



Laboratoire d'Imagerie Biomédicale



Inserm
Institut national
de la santé et de la recherche médicale

S SORBONNE
UNIVERSITÉ



La Spectroscopie de Résonance Ultrasonore (RUS)

Potentialités pour le contrôle des matériaux en F.A.

Pascal DARGENT (équipe « Bone Quality »)

Laboratoire d'Imagerie Biomédicale

15 rue de l'école de médecine

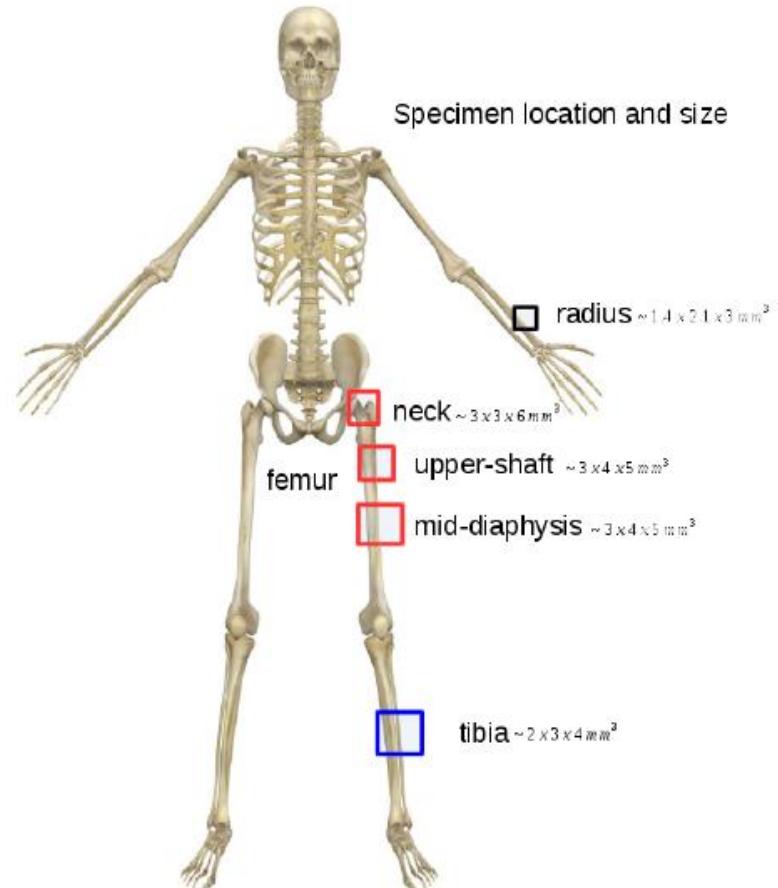
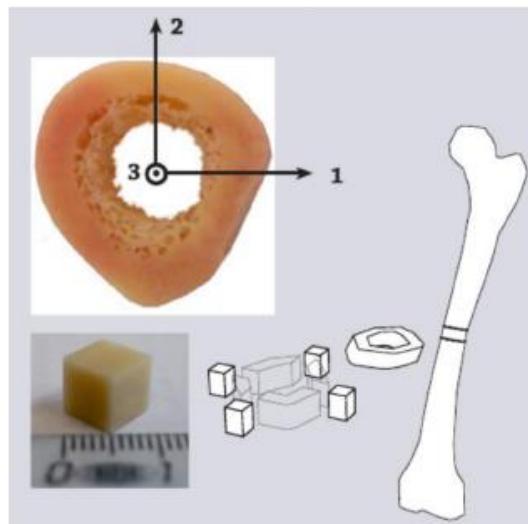
75006 Paris

***Colloque « Fabrication Additive appliquée à la
Physique des deux infinis » - 07/06/2021***

Travaux sur l'Os

Specimens of cuboid shape, sized 1~5 mm

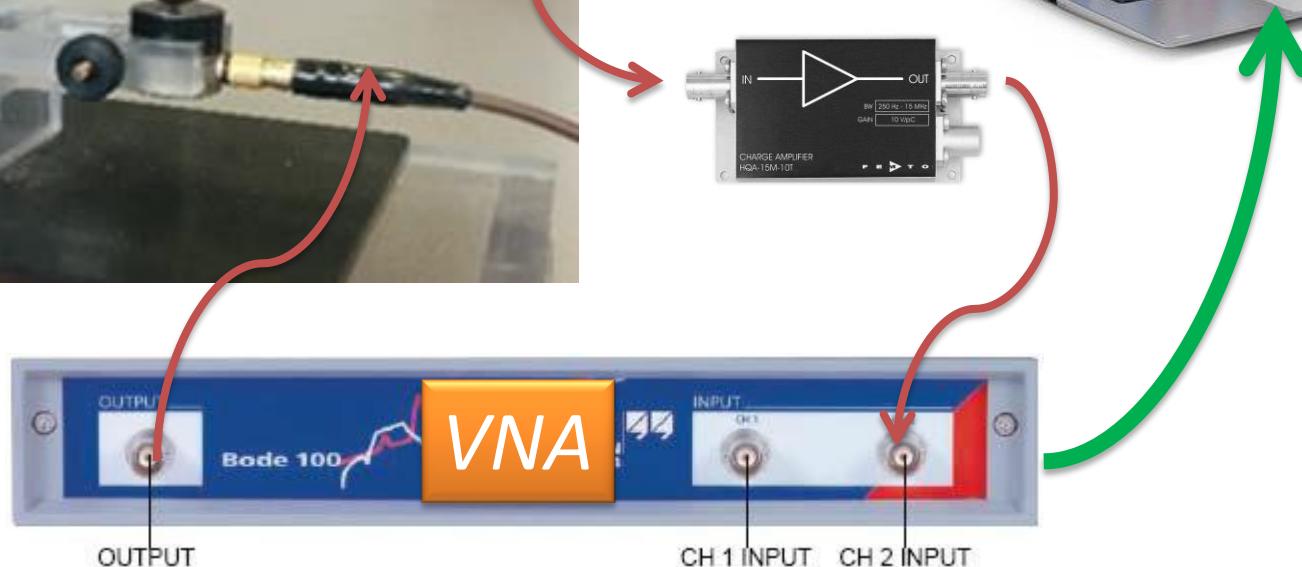
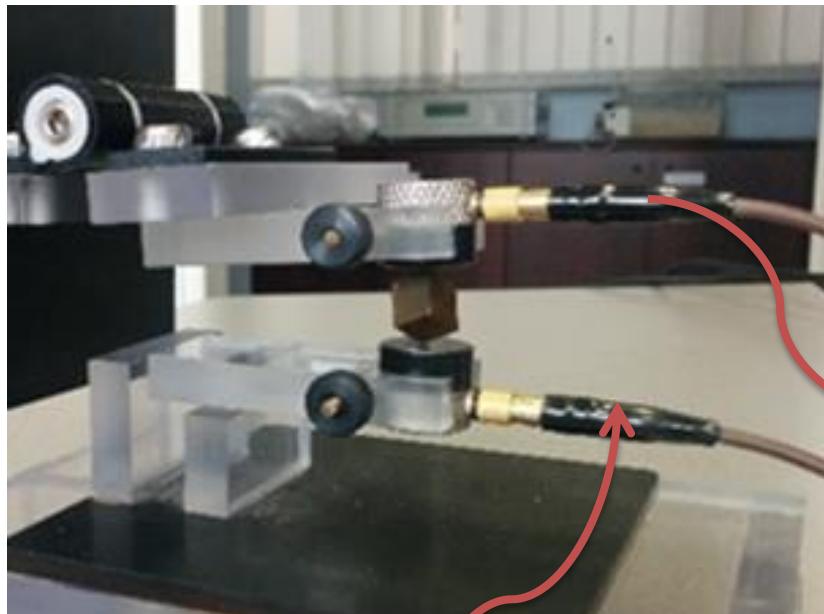
- ▶ Femurs : neck (19 donors, 19 specimens), upper-shaft (19 donors, 73 specimens), mid-diaphysis (30 donors, 55 specimens)
- ▶ Radius (one-third proximal (20 donors, 42 specimens)
- ▶ Tibia (20 donors, 55 specimens)



ANR « Multips » & « Taco-Sound »

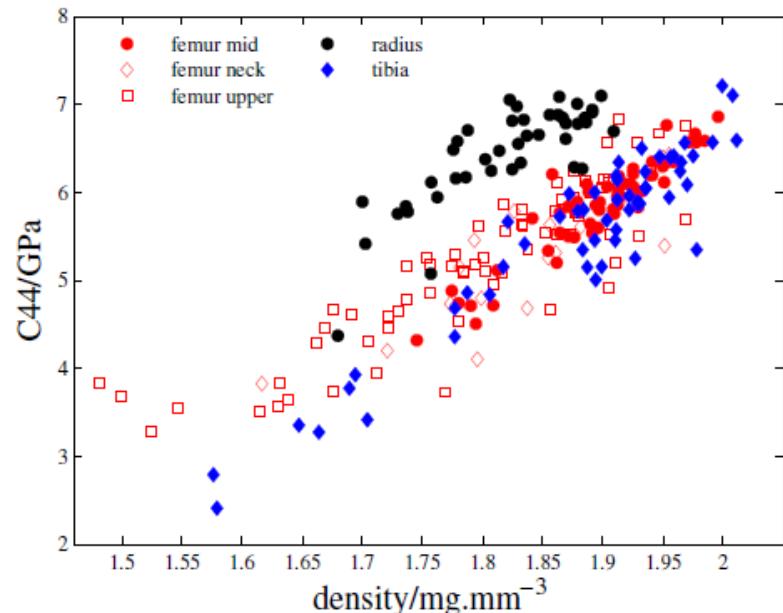
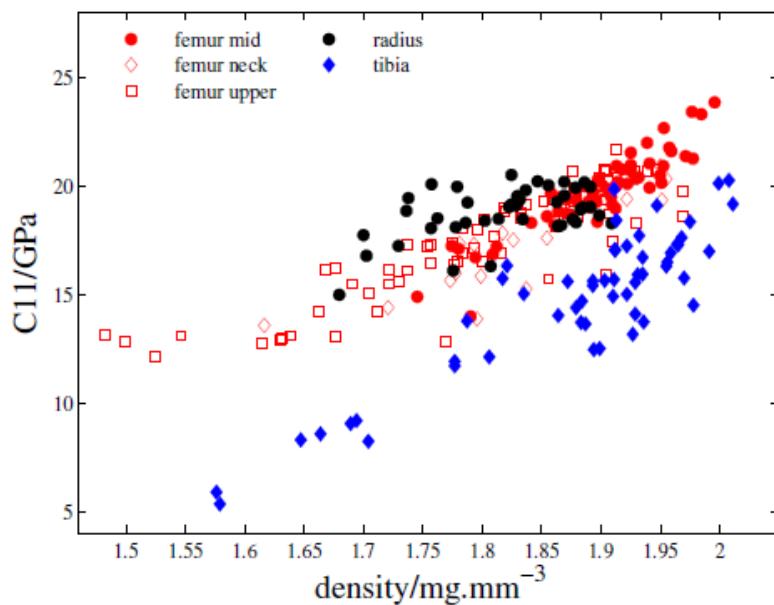
L'instrument du LIB

(2017)



Travaux sur l'Os

A contribution to bone biomechanics : first multi-site characterization of the entire stiffness tensor

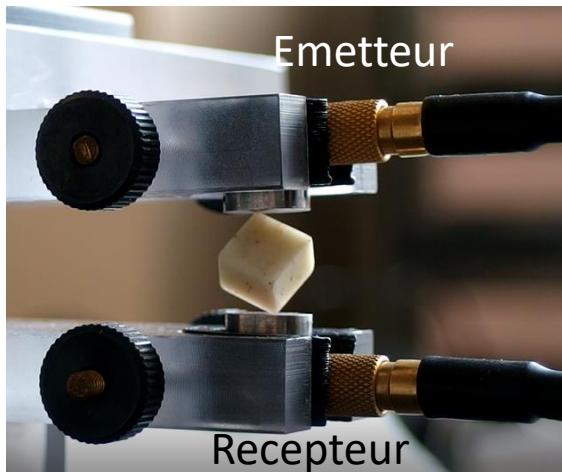


- ▶ Important elasticity relative variations ($> 100\%$) in the physiological density range
- ▶ A trend of relatively higher elasticity in radius and lower elasticity in tibia

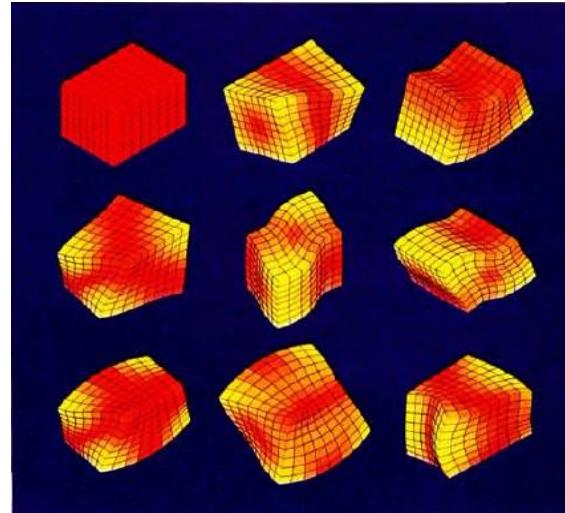
Le spectre de l'Analyse Modale

Ultrasonore : # > 20 kHz

2 transducteurs piézoélectriques génèrent et mesurent les modes propres ultrasonores de l'échantillon



Conditions aux limites « libre-libre »



« Resonant Ultrasound Spectroscopy »,
J. Maynard, Physics Today, January 1996, p. 26-31

Ordre de grandeur pour les dix premiers modes :

Cube de 10 mm en PMMA => **40/80 kHz**
Cube de 3 mm en acier => **400/800 kHz**

Historique

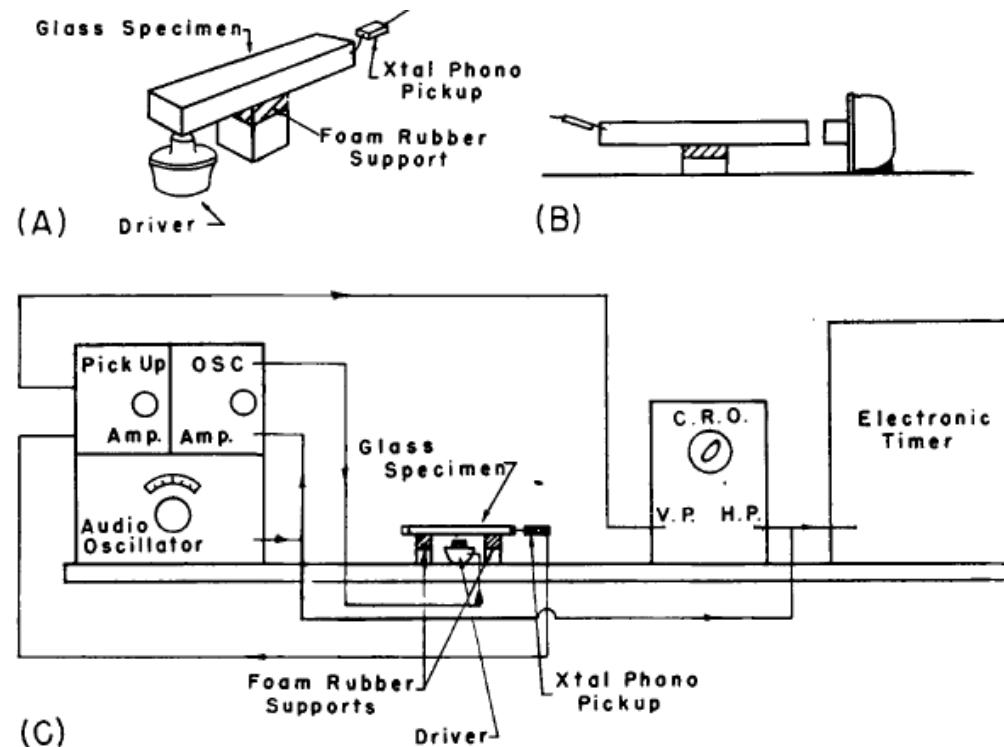


Fig. 1. Diagrammatic sketch of apparatus used for dynamic measurement. Position of driver and specimen (A) for torsional vibrations, (B) for longitudinal vibrations, and (C) for flexural vibrations.

“Elastic Moduli of Glasses by a Dynamic Method”
S. SPINNER, NBS, May 1954

Le premier mode fondamental

Mode de ***torsion*** pour des géométries « simples » (*matériaux isotropes*) :

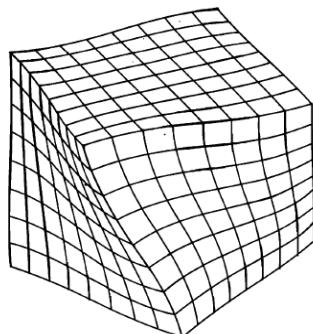
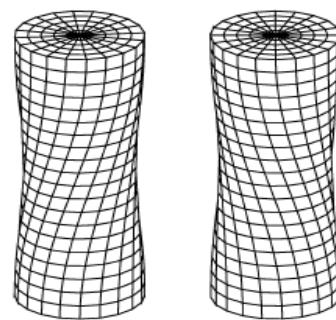


FIG. 2. Cube vibrating in mode T_{41} .

$$f_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi L} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

H. Demarest, Jr., "Cube-resonance method to determine the elastic constants of solids," *J. of Acoustical Soc. of America*, 49, 768 (1971)



$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Tim Jaglinski , Roderic S. Lakes, "Resonant ultrasound spectroscopy of cylinders over the full range of Poisson's ratio", *Review of Sci. Inst.* 82, 035105 (2011)

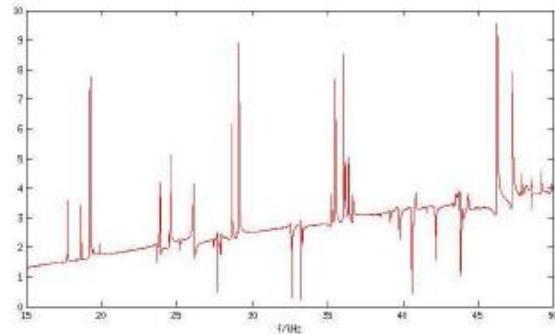
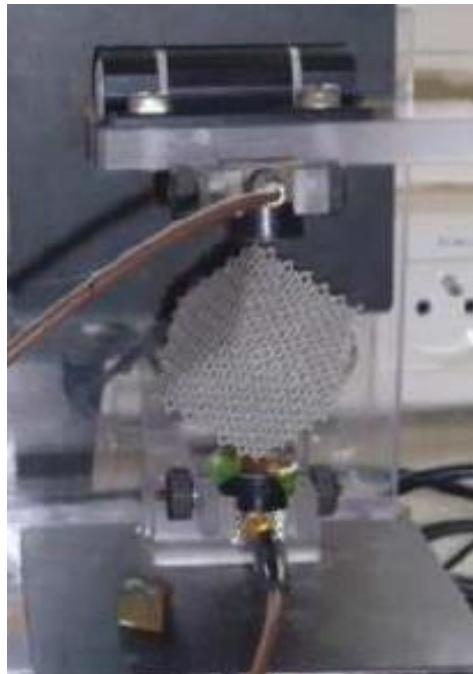


$$f_1 = (2.48/2\pi R) \sqrt{G/\rho}$$

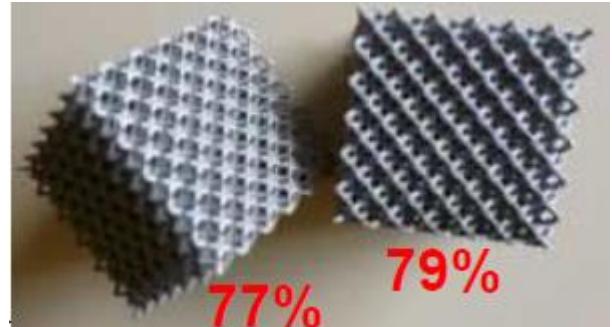
Dong Li, Liang Dong, R. S. Lakes, "The resonant ultrasound spectroscopy method for determining the Poisson's ratio of spheres over the full range », *Materials Letters* 143 (2015) 31–34

« Porosité »

Lattices structures



Premier pic # 17 kHz

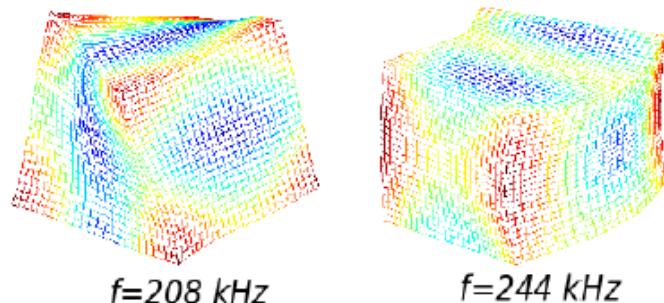
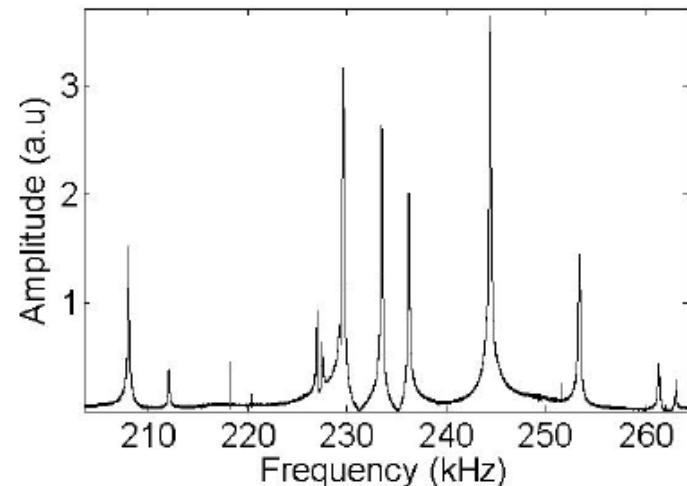


	Shear modulus (GPa)
E1 - 77%	1.32
E2 - 77%	1.31
E1 - 79%	1.12
E2 - 79%	1.12

Calcul de la matrice de rigidité (C_{ij})

1. Measurement of free vibration spectrum
→ resonance frequencies f_k^{exp}
2. Forward model
→ $f_k^{\text{mod}}(C_{ij})$ (semi-analytical Rayleigh-Ritz method)
3. Optimization problem
→ stiffness tensor terms C_{ij}
(Gauss-Newton and gradient methods):

$$Obj = \sum_k \left(\frac{f_k^{\text{exp}} - f_k^{\text{mod}}(C_{ij})}{f_k^{\text{exp}}} \right)^2$$



spectrum for a copper sample and modal shapes

RUSTIC

Le code **RUSTIC** a été développé au **LIB**

Il permet d'identifier à partir de la série des fréquences de résonance les constantes d'élasticité du matériau (**tenseur d'élasticité complet**). Cette identification est réalisée en résolvant un problème inverse qui consiste à optimiser les paramètres *d'un modèle de l'échantillon* jusqu'à ce que les fréquences de résonances calculées (théoriques) **F_{th}** correspondent aux fréquences mesurées **F_{mes}**

Cet appariement était auparavant une tâche complexe qui nécessitait une expertise. **RUSTIC** permet de limiter, voire de supprimer, les interactions entre l'opérateur et le programme informatique de traitement des données expérimentales RUS.

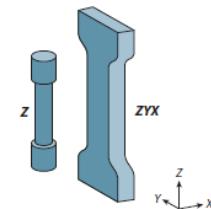
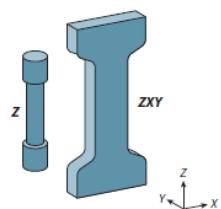
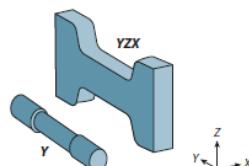
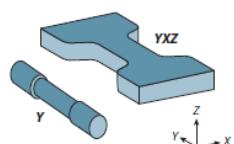
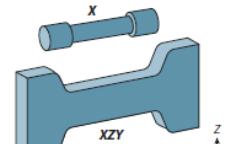
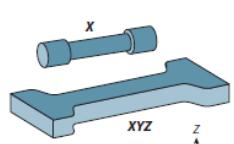
En pratique, la méthode

1. réduit considérablement le *temps de traitement* des données
2. peut permettre une utilisation par des opérateurs non experts
3. fourni une solution plus fiable au sens où la robustesse de l'inversion est améliorée grâce à une formulation **bayésienne**

Bernard S., Marrelec, G., Laugier, P., Grimal Q., « *Bayesian normal modes identification and estimation of elastic coefficients in resonant ultrasound spectroscopy* », Inverse problems, 2015, 31, 065010

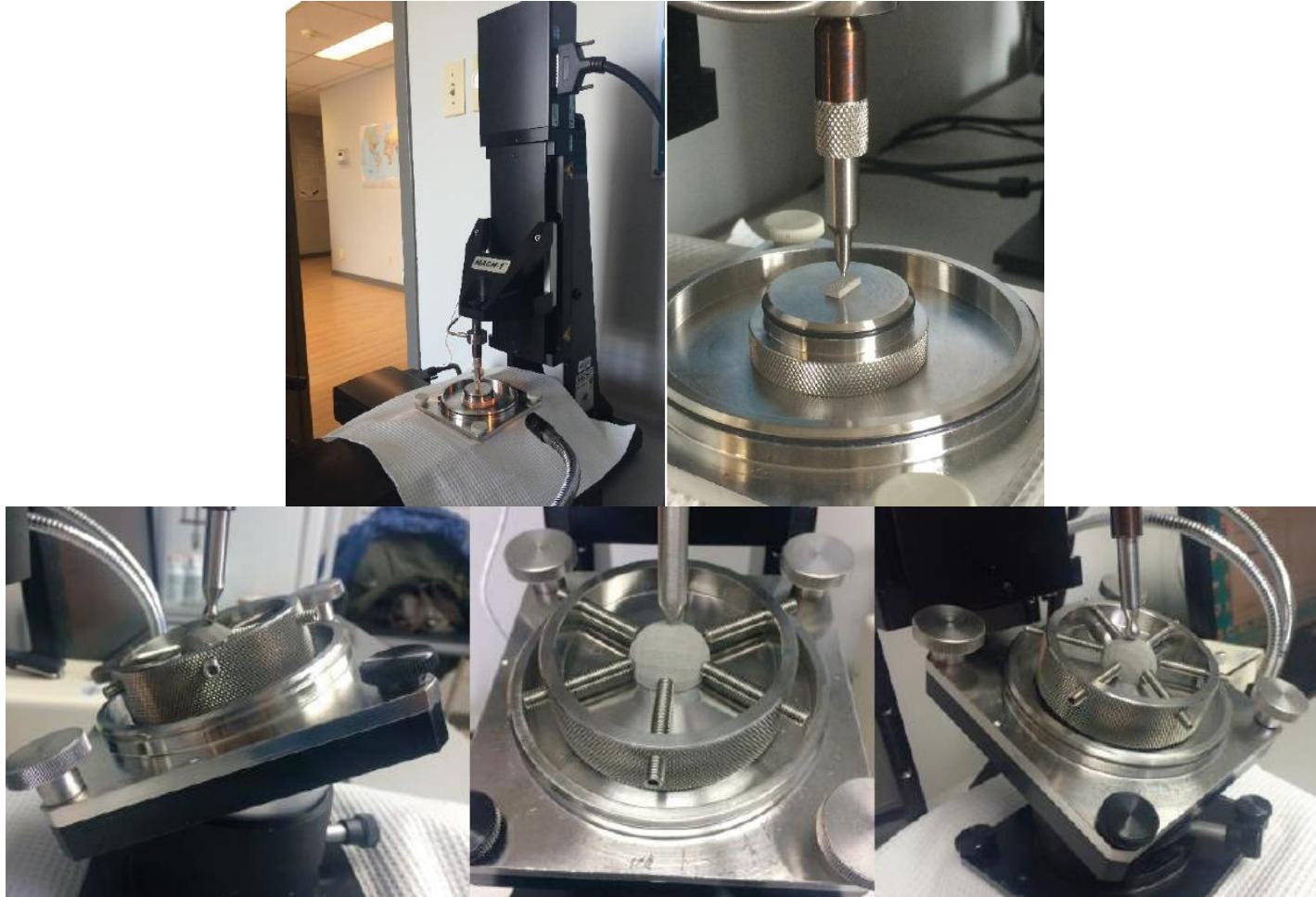
Application à la F.A.M.

Machine de Traction

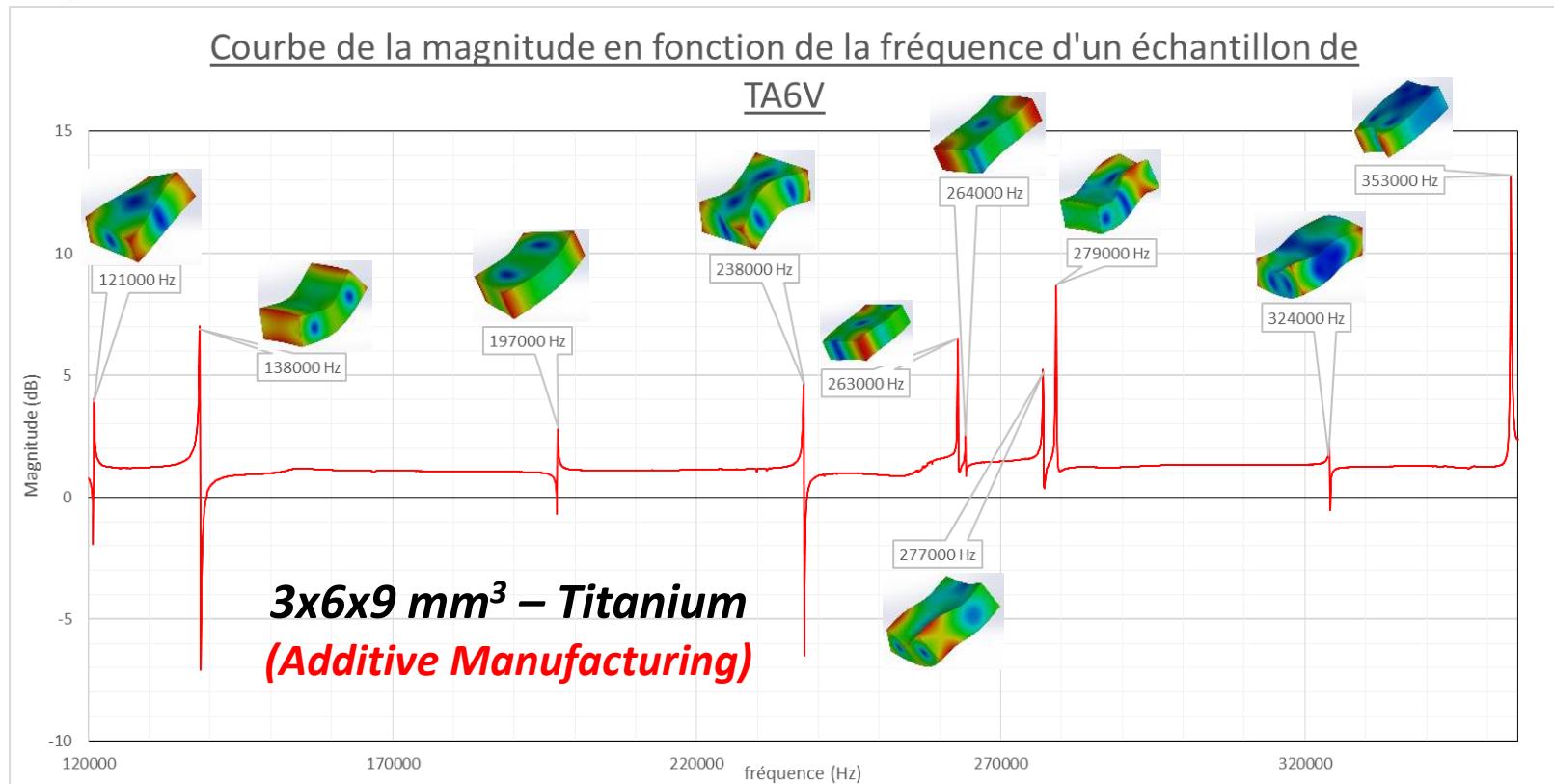


Application à la F.A.M.

Microindentation



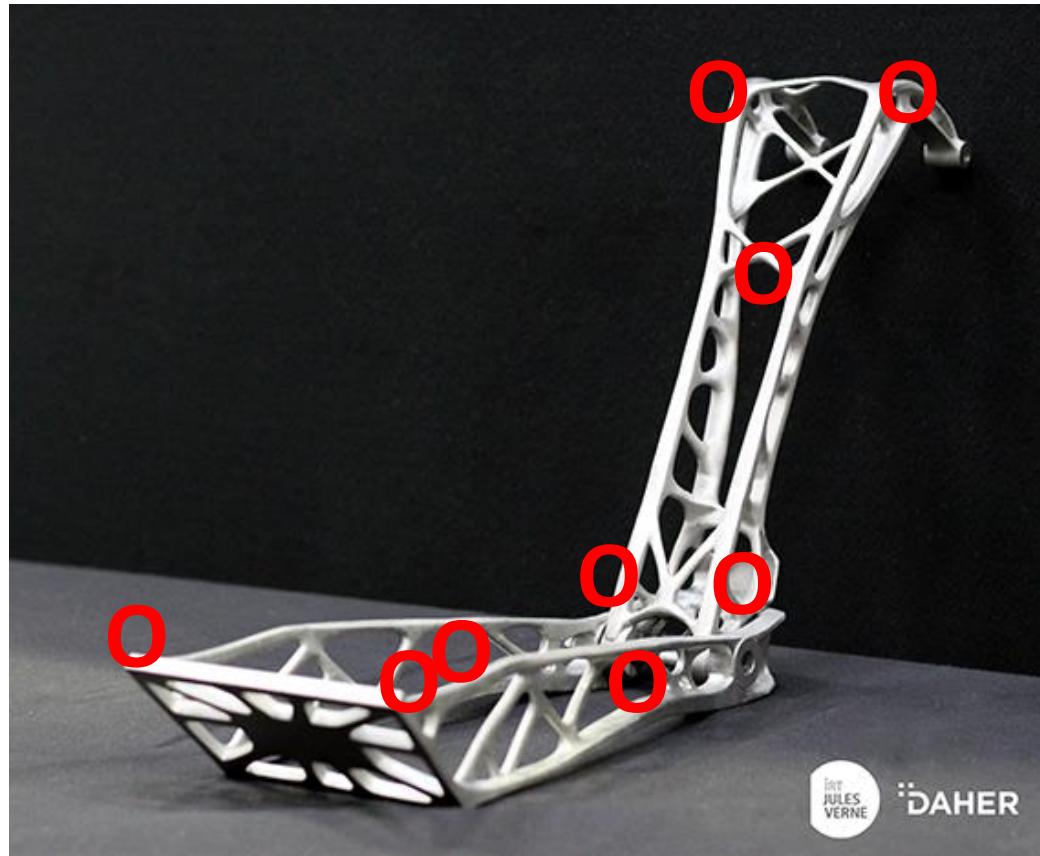
Application à la F.A.M.



La mesure intègre l'élasticité à l'échelle de l'échantillon

(=> voxel mésoscopique de matière)

Application à la F.A.M.



- Adjonction de petits parallélépipèdes à la pièce (différentes positions, différentes orientations)
- Extraction des échantillons
- Analyses RUS
- Stockage des échantillons pour traçabilité
- *(livraison sur la pièce pour éviter les contrefaçons ...)*

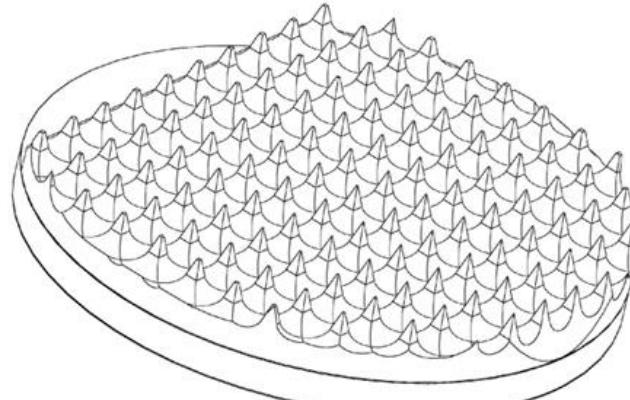
Le Transducteur Hérisson

H.T. : Hedgehog Transducer

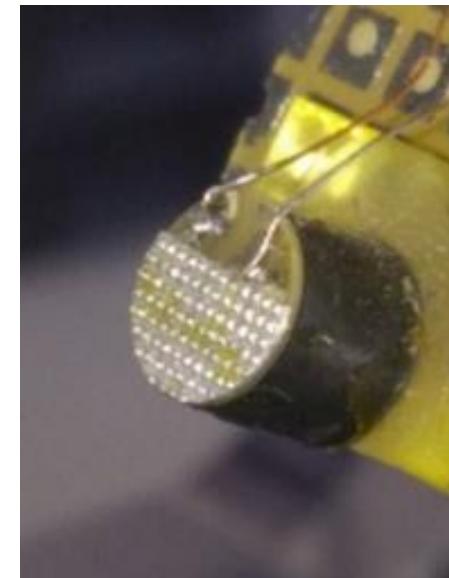
Financement :



Ce nouveau type de transducteur dispose d'un réseau de micro-pointes à la surface du disque piézoélectrique:



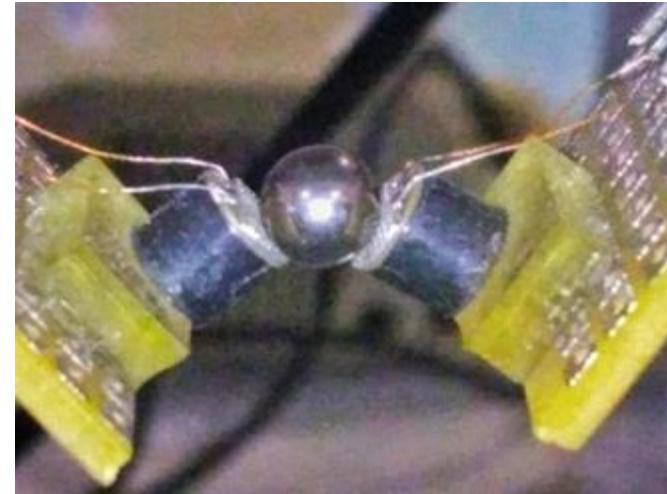
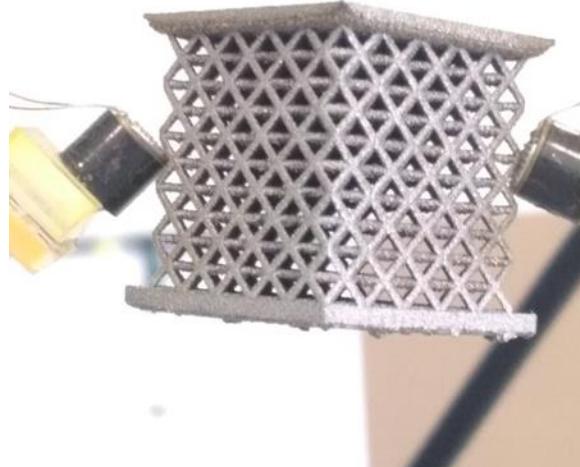
Brevet FR 3 057 667



Le Transducteur Hérisson

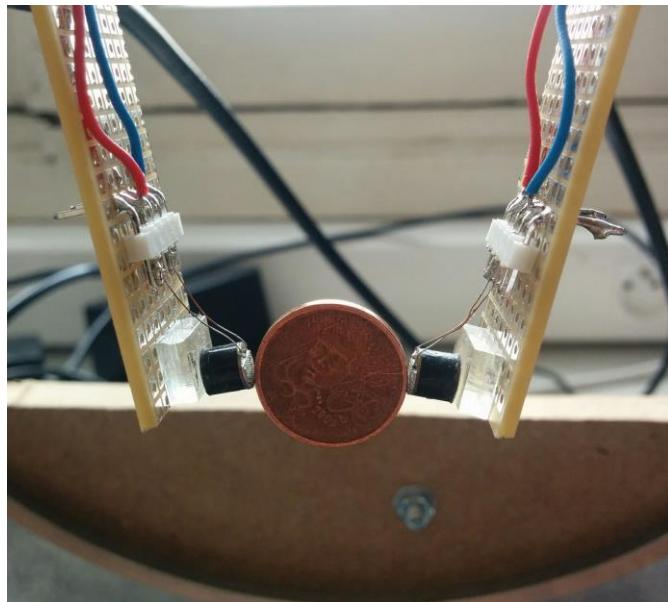
Grâce aux pointes, le positionnement de l'échantillon est isostatique :

- Seulement trois pointes sont en contact (2 + 1)
- Les conditions aux limites se rapprochent de « **libre-libre** »
- Le positionnement (stable) de l'échantillon entre les transducteurs est grandement facilité
- De très petits échantillons peuvent être analysés (pour des modes < 1MHz)

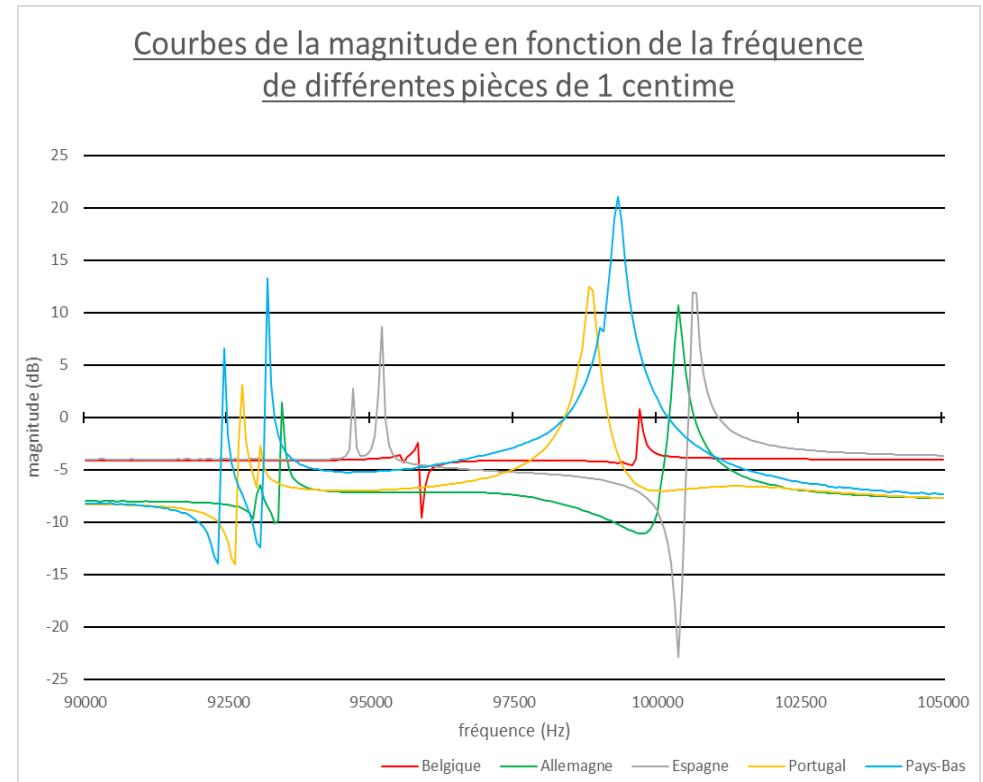


Signatures acoustiques

Analyse qualitative



Pièces de 1 centime d'€,
à différentes effigies
(3 premiers modes identiques)



Une normalisation ... à venir

Références « **en relation** » avec la RUS :

- ASTM C747-16 : Standard Test Method for Moduli of Elasticity and Fundamental Frequencies of Carbon and Graphite Materials by **Sonic Resonance**
- ASTM C1198-09 : Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance
- ASTM C1259-15 : Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by **Impulse Excitation of Vibration**
- ASTM E1875-13 : Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance
- ASTM E1876 : Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration
- ASTM E2001-18 : Standard Guide for **Resonant Ultrasound Spectroscopy** for Defect Detection in Both Metallic and Non-metallic Parts
- BS ISO 17561-2016 = ISO 17561-2016 : Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for elastic moduli of monolithic ceramics at room temperature by sonic resonance
- NF EN 23312-1993 : Matériaux métalliques frittés et métaux-durs - Détermination du module de Young



Laboratoire d'Imagerie Biomédicale

Travaux & développements

- « Industrialisation » du Transducteur Hérisson
- Etudes quantitatives des facteurs d'erreurs (densité, formes, ...)
- Optimisation des dimensions du parallélépipède (=> norme ?)
- Etudes de formes d'éprouvettes spécifiques (diapasons, etc.)
- Analyse non-linéaire (harmoniques)
- Métrologie 3D (4Π)
- *F.E.M. ultra rapide pour des échantillons de forme #quelconque*
- ...
- **Normalisation**



Laboratoire d'Imagerie Biomédicale

Questions ?