

Evaluation du potentiel de performances de micro-accéléromètres vibrants en silicium

Baptiste LE FOULGOC

Directeur de thèse: **Tarik BOUROUINA** (ESIEE / ESYCOM)

Encadrant ONERA: **Olivier LE TRAON** (DMPH / CMT)



retour sur innovation



Contexte

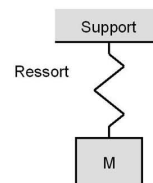


Perspective d'applications futures de type micro-drone

- avion sans pilote
- envergure < 15 cm
- missions civiles et militaires

⇒ nécessite la maîtrise du vol en espace restreint (zone urbaine, immeubles,...)

- ❖ Reconnaissance et évitement d'obstacle
=> détection sonar ou laser, traitement d'images
- ❖ Stabilisation, positionnement
=> magnétomètres, GPS, ...
=> unités de mesure inertielle (UMI)
 - Gyromètres
 - Accéléromètres:
 - accéléromètres asservis
 - accéléromètres vibrants

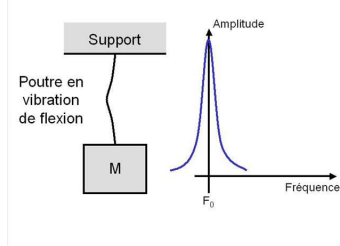


Contexte: Accéléromètre ONERA



VIA

Accéléromètre vibrant: Sortie fréquentielle

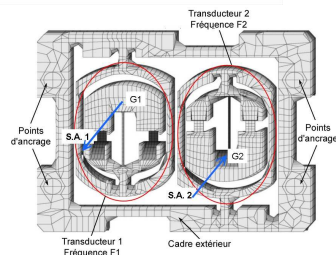


Mode différentiel:

$$F_A = F_{A0} + K_{A1}\gamma + K_{A2}\gamma^2 + f(T, P) + \dots$$

$$F_B = F_{B0} + K_{B1}(-\gamma) + K_{B2}(-\gamma)^2 + f(T, P) + \dots$$

$$\Rightarrow (F_A - F_B) \approx (F_{A0} - F_{B0}) + 2K_1\gamma$$



Dimensions	DIVA
Structure	12mm x 10mm x 0.5mm
Lames	65µm x 30µm x 2.65mm

Accéléromètre monolithique différentiel ONERA: DIVA

3

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Objet de l'étude

Micro-drone

⇒ UMI ultra-miniaturisées

⇒ Miniaturisation de capteurs inertiels performants



Constat:

- le matériau [quartz](#) ne convient plus lorsqu'une miniaturisation poussée est recherchée
- le [silicium](#) serait compatible avec la réalisation de micro-résonateurs à haute performance mécanique



Objectif de la thèse: étudier les avantages et les limitations liées à la miniaturisation d'accéléromètres vibrants en silicium

4

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan

1. Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant
2. Impact de la miniaturisation
3. Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
4. Étude expérimentale du facteur de qualité
5. Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

5

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

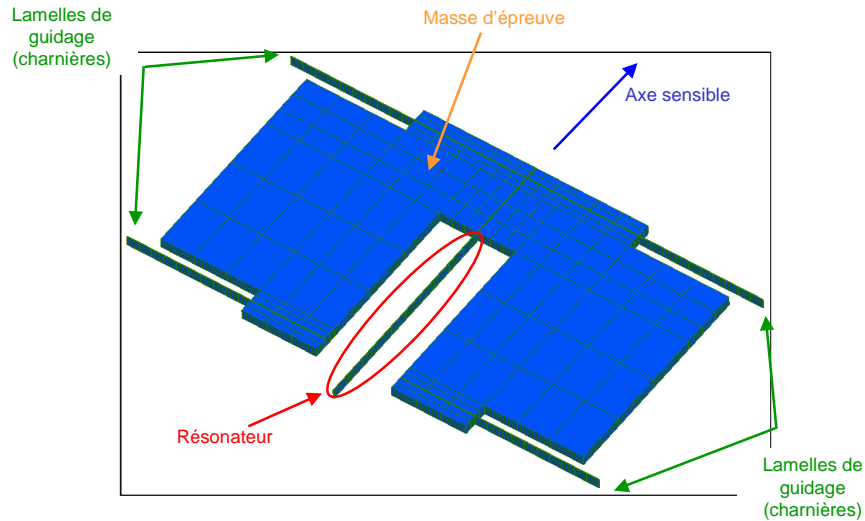
Plan

1. **Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant**
2. Impact de la miniaturisation
3. Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
4. Étude expérimentale du facteur de qualité
5. Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

6

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Principe de l'accéléromètre vibrant



7

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Paramètres fonctionnels d'un accéléromètre vibrant

=> Quels sont les paramètres caractéristiques du résonateur mécanique ?

> Fréquence de résonance F_0 (Hz)

- modes de flexion:

$$F_0 \propto \frac{e}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

> Facteur d'échelle K_1 (ou sensibilité) (Hz/g)

$$K_1 \propto \frac{1}{he^2} \frac{M}{\sqrt{E\rho}}$$

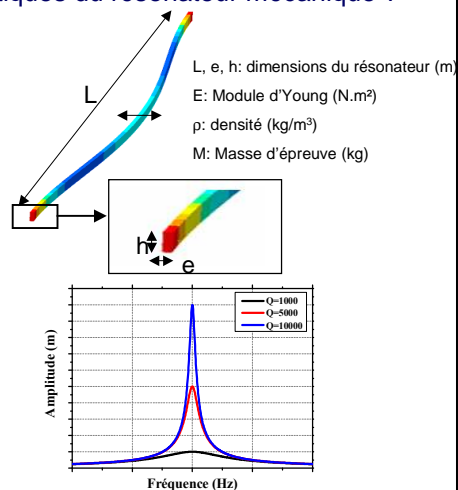
> Étendue de mesure (g)

- Accélération de flambage

$$\gamma_c \propto \frac{he^3}{L^2 M}$$

> Facteur de qualité Q

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}$$



Le « cœur » accélérométrique (résonateur / masse / charnières) se caractérise en partie par: la fréquence du résonateur F_0 et son facteur de qualité Q , le facteur d'échelle K_1 et l'étendue de mesure γ_c

8

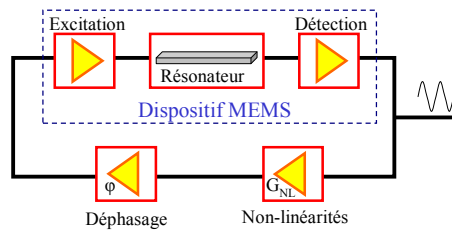
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Oscillateur et stabilité

=> Comment caractériser la performance de l'accéléromètre vibrant ?

Accéléromètre vibrant = résonateur + circuit oscillateur

- Le résonateur fixe la fréquence de l'oscillateur
- Le circuit oscillateur est nécessaire à l'entretien de la résonance



la stabilité de fréquence de l'ensemble détermine la performance de l'accéléromètre:

- A long terme : stabilité de biais $(F_A - F_B) \approx (F_{A0} - F_{B0}) + 2K_1\gamma$
- A court terme: résolution bruit de mesure

9

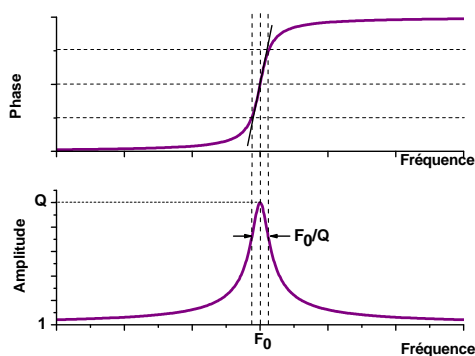
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Stabilité de fréquence à long terme: stabilité de biais

=> Comment améliorer la stabilité de biais?

Causes d'instabilité à long terme de l'oscillateur:

- *Sensibilité aux variations de paramètres extérieurs (pression): effet différentiel*
- *Vieillessement intrinsèque du matériau: cristaux quartz et silicium*
- *Dérive de la fréquence de l'oscillateur : évolutions des composants électroniques*



Une variation de phase $\Delta\phi$ provoque une variation de fréquence ΔF :

$$\Delta F = \frac{\Delta\phi \cdot F}{2Q}$$

Soit une erreur de mesure (en g):

$$Stab_{\Delta\phi} = \frac{\Delta\phi \cdot F}{2\sqrt{2}QK_1}$$

Un facteur de qualité Q élevé améliore la stabilité de biais

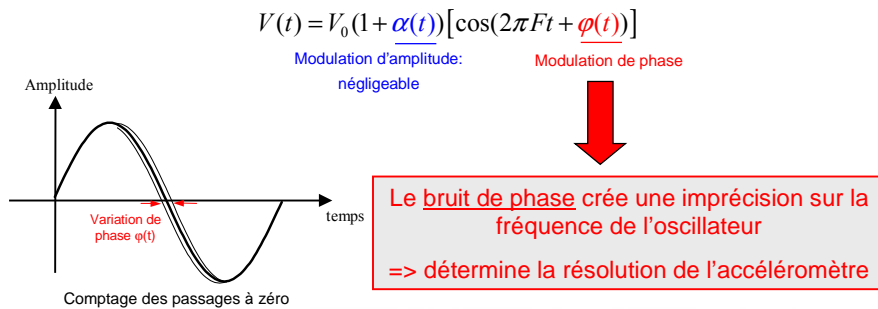
10

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Stabilité de fréquence à court terme: résolution (1/3)

=> Quel est le facteur déterminant la résolution?

- Résolution = plus petite variation détectable de l'accélération à mesurer
= plus petite variation de fréquence mesurable
- L'oscillateur ne délivre pas un signal sinusoïdal parfait:



11

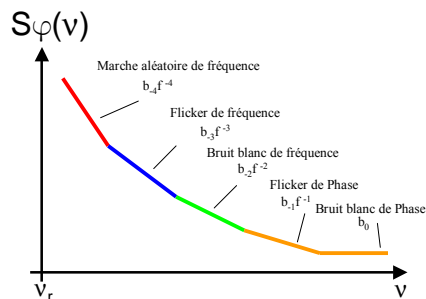
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Stabilité de fréquence à court terme: résolution (2/3)

=> Comment mesurer la résolution d'un oscillateur ?

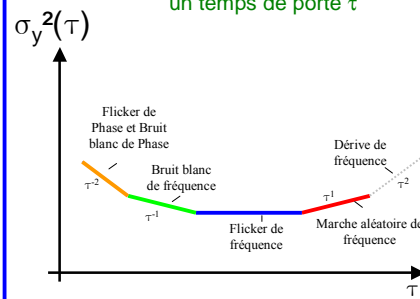
Dans le domaine fréquentiel:

Densité spectrale de bruit de phase:
Mesure l'étalement du spectre autour de la porteuse ν_r



Dans le domaine temporel:

Variance d'Allan:
Mesure la variance d'un grand nombre d'acquisition de fréquences moyennées sur un temps de porte τ



Ces mesures constituent à elles seules un domaine de la métrologie
=> approche qualitative pour appréhender la résolution de l'accéléromètre vibrant

12

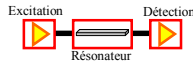
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Stabilité de fréquence à court terme: résolution (3/3)

=> Comment améliorer la résolution?

- Hypothèse: Source principale de bruit de phase dans la boucle oscillatrice:

=> **Amplificateur détection**



- Le bruit de l'oscillateur est déterminé à partir de l'effet Leeson:

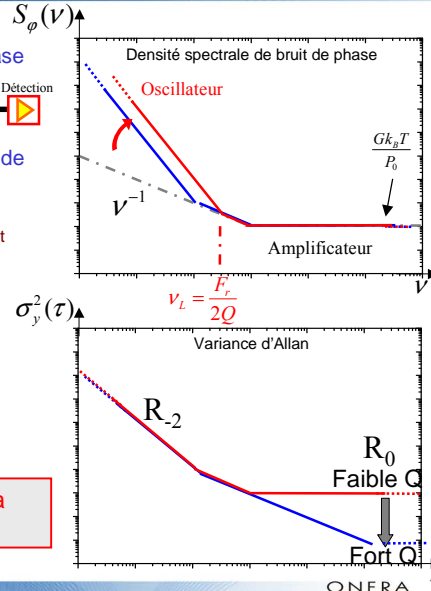
- Fluctuations rapides de $\Delta\phi$ ($\nu > F_r / 2Q$) filtrées
- Fluctuations lentes de $\Delta\phi$ ($\nu < F_r / 2Q$) provoquent un étalement du spectre

- La variance d'Allan associée s'exprime:

$$R_0(g) = \frac{F}{2QK_1} \sqrt{2 \ln(2) b_{-1}}$$

$$R_{-2} = \frac{1}{2\pi K_1} \sqrt{\frac{3f_b G k_B T}{P_0}}$$

Un facteur de qualité Q élevé améliore la résolution ultime de l'accéléromètre



E.Rubiola. The Leeson effect. In IEEE International Frequency Control Symposium, 2006.

13

Plan

- Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant
- Impact de la miniaturisation
- Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
- Étude expérimentale du facteur de qualité
- Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

14

ONERA THE FRENCH AEROSPACE LAB

Limites de la miniaturisation: non-linéarités mécaniques

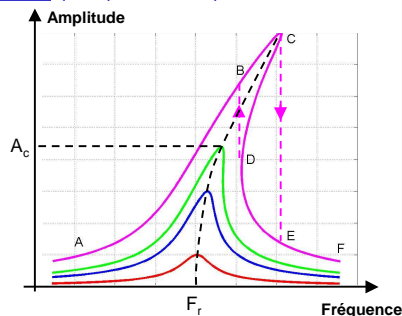
=> Quelle est la limite à la miniaturisation du résonateur?

- Amplitude de vibration très importante:
 - => apparition d'une force de tension axiale alternative aux encastremets
 - => augmentation de la raideur du résonateur
 - => augmentation de la fréquence qui dépend de l'amplitude

- Définition de l'amplitude critique A_c avant apparition des non-linéarités mécaniques

$$A_c \propto \frac{e}{\sqrt{Q}}$$

e ← épaisseur vibrante
 Q ← facteur de qualité



A.N: pour un résonateur avec $e=2\mu\text{m}$ et $Q=50\,000 \Rightarrow A_c \approx 15\text{nm}$

Plus les résonateurs sont fins et plus l'amplitude critique A_c est petite
 => phénomène encore plus important pour des facteurs de qualité élevés

L.D. Landau and E.M. Lifschitz, *Théorie de l'élasticité*, 1964

15

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Expression de la résolution de micro-acceleromètres

=> Impact sur la performance de l'accelerometre miniaturisé?

Nécessité de travailler à de faibles amplitudes de vibrations
 => rapport signal sur bruit moins favorable: P_0

Résolution R_{-2} :

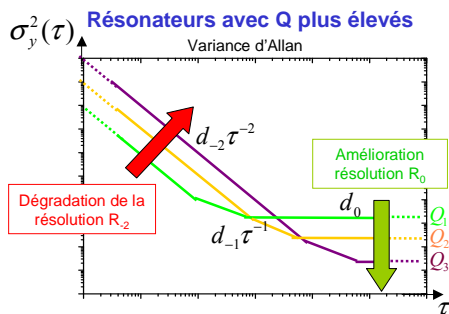
$$R_{-2} = \frac{1}{2\pi K_1} \sqrt{\frac{3f_h F k_B T}{P_0}}$$

avec $P_0 \propto A_c^2 \propto \frac{e^2}{Q}$

$$\Rightarrow R_{-2} = \frac{\sqrt{Q}}{eK_1} \sqrt{\frac{3f_h G k_B T}{4\pi^2 G'}}$$

Plancher Flicker R_0 :

$$\Rightarrow R_0(g) = \frac{F}{2QK_1} \sqrt{2 \ln(2) b_{-1}}$$



La performance de l'accelerometre vibrant dépend essentiellement du facteur de qualité Q du résonateur
 => Estimation théorique et expérimentale de ce paramètre pour des micro-résonateurs en silicium

16

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan

1. Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant
2. Impact de la miniaturisation
3. Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
4. Étude expérimentale du facteur de qualité
5. Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

17

Définition du facteur de qualité

=> Quels mécanismes fixent la valeur du facteur de qualité?

Facteur de qualité Q d'un résonateur = proportion d'énergie dissipée par période de vibration

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Energie emmagasinée dans le résonateur}}{\text{Energie dissipée par période de vibration}} = 2\pi \cdot \frac{W}{\Delta W}$$

Plusieurs mécanismes de dissipation: $\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sum \Delta W_i}{W} = \sum_i \frac{1}{Q_i}$

$$Q^{-1} = \underbrace{Q_{\text{gaz}}^{-1} + Q_{\text{surface}}^{-1} + Q_{\text{support}}^{-1}}_{\text{Mécanismes extrinsèques}} + \underbrace{Q_{\text{thermo}}^{-1} + Q_{\text{viscosité}}^{-1} + Q_{\text{défauts}}^{-1} + Q_{\text{phonons}}^{-1} + Q_{\text{autre}}^{-1}}_{\text{Limitations intrinsèques}}$$

Limitations principales pour le facteur de qualité de micro-résonateurs en silicium:

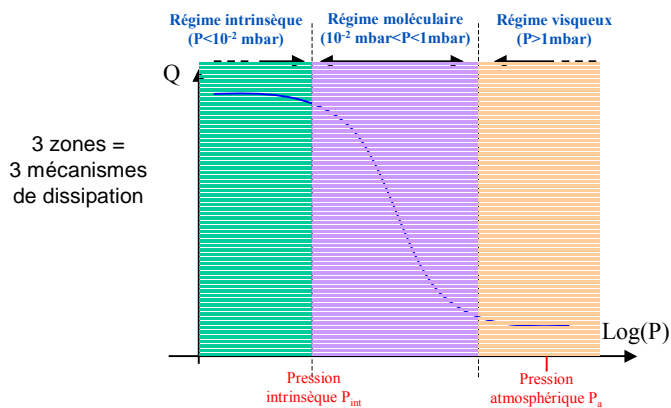
- amortissement gazeux (Q_{gaz})
- effet thermoélastique (Q_{thermo})
- pertes de surface? (Q_{surface})

18

Amortissement gazeux (1/2)

=> Pourquoi fonctionner sous vide?

- Interaction entre les parois du résonateur avec le gaz environnant



Important d'évoluer dans la région intrinsèque pour garantir un facteur de qualité élevé et constant ($P < P_{int}$)

F.R. Blom and al. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry. J. Vac. Sci. Technol, 10, pp 19-26, 1992

19

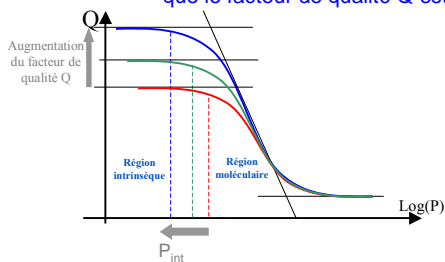
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Amortissement gazeux (2/2)

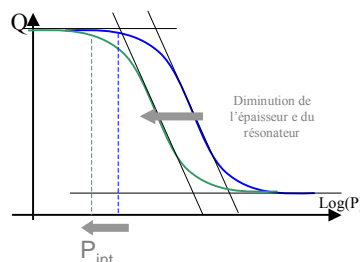
=> Quel niveau de vide à atteindre?

La pression P_{int} est d'autant plus faible:

- que l'épaisseur e est petite
- que le facteur de qualité Q est élevé



$$P_{int} \propto \frac{e}{Q} \sqrt{\frac{\pi R_0 T}{M_{gaz}}}$$



P_{int}	$e=1\mu\text{m}$	$e=5\mu\text{m}$	$e=10\mu\text{m}$	$e=20\mu\text{m}$
$Q=50\ 000$	$2,2 \cdot 10^{-3}$ mbar	$1,1 \cdot 10^{-2}$ mbar	$2,2 \cdot 10^{-2}$ mbar	$4,4 \cdot 10^{-2}$ mbar
$Q=100\ 000$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ mbar	$5,6 \cdot 10^{-3}$ mbar	$1,1 \cdot 10^{-2}$ mbar	$2,2 \cdot 10^{-2}$ mbar
$Q=500\ 000$	$2,2 \cdot 10^{-4}$ mbar	$1,1 \cdot 10^{-3}$ mbar	$2,2 \cdot 10^{-3}$ mbar	$4,4 \cdot 10^{-3}$ mbar

Les niveaux de vide requis sont difficilement réalisables avec les solutions de packaging actuelles

20

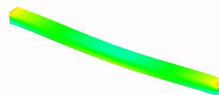
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Limitation intrinsèque: Effet thermoélastique

=> Quelles valeurs de facteurs de qualité attendues?

L'effet thermoélastique est le mécanisme intrinsèque limitant le facteur de qualité de micro-résonateurs (quartz/silicium)

- Résulte du couplage des champs thermique / déformation au sein du résonateur



- Peut se calculer à l'aide de la formule de Zener:

Modélisation Oofelie

$$Q_{\text{thermo}} = \frac{c_p \rho}{\alpha^2 T E} \frac{F^2 + f_0^2}{F \cdot f_0}$$

avec

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{\rho c_p e^2}$$

f_0 : fréquence de transition entre régime adiabatique et isotherme

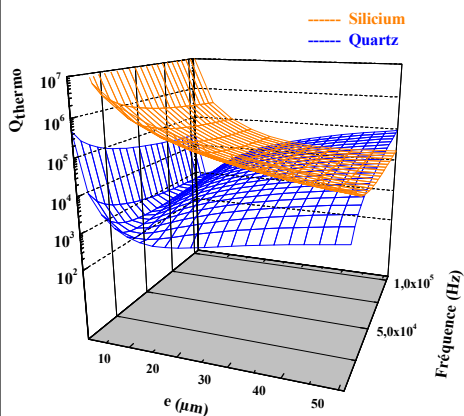
Micro-résonateurs en silicium compatibles avec des valeurs de $Q_{\text{thermo}} > 10^6$ en réduisant l'épaisseur de la poutre

S. Lepage. Stochastic finite element method for the modeling of thermoelastic damping in micro-resonators. PhD thesis, Université de Liège, 2006.
C. Zener. Internal friction in solids: General theory of thermoelastic internal friction. Phys. Rev., 53, pp 90-99, 1938

21

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Intérêt du silicium par rapport au quartz



Raison principale: différence de conductibilité importante entre ces deux matériaux

Propriétés	Silicium	Quartz
Masse volumique (Kg.m ⁻³)	2330	2650
Chaleur spécifique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	700	750
Coefficient de dilatation thermique (K ⁻¹)	2,6.10 ⁻⁶	13,7.10 ⁻⁶
Module D'Young (N.m ²)	1,68.10 ¹¹	7,82.10 ¹⁰
Conductibilité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	148	6,7

Pour des épaisseurs e de quelques μm :

- Q_{thermo} minimal (~ 1000) pour des poutres en quartz
- Q_{thermo} très élevés ($\sim 1 \cdot 10^6$) pour des poutres en silicium

Silicium plus favorable pour résonateurs micrométriques à haut facteur de qualité

22

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan

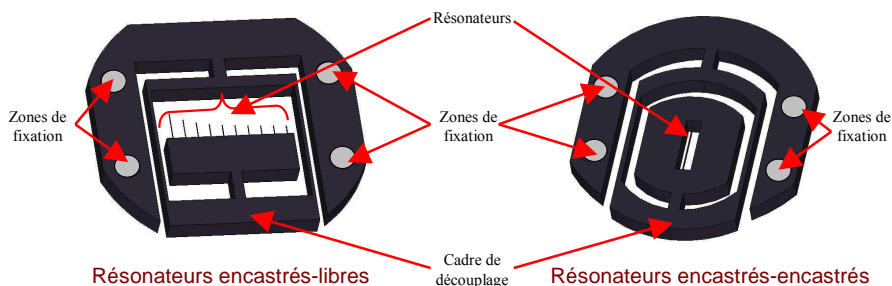
1. Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant
2. Impact de la miniaturisation
3. Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
4. **Étude expérimentale du facteur de qualité**
5. Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

23

Structures de test

=> Mesurer les facteurs de qualité de micro-résonateurs silicium attendus

- => Définition de structures de test sur une large gamme d'épaisseur (2 à 30 μ m) et de fréquence (25 à 250 kHz)

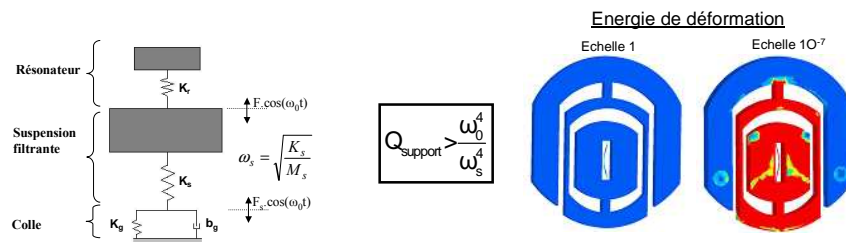


Objectif: Mesure du facteur de qualité ultime pour les micro-résonateurs en silicium

24

Définition des structures de test

- Définition de structures de test présentant des niveaux de découplage compatibles avec les facteurs de qualités attendus ($Q > 10^5$)
 - cadre de découplage développé à l'ONERA



→ minimisation des pertes d'énergie dans le support: $Q_{\text{support}} \sim 10^7$

$$Q^{-1} = Q_{\text{gaz}}^{-1} + Q_{\text{surface}}^{-1} + Q_{\text{support}}^{-1} + Q_{\text{thermo}}^{-1} + Q_{\text{viscosité}}^{-1} + Q_{\text{défauts}}^{-1} + Q_{\text{phonons}}^{-1} + Q_{\text{autre}}^{-1}$$

25

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Réalisation des structures

- Réalisation des structures de test sur substrat SOI (Silicon On Insulator) par des techniques avancées de gravure basées sur la technique « Deep Reactive Ion Etching » (DRIE)
 - 2 niveaux de masque
 - Usinage des résonateurs dans la couche de silicium aminci (15 μm)
 - Procédé parfaitement maîtrisé sans effet de scalping et de surgravure

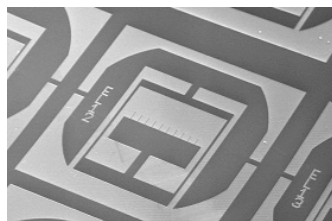
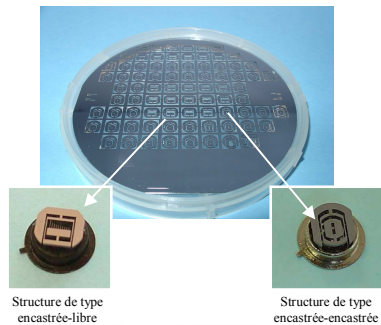


Photo MEB structure DRIE

Sélection puis collage des structures sur embase

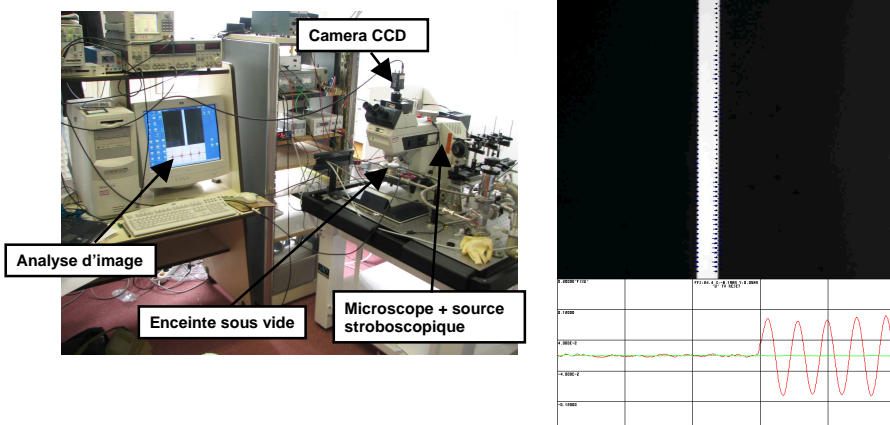


26

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Méthodes de mesure

Microscopie optique stroboscopique sous vide couplée à l'analyse d'image pour détecter les vibrations dans le plan de microstructures (IEF)



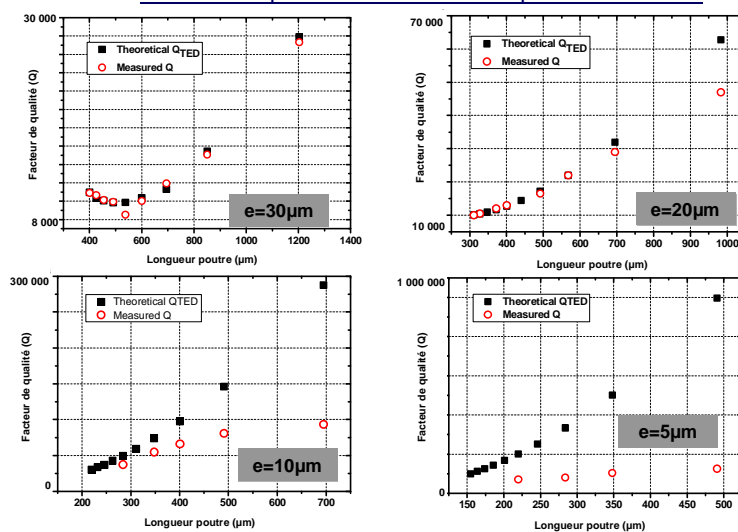
→ limite de détection inférieure à 0.1 nm (~1 nm avec la pompe à vide)

27

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Evolution du facteur de qualité en fonction des dimensions du résonateur (1/2)

Facteur de qualité en fonction de l'épaisseur vibrante

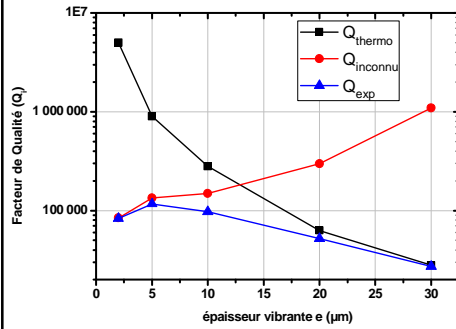


28

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Evolution du facteur de qualité en fonction des dimensions du résonateur (2/2)

Facteur de qualité en fonction de la fréquence et de l'épaisseur vibrante e



$$\frac{1}{Q_{exp}} = \frac{1}{Q_{thermo}} + \frac{1}{Q_{inconnu}}$$

F~25kHz	e=30µm	e=20µm	e=10µm	e=5µm	e=2µm
Q_{exp}	27 200	52 000	97 000	117 000	83 000
Q_{thermo}	28 000	63 000	280 000	900 000	5 000 000
$Q_{inconnu}$	1 000 000	300 000	150 000	130 000	85 000

⇒ Augmentation du facteur de qualité Q en diminuant l'épaisseur jusqu'à 5µm

Nouvelle source de dissipation dont l'influence augmente lorsque l'épaisseur diminue

⇒ Phénomènes de surface: a/ vide non suffisant

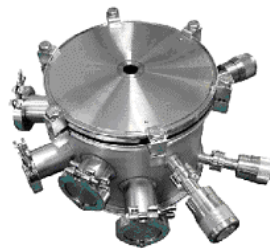
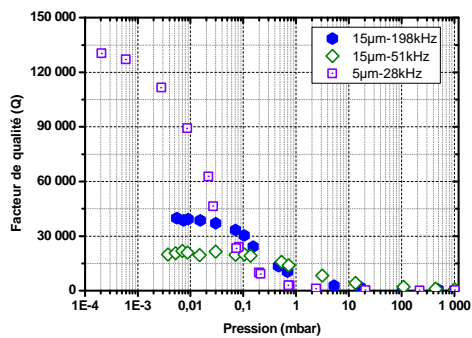
b/ qualité des flancs du résonateur

29

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Influence de la pression résiduelle sur le facteur de qualité

Facteur de Qualité en fonction de la pression résiduelle



Enceinte à Vide (FOGALE/IEF)

- > 10⁻⁴ mbar
- > T°: -30 / +100 °C

Le niveau de vide doit être adapté au facteur de Qualité:

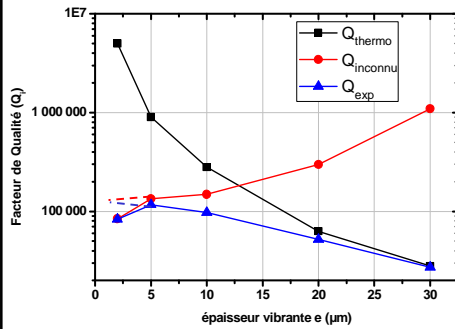
10⁻⁴ mbar pour Q > 100 000

30

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Evolution du facteur de qualité en fonction des dimensions du résonateur (2/2)

Facteur de qualité en fonction de la fréquence et de l'épaisseur vibrante e



$$\frac{1}{Q_{exp}} = \frac{1}{Q_{thermo}} + \frac{1}{Q_{inconnu}}$$

F=25kHz	e=30µm	e=20µm	e=10µm	e=5µm	e=2µm
Q_{exp}	27 200	52 000	97 000	117 000	83 000
Q_{thermo}	28 000	63 000	280 000	900 000	5 000 000
$Q_{inconnu}$	1 000 000	300 000	150 000	130 000	85 000

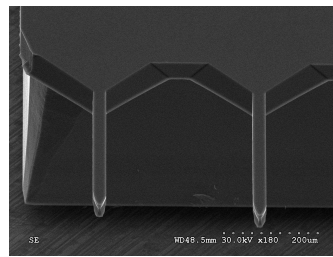
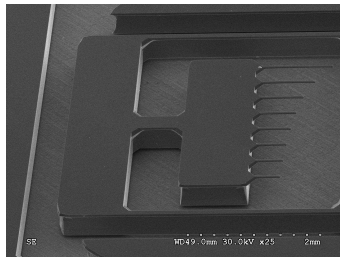
=> **Qualité des flancs du résonateur**: Réalisation de structures par **gravure chimique** pour étudier l'impact de la technologie de réalisation sur les facteurs de qualité

31

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Procédé de fabrication mixte: KOH/DRIE (1/2)

Réalisation des structures de test à l'ESIEE (DRIE) et IEF (KOH) sur substrat Silicium



Procédé	DRIE/KOH			DRIE
Résonateur	3µm – 24 kHz	3µm – 84 kHz	8µm – 24 kHz	2µm – 24 kHz
Q (25°C)	189 000	165 000	134 500	84 000

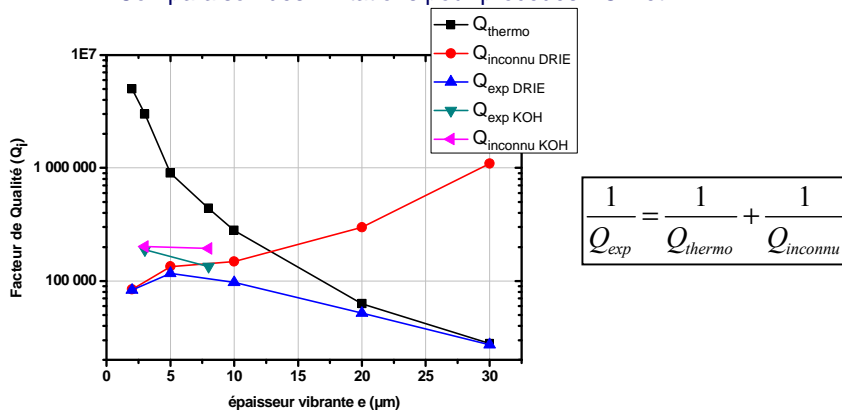
Nette amélioration des facteurs de qualité avec ce procédé

32

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Procédé de fabrication mixte: KOH/DRIE (2/2)

Comparaison des limitations pour procédés KOH et DRIE



Nette amélioration des facteurs de qualité avec ce procédé
 => Va dans le sens des effets de surface pour les poutres les plus fines
 => Limitations liées en partie au système de mesure (vide limite: 10^{-4} mbar)

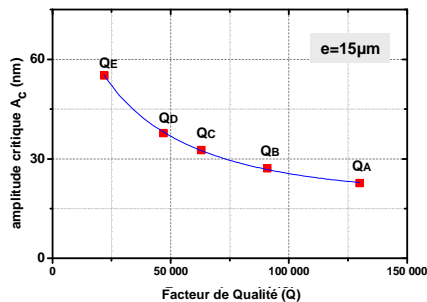
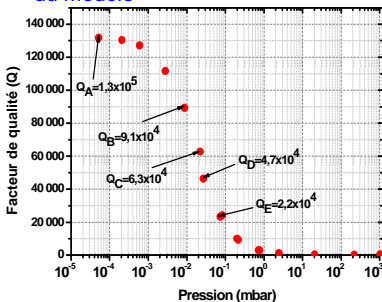
Non linéarités mécaniques

- Valider le modèle théorique pour l'expression de l'amplitude critique de vibration avant apparition des non-linéarités mécaniques

$$A_c \propto \frac{e}{\sqrt{Q}}$$

epaisseur vibrante (pointing to e)
facteur de qualité (pointing to Q)

- Mesure de l'amplitude critique à différentes pressions sur un même résonateur => validation du modèle



Amplitudes critiques < 20nm pour des résonateurs de quelques μm d'épaisseurs

Conclusion sur les facteurs de qualité

- Validité de la théorie thermoélastique pour des facteurs de qualité dans une gamme de 10 000 à 40 000
- Le niveau de dopage n'est pas un facteur d'optimisation déterminant en ce qui concerne la qualité de la vibration et son comportement thermique
- Des sources de dissipation autres ont été identifiées pour les forts facteurs de qualité. L'impact de la technologie de réalisation sur les pertes a aussi été mis en évidence
- La qualité du vide est un paramètre déterminant, surtout à l'échelle micro : un niveau de vide de 10^{-4} mbar est nécessaire pour des facteurs de qualité de 100 000. De meilleurs coefficients de qualité nécessiteraient un niveau encore meilleur
- Des facteurs de qualité très élevés ont pu être mesurés (~200 000) sur des micro-résonateurs en vibration de flexion

Résultats intéressants pour définir une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium

35

Plan

1. Analyse de la performance de l'accéléromètre vibrant
2. Impact de la miniaturisation
3. Étude des mécanismes de dissipation pour des micro-résonateurs en silicium
4. Étude expérimentale du facteur de qualité
5. Développement d'une première architecture d'accéléromètre vibrant miniature en silicium: ISA (Inertial Silicon Accelerometer)

36

Critères de dimensionnement

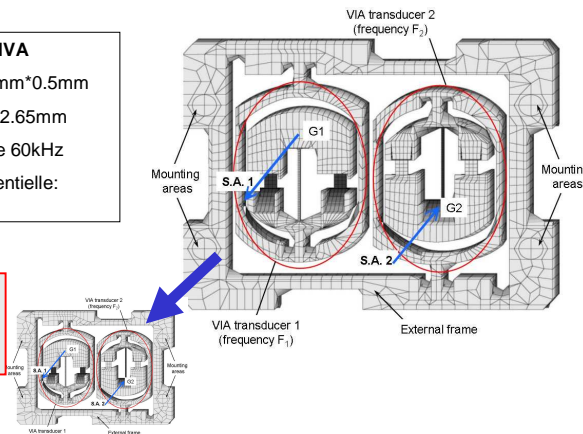
- Objectif: miniaturiser les accéléromètres existants en quartz (DIVA, VIA) tout en conservant les performances.
- Etude d'un accéléromètre vibrant en silicium, différentiel et monoépaisseur

ACCELEROMETRE DIVA

Dimensions structure: 12mm*10mm*0.5mm
 Dimensions lames: 65µm*30µm*2.65mm
 Fréquences des lames: autour de 60kHz
 Facteur d'échelle structure différentielle:
 30Hz/g

OBJECTIF

- Réduire le volume d'un facteur 10
- Épaisseur des lames: qqqs µm



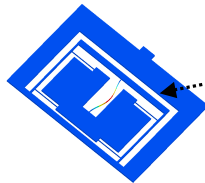
37

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Définition des structures d'accéléromètres ISA (Inertial Silicon Accelerometer) (1/2)

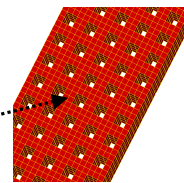
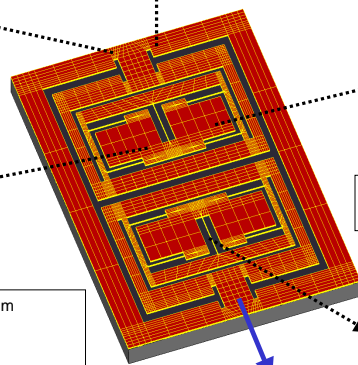
- Étude pour la réalisation d'une première architecture d'accéléromètre en silicium

Dimensions accéléromètre:
 3mm*5mm*0.5mm
 Wafer SOI



Dimensions poutres: 3µm*100µm*1030µm
 Fréquence résonance ~ 24,6 kHz
 Facteur d'échelle: 28 Hz/g
 Amplitude critique: 16 nm
 Accélération de flambage: 50g
 Hypothèse: Q~100 000

Réalisation par DRIE



Structure perforée pour libérer les parties actives

Excitation/Détection électrostatique

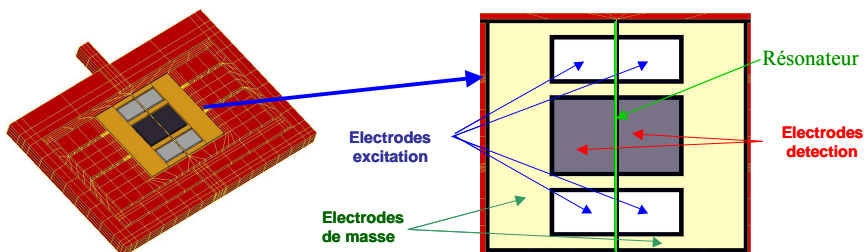
38

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Définition des structures d'accéléromètres ISA (Inertial Silicon Accelerometer) (2/2)

Principale difficulté: excitation de la poutre en régime linéaire (amplitude < 15 nm) requiert l'application de tensions très faibles (de l'ordre du mv)

=> Augmente le bruit de mesure



Si régime linéaire: $A < A_c$ ($A_c \approx 15nm$)

=> Baisse résolution R_2

Si régime non-linéaire: $F_r = F_0(1 + \alpha A^2)$

=> Bruit d'amplitude => bruit de phase

=> Baisse résolution R_0

Amplitude du courant de sortie i_s :

$$i_s = \frac{\epsilon SU}{g^2} \frac{\partial x}{\partial t} \approx \frac{\epsilon SU}{g^2} 2\pi F_r A$$

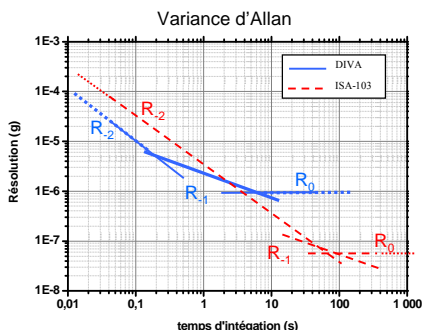
39

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Estimation des performances de l'accéléromètre ISA

A partir de l'ensemble des mesures expérimentales et des développements théoriques

=> estimer la performance du micro-accéléromètre vibrants en silicium ISA



- gain d'un facteur 10 sur l'encombrement
- gain d'un facteur 10 sur la résolution ultime (plancher Flicker) et stabilité de biais
- perte d'un facteur 3 sur la résolution R_2
- pression P_{int} requise (1.10^{-4} mbar) difficilement atteignable avec les technologies de packaging actuelles
- perte d'un facteur 10 sur l'étendue de mesure

40

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Conclusion

- Expression de la performance des accéléromètres vibrants en fonction des différents paramètres du résonateur
 - Importance du facteur de qualité
 - Impact de la miniaturisation sur la performance
- Etude des facteurs de qualité pour des micro-résonateurs en silicium:
 - Caractérisation d'un grand nombre de résonateurs: lois d'évolution
 - Limite théorique thermoélastique validée
 - Limite amortissement gazeux validée
 - Mise en évidence d'une autre source de dissipation importante : pertes de surface?
 - Phénomène de non-linéarité mécanique et limitation à la miniaturisation
- Définition d'une architecture d'accéléromètre vibrant en silicium et évaluation de ses performances

⇒ Impact de la miniaturisation de l'accéléromètre à lame vibrante sur sa performance
⇒ Possibilité de développer des structures en silicium à encombrement réduit (qq mm²) tout en garantissant des performances intéressantes pour les applications micro-drone

41

Perspectives

A l'issue de cette étude,

- Certains points nécessitent une étude approfondie:
 - Réalisation des structures accélérométriques définies pour validation expérimentale (mesure de variance d'Allan)
 - Compréhension des mécanismes de dissipation liés à la surface du résonateur (Q_{surface})
 - Étude de la stabilité de fréquence à « moyen terme » (marche aléatoire et dérive)
 - Étude du vieillissement du matériau silicium et impact sur la stabilité de biais
 - Approfondissement des sources de bruit de phase dans la boucle oscillatrice
- Certaines pistes prometteuses ont été identifiées:
 - Étude des systèmes d'excitation/détection optiques permettant de mesurer de très faibles amplitudes de vibrations
 - Étude d'un oscillateur intégré à faible bruit de phase pour ne pas détériorer les performances mécaniques

42

Publication / communications



Publication:

B. Le Foulgoc, T. Bourouina, O. Le Traon, A. Bosseboeuf, F. Marty, C. Breluzeau, J.-P. Grandchamp, and S. Masson. **Highly decoupled single-crystal silicon resonators: an approach for the intrinsic quality factor.** *J. Micromech. Microeng.*, 16, pp 45-53, 2006.

Communications:

B. Le Foulgoc, T. Bourouina, O. Le Traon, A. Bosseboeuf, F. Marty, C. Breluzeau, J.-P. Grandchamp, and S. Masson. **Highly insulated single-crystal silicon resonators: an approach for the intrinsic quality factor.** *MME 05 – Micromechanics Europe, Göteborg, 4-6 Septembre 2005*

B. Le Foulgoc, T. Bourouina, O. Le Traon, A. Bosseboeuf, F. Marty, S. Masson, A. Parent. **High-Q silicon flexural resonators for vibrating inertial sensors: Investigations of the limiting damping mechanisms.** *IEEE Sensors, Daegu Korea, 22-25 Octobre 2006*

B. Le Foulgoc, O. Le Traon, A. Parent, T. Bourouina, F. Marty, A. Bosseboeuf, H. Mathias. **Concepts and limits for the miniaturization of silicon differential vibrating inertial micro-beam accelerometer.** *IEEE Sensors, Atlanta USA, 28-31 Octobre 2007*

B. Le Foulgoc, A. Bosseboeuf, T. Bourouina, O. Le traon, S. Masson, A. Parent. **An experimental study of nonlinear limits in High-Q Silicon vibrating micro- and nano-mechanical sensors.** *Transducers 2007 – The 14th international conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems – Lyon France, 10-14 juin 2007.*