

ARIANE

Angular Rate sensor with IntegrAted Nano gages and dedicated Electronics

Ph. Robert, A. Walther, F. Delaguillaumie, **LETI-MINATEC**

N. Delorme, C Le Blanc, **Asygn**

A. Bosseboeuf, P. Allain, F. Parrain, T.-T. Trang Nghiem, P. Dollfus, **IEF**

O. Gigan, J. Bon, S. Renard, S. Louwers, **Tronics**

O. Lefort, M. Ferrier, **Thalès**

Journées Nationales Nanosciences et
Nanotechnologies 2012

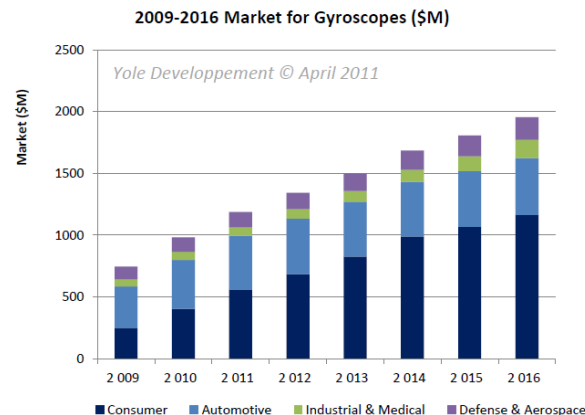
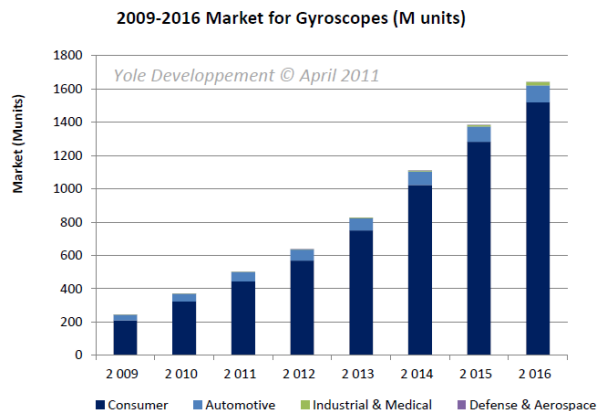
Présentation générale du projet

- Objectifs du projet :
 - Conception, réalisation, tests de gyroscopes à détection piézo-résistive par nanofil Si
 - Conception et réalisation du MEMS, packaging, électronique associée
 - Étude et modélisation des nanofils Si
 - Tests puces sur tranche et puces avec électronique
 - Gain de surface d'un facteur 5
 - Designs faible coût pour application de masse (consumer, automobile...)
 - Designs haute performance pour applications aéronautiques
- Partenaires et ressources
 - 5 partenaires, coût total : 3445k €, aide demandé : 1940k€
 - CEA-LETI : coordinateur du projet, conception et fabrication des gyroscopes
 - Asygn : conception et fabrication de l'électronique
 - IEF : caractérisation des propriétés physiques des nanofils Si
 - Tronics : spécifications, packaging
 - Thalès : conception et tests des gyroscopes
 - Durée : 42 mois ; T0 : 01/03/09

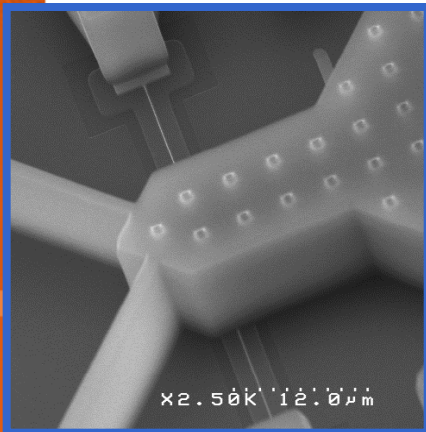
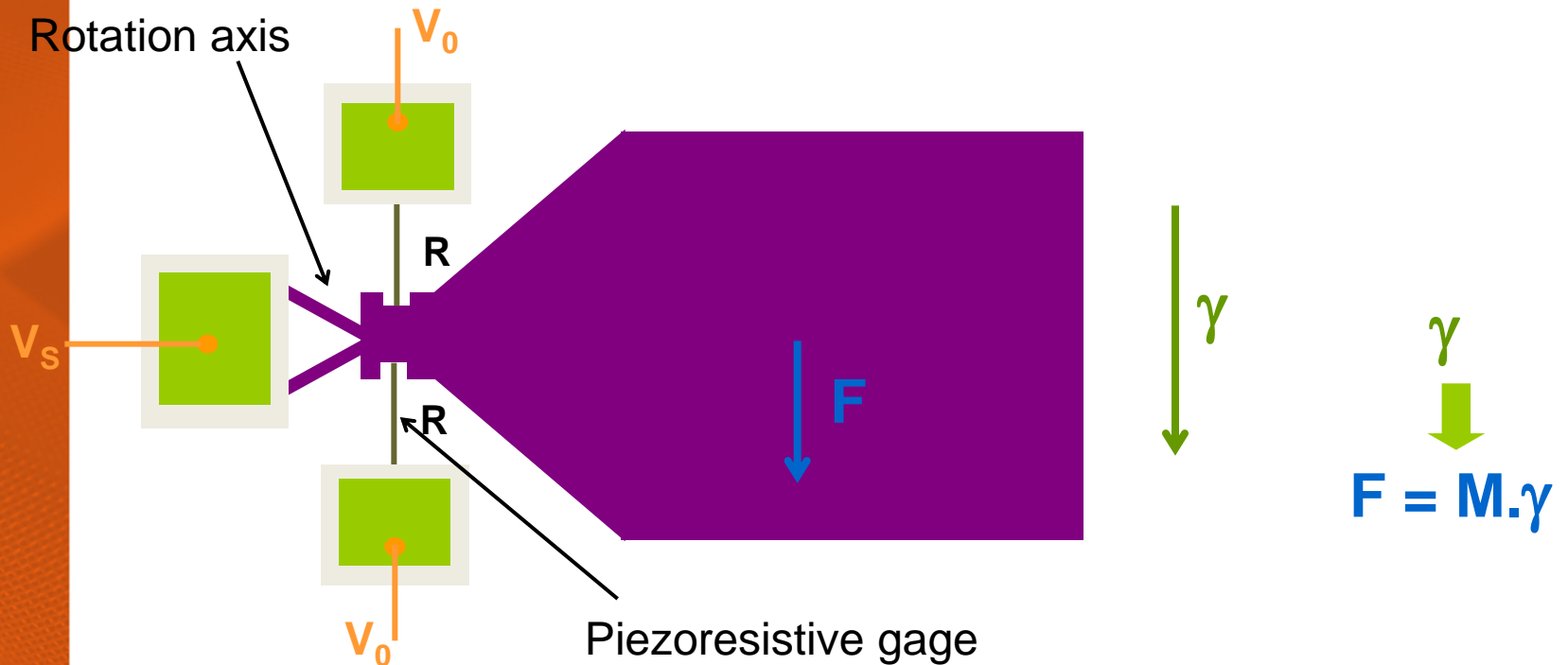
Marché des gyroscopes MEMS

- Situation au début du projet
 - Pas d'ouverture vers les marchés de masse en raison de la taille des puces (plusieurs mm²) et du packaging (vide poussé)
 - Prix : 6-12\$/axe ; besoin : 2\$/axes pour l'automobile, 1.5\$ pour 2 axes pour le consumer
- Évolution durant le projet
 - Introduction d'un 2 axes gyroscope dans le module Wii Motion Plus
 - Introduction de gyroscopes 3 axes dans les smart-phones
 - Leader gyroscopes consumer : ST Microelectronics et Invensense
 - Croissance de plus de 10%/an du marché des gyroscopes MEMS, mais forte pression sur le coût
- Objectif à moyen terme
 - Gyroscopes 3 axes dans un packaging de 2x2mm²
 - Combo 6/9 axes dans un packaging de 3x3mm²

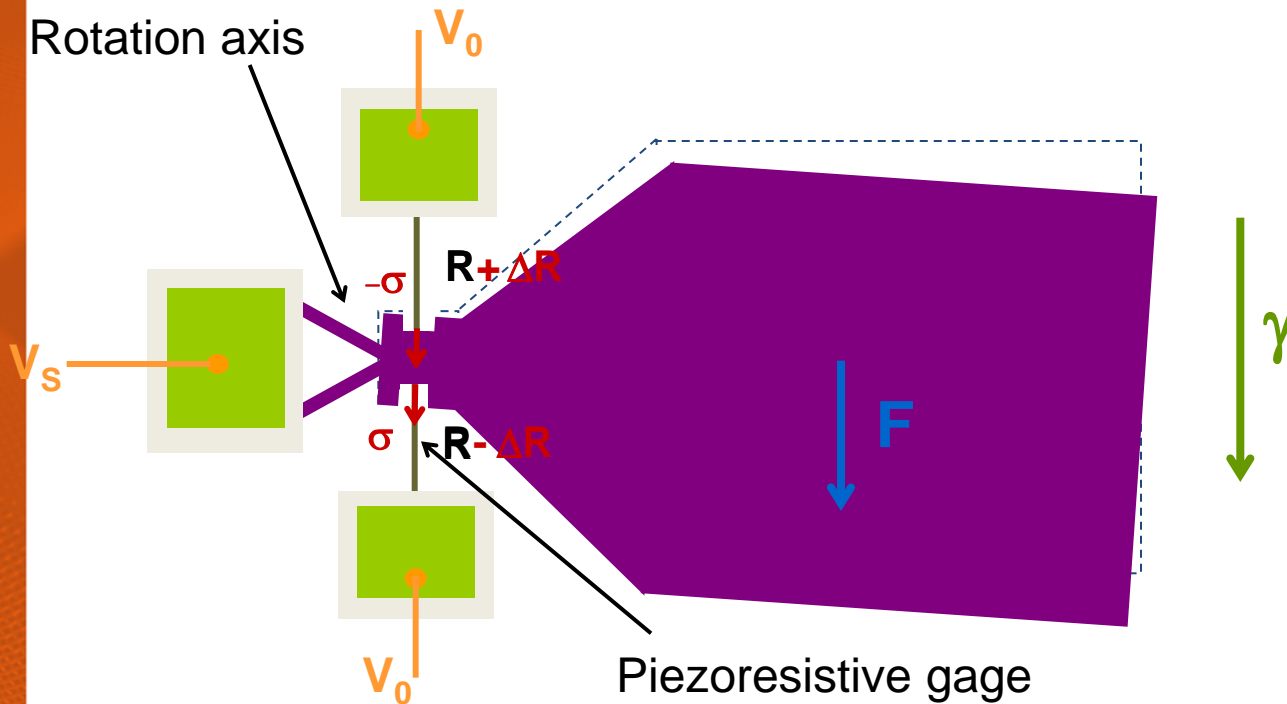
→ Objectif du projet Ariane : Valider / Réaliser une rupture grâce à l'utilisation d'une détection par nanofils Si



La détection par nanofils Si



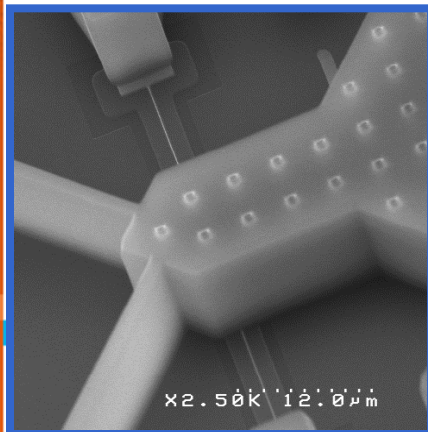
La détection par nanofils Si



$$\begin{aligned}
 & \gamma \\
 & \downarrow \\
 & F = M \cdot \gamma \\
 & \downarrow \\
 & \sigma = F_g / S_g \\
 & \downarrow \\
 & \frac{\Delta R}{R} = \pi \sigma
 \end{aligned}$$

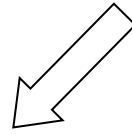
Double amplification

- Section de la jauge
- Bras de levier



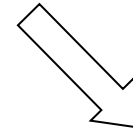
Spécifications et principe de fonctionnement choisi

2 jeux de spécifications



Applications automobile
(ESP, Roll-over, GPS)

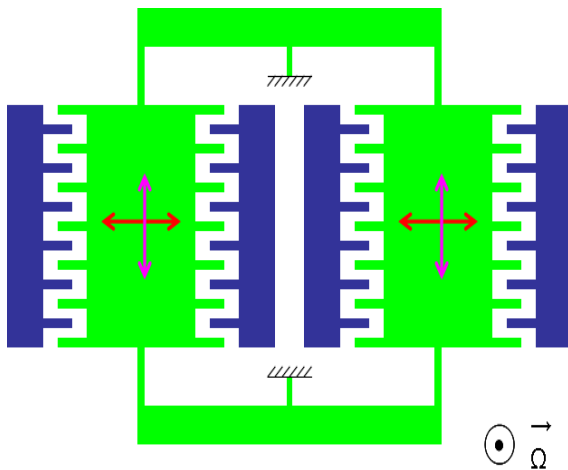
Domaine de mesure : 300°/s
Résolution : 0.05°/s/√Hz
Bande passante : 50Hz
Stabilité de biais : 1-0.1°/s



Applications aéronautiques

Domaine de mesure : 400°/s
Résolution : 10⁻⁴°/s/√Hz
Bande passante : 30Hz
Stabilité de biais : 0.1°/h

Principe de fonctionnement du gyroscope :

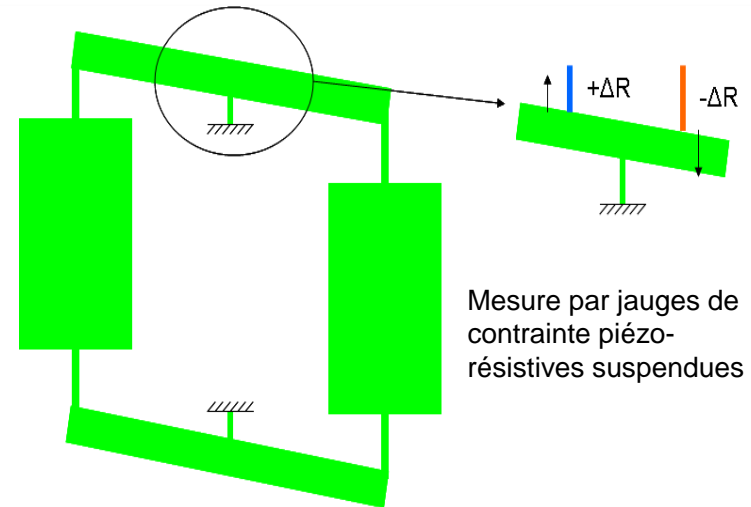


↔ Excitation

Rotation → force de Coriolis:

$$\vec{F} = 2m\vec{v} \times \vec{\Omega}$$

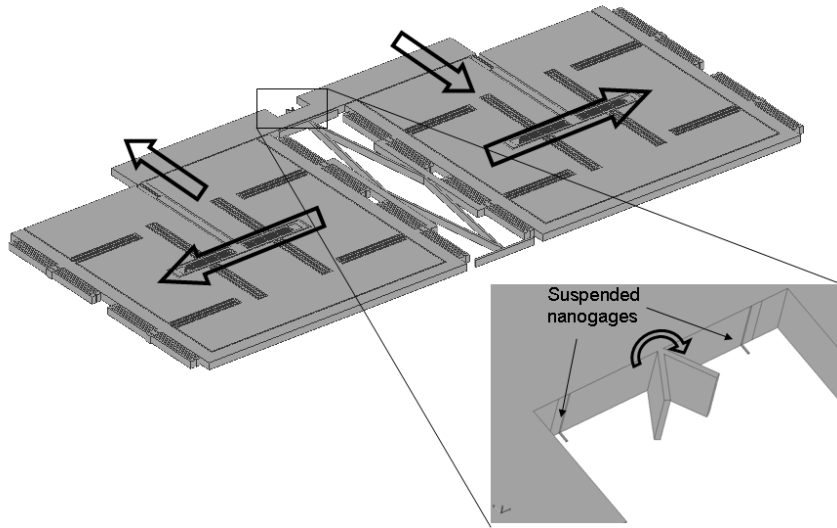
→ mouvement en détection



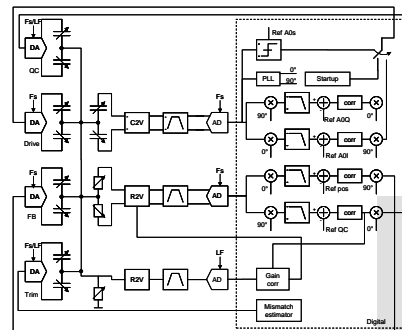
Mesure par jauges de contrainte piézo-résistives suspendues

Conception des dispositifs

Conception de gyroscope de surface mécanique 0.5mm²/axes

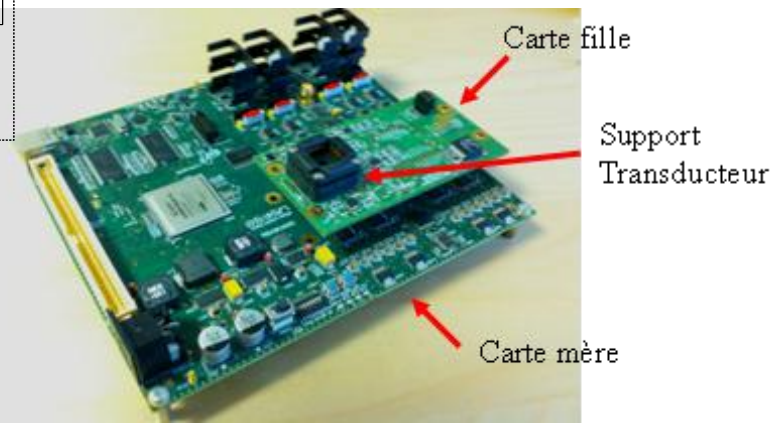


Conception de gyroscopes aux spécifications aéronautiques
10mm², bruit de mesure 2.10⁻⁵ °/s/√Hz



Conception d'une électronique associée (ASYGN)

Réalisation d'une carte mère numérique et de
cartes-fille analogiques adaptées aux 2 variantes



Empilement technologique

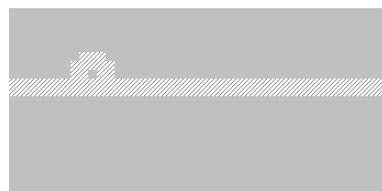
- **Objectif** : réaliser des gyroscopes avec détection par jauges Si suspendues de section nanométrique.
- **Avantages**
 - ↓ section => ↑ sensibilité
 - Moyen de détection plus simple du point de vue de l'électronique et plus compact par rapport à la détection capacitive
- Empilement technologique : à partir du process développé dans le cadre du projet ANR M&NEMS



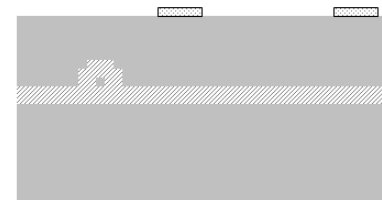
Litho, gravure NEMS



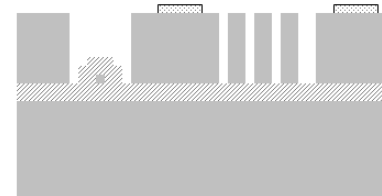
Dépôt SiO₂
protection NEMS



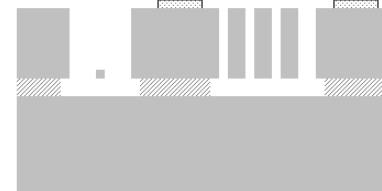
Épitaxie Si 10µm



Métallisation AlSi



Gravure DRIE :
définition partie
mécanique

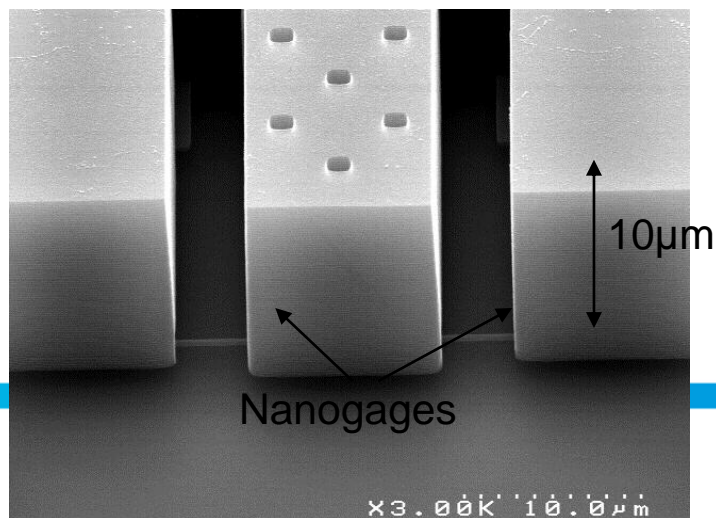
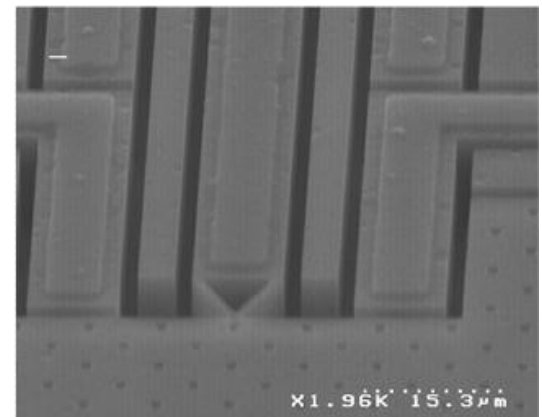
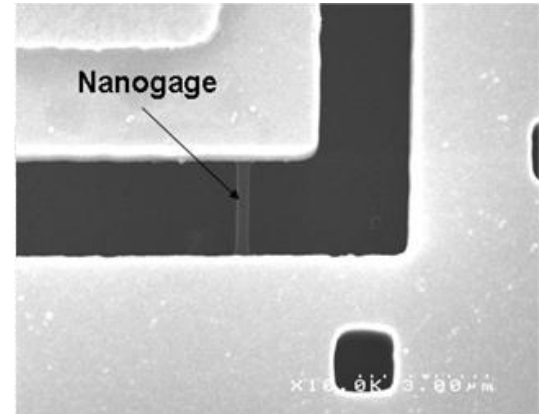
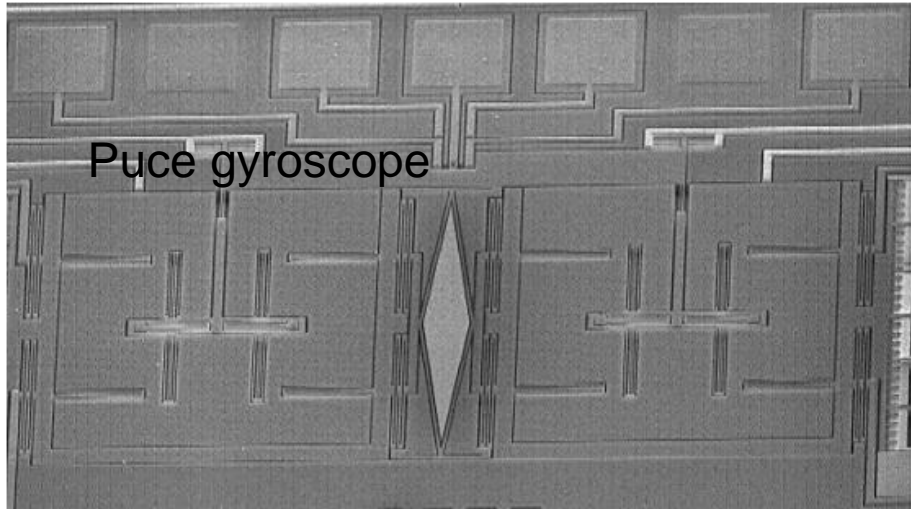


Libération



Fabrication

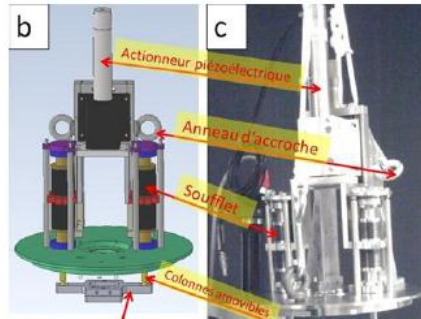
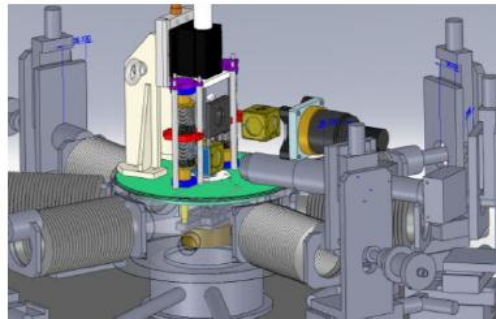
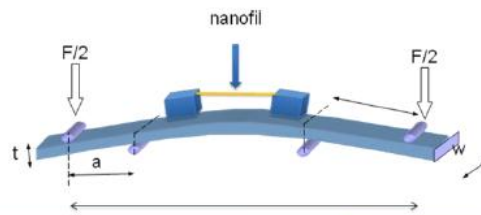
- Lancement de 2 runs technologique en salle blanche



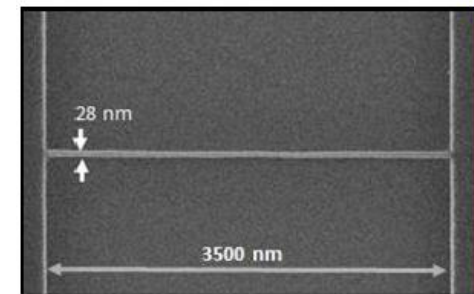
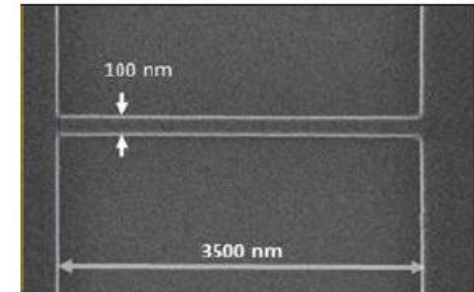
Jauges de section 250x250nm²

Dispositifs de tests de la piézo-résistivité

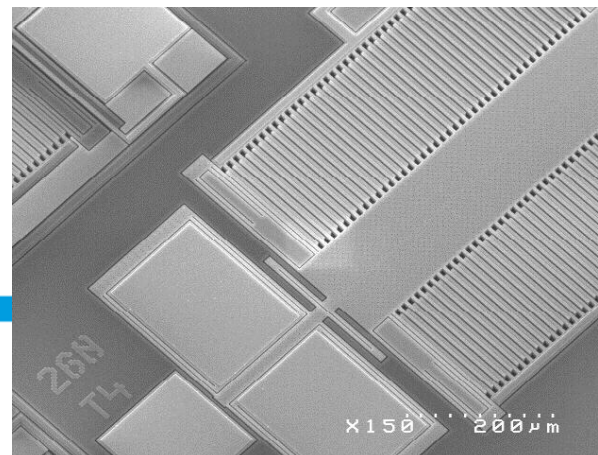
Banc de flexion 4 points directe statique ou dynamique de puces à nanofils monté sur une station sous pointes cryogénique



Réalisation de nanofils de petites dimensions

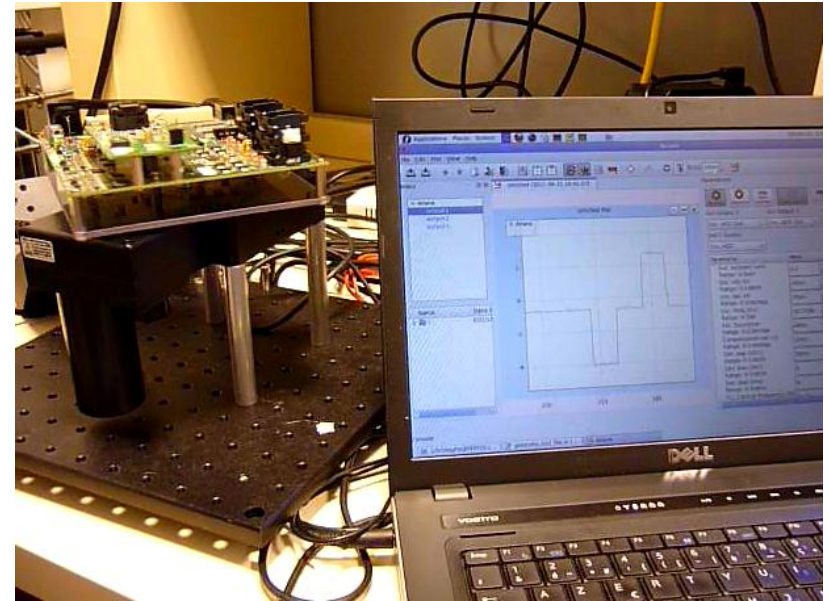
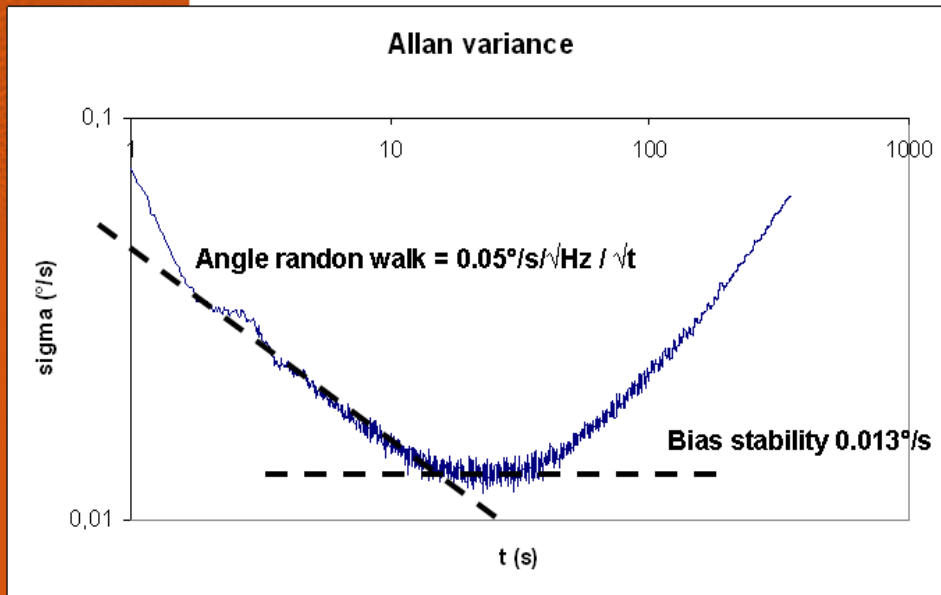


Réalisation de dispositifs avec nanofils et micro-actionneurs MEMS intégrés



Résultats fonctionnels

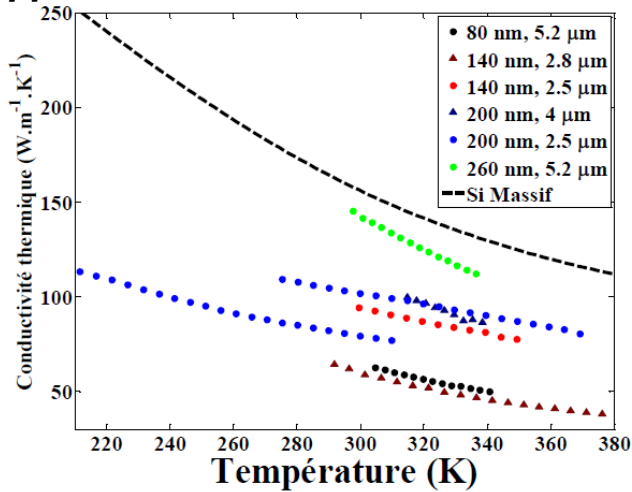
- Obtention de gyroscopes fonctionnels
 - Facteur de qualité 100.000 en excitation, 50.000 en détection
- Packaging en boîtier céramique sous vide
- Association avec électronique
- **Résolution jusqu'à $0.015^\circ/s/\sqrt{\text{Hz}}$, stabilité de biais $50^\circ/h$**



Résultats de caractérisation des nanofils

Mesure de la conductivité thermique par méthode 3 ω

Conduction « classique » (non balistique), mais valeurs réduites par rapport au Si bulk

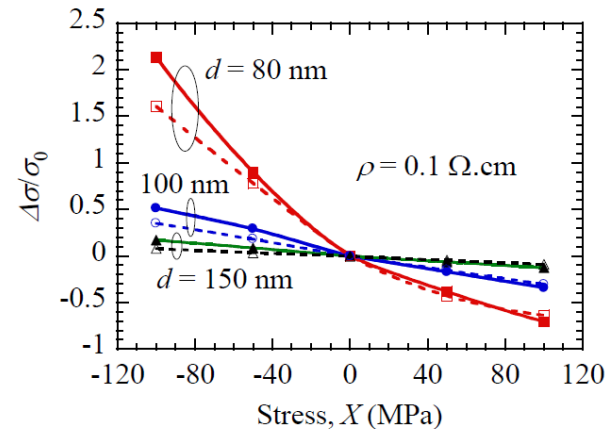
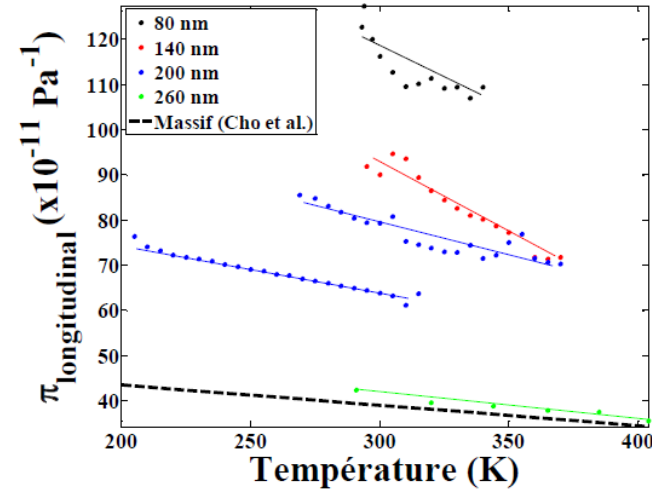


Comparaison avec simulation Monte-Carlo Fullband : Bon accord théorie-mesure

Avec (traits pleins) et sans (traits pointillés) variation de la structure de bande

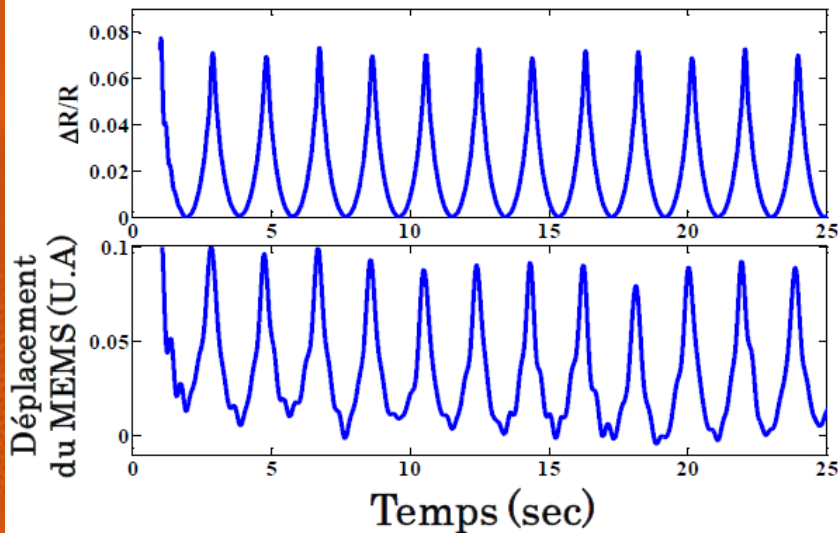
Mesure du coefficient piézo-résistif en fonction de la taille des nanofils

Pas de piézo-résistivité géante, mais augmentation du coefficient PZR jusqu'à un facteur 3 pour des dimensions <250nm

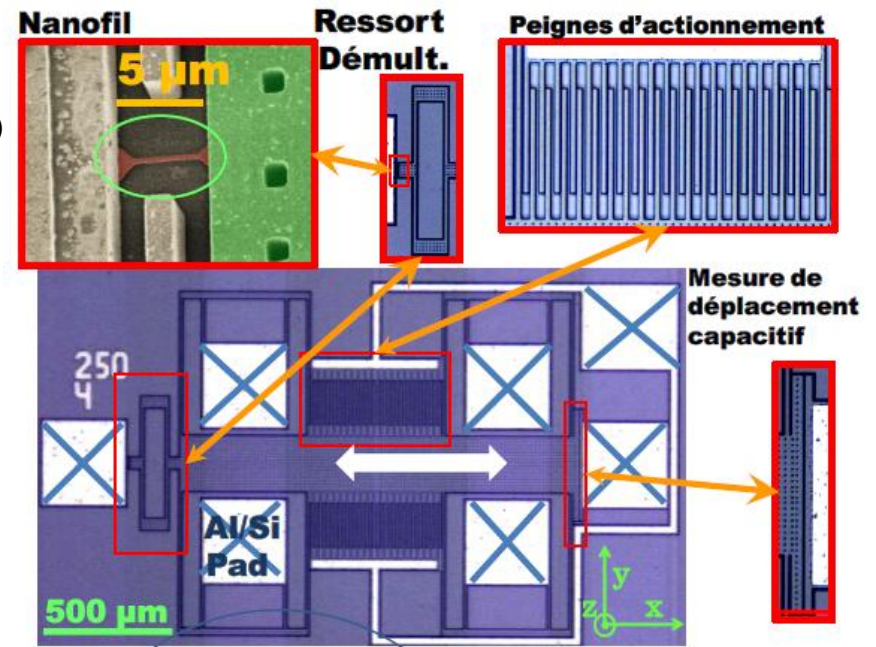


Résultats de caractérisation des nanofils

Avec contrainte appliquée par actionneur MEMS
(présence d'un ressort d'amplification du déplacement x10)



Comparaison mesure nanofil et mesure optique



Course max. actionneur 180nm

Limite détection par le nanofil $< 0.1\text{nm}$

(au niveau de l'actionneur – soit une déformation de 0,01nm du nanofil)

Exploitation des résultats

- 2 publications dans des journaux
 - Modern Physics Letters B (IEF) et JMEMS (Leti+Asygn)
 - + plusieurs publications en cours de rédaction/soumission
- 6 conférences avec publications
 - IEEE MEMS , SISPAD, IEEE-NEMS...
- 2 conférences de vulgarisation (IEF)
- 4 brevets LETI déposés dans le cadre du projet
- Projets faisant suite à ARIANE
 - NIRVANA : projet européen FP7 ; fabrication d'une centrale inertielle 9 axes
 - **ULTIMES : transfert industriel de la technologie Ariane vers Tronics**

Conclusion

- Obtention d'un gyroscope à l'état de l'art et pour une surface particulièrement réduite
 - résolution de $0.015^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour une surface de 0.5mm^2
- Mesure des propriétés électriques, électromécaniques et thermiques des nanofils des nanofils Si avec un banc à l'état de l'art
- 8 publications internationales + 4 brevets
- 2 projets qui suivent dont un transfert technologique
- Remerciement à l'ANR pour le soutien de cette étude