluer les capacités de détection
- **Mode dynamique** de température
 - Permet d'accroître la sélectivité
 - Utilisation d'analyses multi-variées



Températures

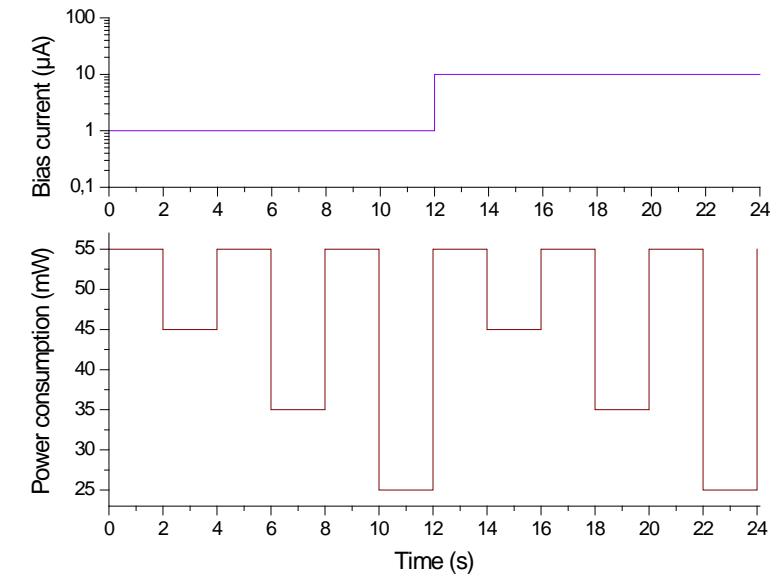
- 500°C
- 400°C
- 300°C
- 200°C

Gas testing: operating mode

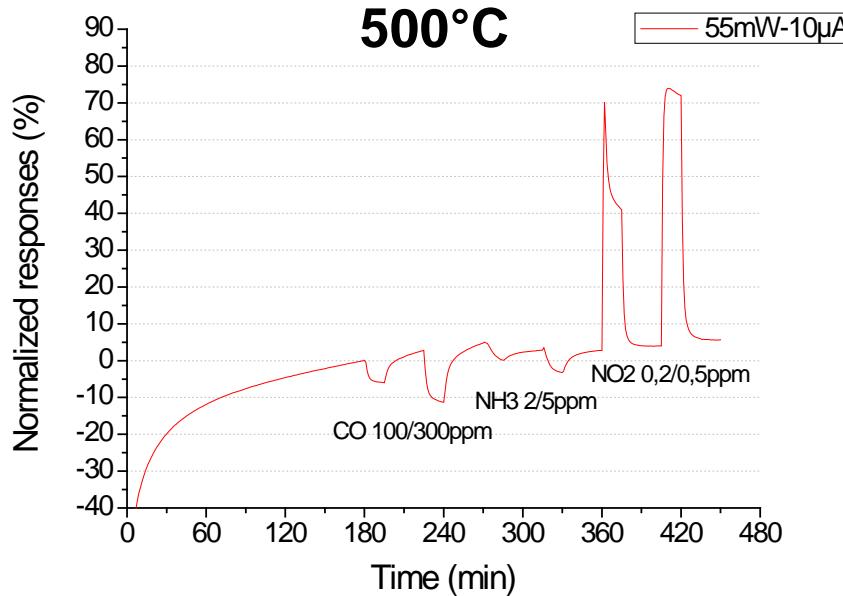
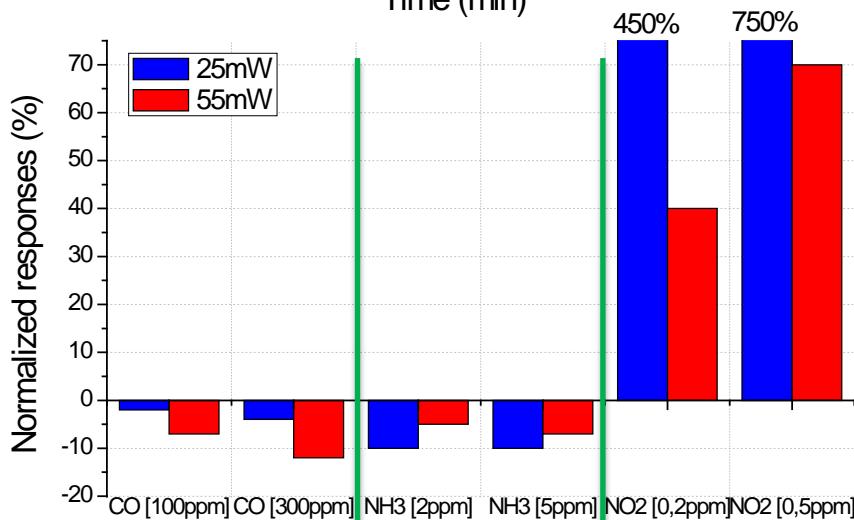
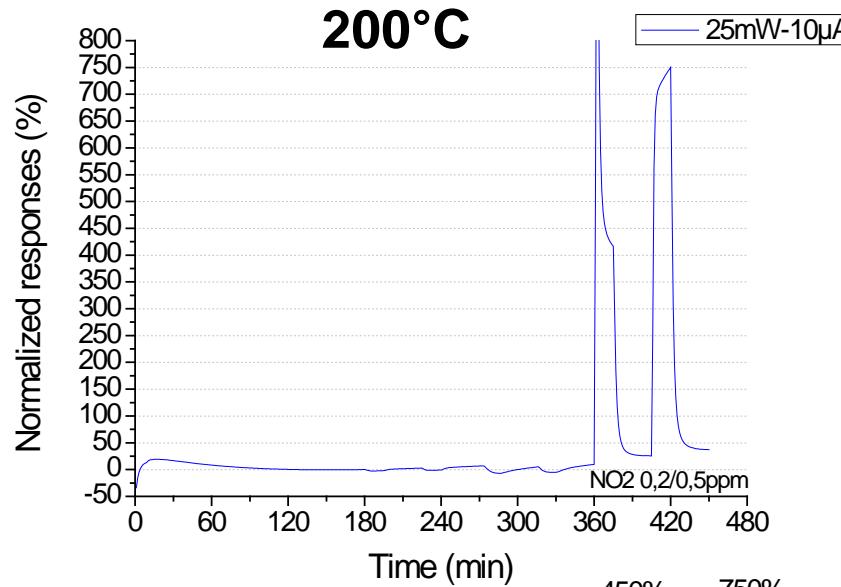
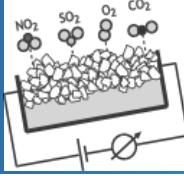


2 operating modes

	Standard	Dynamic
Power	Constant	Pulsed temperature
Bias current	Constant	Variable



Results: standard operating mode



Constant temperature and bias current

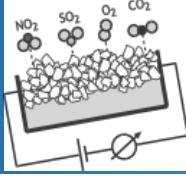
- ❖ Light variation of the gas sensitivities
- ❖ Insufficient values to be selective



Méthode pour augmenter la sélectivité : Faire varier la sensibilité de manière rapide

=> Modes de fonctionnement dynamique des MOX

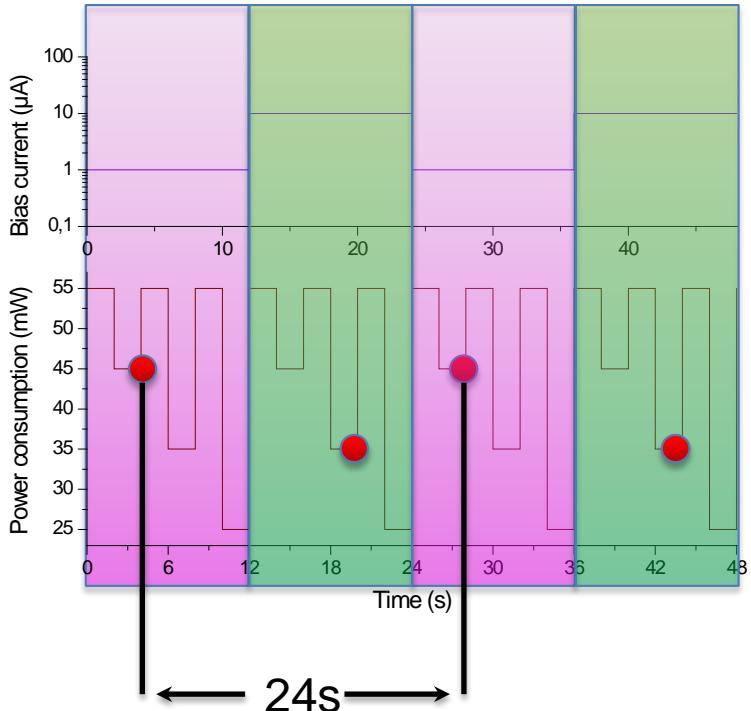
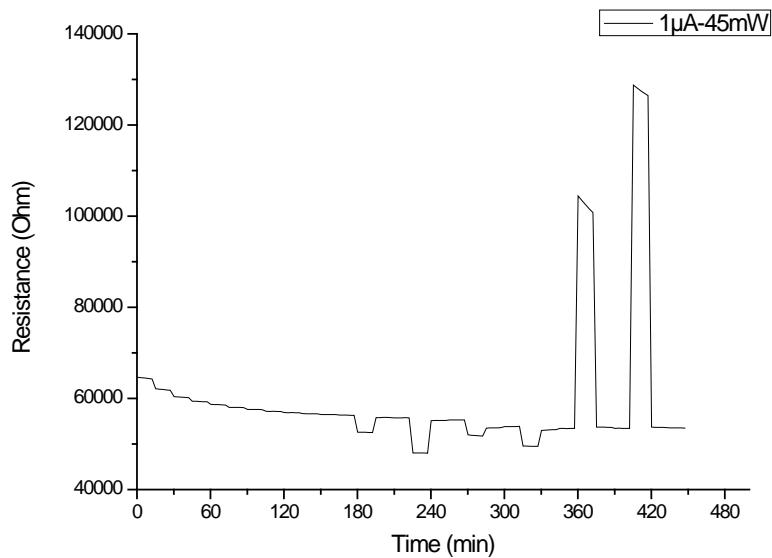
Results: dynamic mode



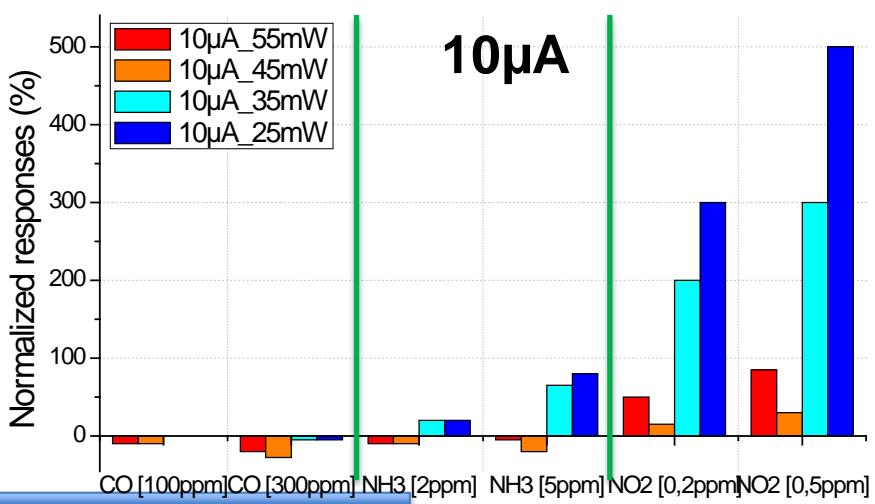
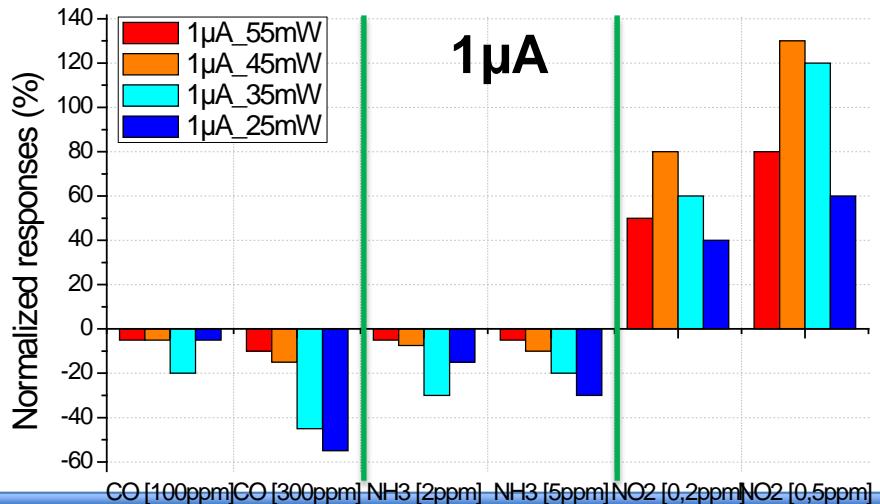
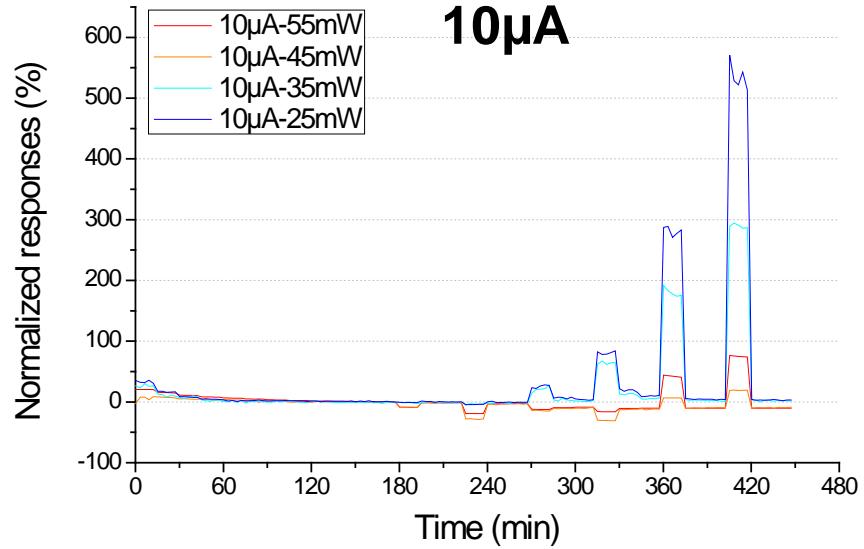
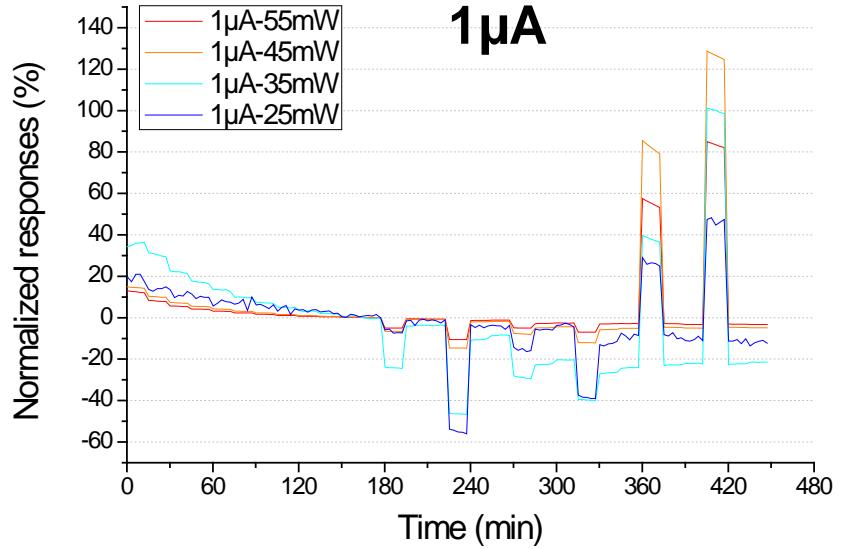
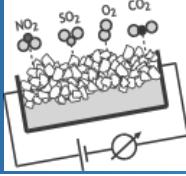
For exemple:

$1\mu\text{A} - 45\text{mW}$

$10\mu\text{A} - 35\text{mW}$

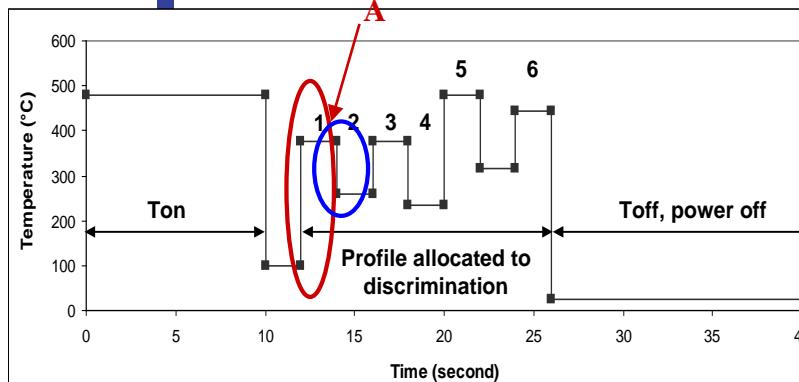


Results: dynamic mode

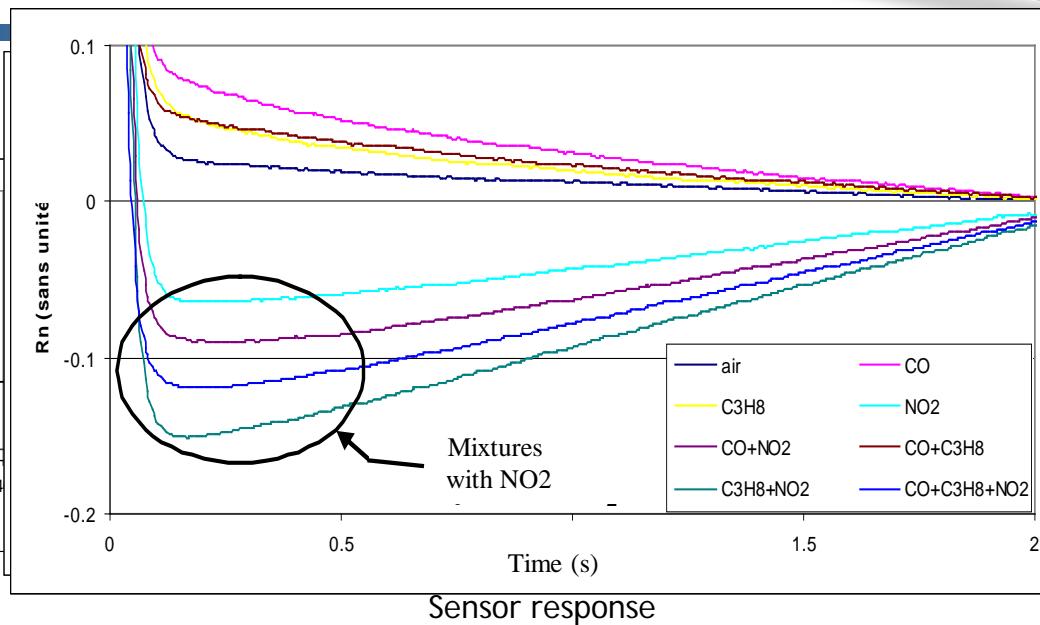


Transient sensor responses

1. Normalisation



Profile of temperature



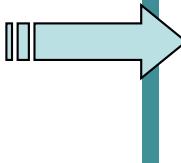
Sensor response

$$\Delta R_n = \frac{(R_i - R_f)}{R_f}$$

Transient response depends on :

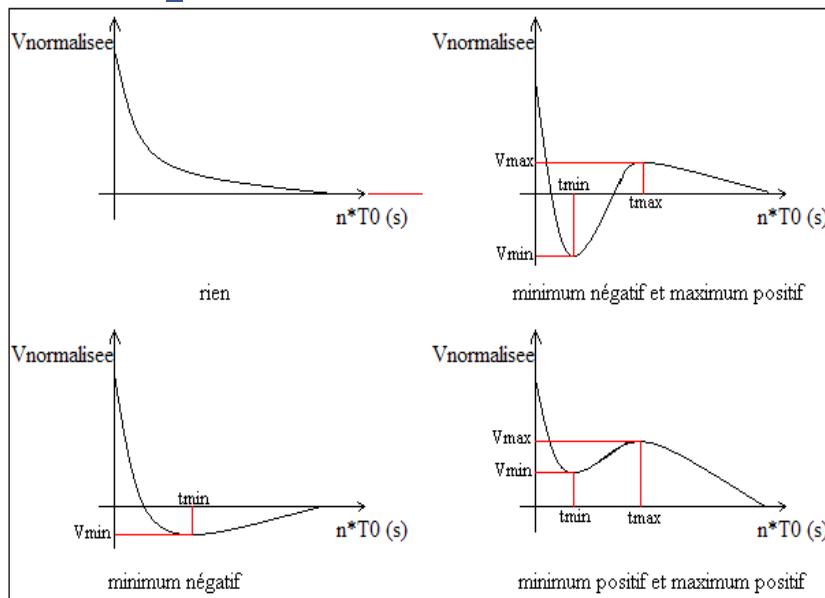
- Temperature variation
- ambient gas mixture

Correlation to kinetic chemical reactions



2. Variables and mathematical analysis

4 Different transient response shapes



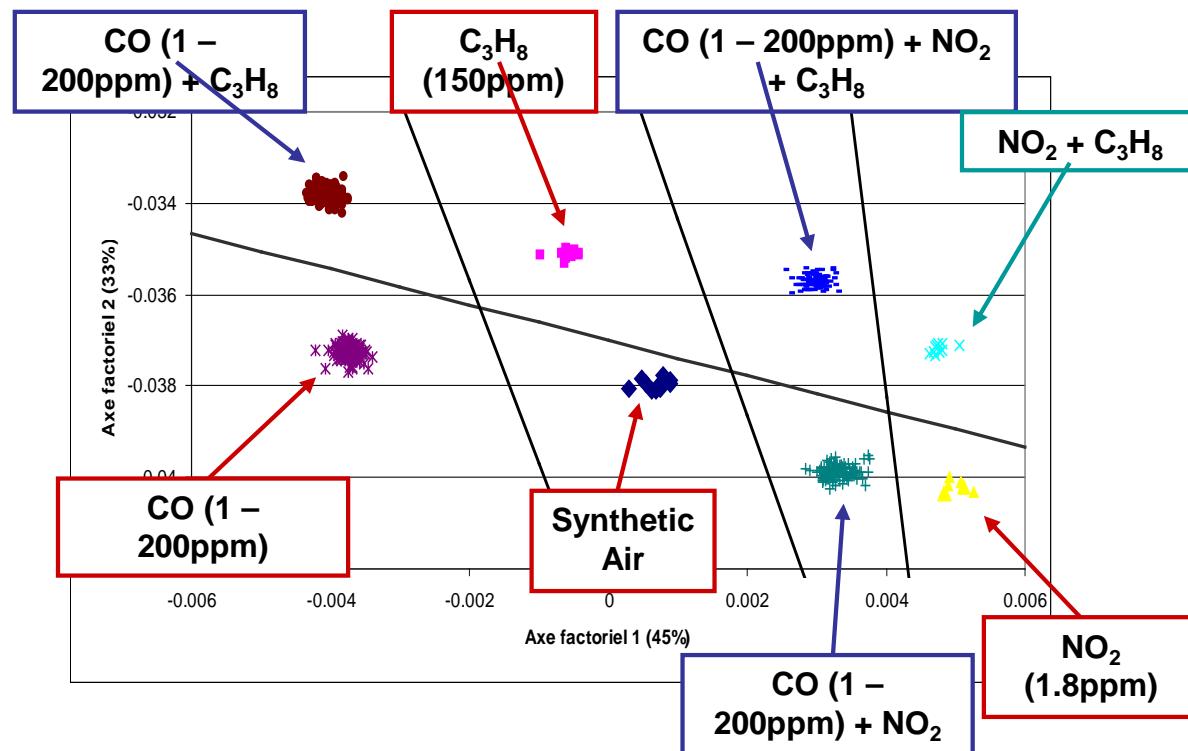
20 points within
the first part of each step



**Multi-variable analysis :
Factorial Discriminate Analysis
(FDA)**

FDA Results

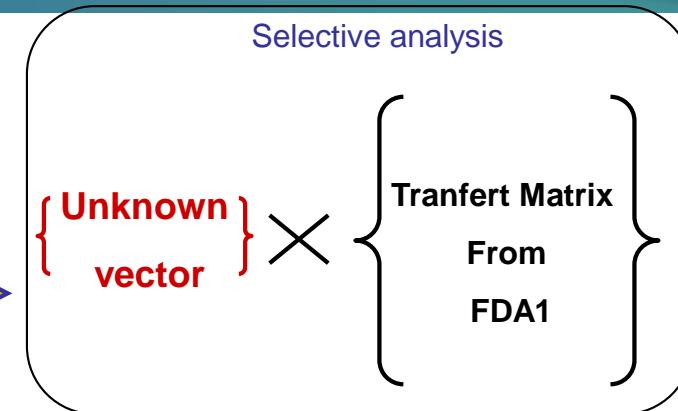
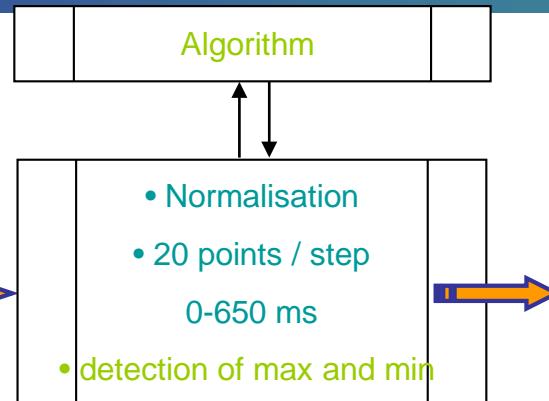
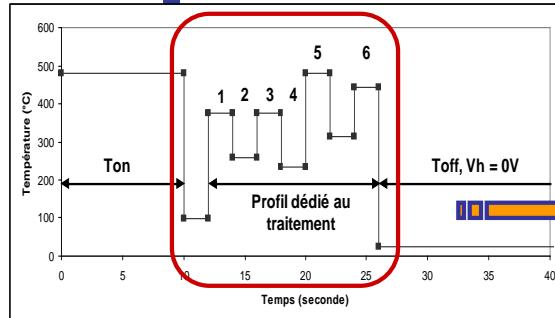
1. Selectivity



Good selectivity..In Humid atmosphere With only 1 sensor

Summary : CO-Sensor description

Thermal Profile



CO Concentration (1 – 200 ppm)

Regression (2nd order)

CO ?

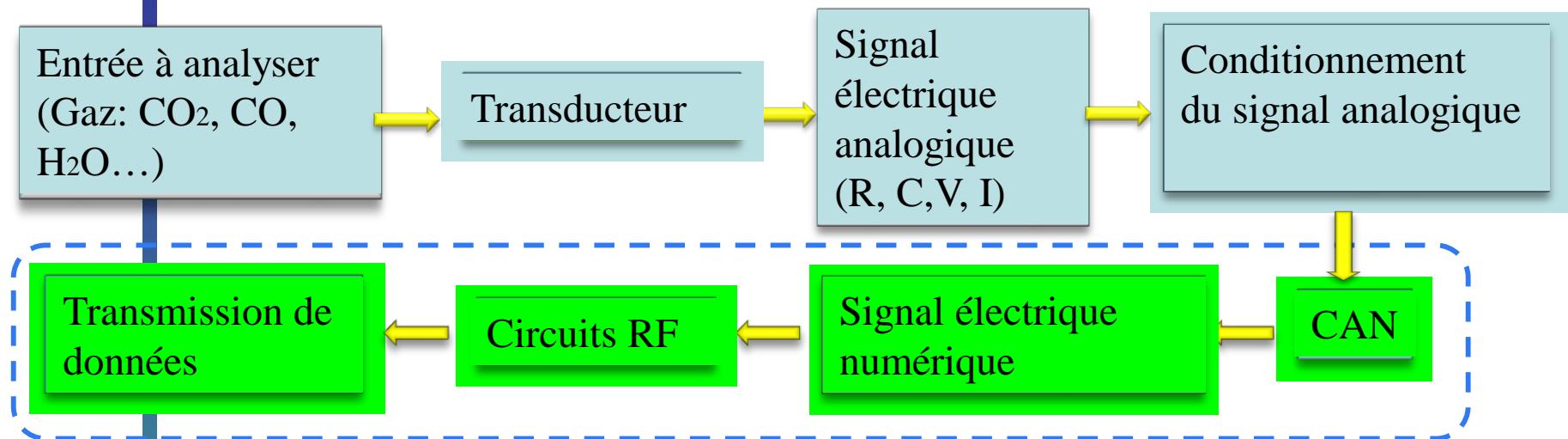
Determination of the ambient gas mixture by Decision tree

quantitative Analysis

{ unknown } \times { Transfert Matrix From FDA2 }

Vers le capteur embarqué sans fil ...

Principe d'un capteur de gaz sans fil



Avantages/Intérêts des capteurs de gaz sans fil (RF)

- Réseau de capteurs distribués autonomes
- Détection en environnement sévère/dangereux
- Disponibilité des circuits RF (300MHz-3GHz)
- Protocoles et normes de transmission disponibles (wifi, zigbee, RFID ...)

Capteur communicant LAAS-ALPHAMOS-LCC (OSEO OW)

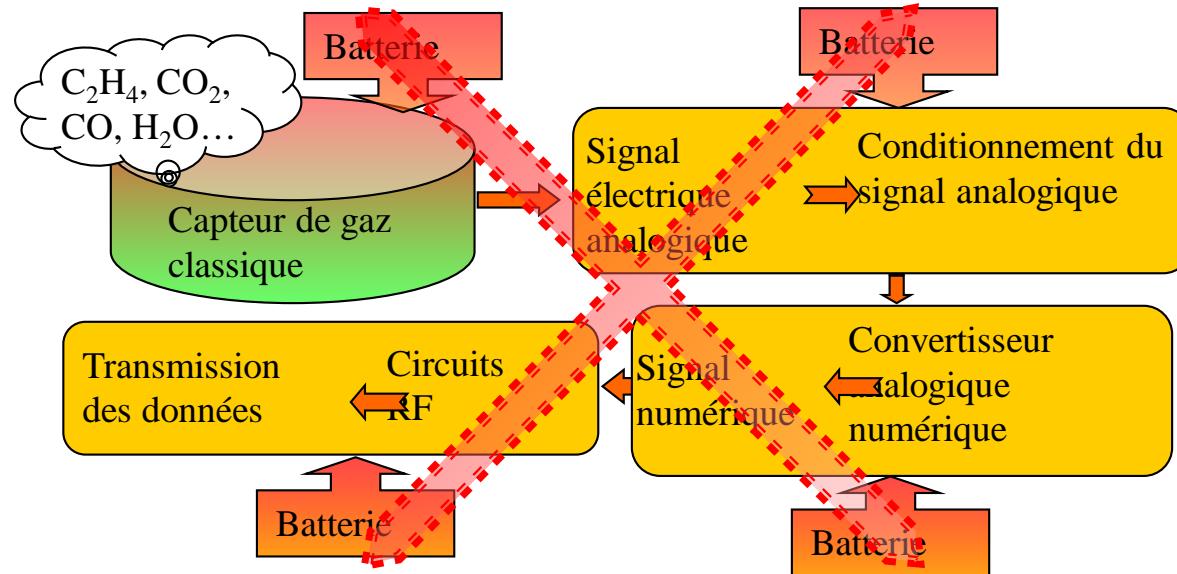
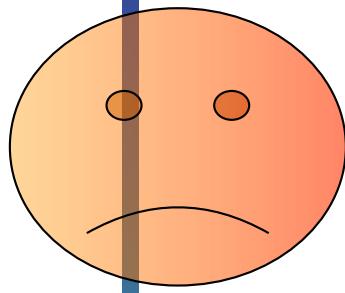
Multi capteur gaz

Electronique :

- Calibration
- Auto compensation
- mémoire de données
- pilotage PWM
- Acquisition 10-100ms
- traitement mathématique
- Module de communication Sigfox

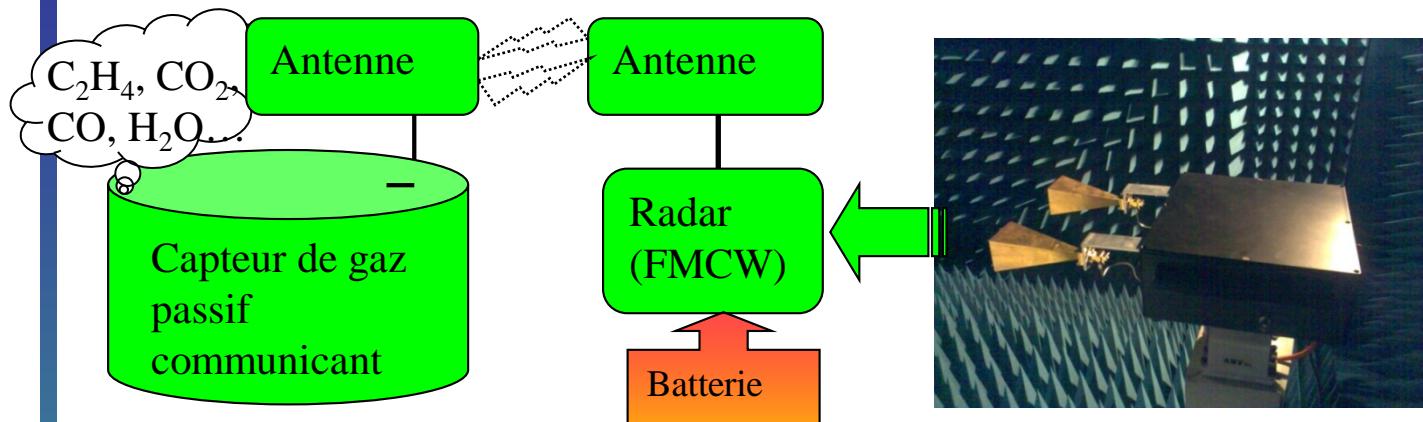


Inconvénients



- **Chacune des Composantes du capteur consomme de l'énergie**
- **Autonomie énergétique trop faible pour plusieurs applications**
 - Nucléaire (durée de vie importante)
 - Mise en réseau des capteurs
- Limitations des gammes de fréq. par les normes et les bandes de fréquences en transmission (<3GHz)
- **Problèmes d'encombrement**
 - Conditionnement du capteur
- **transmission des données ?**

Autre Solution



► Transduction Electromagnétique Passive

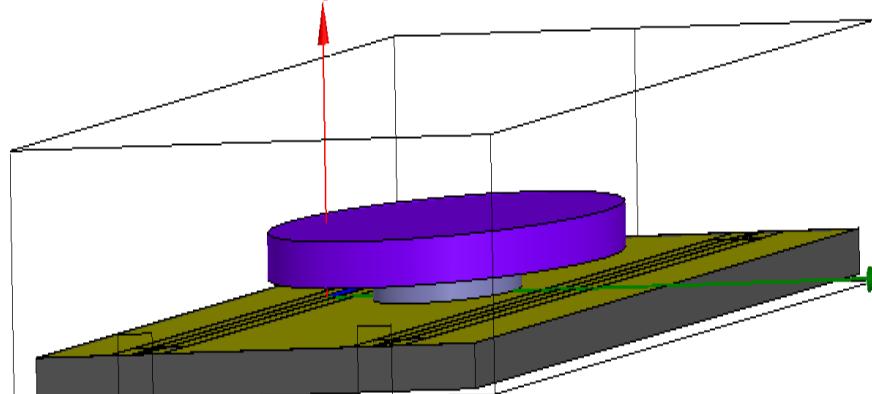
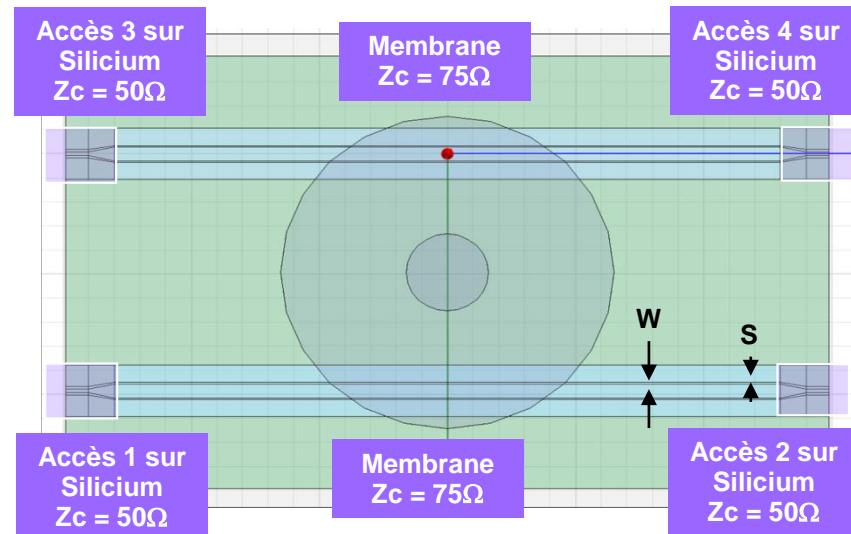
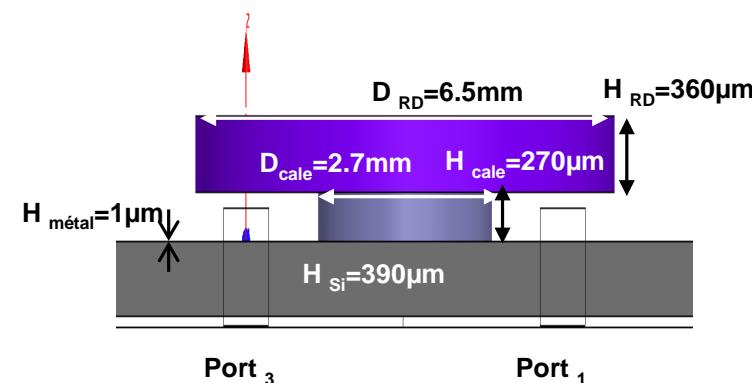
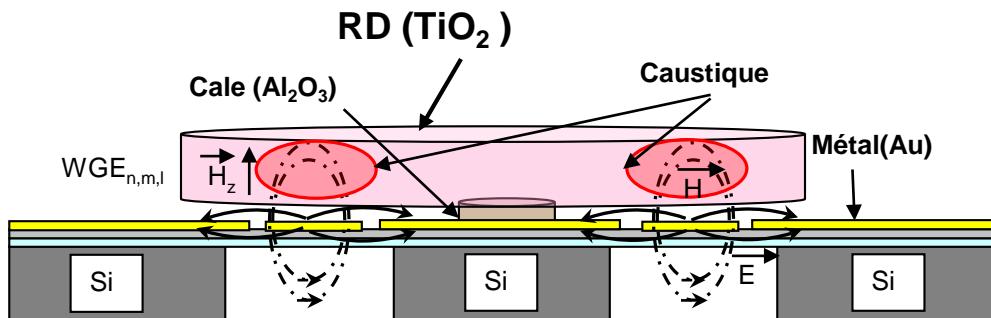
- Suppression de tous les circuits électroniques
- Pas de contraintes pour le choix de la bande de fréquence en transmission
- Pas de consommation d'énergie

► Interrogation RADAR

- Elimination des problèmes de normes de transmission (wifi, zigbee, ...)
- Augmentation de la portée (plusieurs dizaines de mètres)
- RADAR-FMCW déjà réalisé au LAAS (Thèse de Franck CHEBILA (2007/2010))

Filtre à base d'un RD à modes de galerie

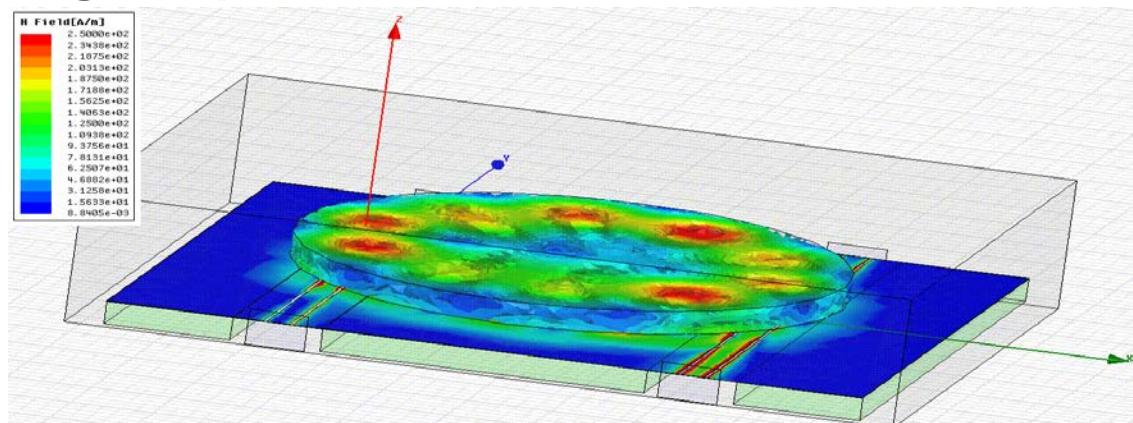
► Conception du capteur sur HFSS™



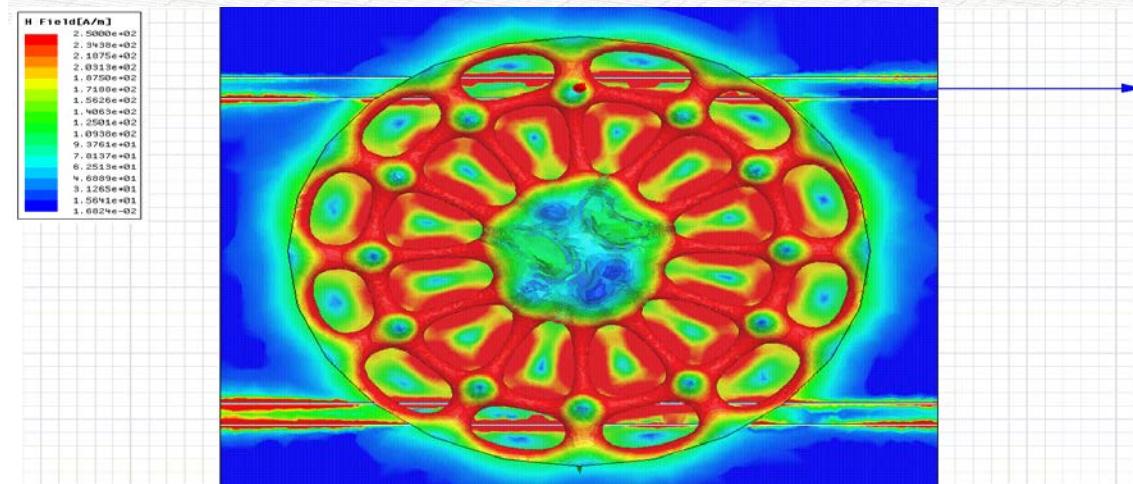
Filtre à base d'un RD à modes de galerie

► Répartition du champ magnétique sur HFSS™

WGE_{5, 0.0} à Fr=26.01GHz



WGE_{6, 1.0} à Fr= 33.34GHz



Validation du filtre directif à base d'un RD excité sur des modes de galerie

Assemblage du RD sur les lignes coplanaires

▶ Technique d'assemblage

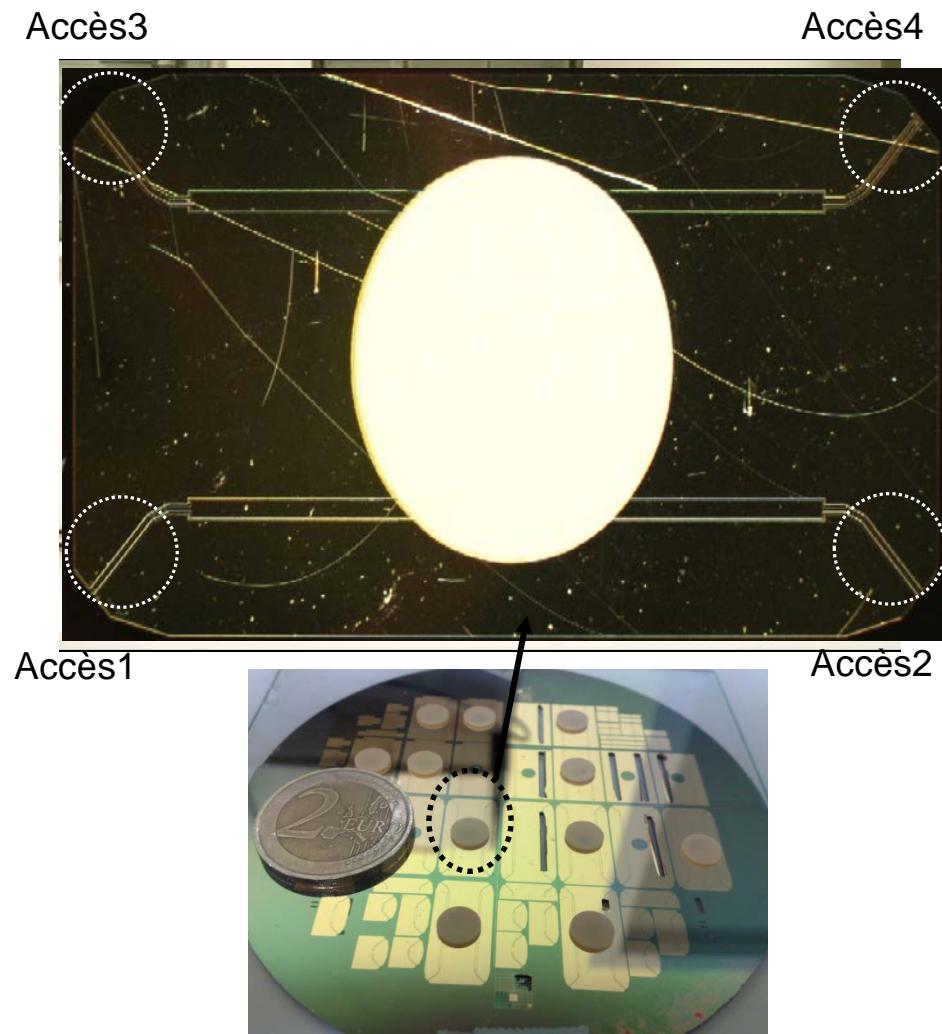
Adhésif cyanoacrylate

1. Colle isolante
2. Épaisseur $< 5\mu\text{m}$

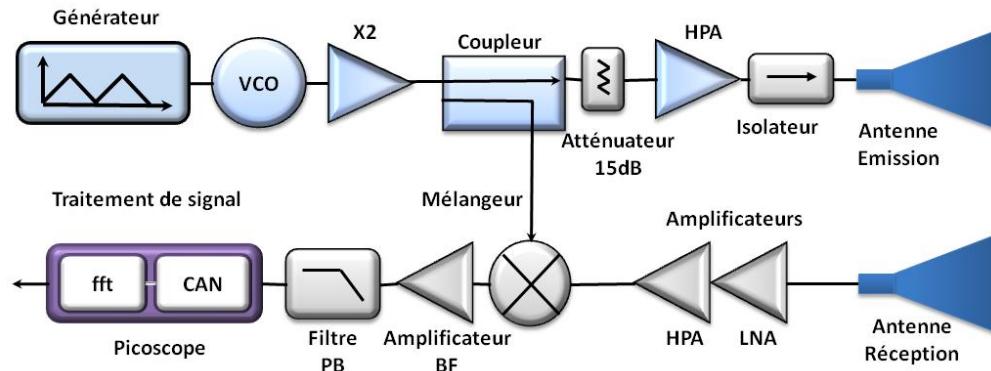
Equipement flip-chip

1. Aspiration du RD
2. Support pour wafer

Prototypes fonctionnels

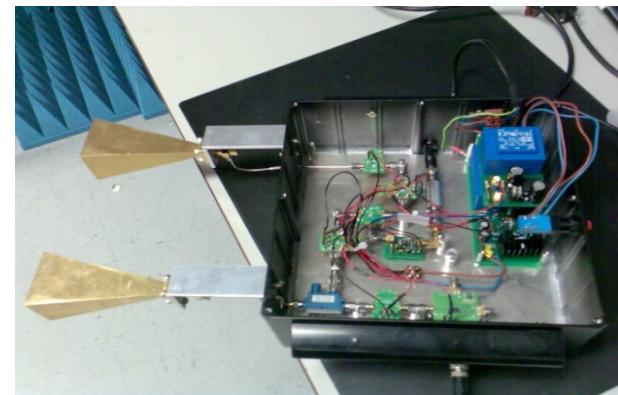
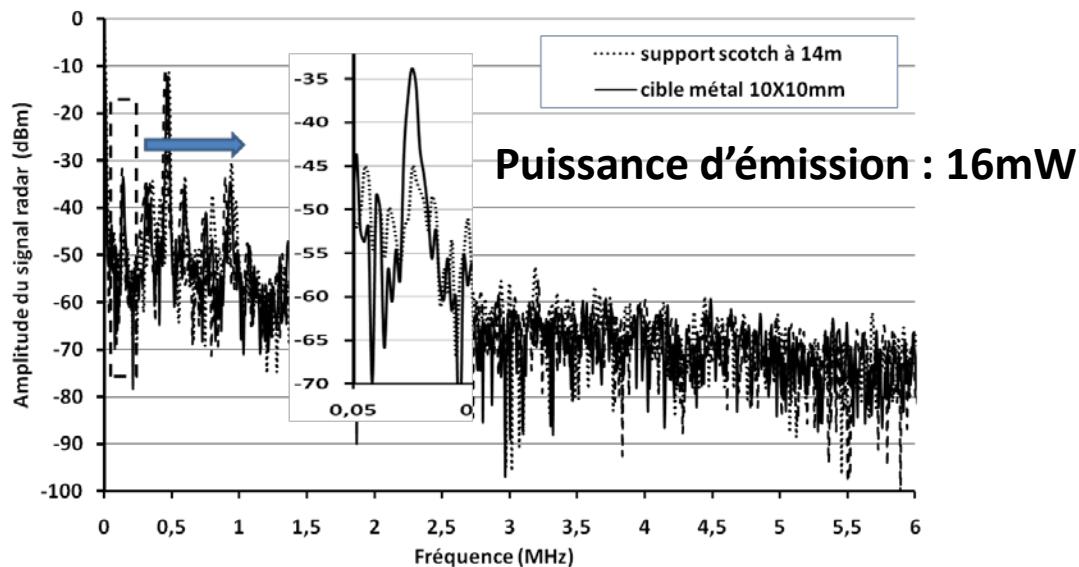


Lecture et identification de capteurs passifs par contrôle de l'écho Radar



Le Radar FMCW

Détection à **14 m** d'une pastille métallique de **1cm²**

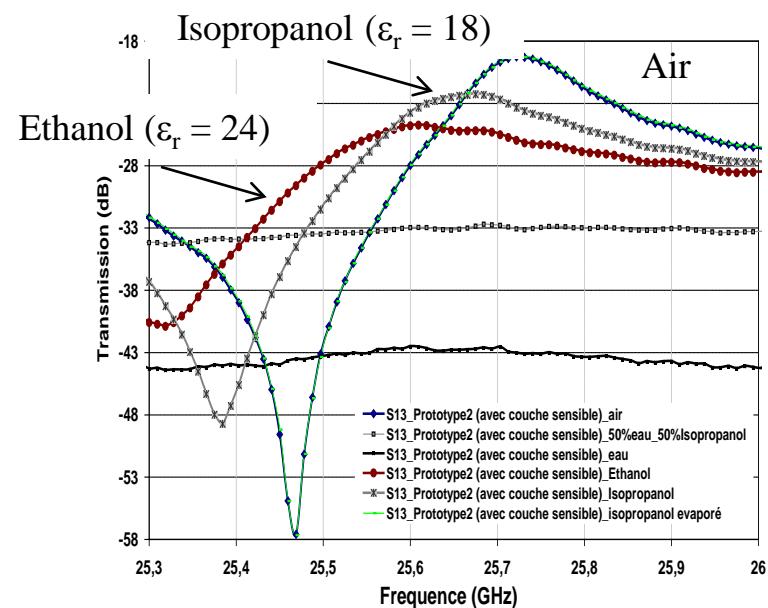
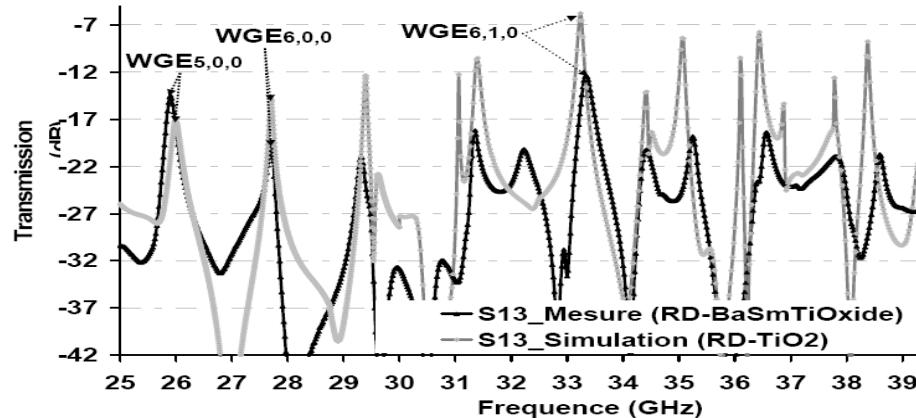


Fréquence centrale : 29,45 GHz
Bande de fréquence : 650 MHz
Antenne parabolique : 35dB

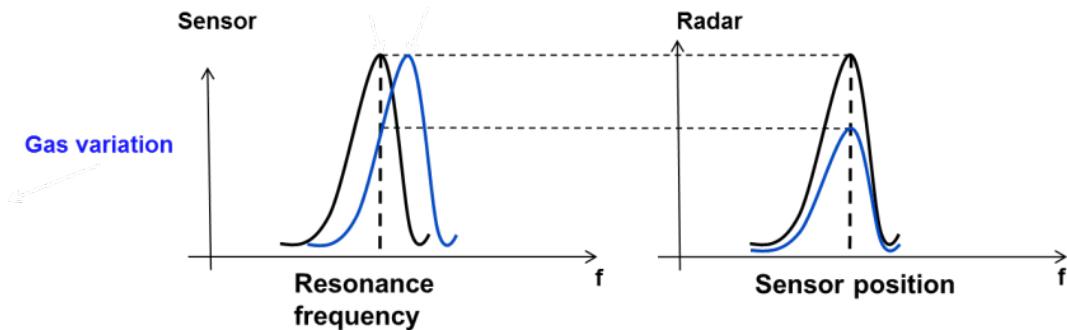
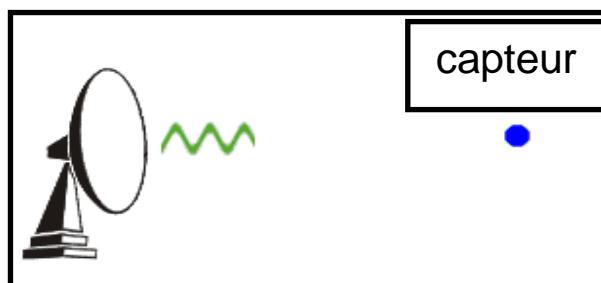


Bilan 1ers Travaux (Capteur Gaz)

4. Validation du concept par mesure de solvants



5. Validation de la communication par RADAR

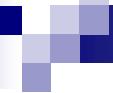


Variation of Gas concentration

Dielectric Relaxation => shift of Resonance frequency

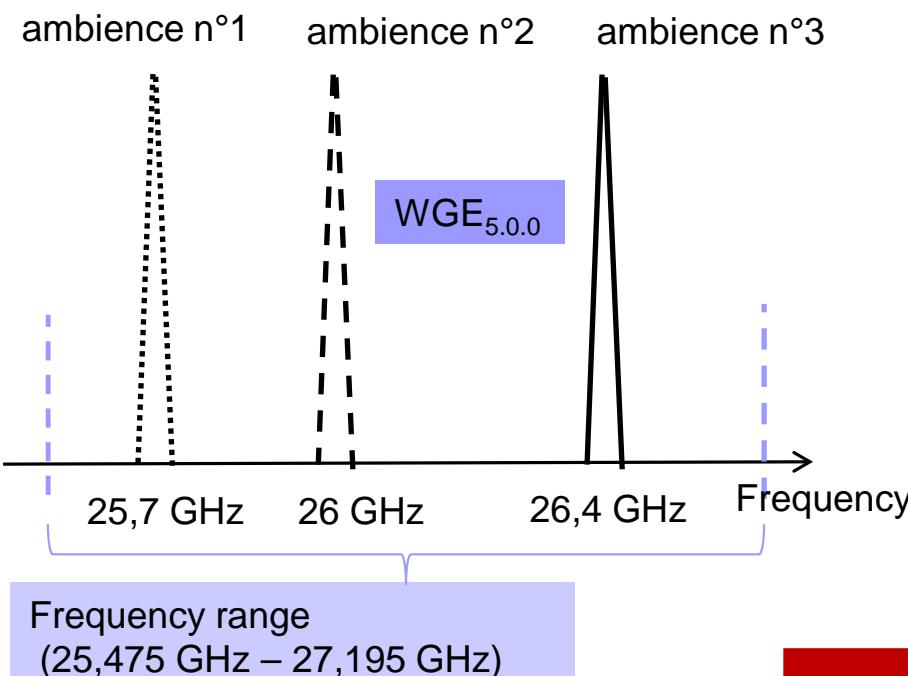
- Variation of distributed EM Field

Modification of backscattered signal



RADAR interrogation : results

➤ Sensor Measurements



➤ Results with RADAR

Mode WGE _{5.0.0}	Beat frequency level (dBm)
Ambience 1 (ref)	-16,9 ± 0.7
Ambience 2	-18,6 ± 1.2
Ambience 3	-20,2 ± 0.3

Validation
Proof of concept

H. Hallil, F. Chebila, P. Ménini and H. Aubert, "Feasibility of passive gas sensor based on Whispering Gallery Modes and its Radar interrogation: theoretical and experimental investigations", Journal Sensors & Transducers, Vol.116, N°5, pp.38-48, Mai 2010

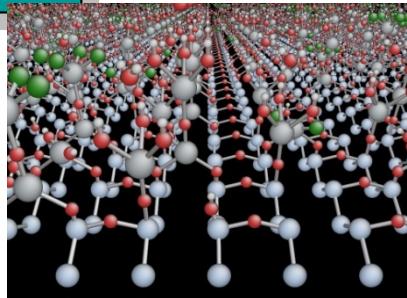
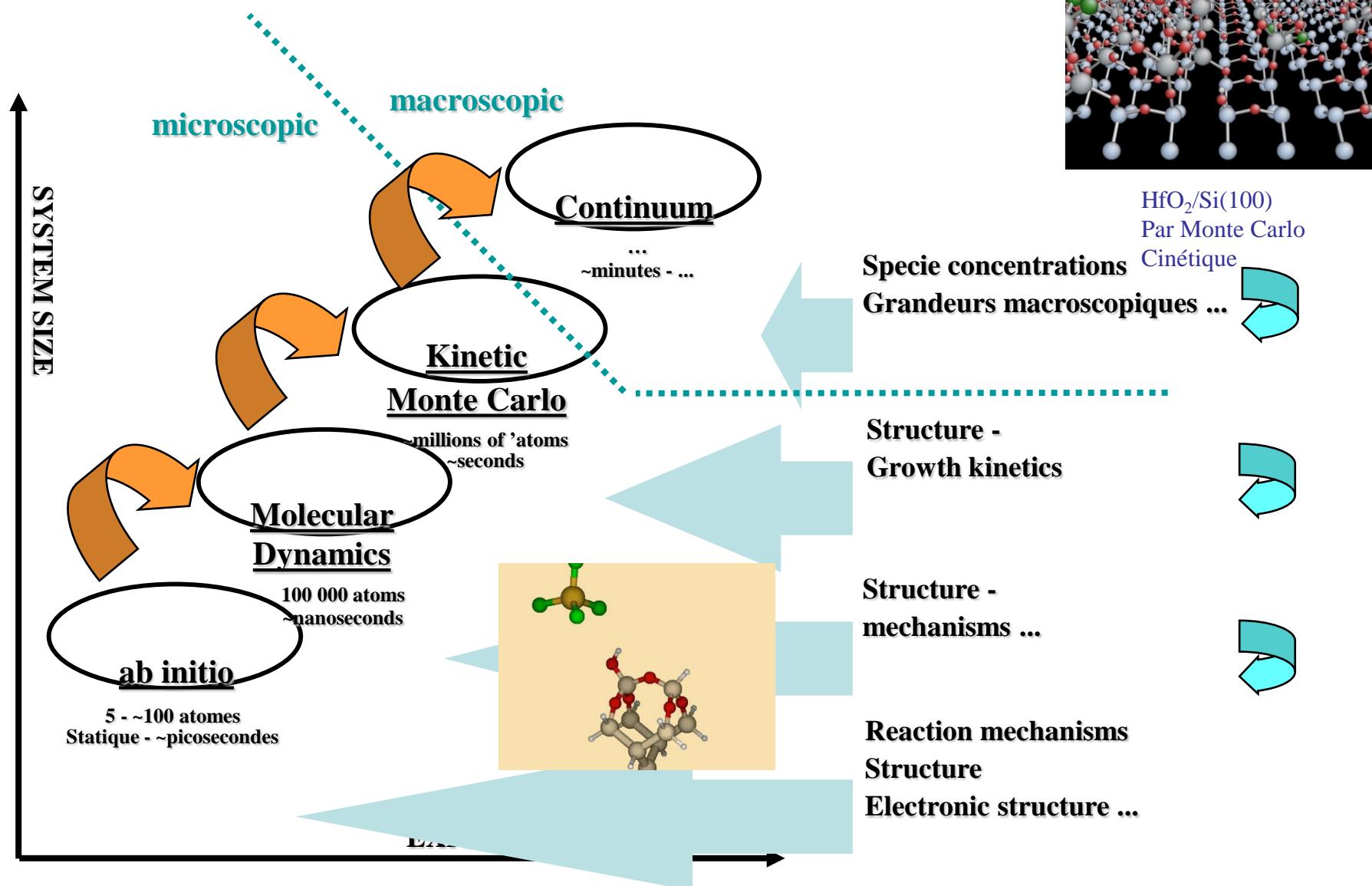
H. Hallil, F. Chebila, P. Menini, P. Pons, H. Aubert "Feasibility of Wireless Gas Detection with an FMCW RADAR Interrogation of Passive RF Gas Sensor"; 20 IEEE SENSORS 2010, Kohala, Hawaii (USA); 01-04 Novembre 2010.

Plan

1. Introduction Généralités
2. Les Technologies de Fabrication
3. Exemples De Micro-capteurs & actionneurs
- 4. Les Outils de Conception**
5. Prospectives : Les Microsystèmes de demain...

Outils de conception

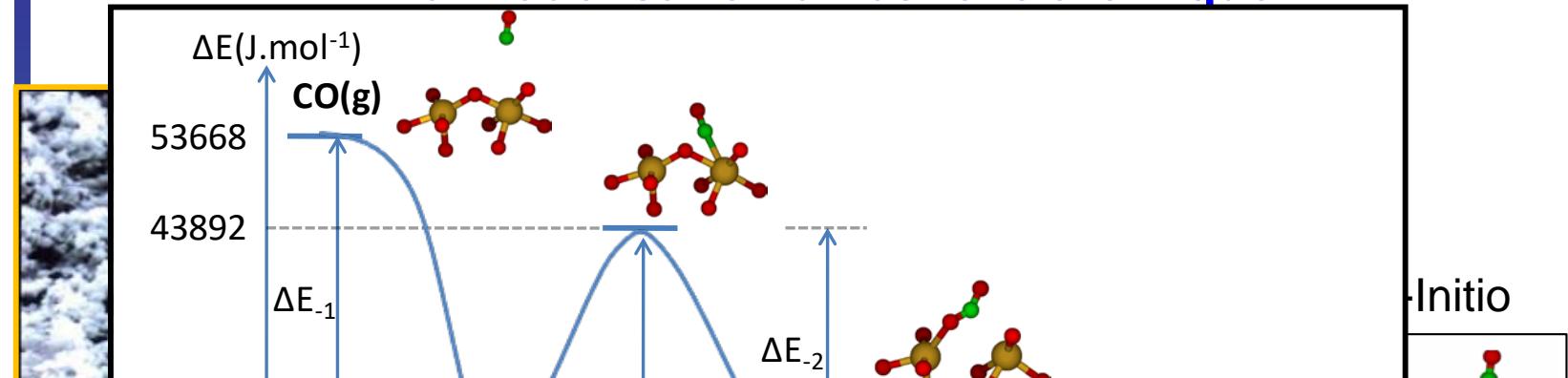
- **Simulation à l'échelle Atomique**
 - AB-INITIO
 - MonteCarlo
- **Technologique (1 à 3D)**
 - SILVACO
 - GENESIS LAB
 - SYNOPSYS TCAD / SENTAURUS
- **Physique – Multiphysique (1 à 3D) :**
 - CATIA
 - COMSOL
 - ANSYS
 - COVENTOR
 - CESES
 - ABAQUS
 - HFSS, CST (spécifique RF)
- **Comportemental**
 - CADENCE
 - ADS
 - VHDL-AMS



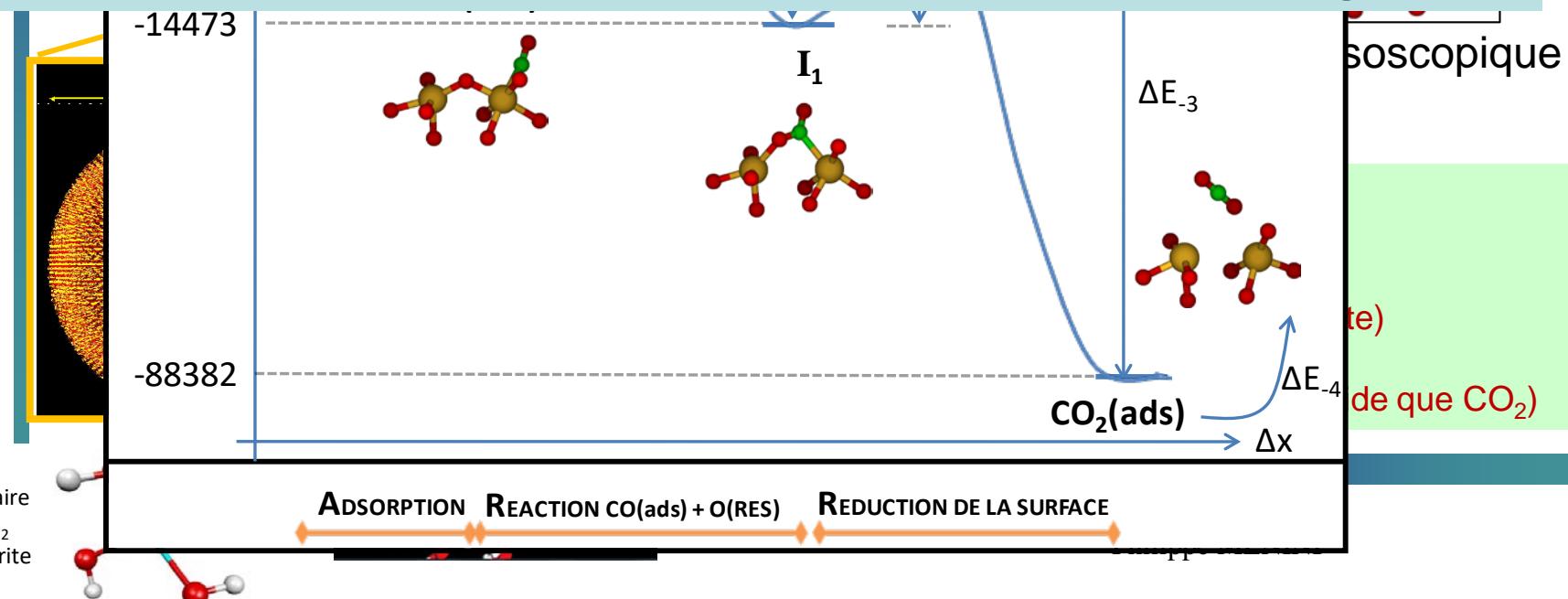
HfO₂/Si(100)
Par Monte Carlo
Cinétique

Modélisation/Simulation

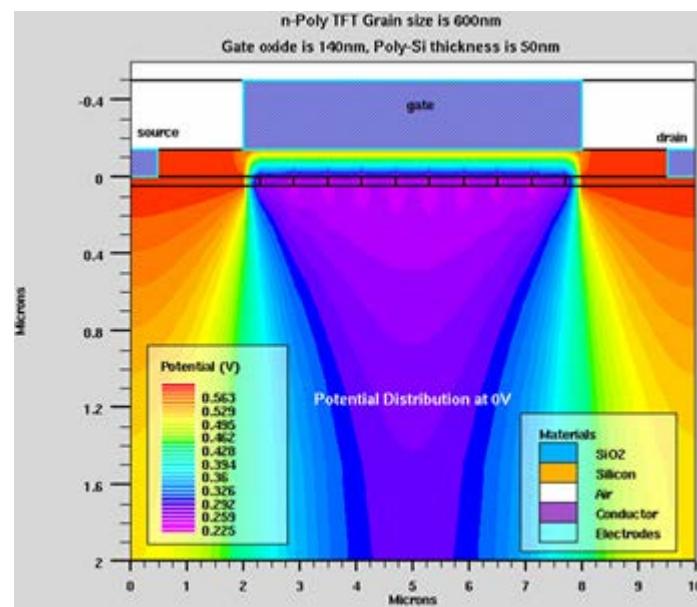
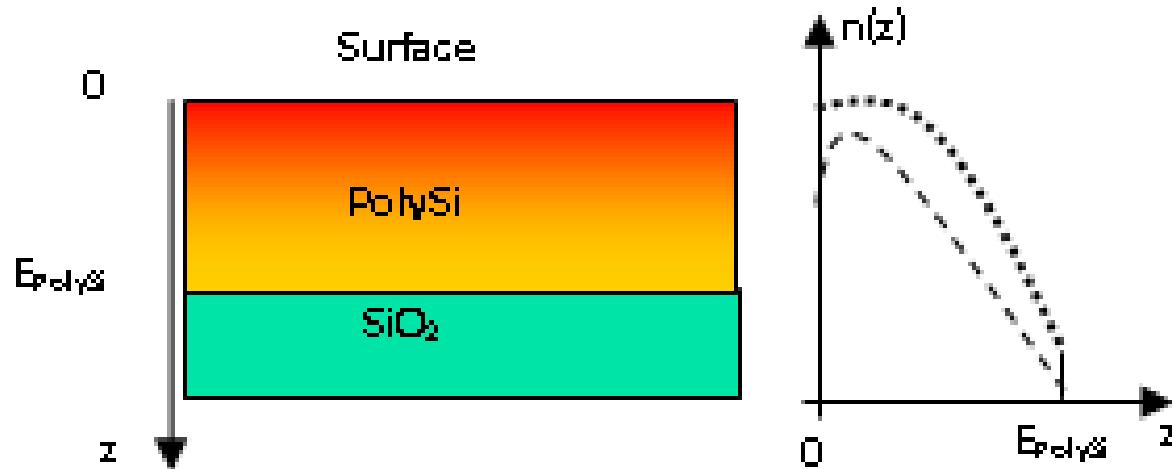
Exemple de réaction du CO avec une maille élémentaire de SnO_2



Approche intéressante en prédictif
Choix/validation d'un matériau sensible pour la détection d'un gaz cible



Simulations Technologiques



Multiphysique

COVENTORWARE^{PM}

Develop Concept

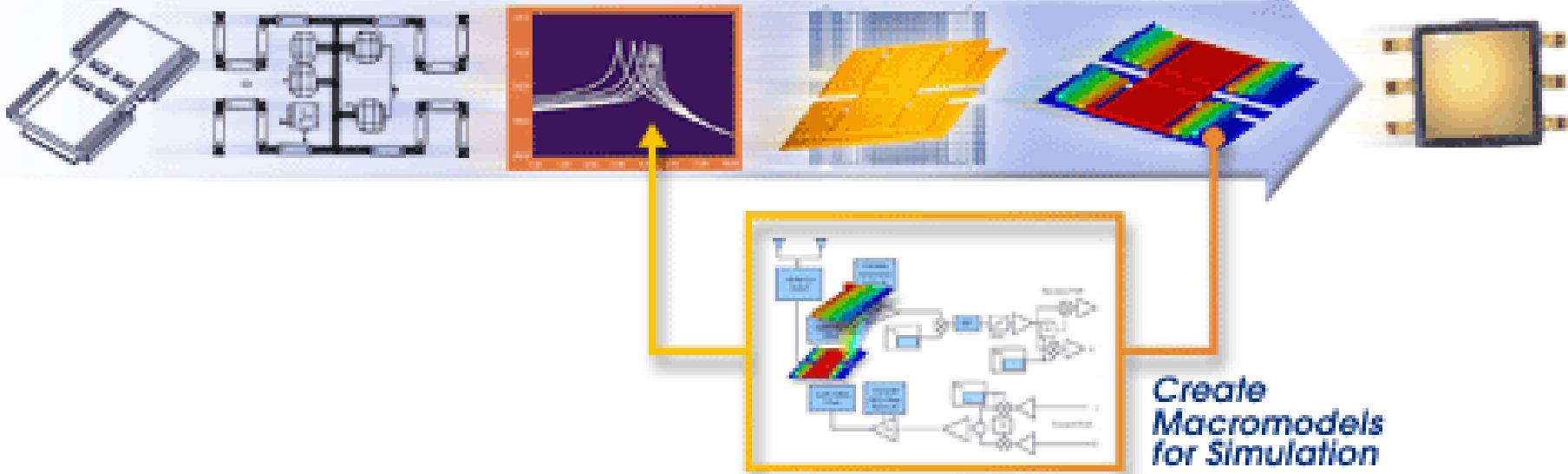
Build Design

Simulate Performance

Create Layout & 3D Model

Perform Detailed Analysis

Fabricate

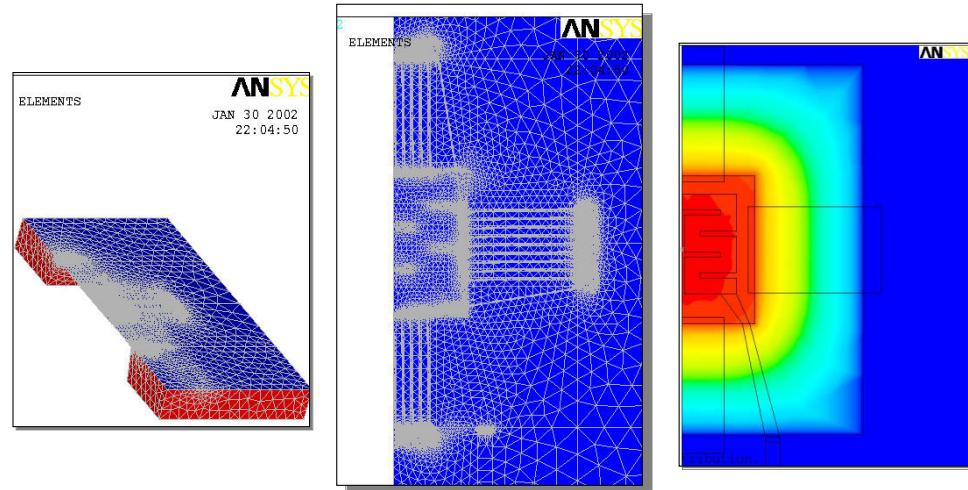
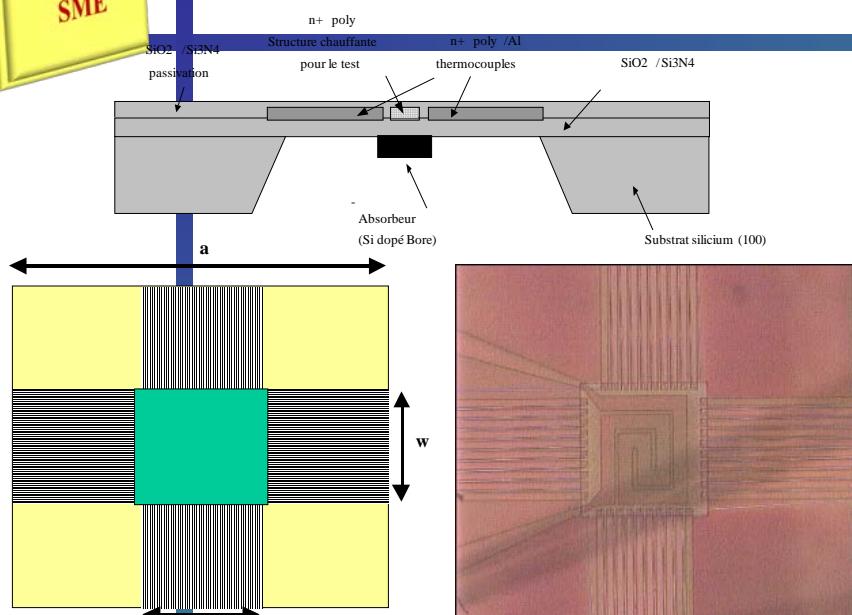


Les outils de conception

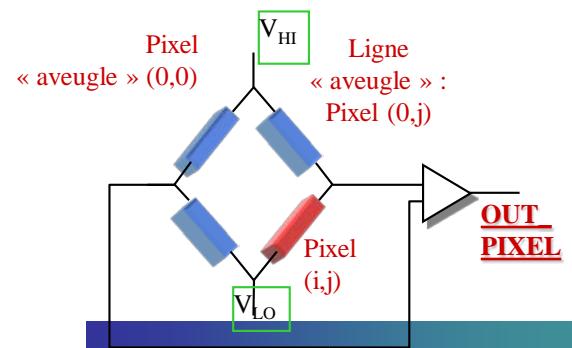
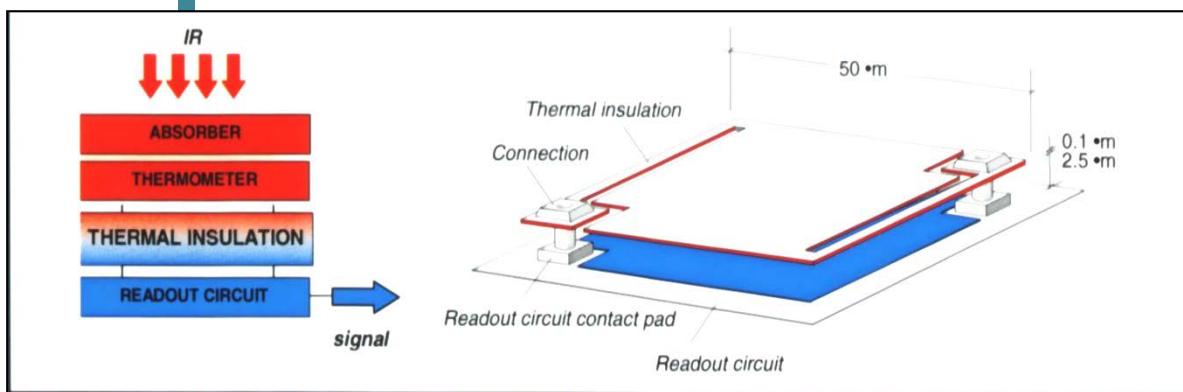
Multiphysique



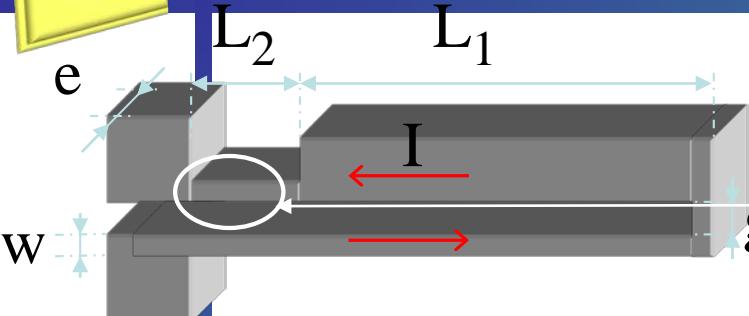
Conception & Modélisation de thermopiles



Imagerie IR (>10μm) :Microbolométrie



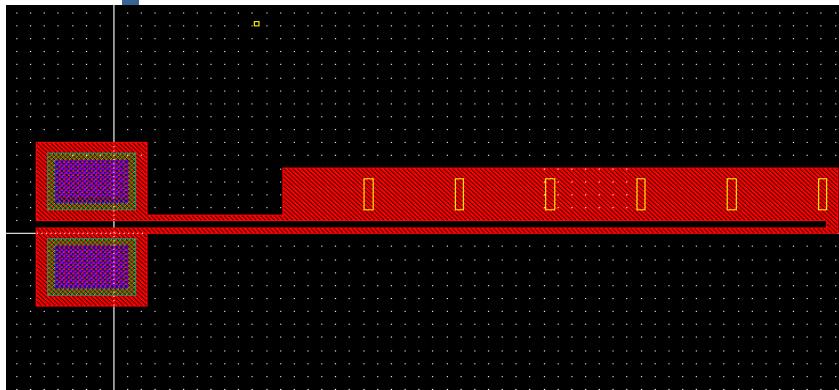
Actionneur type « bilame thermique » (Othman 1988)



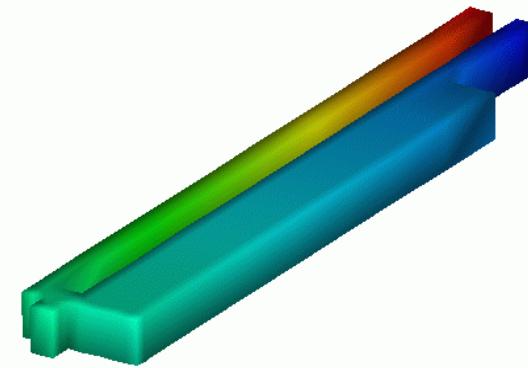
Sens de déplacement (+ effet ressort)

$$\Delta L = L_1 \cdot \alpha \frac{\Delta R \cdot I^2 \cdot g}{\lambda \cdot w \cdot e}$$

$$\alpha_{Si} \approx 0,06 \mu m / {}^\circ K$$



Modèle 2D sous CADENCE



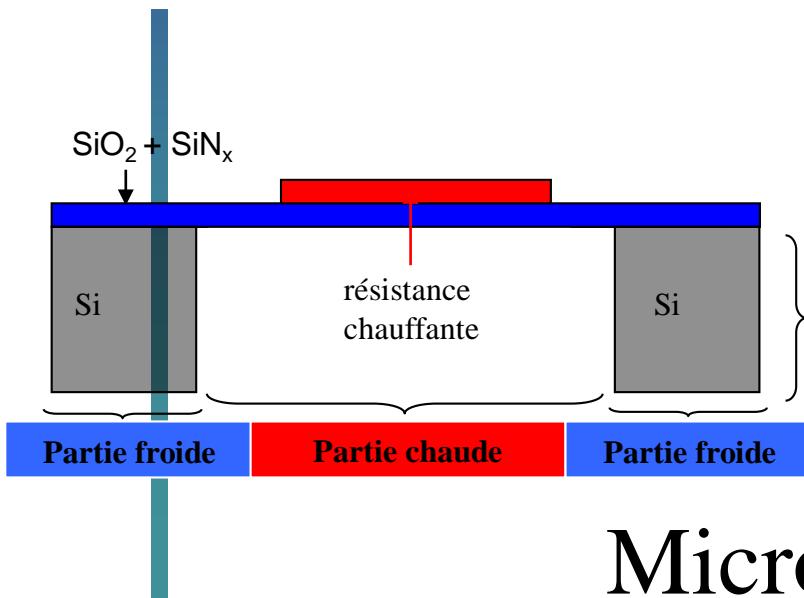
Modèle 3D sous Comsol

Principe :

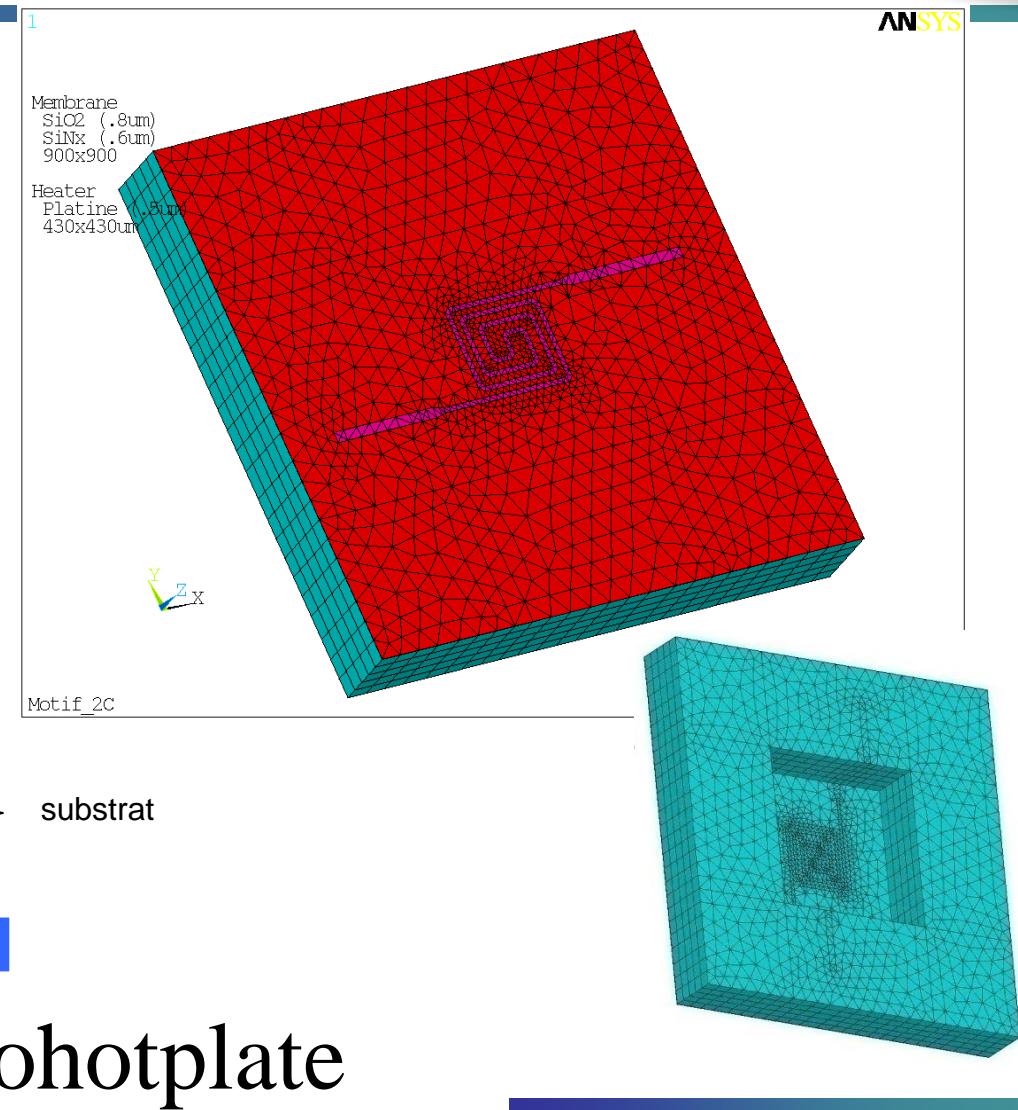
- Utilise l' **effet Joule** pour générer de l'expansion thermique, et donc un déplacement
- L' augmentation de la densité de courant dans la branche la plus fine crée un échauffement du bras et donc une dilatation des dimensions

MULTIPHYSIQUE (ANSYS)

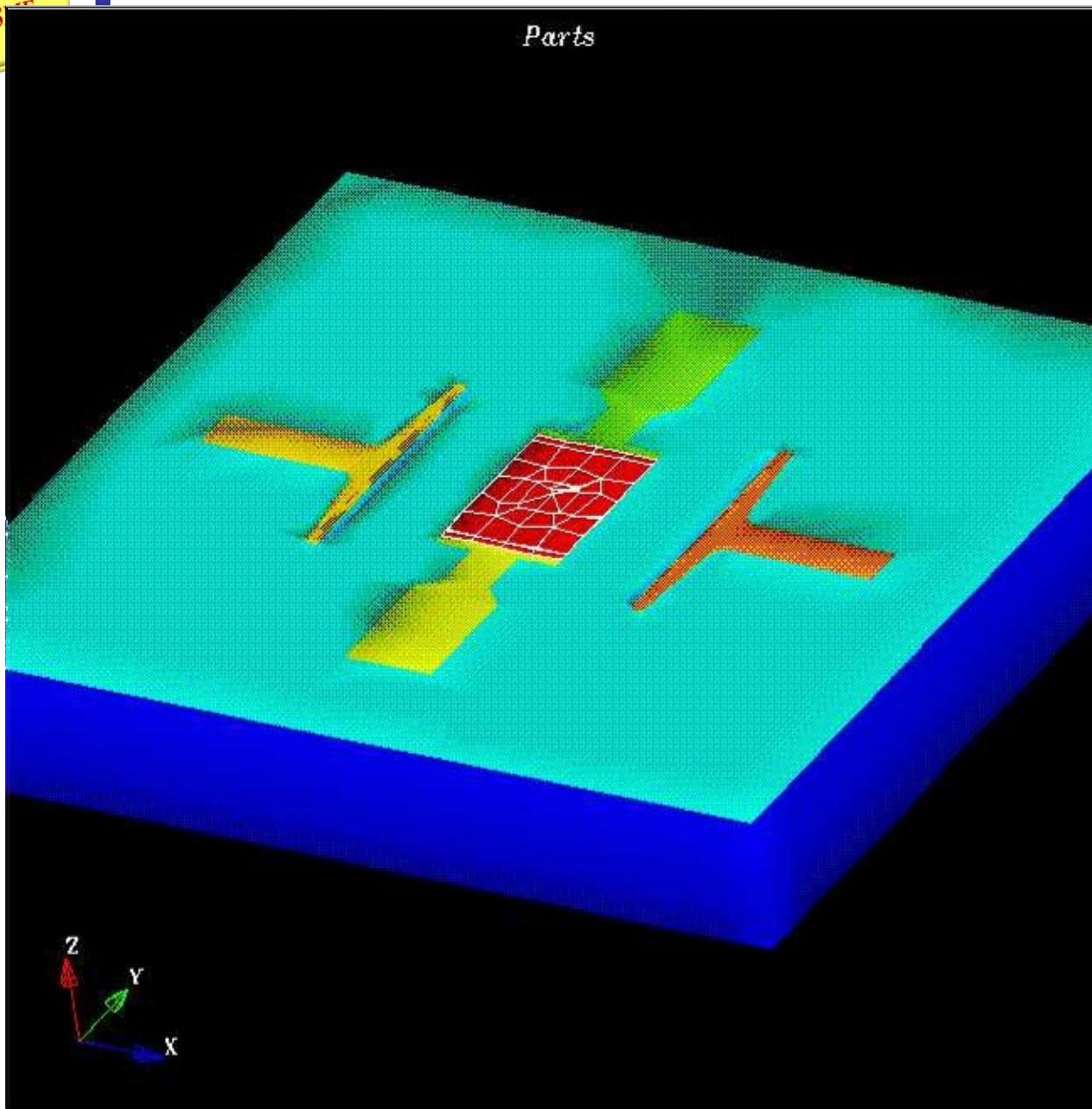
- Structure simplifiée:
 - Substrat Si
 - Membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$
 - Résistance chauffante: Poly-Si ou Platine



Microhotplate



Device composition for the simulation



Etched substrate

SiO_xN_y supporting
membrane

Polysilicon heating resistor

Insulating SiO_2
with contact vias

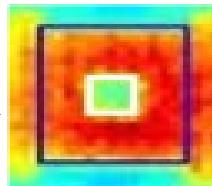
Platinum connections
for Si poly and SnO_2

SnO_2 sensitive layer
(arbitrary shape, thickness
and thermal constants)

Etudes thermoélectriques

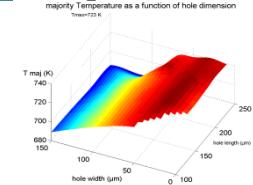
⇒ Paramètres variables:

- Dimension et géométrie de l'élément chauffant,
- Dimension des contacts,
- Dimension de l'élément isolant (taille de la membrane).



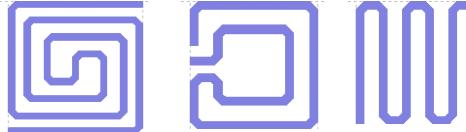
Géométrie
heater PolySi
(homogénéité T°)

Dimensions optimales du trou

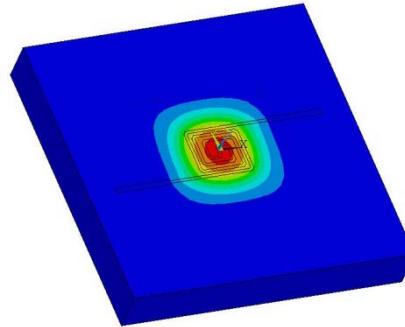


⇒ Analyses :

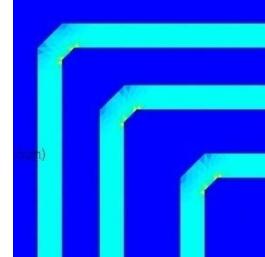
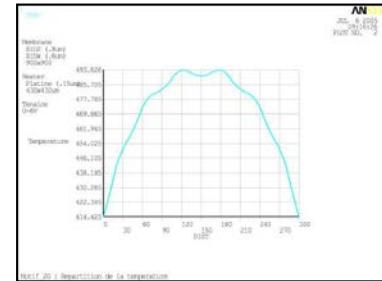
- Répartition Température en fonction de la puissance
- Répartition effet joule
- Section en coupe
- Comportement temporel



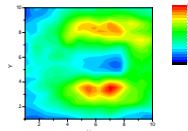
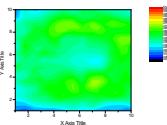
Géométrie heater Pt
(Homogénéité de T°)



Analyse des
points chauds
(heater Pt)



Analyse du
vieillissement
D'un heater PolySi



Conception de la cavité micro-usinée à résonateur diélectrique

Simulation du Résonateur Diélectrique (HFSSV11)

Le résonateur diélectrique(RD)

est maintenu par **une cale** qui permet de régler le couplage et d'éliminer les **modes parasites**



$$H_{cale} = 350\text{um}$$

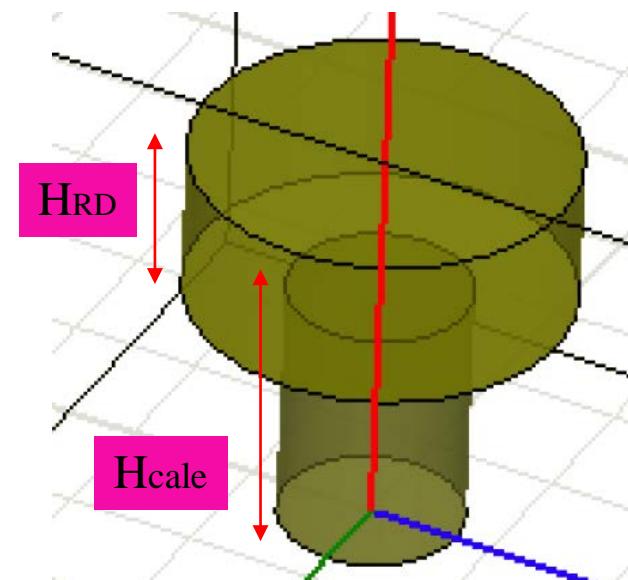
$$R_{cale} = 800\text{um}$$

$$\epsilon_{SiO_2} = 3.9$$

$$HRD = 700\text{um}$$

$$RRD = 3.25\text{mm}$$

$$\epsilon_{RD} = 30$$



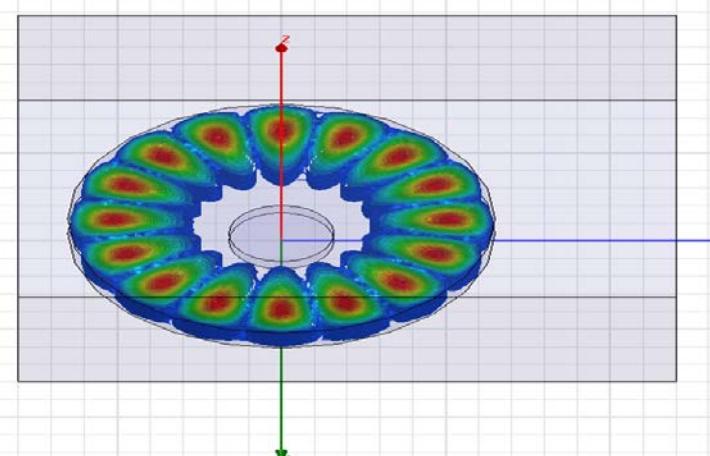
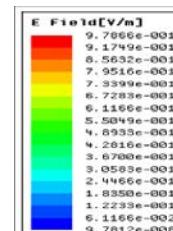
1ere simulation:

cavité en Aluminium:

Eigenmode	Frequency (GHz)
Mode 1	33.2983 +j 0.0129926
Mode 2	33.5444 +j 0.0130317
Mode 3	33.7234 +j 0.0126435
Mode 4	33.7271 +j 0.0130800
Mode 5	33.7272 +j 0.0130814
Mode 6	34.3561 +j 0.0142221
Mode 7	34.3603 +j 0.0142692
Mode 8	35.4561 +j 0.0137889
Mode 9	35.4587 +j 0.0137823
Mode 10	36.5075 +j 0.0136026



1. Les fréquences de résonances pour chaque mode de galerie



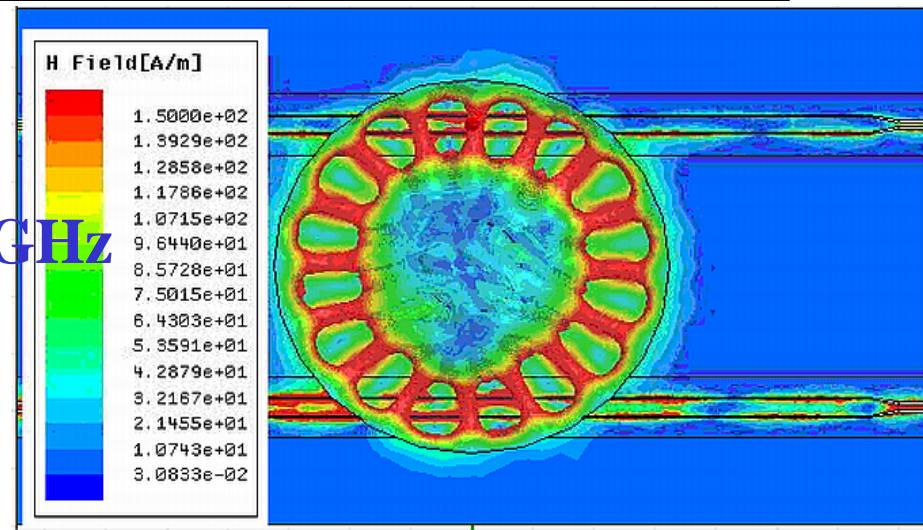
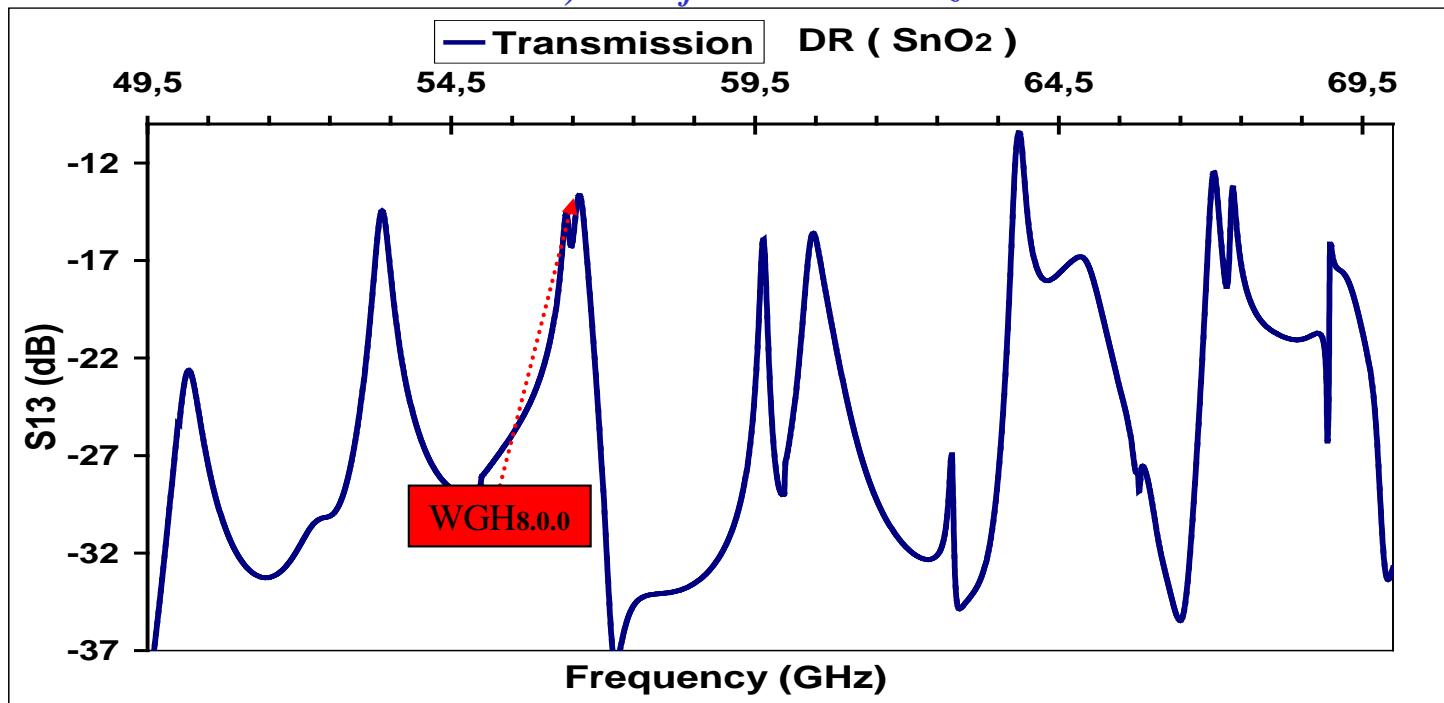
2. Le champ électrique à 35.45GHz (n=8)



$\epsilon_{\text{SnO}_2} = 24$

Résonateur diélectrique à SnO₂

The simulation results of the structure transmission coefficient using full-wave electromagnetic simulation for:
a) SnO₂ from 50 to 70GHz.



WGH_{8,0,0} mode at f r=56.62 GHz

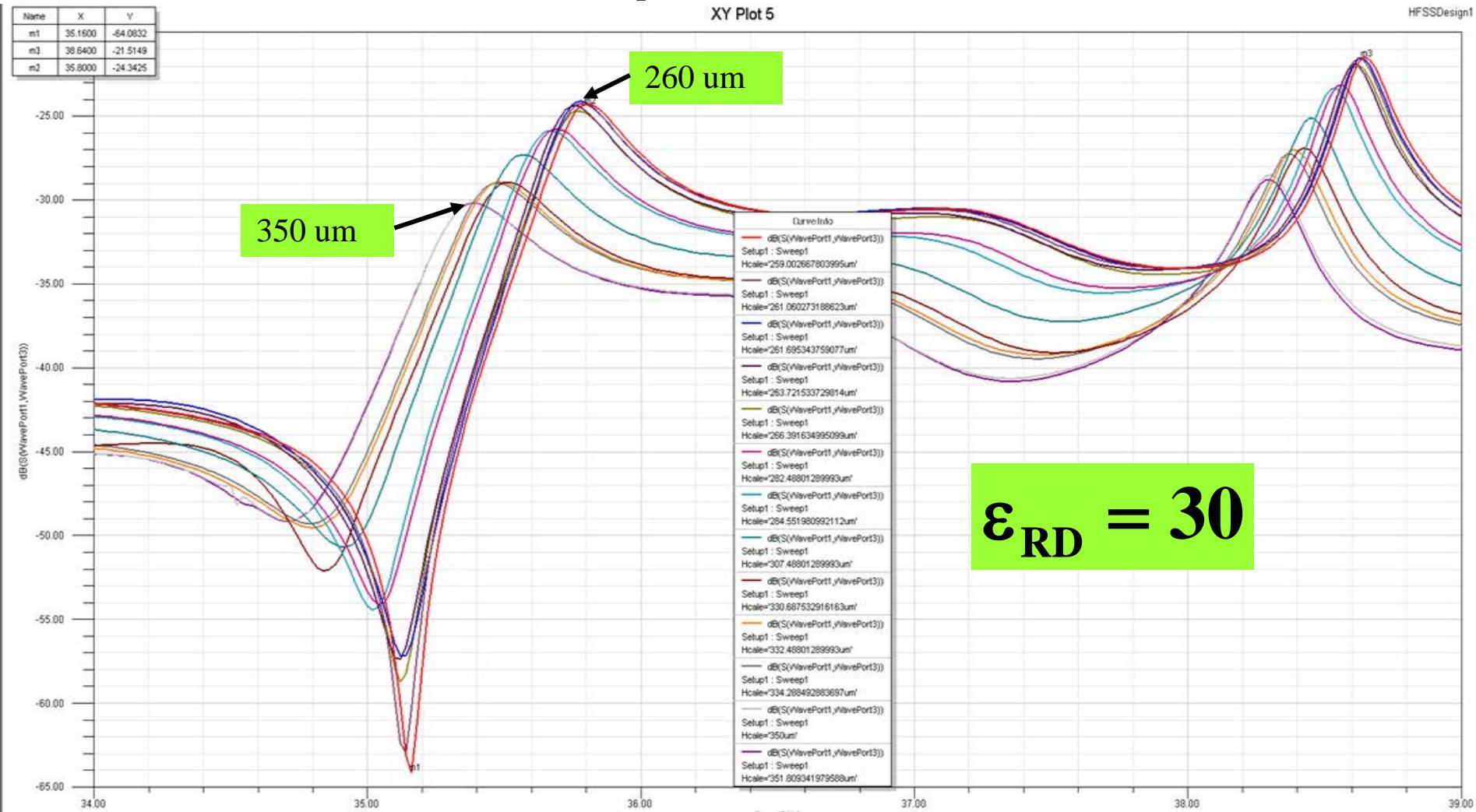
Conception de la cavité micro-usinée à résonateur diélectrique

Simulation du RD couplé à deux lignes coplanaires sur HFSSV11.1

Optimisation

Faire varier la hauteur de la cale entre
350um à 25um avec HRD =700um

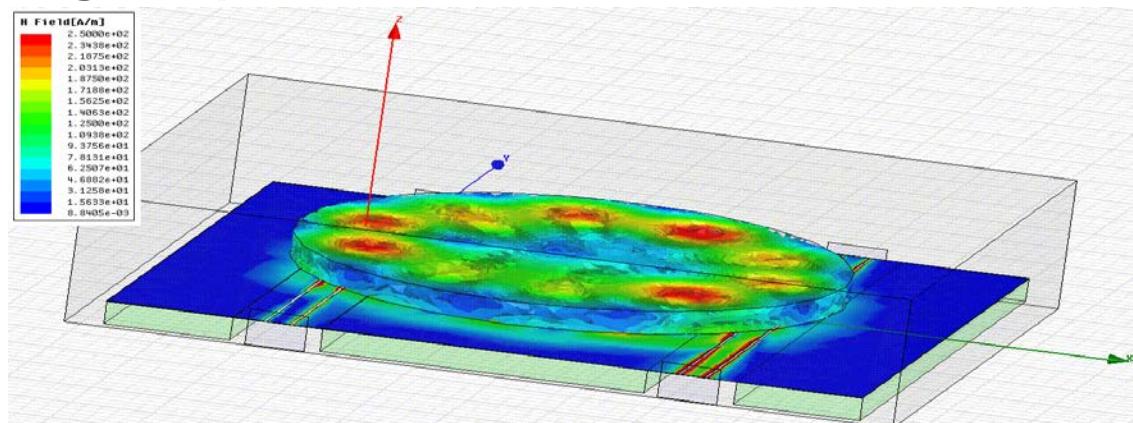
1. S13 sur un intervalle de fréquence [34GHz.39GHz]:



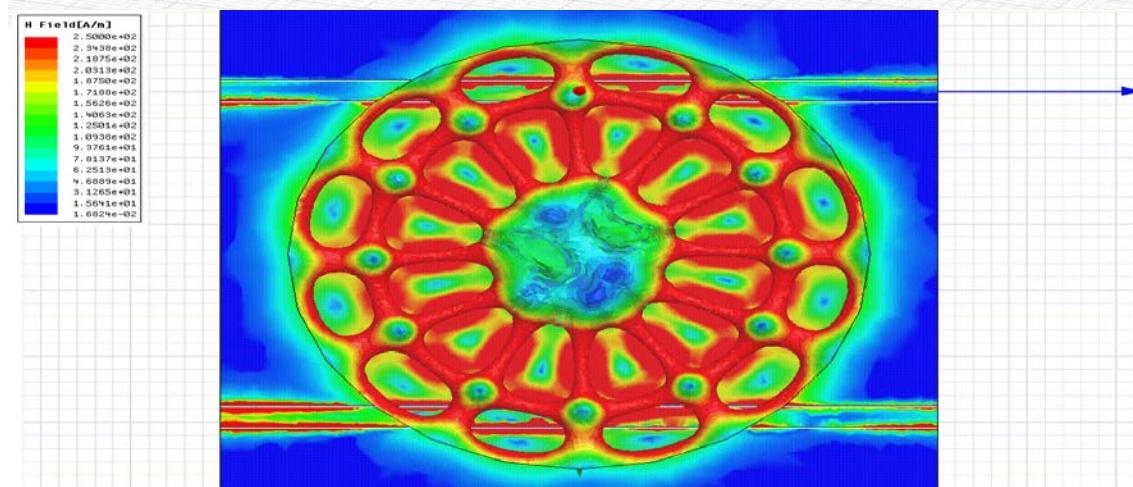
Filtre à base d'un RD à modes de galerie

► Répartition du champ magnétique sur HFSS™

$WGE_{5,0.0}$ à $Fr=26.01\text{GHz}$



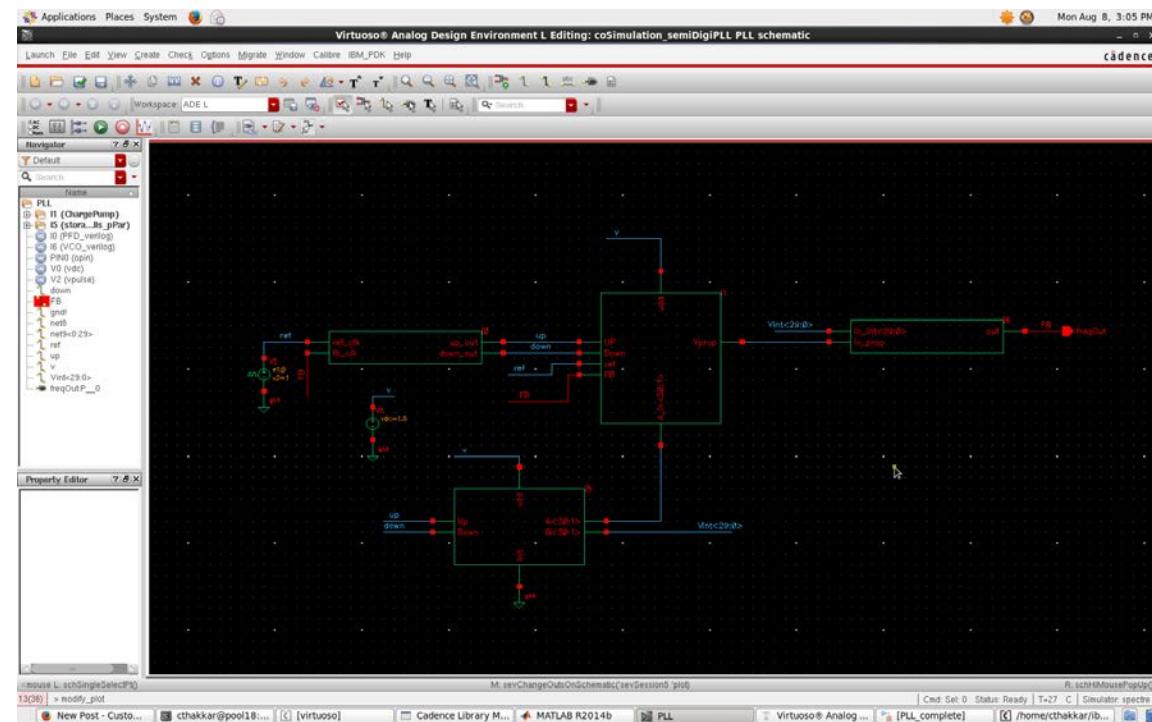
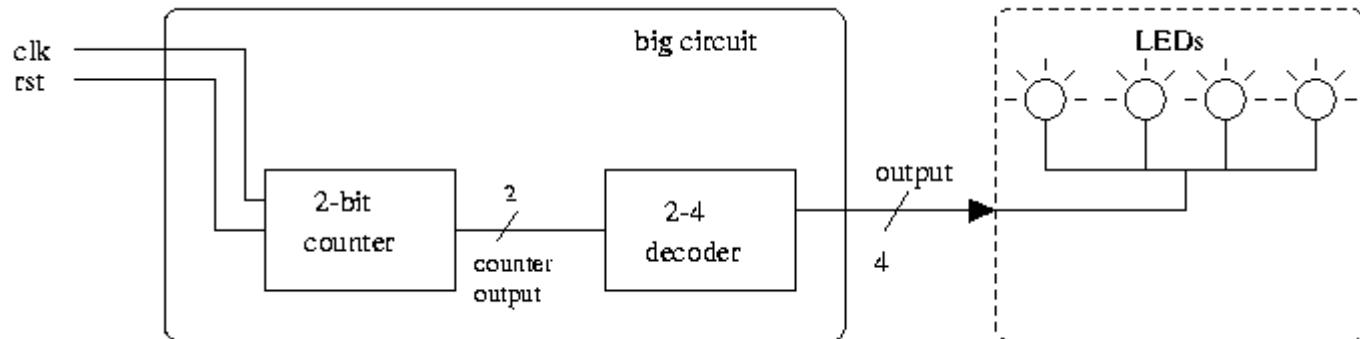
$WGE_{6,1.0}$ à $Fr= 33.34\text{GHz}$



Validation du filtre directif à base d'un RD excité sur des modes de galerie

Simulations Comportementales

Cours de VHDL-AMS // CADENCE



Plan

1. Introduction Généralités
2. Les Technologies de Fabrication
3. Exemples De Micro-capteurs & actionneurs
4. Les Outils de Conception
5. Prospectives : Les Matériaux pour les Microsystèmes de demain...



Les Microsystèmes d'aujourd'hui et de demain ...

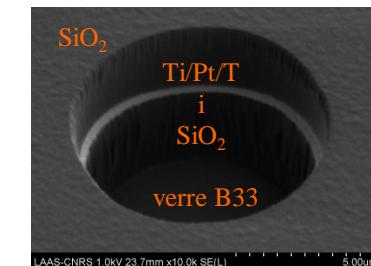
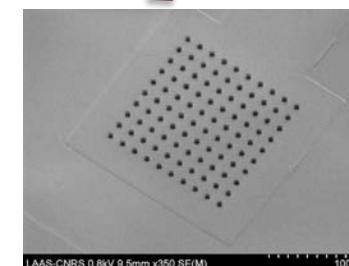
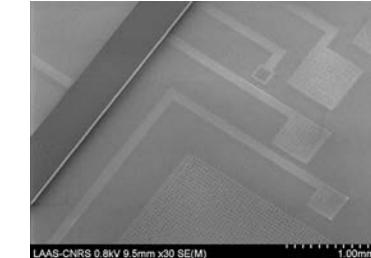
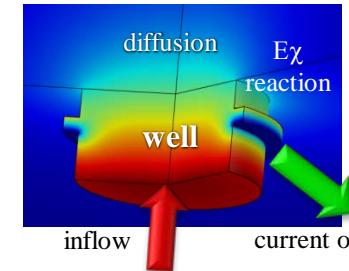
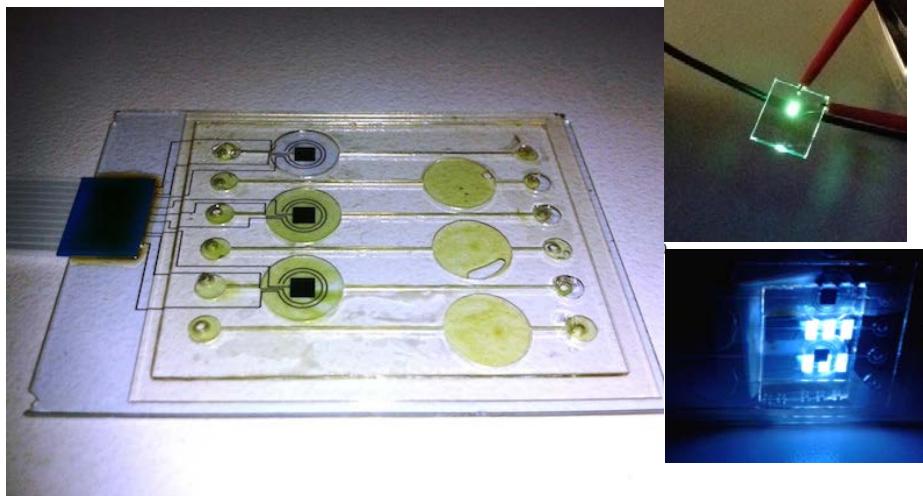
- Les μsystèmes Microfluidiques
 - Les Lab-on-Chip
- Les μsystèmes pour le Médical
- Vers les réseaux de capteurs distribués
- Les Nanosystèmes



Biosensing at the micro- and nano-scale

- A. Physics of nanomaterials
- B. Advanced materials for nanodevices
- C. Sensing (Bio-, Chemo-)**
- D. Living cells analysis

AIM: Providing innovative devices for the liquid phase bio-analysis in micro- and nanovolumes



Coupling optical and electrochemical detection principles in microvolume:
OLED/ElecCell functional integration into lab on chip

Integration of nanoelectrodes and nanoelectrode arrays into microwell and microwells array

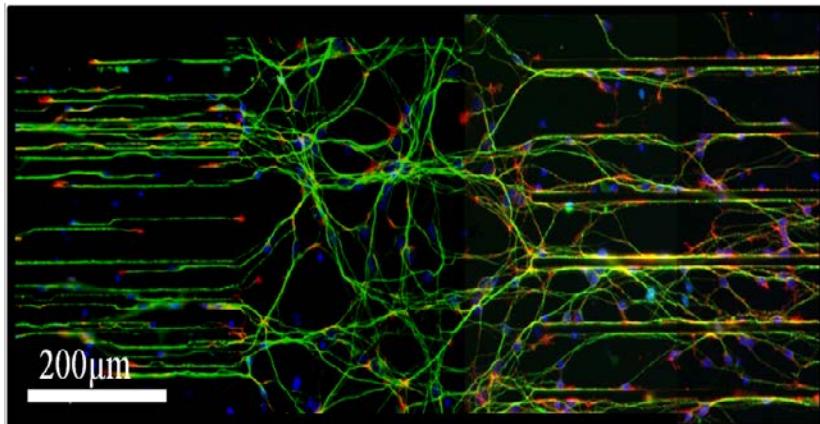
METHOD: design, simulation, technological integration and characterization

APPLICATIONS: Monitoring of cell cultures or single cell analysis

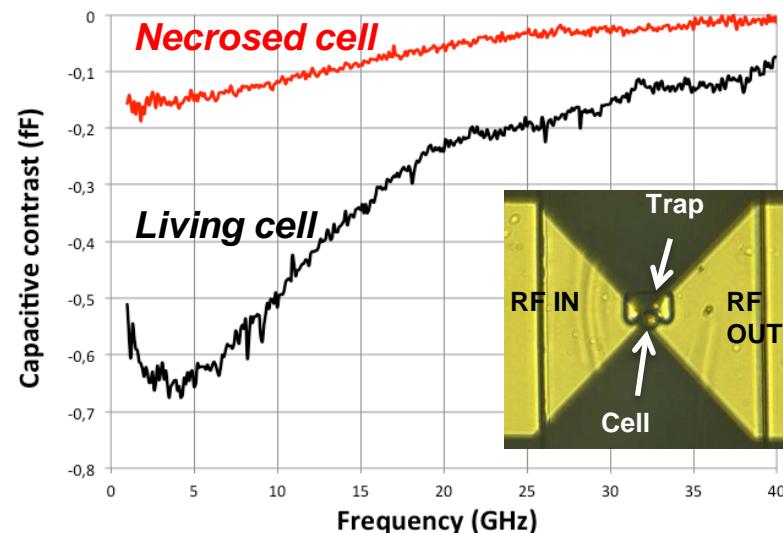
Living cells analysis

- A. Physics of nanomaterials
- B. Advanced materials for nanodevices
- C. Sensing (Bio-, Chemo-)
- D. Living cells analysis

AIM: Exploring living cells and their interaction with engineered surfaces/cell environment



Topographical surface patterning : design of controlled neuronal architecture



Non-invasive, contact-less discrimination of single lymphoma cell through MDS in culture media

METHOD: multifunctional microsystems for Manipulating and Monitoring living cells

APPLICATIONS: Oncology-related diagnosis and prognosis, personalized medicine

Biomaterials (2012), *Macromol. Biosci.* (2013), *Invited IEEE T-MTT* (2013), *IEEE Life Science Newsletter* (2013)

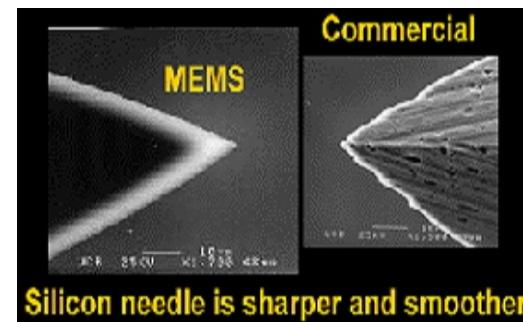
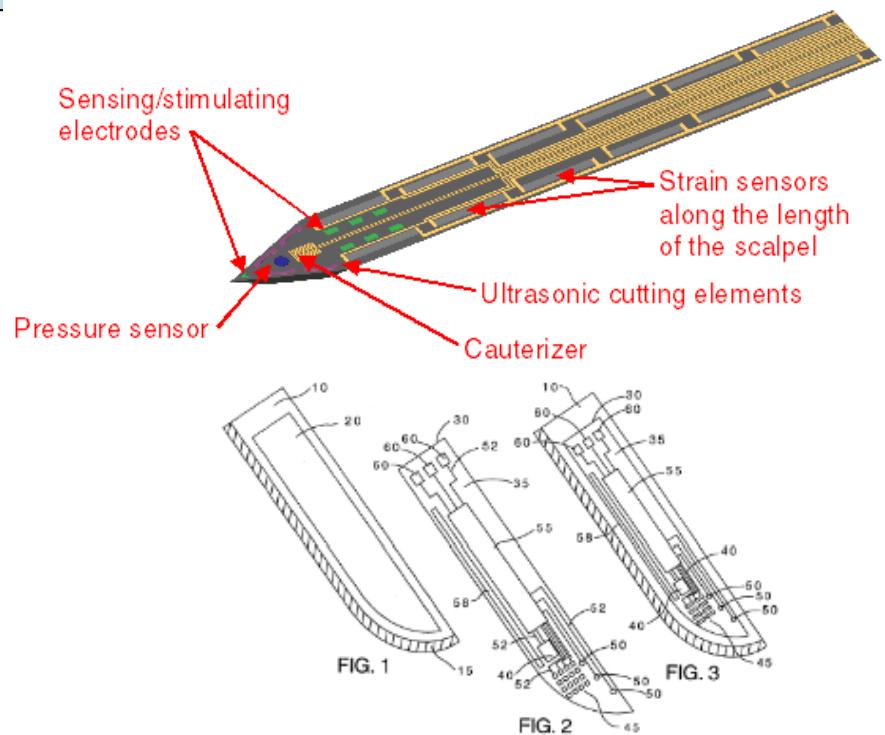
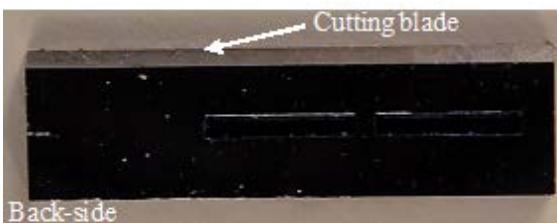
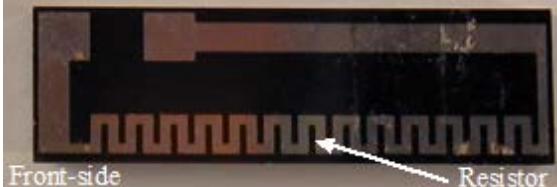
Les Microsystèmes d'aujourd'hui et de demain ...

- Les μsystèmes Microfluidiques
 - Les Lab-on-Chip
- **Les μsystèmes pour le Médical**
 - Vers les réseaux de capteurs distribués
 - Les Nanosystèmes



Future directions of R&D and technical challenges (silicon microtechnologies)

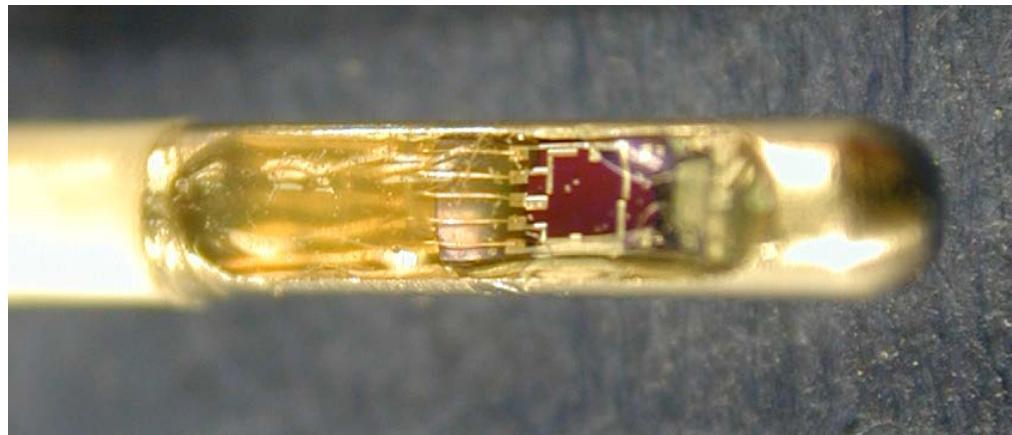
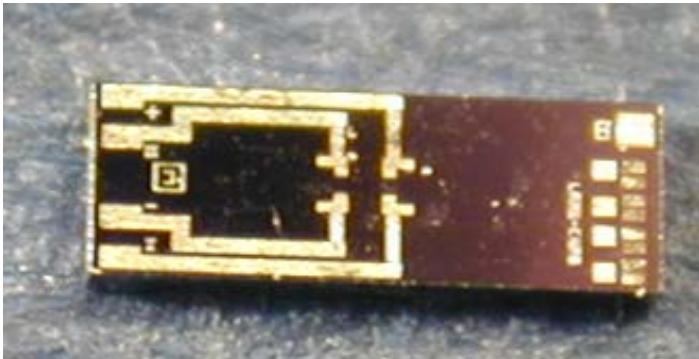
Smart-silicon Blade for coagulation-cutting (LAAS, France), 2005



Multi-sensor/actuator silicon tool, sharp-silicon needles (Verimetric, US), 2002

Future directions of R&D and technical challenges (silicon microtechnologies)

Mesure de Pression intracranienne (0 / 0.4 bars)

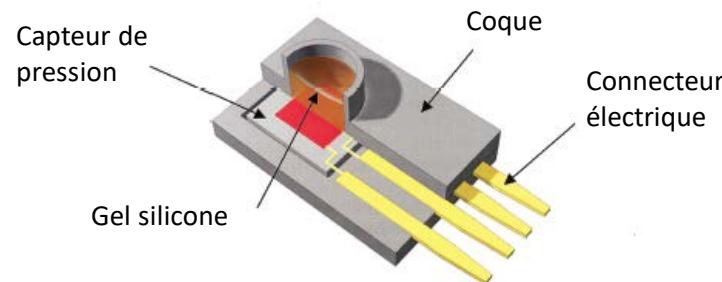
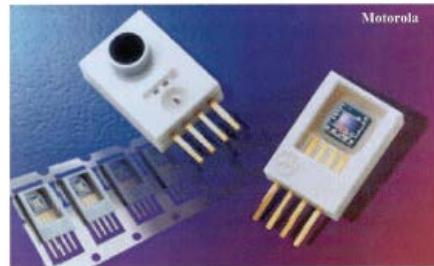


LAAS-CNRS, M2D, Patrick PONS : ppons@laas.fr

Transfert industriel à
HEMODIA en cours

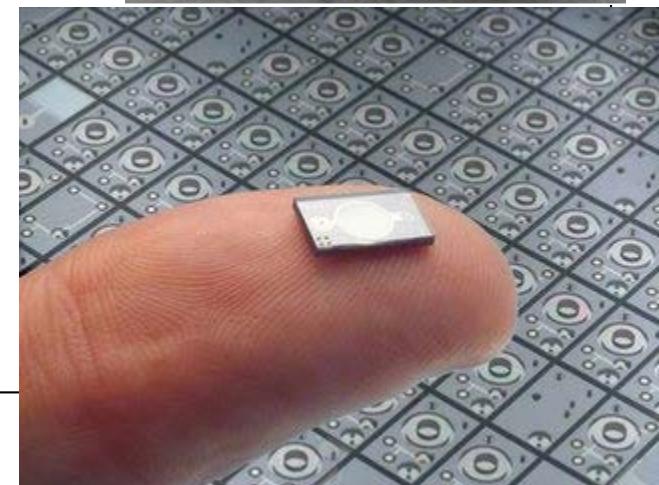
Monitorage de la pression sanguine

- Capteur de pression piezorésistif
- Jetable
- Lignes intraveineuses en réanimation
- Motorola, NovaSensors, EG&G IC sensors



Les systèmes actifs : La nano pompe à insuline

- Injection sous cutanée continue
- Technologie MEMS microfluidique
- Actionneur piézoélectrique
- Dosage précis (200 nl)
- Coût faible ? (volume)
- Disponible depuis fin 2008
- Patch jetable



Micro pompe implantable



MIP implantable

The new generation of
implantable pumps



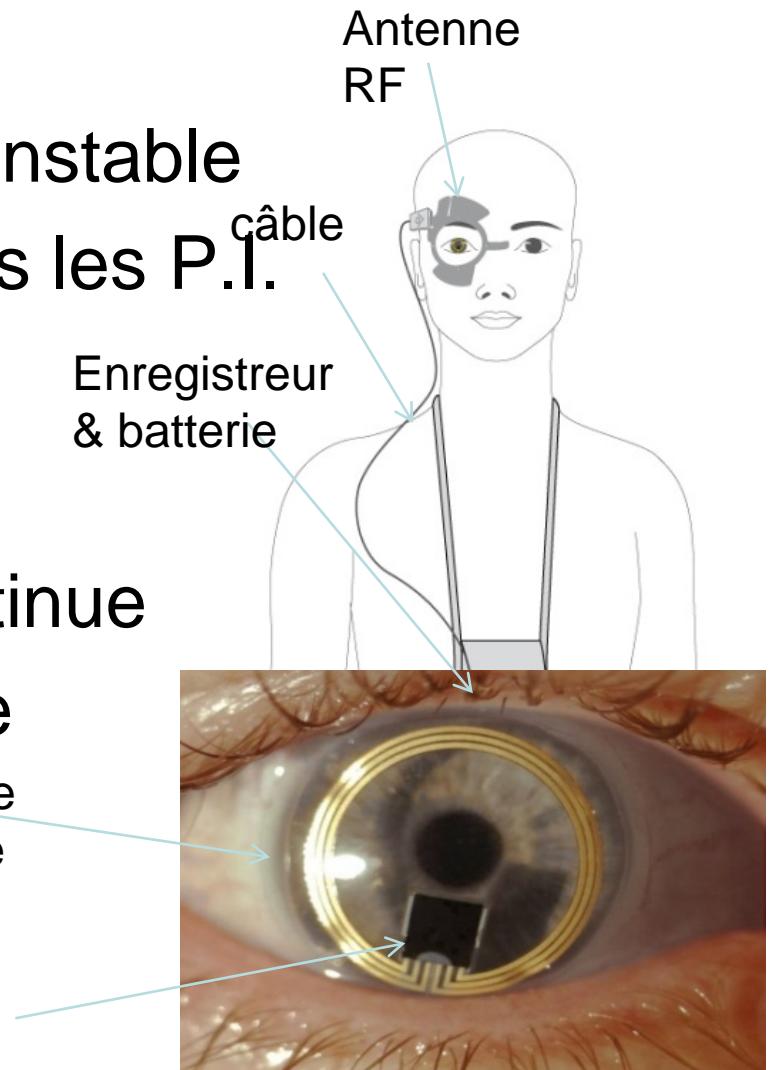
Main performance specification

Flow rate	0 to 100 $\mu\text{l/h}$	This is the linear range, stroke volume is constant and the flow rate is proportional to the frequency (Frequency range 0-0.2Hz).
Priming rate	250 $\mu\text{l/h}$	This is the maximum flow rate in the uncontrolled range. (Frequency 2Hz).
Stroke volume	150 nl	Minimum dosage unit.
Leakage	Non measurable $< 0.05 \text{ ml/h}$	Forward and backward leak with 150 mbar overpressure applied on inlet respectively on outlet.
Accuracy	$\pm 5\%$	Overall accuracy of the stroke volume within nominal conditions.
Inlet pressure Outlet pressure	-350 to +350 mbar -400 to +200 mbar	
Viscosity	0-10 mPa.s	
Actuation voltage	-40V/ +110V	Voltage applied to the piezo disc.
Compression ratio	$e = \Delta V/V_0 = 1.15$	The pump is self priming and tolerant to small air bubbles.
Reliability	1.8×10^8 stroke 67 days	(equivalent to 25yr of use). Accelerated dry test at 10Hz : no measurable degradation. Real time liquid flow test 0.05Hz (see plot below).
Chip dimensions	16x12x1.86mm	

(Currently under development)

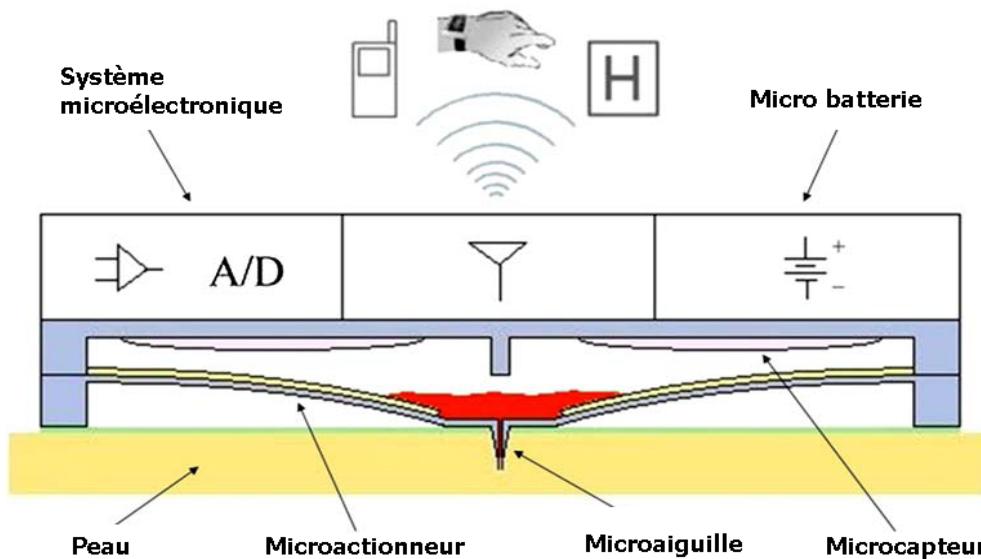
Diagnostic du glaucome

- Glaucome :
 - surpression ou pression instable
 - 2^{ème} cause de cécité dans les P.I.
 - 50% non diagnostiqués
- Solution : TriggerFish
 - Capteur de pression continue
 - Lentille de contact souple



Electronic Mosquito

- Glucomètre automatique : analyse temps réel
- Echantillon sanguin : $1,5 \mu\text{L}$
- Mesure semi-invasive : glycémie
 - Nominale : $0,7\text{g/L}$ à $1,2\text{g/L}$
- Ensemble de 4 microsystèmes



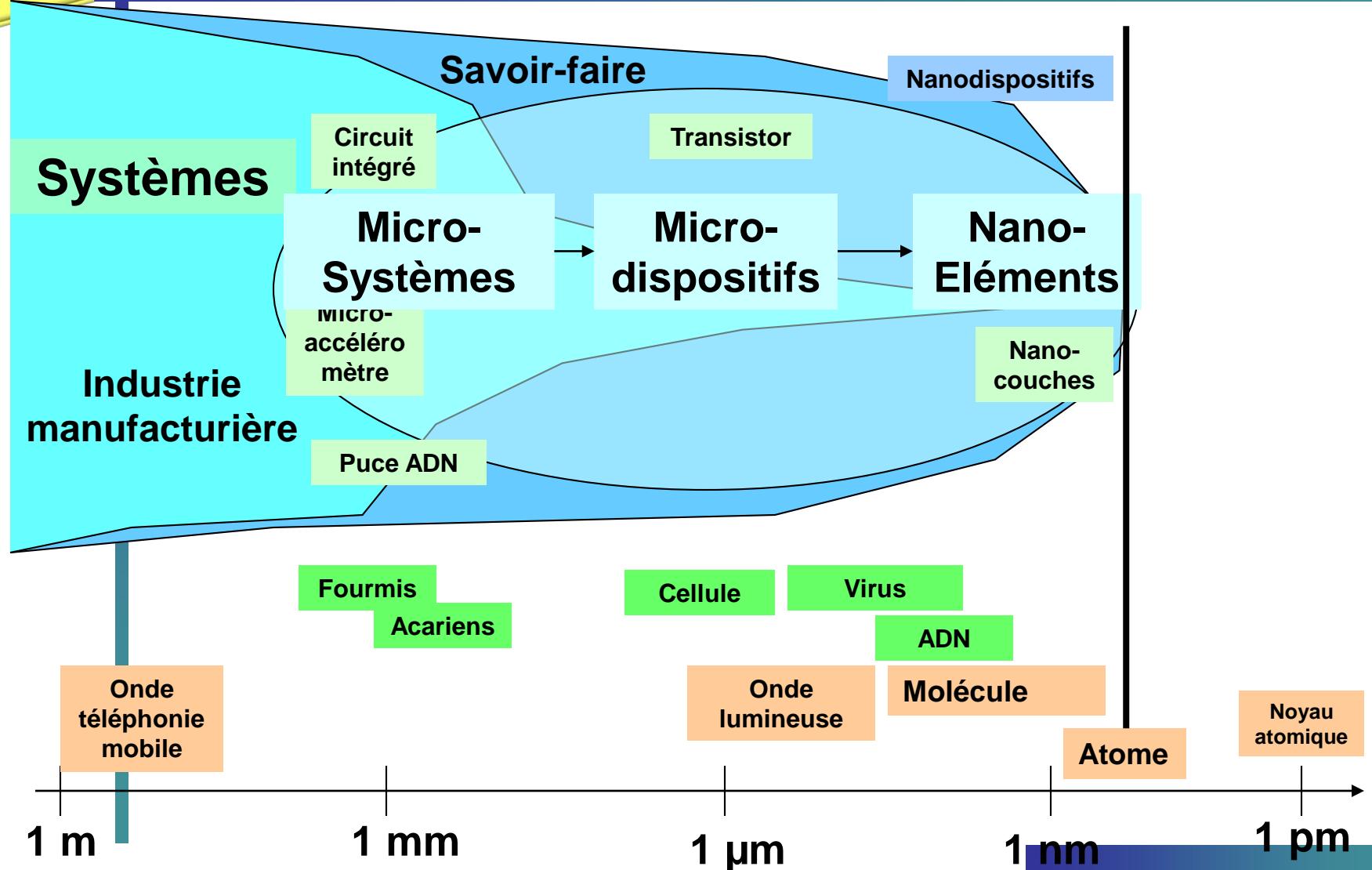
Les Microsystèmes d'aujourd'hui et de demain ...

- Les μsystèmes Microfluidiques
 - Les Lab-on-Chip
- Les μsystèmes pour le Médical
- **Vers les réseaux de capteurs distribués (IoT)...**
- Les Nanosystèmes

Les Microsystèmes d'aujourd'hui et de demain ...

- Les µsystèmes Microfluidiques
 - Les Lab-on-Chip
- Les µsystèmes pour le Médical
- Vers les réseaux de capteurs distribués
- **Les Nanosystèmes**

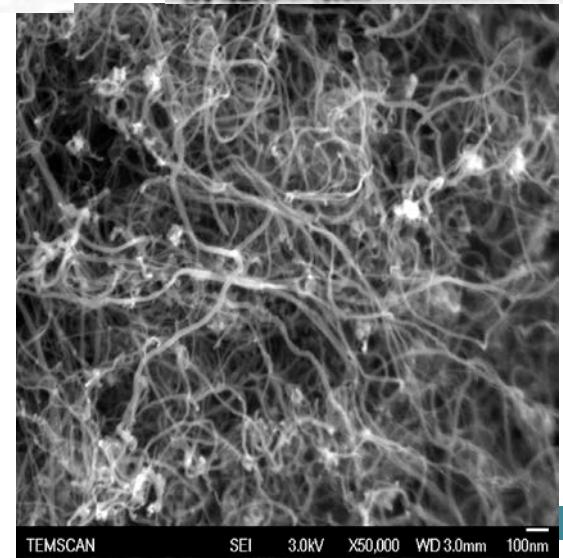
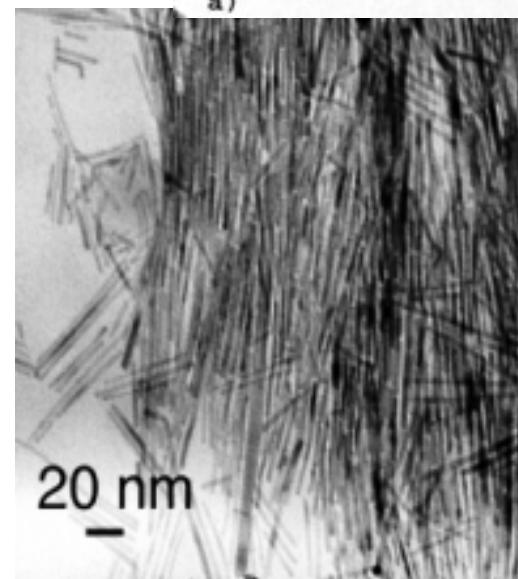
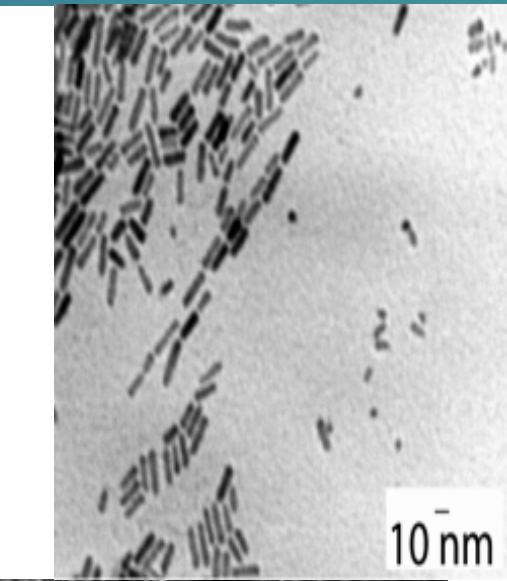
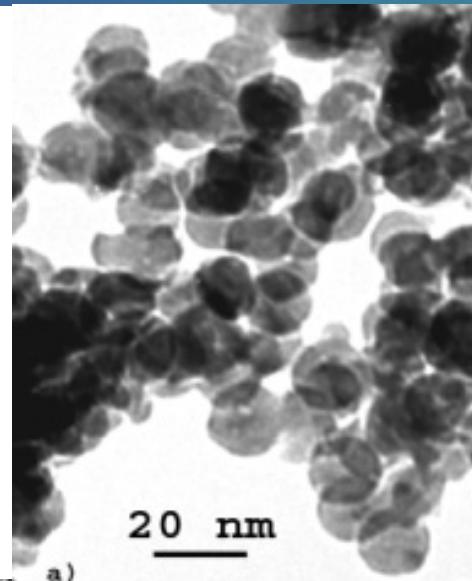
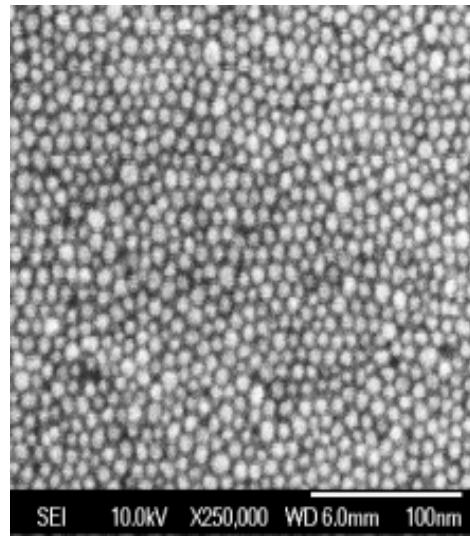
Les Microsystèmes d'aujourd'hui et de demain ...



Un nanomètre c'est quoi?

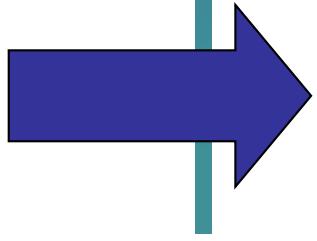
- 500 000 fois plus fin qu'un trait de stylo bille
- 30 000 fois plus fin qu'un cheveu
- 100 fois plus petit que la longueur d'une molécule d'ADN
- 4 atomes de Silicium côte à côte

Les nanomatériaux



Les nanotechnologies c'est quoi?

- mise au point de nouvelles méthodes d'assemblages (atome par atome, molécule par molécule) inspirées de la chimie, de la biologie afin de construire les nano objets.
- Structuration à l'échelle sub-micronique

 Défis scientifiques et technologiques

Les Nanotechnologies

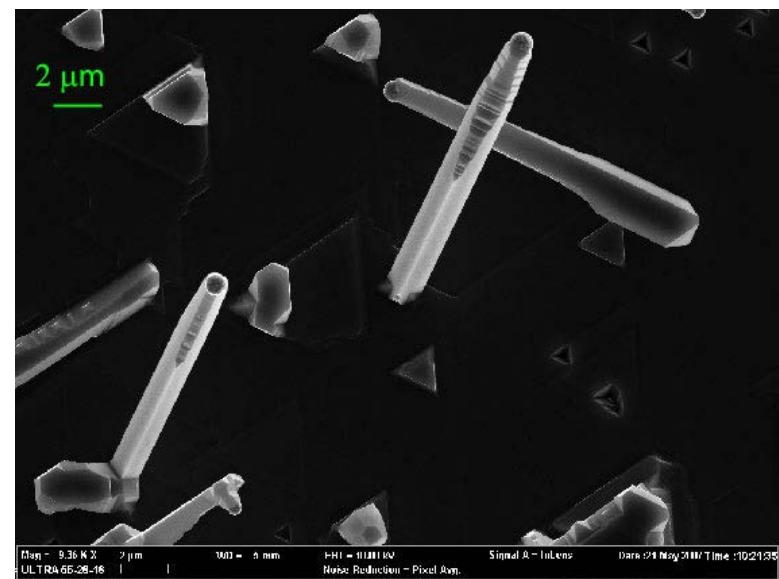
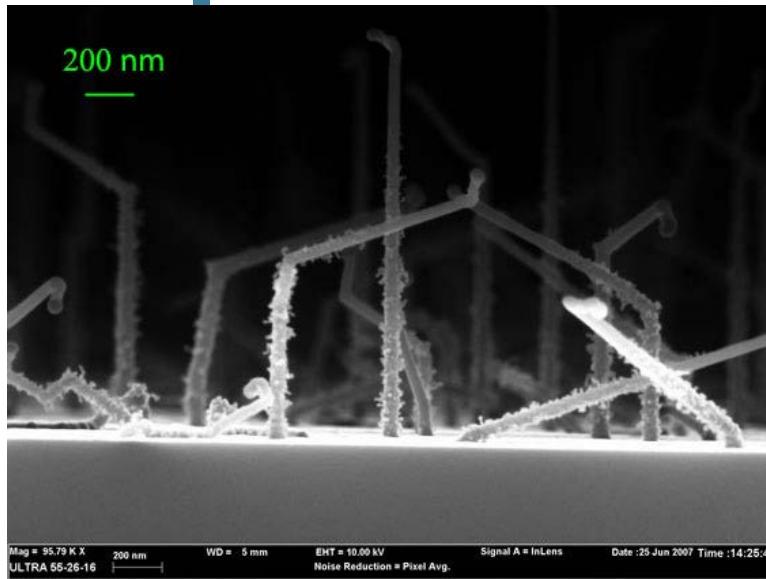
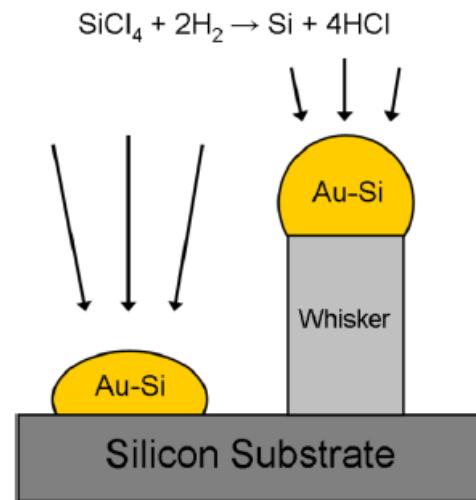
Bottom-up (Synthèse-croissance) :

- Synthèse en voie chimique ou phase vapeur
- Croissance VLS,
- Diélectrophorèse

Top-down (structuration de couches) :

- Lithographie électronique
- Lithographie laser
- Nano impressions

Croissance par VLS

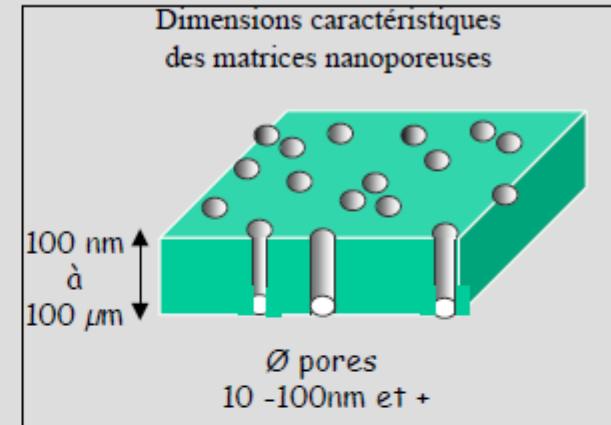


Approche Bottom-up par template

« technique versatile qui consiste à utiliser une **matrice nanoporeuse** comme moule ou milieu confinant imposant sa morphologie au matériau déposé à l'intérieur »

deux types de matrices nanoporeuses :

- inorganiques telles que l'alumine poreuse, le silicium poreux, la famille des matériaux mésoporeux (zéolithes,...),
- organiques, généralement des membranes de polycarbonate.



Les **techniques de remplissage** des nanopores sont variées:

- synthèse chimique
- synthèse électrochimique
- injection haute pression, sels fondus
- méthode sol-gel

Cette méthode permet de réaliser des nanofils de:

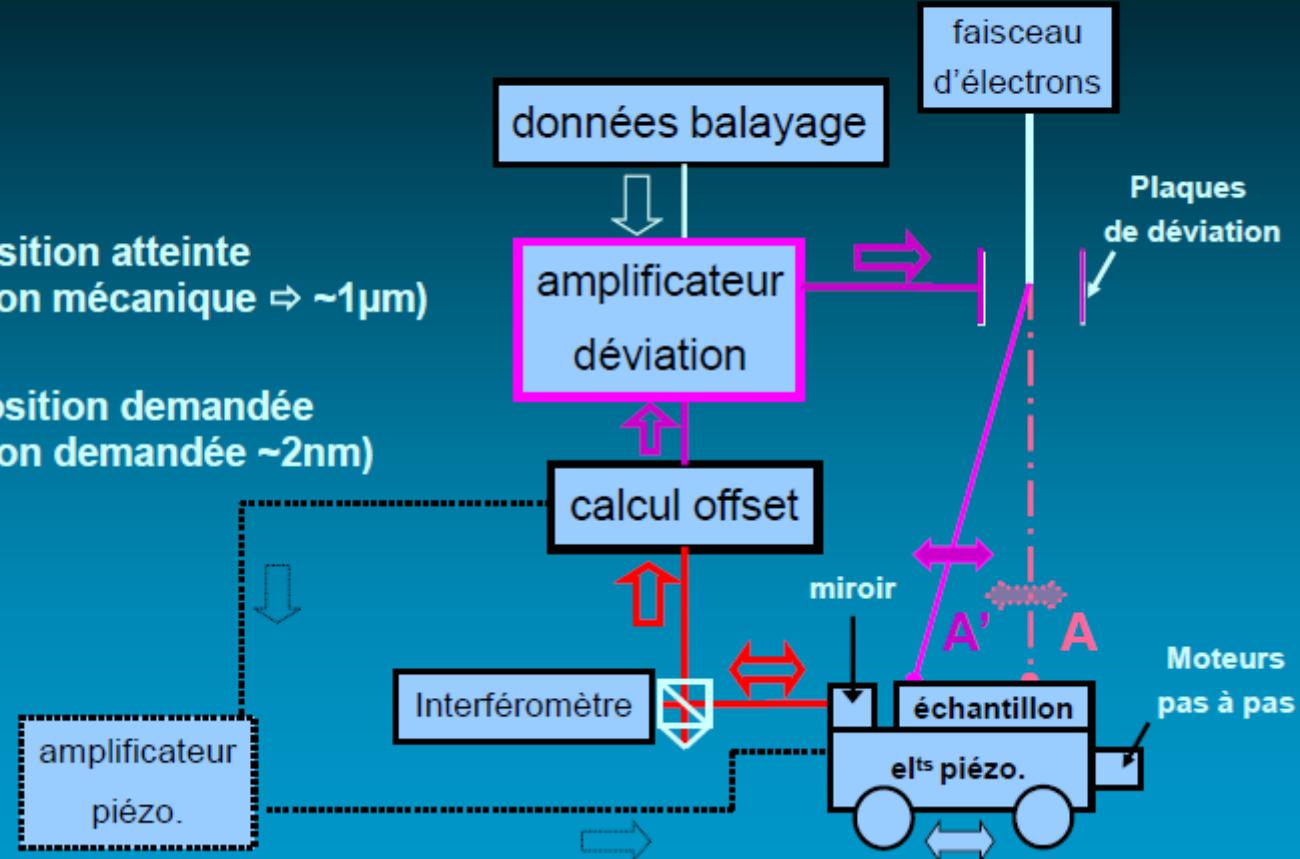
- métaux, semi-métaux
- semiconducteurs
- oxydes
- polymères conjugués

Approche Top-down

16/50

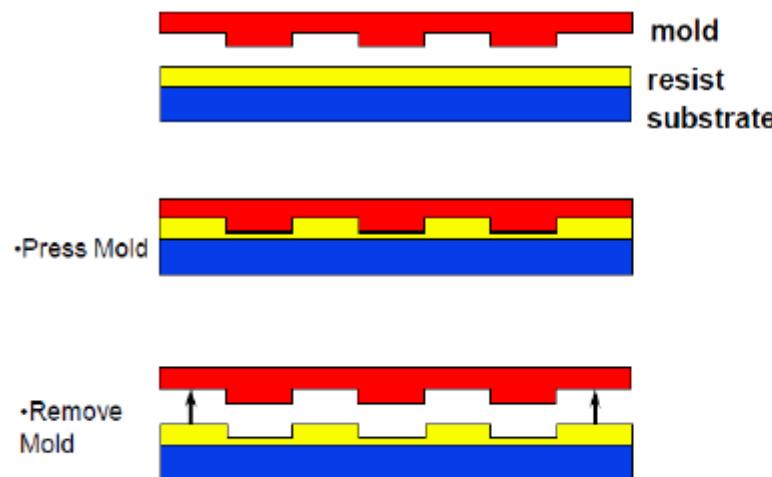
LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE : SYNOPTIQUE

- A : position atteinte
(précision mécanique $\Rightarrow \sim 1\mu\text{m}$)
- A' : position demandée
(précision demandée $\sim 2\text{nm}$)



Principe

- ▶ Duplication de motifs de haute résolution par mise en contact d'un moule structuré et d'un matériau déformable.

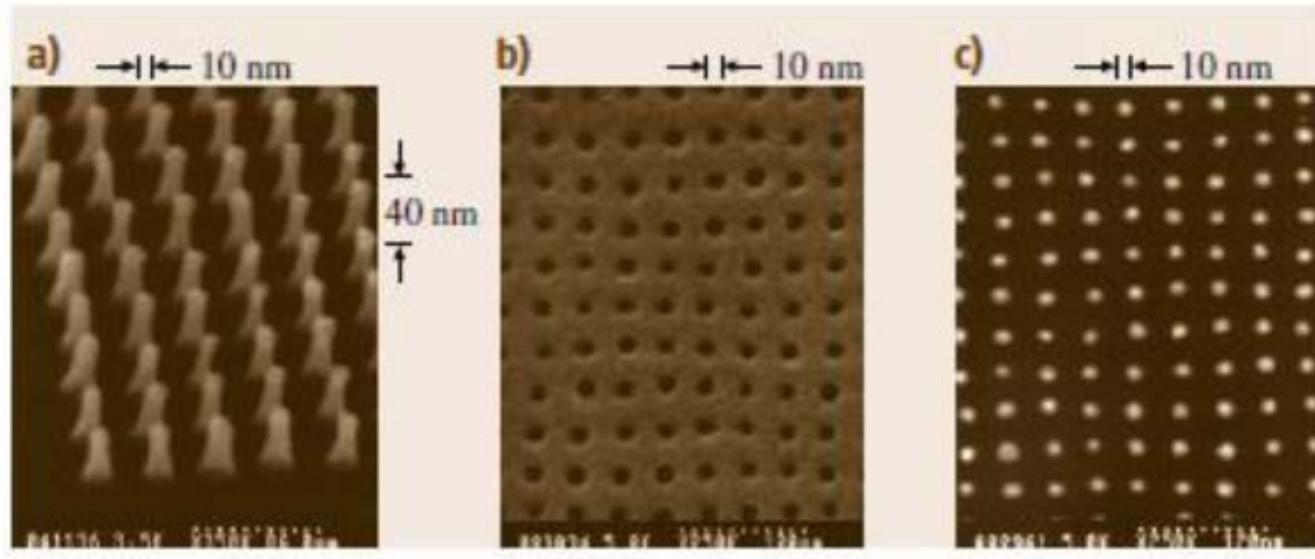


- ▶ Points clé
 - ▶ le moule
 - ▶ résolution,
 - ▶ traitement de surface
 - ▶ la résine
 - ▶ rhéologie
 - ▶ nature (monomère, polymère)
 - ▶ propriétés
 - ▶ homogénéité du procédé NIL
 - ▶ surfaces
 - ▶ épaisseur résiduelle
 - ▶ le transfert des motifs
 - ▶ RIE
 - ▶ lift-off
- ▶ Pas de procédé standard
 - ▶ nombreuses variantes
 - ▶ en lien avec l'application



La Nanoimpression - Nanoimprint

1ers résultats de S. Chou en 1997



moule Si

impression
dans PMMA

lift-off de 10nm
de métal

Premiers résultats : très grande résolution (limitée par le moule),
procédé simple,
capacité de production de masse

20xx : Rencontre programmée des μ et nanotechnologies

μélectronique

Dimensions :
-30% tous les 18 mois

100nm
en 2000

« Top-down »

30nm en 2010
Couches monoatomiques

10-30nm

« Bottom-Up »

Nanotechnologies

Assemblage
« auto organisé »
D'atomes et molécules

Manipulation collective

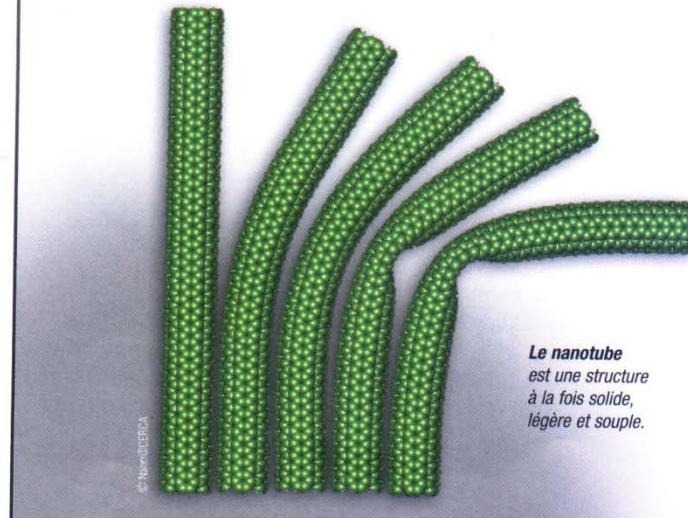
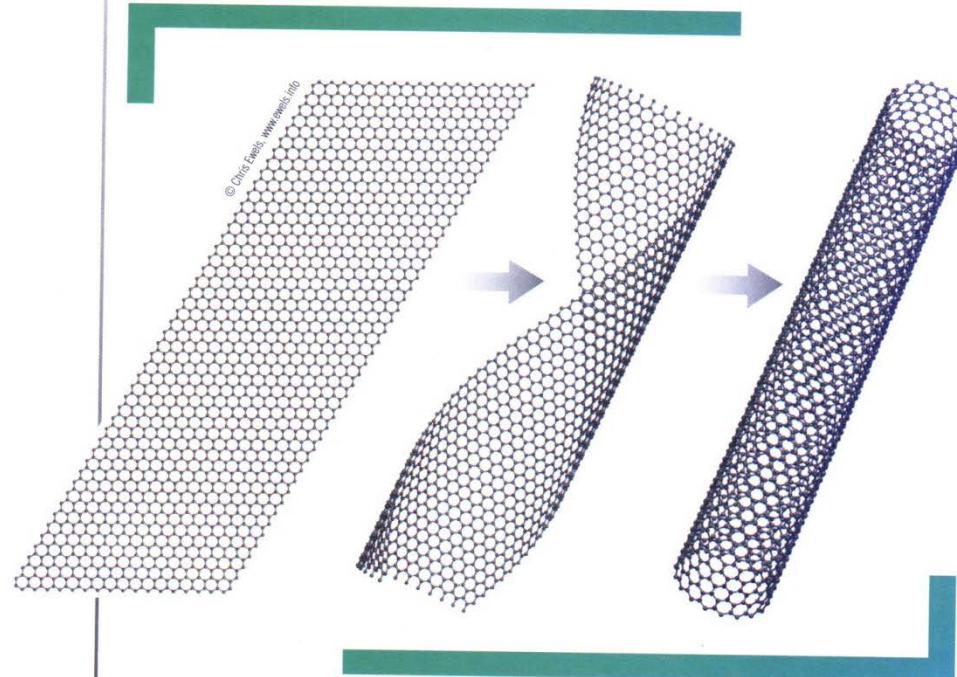
*Manipulation
Individuelle*

Quelques nano objets....

Nanotubes de C

- C'est un feuillet de graphite formé d'atomes de C disposé en réseau hexagonal (nid d'abeille) et enroulé sur lui-même pour former un tube.
- Son diamètre est de l'ordre du nm
- Sa longueur peut atteindre plusieurs μm
- A chacune de ses deux extrémités se trouve un fullerène (C_{60}).
- Fullerène comporte 60 C et est sphérique

• Les nanomatériaux : Nanotubes de C



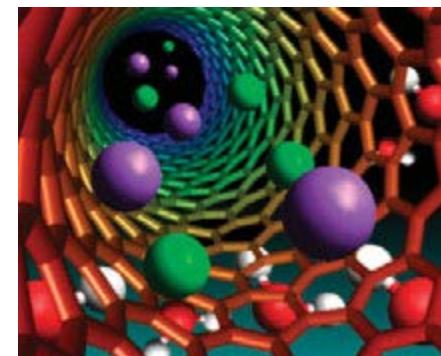
*Le nanotube
est une structure
à la fois solide,
légère et souple.*

Nanotubes de C

- 100 fois plus résistant et 6 fois plus léger que l’acier.
- Peut être utilisé pour fabriquer des matériaux composites.
- **Par sa structure très simple et très stable, le nanotube a des propriétés mécaniques et électriques surprenantes qui promettent de nombreuses applications.**

Nanotubes de C

- Les applications :
 - Matériaux composite de haute technologie
 - Nano fils électriques, nano électrodes pour écran plats
 - Stockage de gaz comme H
 - ...



Nanocristaux fluorescents

- CdSe est un matériau fluorescent s'il est sous forme de grain nanométrique (apparition d'effets quantiques à ces dimensions)
- Eclairés sous UV, en fonction de leur taille, les nanocristaux émettent du visible : des couleurs rouge, bleu ou verte.
- **Applications : marquage moléculaire** : suivre la trace d'une réaction chimique ou biologique dans les cellules vivantes

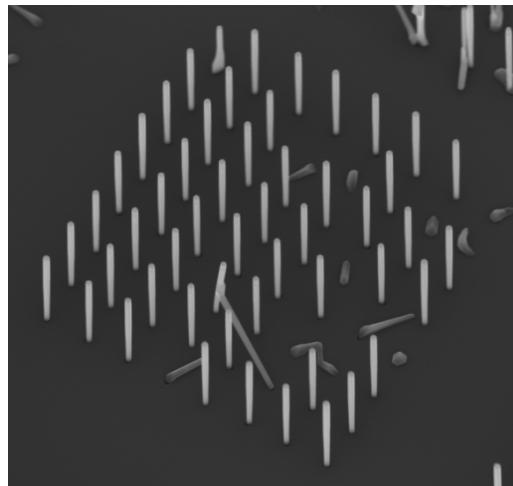
Smart dust

- Un concept de « poussière » électronique communiquante a été développée à UCB (Berkeley)
- Constituée d'un grand nombre de micro puces de Si usinées capable de sentir, communiquer, émettre des signaux...
- **Applications :**
 - pulvérisées dans l'air pour la surveillance de l'environnement,
 - intégrées dans des matériaux pour en surveiller le vieillissement,
 - ...

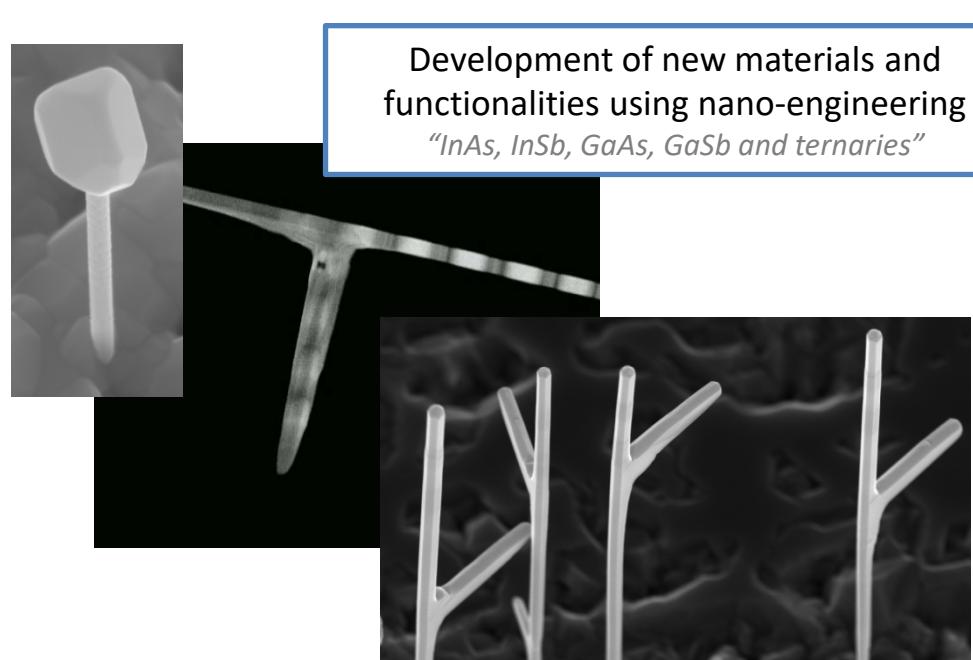
III-V nanowires for nanoelectronics

- A. Physics of nanomaterials
- B. Advanced materials for nanodevices
- C. Sensing (Bio-, Chemo-)
- D. Living cells analysis

AIM: Development of new materials and geometries for nanoelectronics



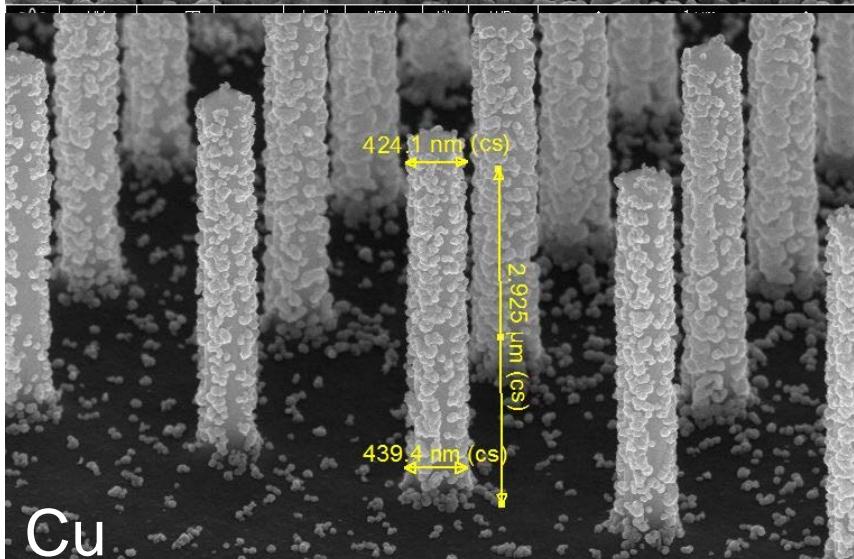
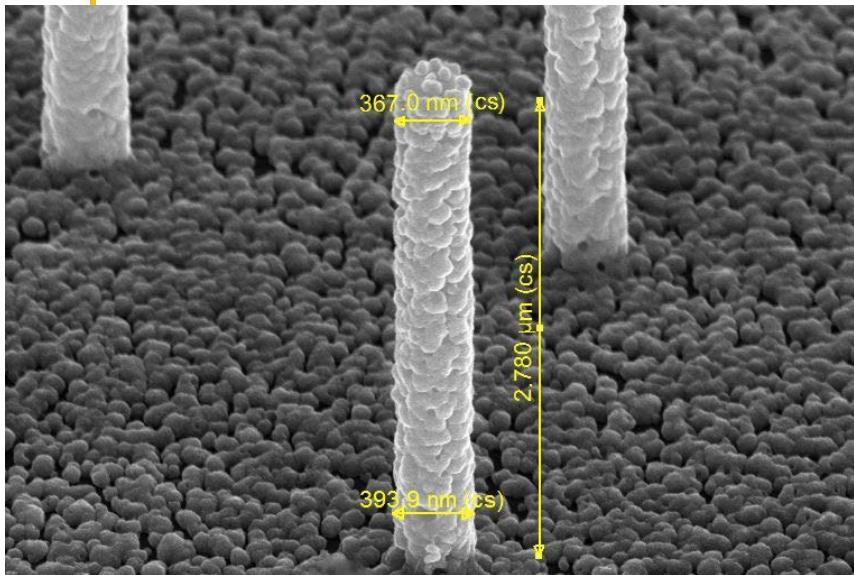
Integration of III-V functionalities
on Silicon
"Gold-free nanowires on Si(001)"



METHOD: Nano-lithography, Molecular Beam Epitaxy, SEM, TEM, XRD

APPLICATIONS: Nanoelectronics, Thermoelectrics, CMOS-based devices

Nanofils Si recouverts de Cu et Pd



Cu

	HV	mag	curr	dwell	HFV	tilt	WD	
	10.00 kV	35 000 x	0.17 nA	300 ns	5.92 μm	52 °	6.2 mm	1 μm

LAAS-CNRS

	HV	mag	curr	dwell	HFV	tilt	WD	
	10.00 kV	199 990 x	0.17 nA	300 ns	1.04 μm	52 °	5.7 mm	300 nm

Pd

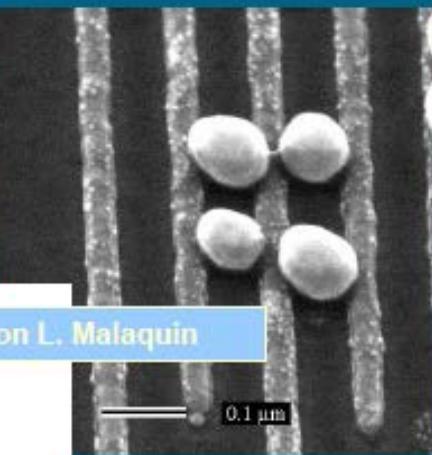
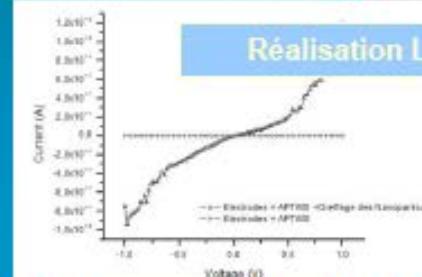
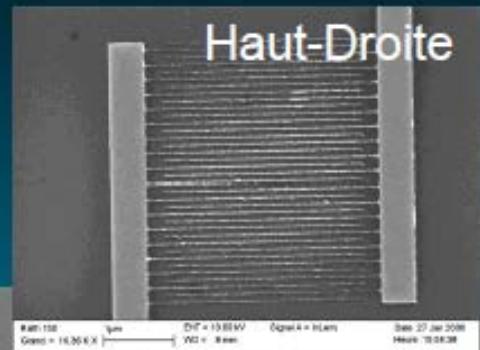
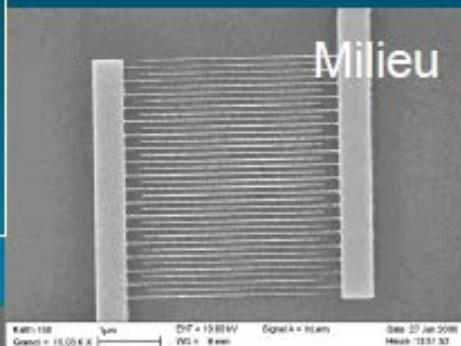
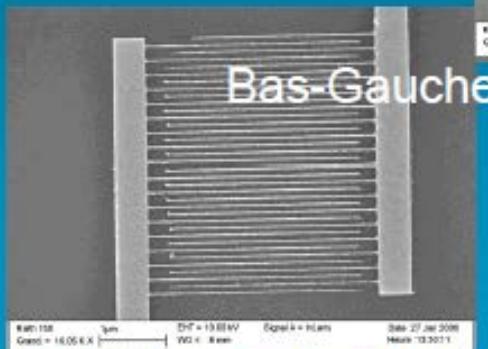
Nano électrodes sur plaque 4"

PMMA 150nm @ 20kV – 130pA :

- Lift-off Ti/Au
- Largeur ligne 30nm - pas 110nm
- Sur une distance de 80mm
- Porte-échantillon électrostatique
- « Leveling »
- Suivi de Focus
- « Mix and Match »
- détection automatique de marques

Détection de biomolécules marquées à l'or

Sensibilité: quelques molécules



contacts : Adrian Martinez (amartine@laas.fr) – Chiderick Séverac (cseverac@laas.fr) – Christophe Vieu (cvieu@laas.fr)

Piégeage électrostatique d'une particule

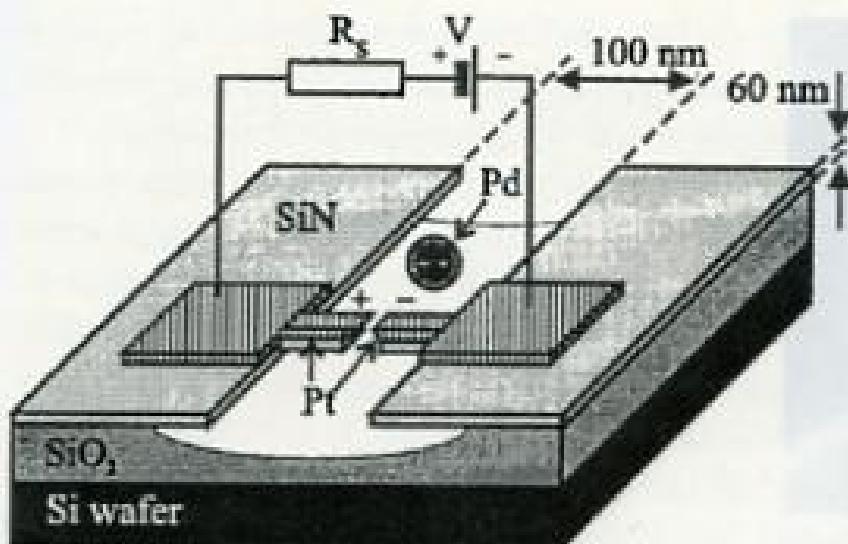


Fig. 5-30 Schematic representation of the set-up for single particle measurements. Pt denotes two free-standing Pt electrodes (dashed region). A ligand-stabilized Pd cluster

is polarized by the applied voltage and attracted to the gap between the Pt electrodes (electrostatic trapping: ET). (Printed with kind permission from [144].)

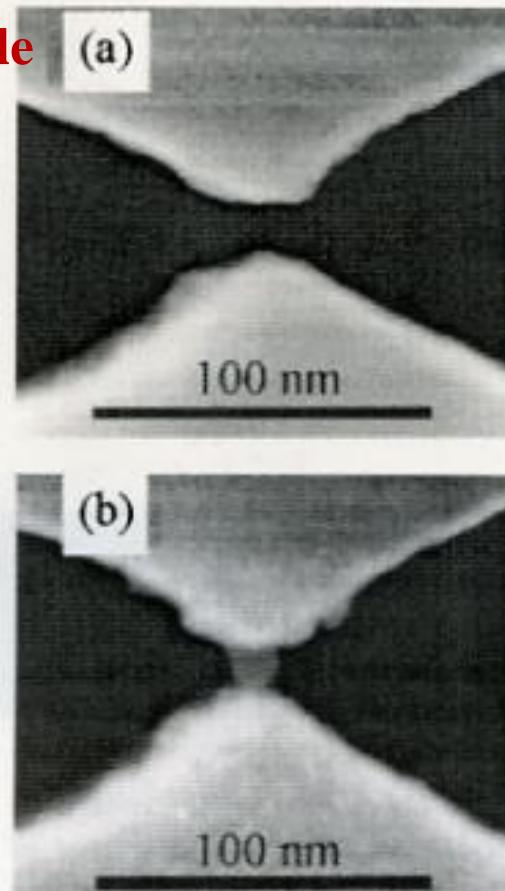
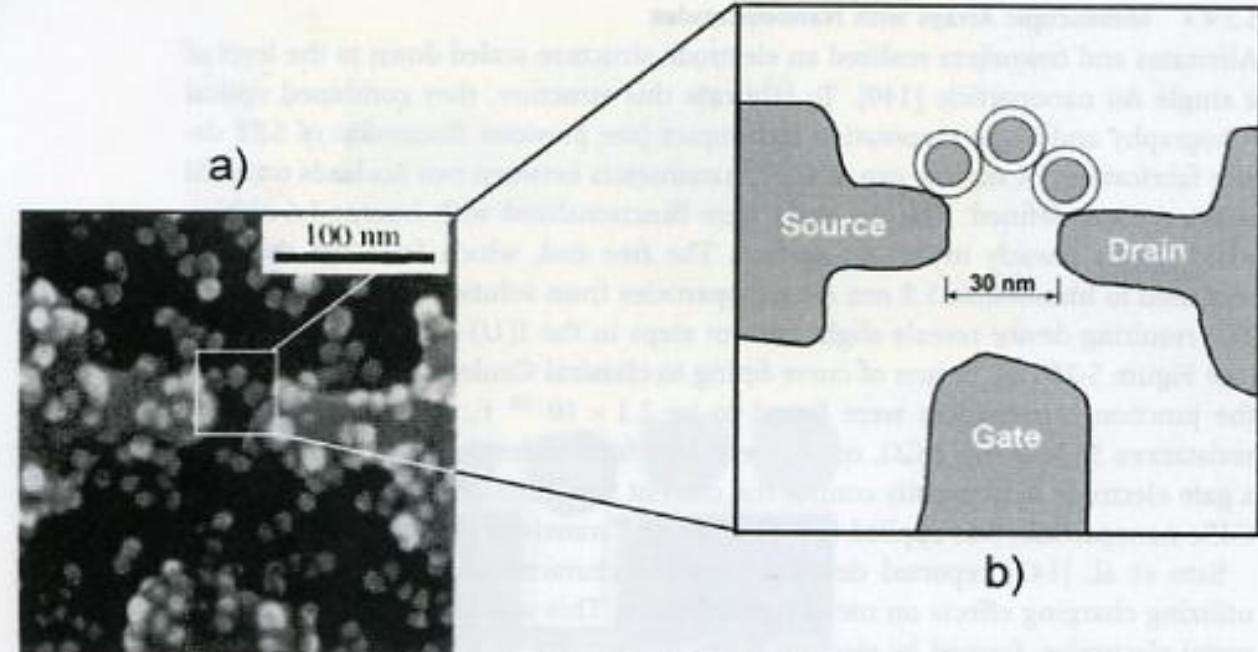


Fig. 5-31 a Pt electrodes (white) separated by a ca. 14 nm gap.
b After ET, the same electrodes are bridged by a single ca. 17 nm Pd particle (printed with kind permission from [144]).

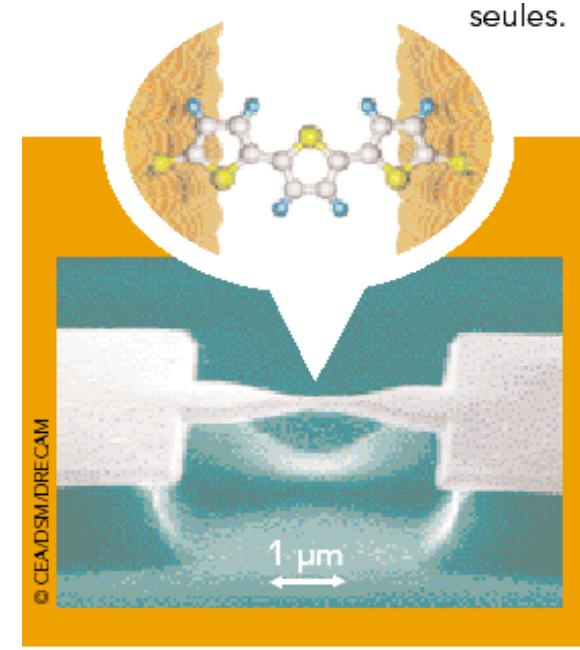


Transistor à 1 électron utilisant une assemblée de nanoparticules

Fig. 5.29 SET transistor, based on self-assembling of gold nanoparticles on electrodes fabricated by electron beam lithography. (Reproduced in modified form from [142].)

L'électronique moléculaire

- Un candidat possible est la molécule de Benzenethiol :
 - Sous une ddp déterminée, la molécule laisse passer un e- et se tord,
 - Sinon elle est isolante.



Vers les nanocapteurs embarqués....oui...

.....mais reste le problème de l'énergie

Problème de l'énergie embarquée...

Le problème de la **génération et de la gestion de l'énergie** est capital lorsqu'on souhaite réaliser des MEMS autonomes ayant des capacités importantes de traitement et de communication.

■ Un des principaux axes de recherche est la **miniaturisation** des sources d'énergie qui est bien moins avancée que celle des actionneurs, des capteurs et des fonctions électroniques.

Les contraintes de miniaturisation sont particulièrement critiques dans les systèmes embarqués... **la problématique est de disposer dans des volumes de l'ordre du mm³ de densités d'énergie typiquement de l'ordre du µW/mg.**

Marché

- Ordinateur portable
- Téléphonie mobile
- Médical
- Applications militaires
- Appareils Multimédia portables (tablettes, camescope, caméra,...)

Etat de l'art sur le développement de microsources d'énergie

Les principaux axes d'étude sur les micro sources d'énergie :

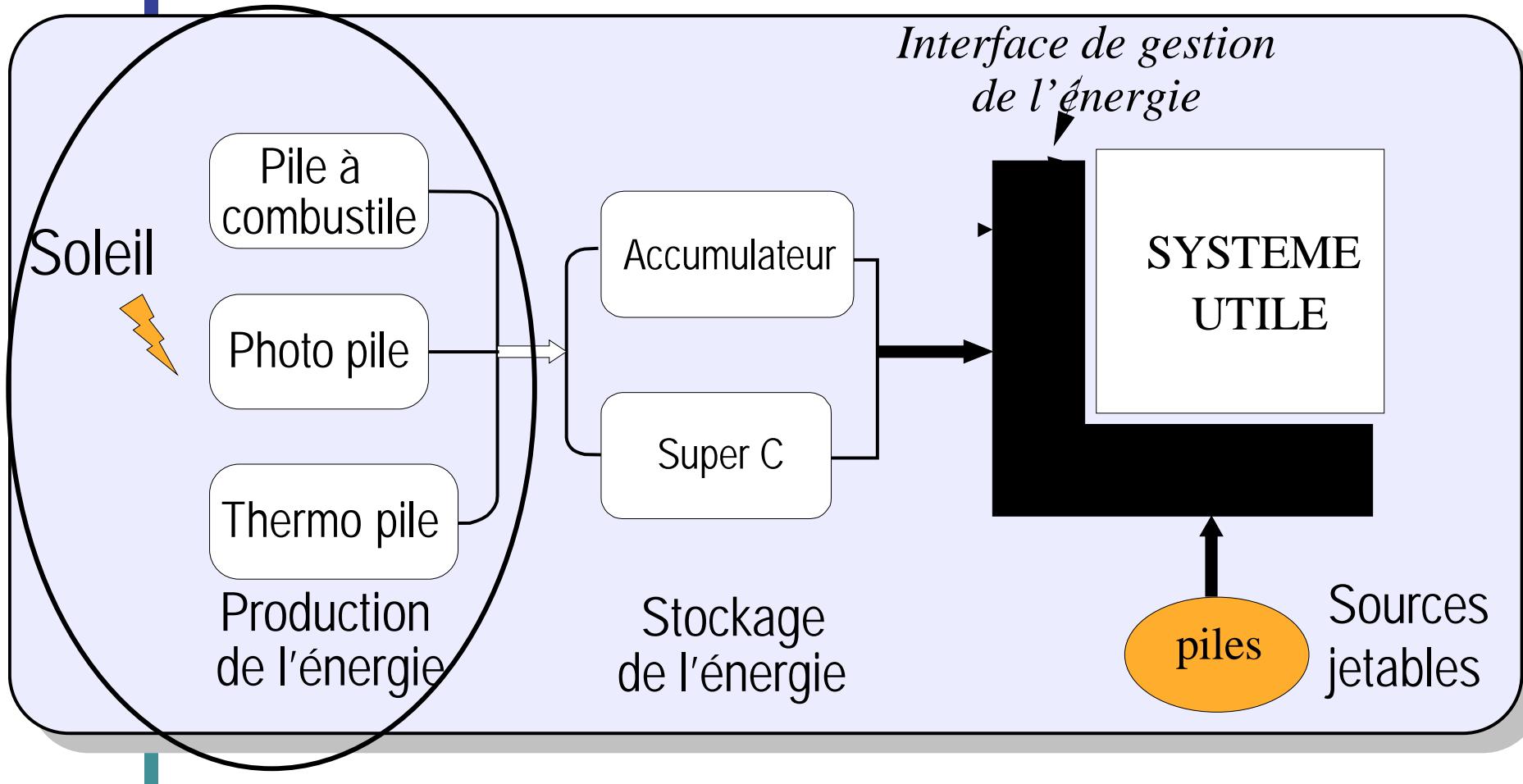
- Développement de nouvelles **sources** miniatures de puissance pour bien répondre aux différents besoins des applications.
- Miniaturisation et augmentation de la capacité et de la densité de **stockage** des dispositifs existants.
- Optimisation de la **gestion** de l'énergie :

En stockant l'énergie produite pendant les cycles de veille.

En réduisant au maximum la consommation (pour le fonctionnement des capteurs, le traitement de l'information et la communication) en alternant période de travail et période de veille.

En utilisant différentes sources d'énergie afin d'adapter la génération au besoin.

Exemple de module spécifique



La génération de l'énergie

Les sources d'énergie explorées à ce jour pour produire de l'électricité dans le domaine des microtechnologies sont :

- la lumière (cellule photovoltaïque ou photopile),
- la différence de température (thermopile),
- l'énergie chimique (pile à combustible, pile),
- l'énergie mécanique (microturbine).
- l'énergie électromagnétique

La difficulté est double : la récupération et le stockage d'énergie

Stockage de l'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie de type **batteries Lithium** restent aujourd'hui les plus couramment utilisés dans le domaine des microsystèmes.

Le développement des nouveaux procédés de dépôt de couches minces (CVD, PVD) et l'introduction de nouveaux matériaux pour la cathode ($\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$, Li_xCoO_2 , Li_xMnO_2 , Li_xNiO_2 ...) a permis d'augmenter la densité d'énergie et les tensions de fonctionnement tout en les miniaturisant.

En parallèle, les efforts accomplis pour réaliser des électrolytes solides polymères (par exemple $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-Li}_2\text{SO}_4$) ont contribué à avoir des meilleures conductivités ioniques et de bonnes propriétés électrochimiques à température ambiante.

Les capacités ou super capacités ont des capacités de stockage bien inférieures aux batteries mais présentent l'avantage de pouvoir fournir transitoirement des impulsions de courant élevées, typiquement supérieures à quelques mA pendant 1ms.

Conclusions sur l'énergie

- Un réel besoin de développement techno
- L'émergence de certains µsystèmes dépend du développement des microsources d'énergie
- Voit apparaître de nouvelles idées pour réaliser des µsources tout intégrées.....