

Les capteurs acoustiques : des montres à quartz aux biocapteurs

J.-M Friedt
Sensor, Besançon
jmfriedt@lpmo.edu

transparents et références disponibles à <http://jmfriedt.free.fr>

8 novembre 2006

Introduction

Introduction

Le diapason

Onde transverse de volume

Ondes de surface

Conclusion

Onde acoustique : vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant

Un capteur est composé de nombreux éléments :

- un transducteur qui traduit un phénomène en une quantité mesurable
- une instrumentation d'acquisition de cette quantité
- une méthode d'apport des réactifs ou des composés à détecter

Ici : mesure des paramètres de propagation d'une onde acoustique en fonction des effets de l'environnement sur le milieu de propagation.

Problème : comment générer l'onde acoustique ?

Introduction

Nous utiliserons des substrats *piézoélectriques* (alternative aux excitations mécaniques ou thermiques)

Les transducteurs présentés ici :

- fournissent un *signal électrique* ...
- ... traduisant une perturbation d'une *onde acoustique* ...
- ... générée par effet *piezoélectrique*

Les perturbations peuvent être

- une variation de température,
- une force (accélération, rotation ...)
- une masse, la viscosité d'un fluide ...

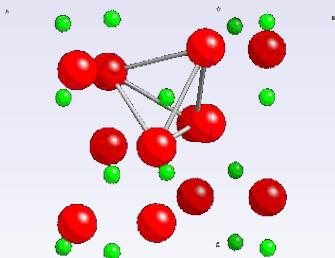
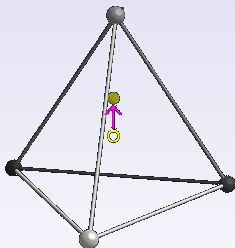
La sélection de la quantité physique mesurée est issue d'un choix sur la géométrie du capteur.

La piezoélectricité

Découverte : P. Curie (1881)

Conversion d'une différence de potentiel en déplacement et réciproquement : un dipôle électrique est induit par déformation de la maille cristalline.

Cette condition ne peut se réaliser que si la maille cristalline ne présente aucun centre de symétrie (quartz : trigonal 32).



Exemple du ZnS^1 et du quartz (rouge=O, vert=Si)

¹image de

<http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/tlplib/piezoelectrics/printall.php>

Aspects formels de la piézoélectricité

Relation de couplage entre les contraintes (T), déformations (S) et champ électrique E grâce aux matrices des rigidités élastiques (c en N/m^2) et e les constantes piézoélectriques (en C/m^2).

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & (c_{11} - c_{12})/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_{11} & -e_{11} & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{14} & -e_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

(extension de la loi de Hooke aux solides piézoélectriques)

Relation de couplage entre l'induction électrique (D), les déformations (S) et champ électrique E grâce aux matrices e des constantes piézoélectriques (en C/m^2) et ε les constantes diélectriques (F/m)

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & -e_{11} & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{14} & -e_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

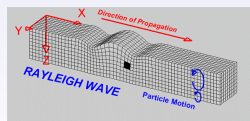
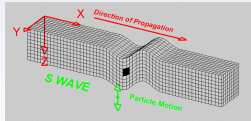
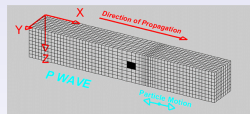
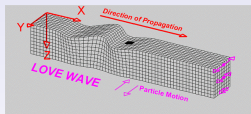
Constantes numériques :

www.ieee-uffc.org/freqcontrol/quartz/fc_conqztz2.html

D. Royer & E. Dieulesaint, *Ondes élastiques dans les solides, tome 1 : Propagation libre et guidée*, Masson (1997), pp.115-146

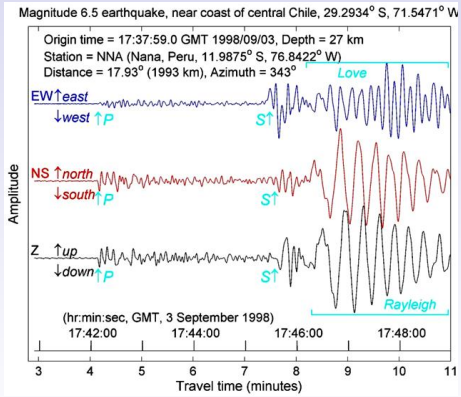
Les différents types d'ondes

- Longitudinales (échographie) : déplacement colinéaire à Poynting (propagation d'énergie)
- Transverse (de volume ou de surface) : déplacement normal à Poynting
- Rayleigh (surface) : deux composantes du déplacement dont une hors plan
- Guidées (Love) : onde transverse confinée dans une couche sub-longueur d'onde de célérité inférieure à celle du substrat.



Les différents types d'ondes (2)

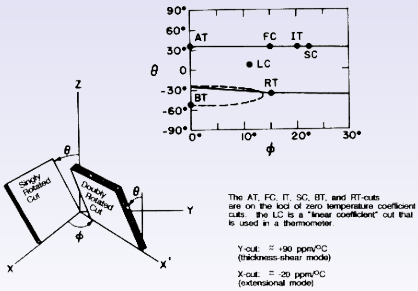
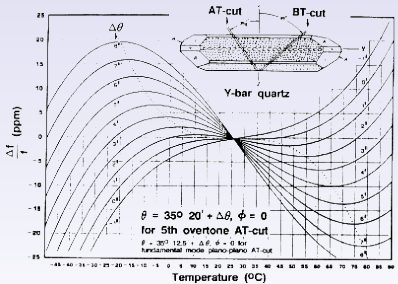
- Historiquement identifiées lors des études sismologiques



Un observateur fixe observe la déformation issue d'un évènement ponctuel

Les différents types d'ondes (2)

- Historiquement identifiées lors des études sismologiques
- Notion de coupe : l'anisotropie du cristal implique que la nature de l'onde est déterminée par la direction de propagation et direction du champ électrique (=position électrodes).



<http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/quartz/vig/vigtoc.htm>

Principe de transduction dans les microsystèmes

Introduction

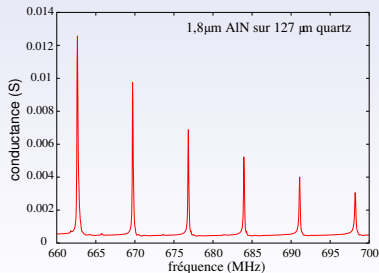
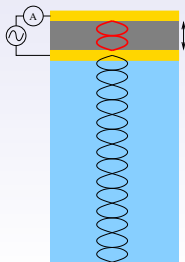
Le diapason

Onde transverse de volume

Ondes de surface

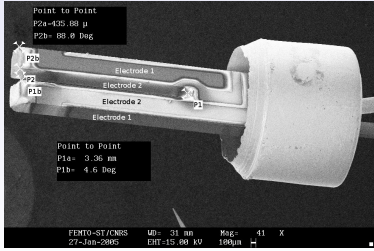
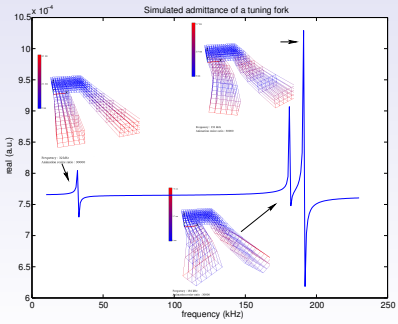
Conclusion

- Une différence de potentiel sinusoïdale génère une déformation périodique de la maille cristalline=onde acoustique
- Le choix de l'orientation cristalline par rapport aux faces sur lesquelles sont déposées les électrode détermine la nature de l'onde
- Exemple du HBAR (high-overtone bulk acoustic resonator) : électrode-piézo-électrode-substrat pour avoir une onde longitudinale dans le substrat
- Choix des substrats aux matériaux à faibles pertes $\Rightarrow$ facteur de qualité élevé ($1000-10^6$)



Le diapason à quartz

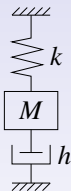
- La géométrie du dispositif, le choix de l'orientation cristalline et la disposition des électrodes détermine les quantités physiques auxquelles est sensible un capteur acoustique.
- Le diapason à quartz détermine la référence de temps dans une montre à quartz.
- Il remplace le balancier ou masse-ressort. La fréquence de résonance est déterminée par la géométrie des bras : quelque dizaines de kHz.



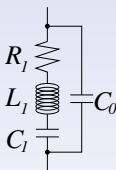
Modèle électromécanique (Butterworth-Van Dyke)

Modèle mécanique de masse+ressort amorti (branche motionnelle)

Modèle
mécanique



Modèle
électrique



Mécanique	Électrique
h (friction)	R_1 (résistance)
M (masse)	L_1 (inductance)
k (raideur)	$1/C_1$ (condensateur)
x (déplacement)	q (electrical charge électrique)
$\dot{x}$ (vitesse)	$i = \frac{dq}{dt}$ (courant)
$M\ddot{x} + h\dot{x} + kx = F$	$L_1\ddot{q} + R_1\dot{q} + q/C_1 = U$
$Q = \frac{1}{h} \sqrt{kM}$	$Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ (facteur de qualité)
$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ (pulsation)

C_0 est le condensateur formé par le diélectrique (quartz) séparant les électrodes (branche électrique).

Sa présence induit une *anti-résonance*.

Application à un capteur

Perturber le diapason se traduit par une perturbation de sa réponse :

- ajouter une masse se traduit par une baisse de fréquence de résonance
- rigidifier un bras se traduit par une élévation de fréquence de résonance
- augmenter les pertes se traduit par une baisse du Q

Capacité à mesurer de nombreuses quantités physiques : la fréquence est la quantité physique qui se mesure avec la plus grande précision.

Interrogation du dipôle

Introduction

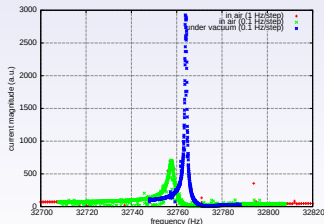
Le diapason

Onde transverse
de volume

Ondes de surface

Conclusion

- Interrogation en boucle ouverte : un synthétiseur de fréquence balaie la plage de fréquence de part et d'autre de la résonance
- Une convertisseur courant-tension fournit une tension proportionnelle au courant circulant dans le dipôle (résonance=max de courant, anti-résonance =min de courant).
- Difficultés : source de fréquence stable et balayage lent
- Solution faible coût : les synthétiseurs de fréquence AD9850, AD9851 ... de Analog Devices (programmable par port parallèle du PC)
- aspect capteur : une fois le point de fonctionnement identifié, on reste à fréquence fixe et on étudie l'évolution de la quantité qui nous intéresse (phase, magnitude) en fonction des conditions extérieures



Application à la microscopie à sonde locale

- Microscopie classique, un grand nombre de capteurs (œil, pixel de capteur CCD) captent simultanément une information optique : action *parallèle*
- Microscopie à sonde locale, une sonde unique balaye un échantillon pour en mesurer une propriété physique : action *séquentielle*
- Exemple de la mesure de la topographie : le diapason vient en contact avec une surface et asservit sa position de façon à garder la distance sonde-surface constante.
- Intérêt : résolution nettement meilleure que par les méthodes optiques, mesure de quantités telles que la dureté d'un matériau, coefficient de friction ...

Les capteurs
acoustiques : des
montres à quartz
aux biocapteurs

J.-M Friedt

- Introduction
- Le diapason
- Onde transverse
de volume
- Ondes de surface
- Conclusion

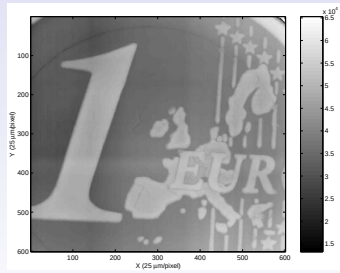
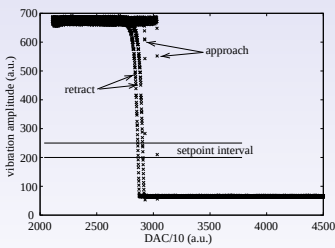
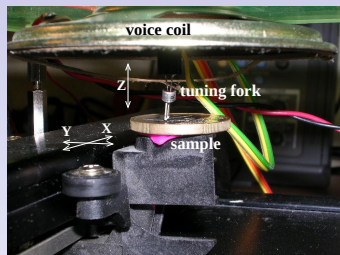
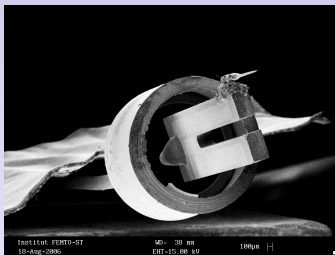
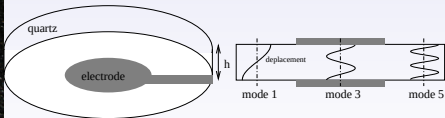
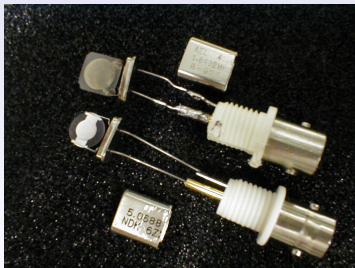


Image MEB obtenue par É. Carry, FEMTO-ST/LOPMD, Besançon

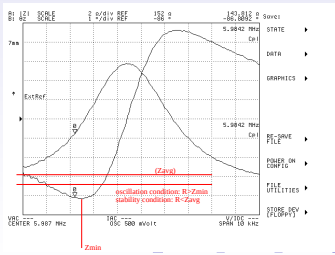
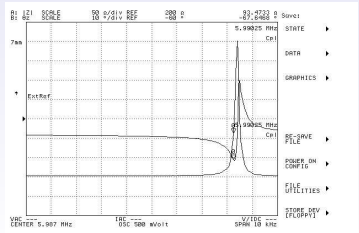
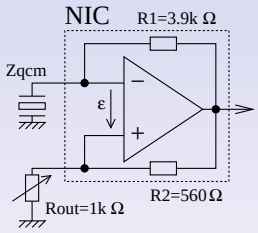
Le résonateur à onde de volume

- Une onde transverse est confinée dans un morceau de quartz couvert d'électrodes (Ag ou Au)
- Les très faibles pertes acoustiques sont associées à un rapport $\frac{\text{énergie emmagasinée}}{\text{énergie dissipée}}$ grand ($\simeq 10^6$)
- Célérité de l'onde $\simeq 5000$ m/s et épaisseur de l'ordre de quelque centaines de $\mu\text{m} \Rightarrow$ fréquence de l'ordre de quelque MHz.



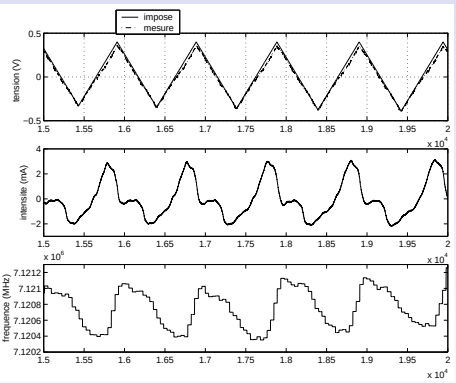
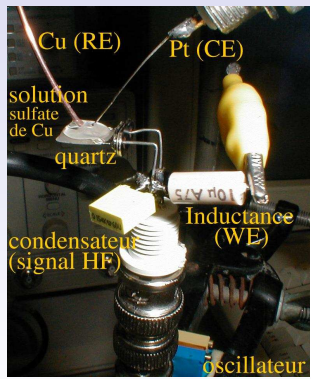
Utilisation en boucle fermée

- Facteur de qualité élevé $\Rightarrow$ interrogation en boucle ouverte difficile
- Sensibilité du capteur acoustique aux pertes viscoélastiques : Q
- Exemple d'oscillateur à base d'ampli-op : le convertisseur d'impédance négative (NIC)



Exemple : électrodéposition de Cu

- Un potentiostat est un montage à 3 électrodes permettant de déposer (réduire) ou retirer (oxyder) un ion de l'électrode de travail
- ici $Cu \leftrightarrow Cu^{++}$
- fréquence d'oscillation mesurée par un compteur de fréquence commercial



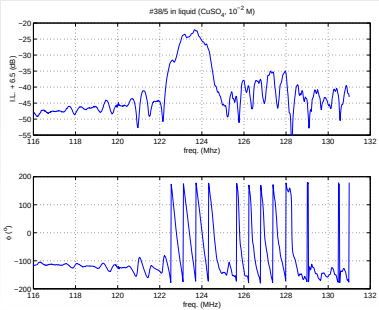
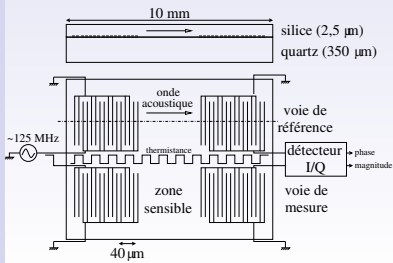
Analyse des résultats

Comment relier une variation de fréquence à une masse ?

- en première approximation, si les propriétés de la couche adsorbée sont proches de celles du quartz, on ne fait que changer l'épaisseur
⇒ confinement de $\lambda/2$ dans une épaisseur variable (célérité constante)
⇒ modèle de Sauerbrey (1959) : $\Delta f \propto \Delta h$
- valide dans le vide
- cas des milieux liquides ou couches visqueuses : pertes acoustiques et décalage de fréquence attribuées à d'autres effets que gravimétriques

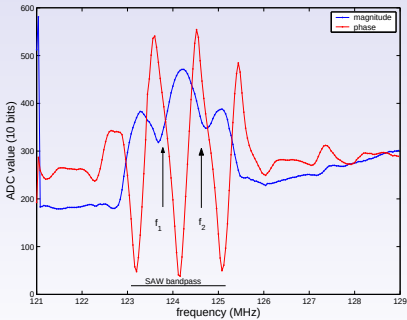
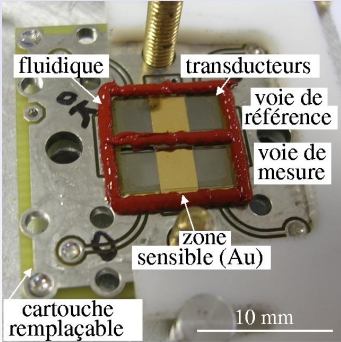
Les ondes de surface

- Classification des types d'ondes se propageant en surface des solides est issue de ces études sismologiques : onde de Rayleigh, onde de Love ...
- La célérité d'une onde de surface dépend des propriétés des espèces adsorbées en surface (pertes, densité)
- Afin de travailler sur des dispositifs de petites dimensions et d'obtenir des profondeurs de pénétration de l'onde évanescente de l'ordre de l'épaisseur de la couche étudiée, on travaille dans la centaine de MHz avec des structures de quelques microns (salle blanche).



Principe de mesure

- Mesure de la variation de célérité par mesure de déphasage entre une voie de référence et une voie de mesure
- Instrument dédié à ce type d'analyses (diagramme de Bode d'un quadripôle quelconque) : analyseur de réseau



Exemple : électrodéposition de Cu

Introduction

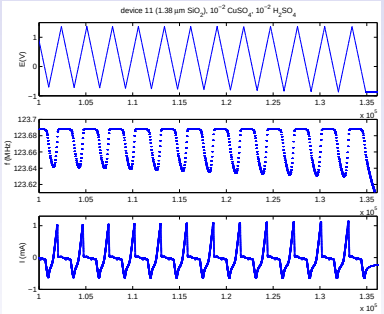
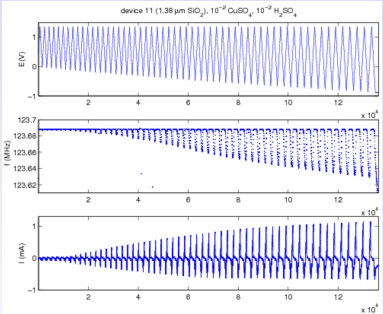
Le diapason

Onde transverse
de volume

Ondes de surface

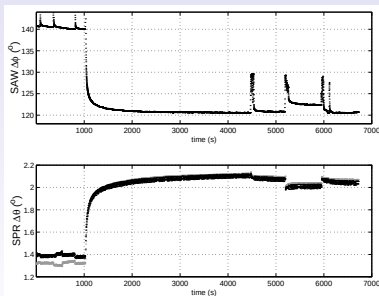
Conclusion

L'électrodéposition est ici utilisée pour calibrer la sensibilité
gravimétrique du capteur

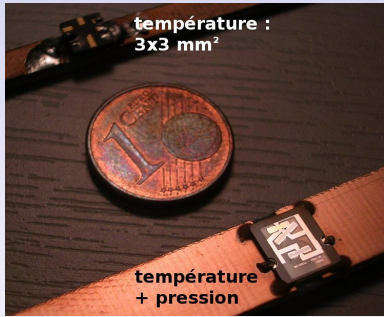
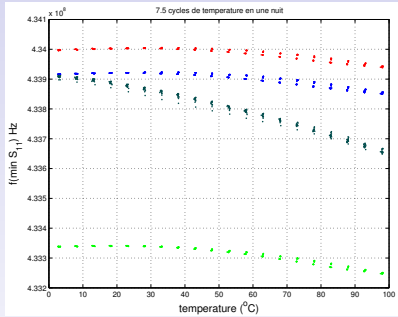


Exemple : adsorption de protéines

- Biocapteur à détection directe : on mesure la masse adsorbée en surface
- Une monocouche de protéines pèse entre 500 et 5000 ng/cm²
- Pas de fonctionnalisation préalable (radiomarquage, fluo)
- Résolution temporelle donne cinétique de la solution



Exemple : mesure de température sans fil



L'onde acoustique issue d'une excitation radiofréquence est sensible à son environnement (stress, température, charge gravimétrique)
⇒ capteur

[1] G. Martin, P. Berthelot, J. Masson, W. Daniau, V. Blondeau-Patissier, B. Guichardaz, S. Ballandras, A. Lamber, *Measuring the inner body temperature using a wireless temperature SAW-sensor-based system*, IEEE Ultrasonics Symposium 4 (2005), pp. 2089-2092

Conclusion et perspectives

- Les dispositifs à quartz sont faciles à obtenir pour en étudier les caractéristiques
- Divers modes de propagation d'ondes acoustiques : diapason, onde de volume, onde de surface
- Application du quartz aux domaines liés aux références de temps dans les circuits électroniques
- Extension aux applications capteurs. Certains des modes acoustiques sont compatibles avec l'utilisation en milieu liquide
- Mesures de masses de quelque 10aines de ng/cm^2 à plusieurs $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
- Mesure en boucle fermée (oscillateur $\rightarrow$ fréquence) ou ouverte (source extérieure d'interrogation $\rightarrow$ résonance et Q)

- Interprétation des résultats riche en données uniques sur les propriétés physiques des couches adsorbées (densité+épaisseur, viscoélasticité, rugosité ...)
- Domaine très riche, actif aujourd'hui dans l'exploitation de matériaux piézo autres que le quartz ($LiNbO_3$, $LiTaO_3$, langasite ...)
- Capacité à l'interrogation sans fil (radiofréquence) pour utiliser les capteurs dans des emplacements difficilement accessibles (pièces mobiles, applications médicales)
- Nombreux autres modes acoustiques n'ont pas été développés ici (ondes de Lamb, FBAR, ...)

Bibliographie

- Nombreuses références électroniques issues de la conférence de référence UFFC : <http://icmfg.com/frequencycontrol.html>
- C. Audoin & B. Guinot, *The measurement of time – time, frequency and the atomic clock*, Cambridge Univ. Press (2001)
- E. Gizeli, C.R. Lowe, *Biomolecular Sensors*, Taylor & Francis (2002)



Contact : jmfriedt@lpmo.edu, [http ://jmfriedt.free.fr](http://jmfriedt.free.fr)