

Les techniques d'acoustique non-linéaires appliquées à l'os : quelques exemples

S. Hauptert, J. Rivière, M. Talmant et P. Laugier

UPMC Paris 6, CNRS, UMR7623, Laboratoire d'Imagerie Paramétrique, Paris, France



L.I.P.

Journée acoustique et milieux biologiques - 19 mars 2010



Plan

- **Thématique 1:**

- Détection de l'endommagement de l'os cortical par des méthodes classiques: NRUS et NWMS
- Détection de l'endommagement à l'aide d'une nouvelle méthode: DAET

- **Thématique 2:**

- contrôle et suivi de l'ostéointégration d'implants.

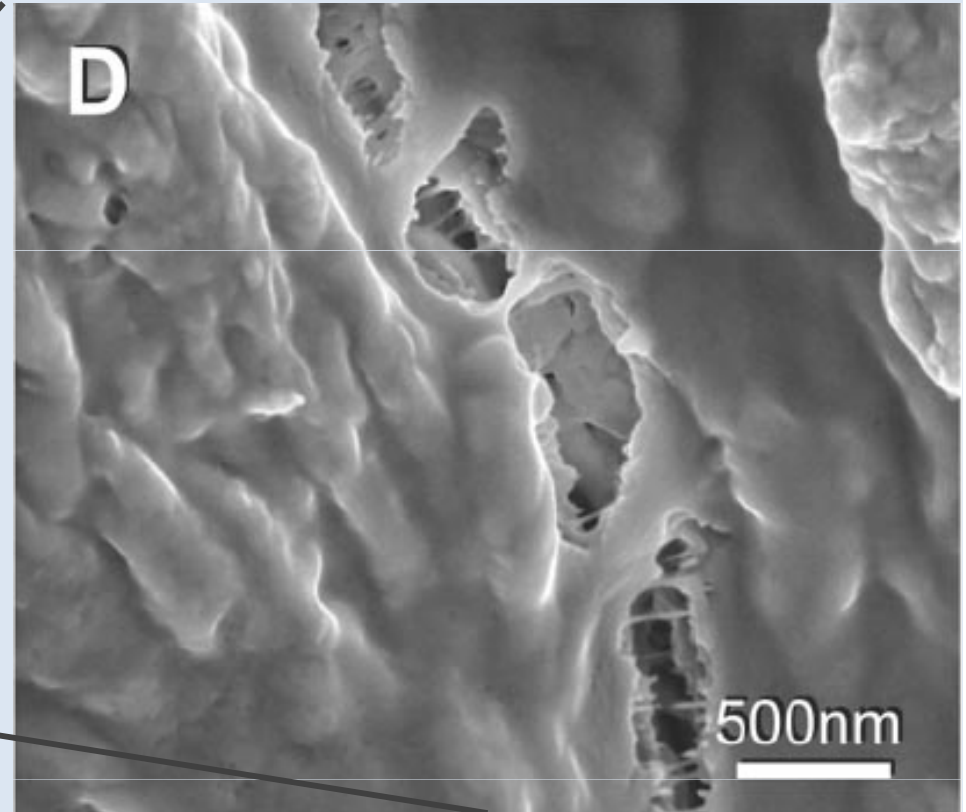
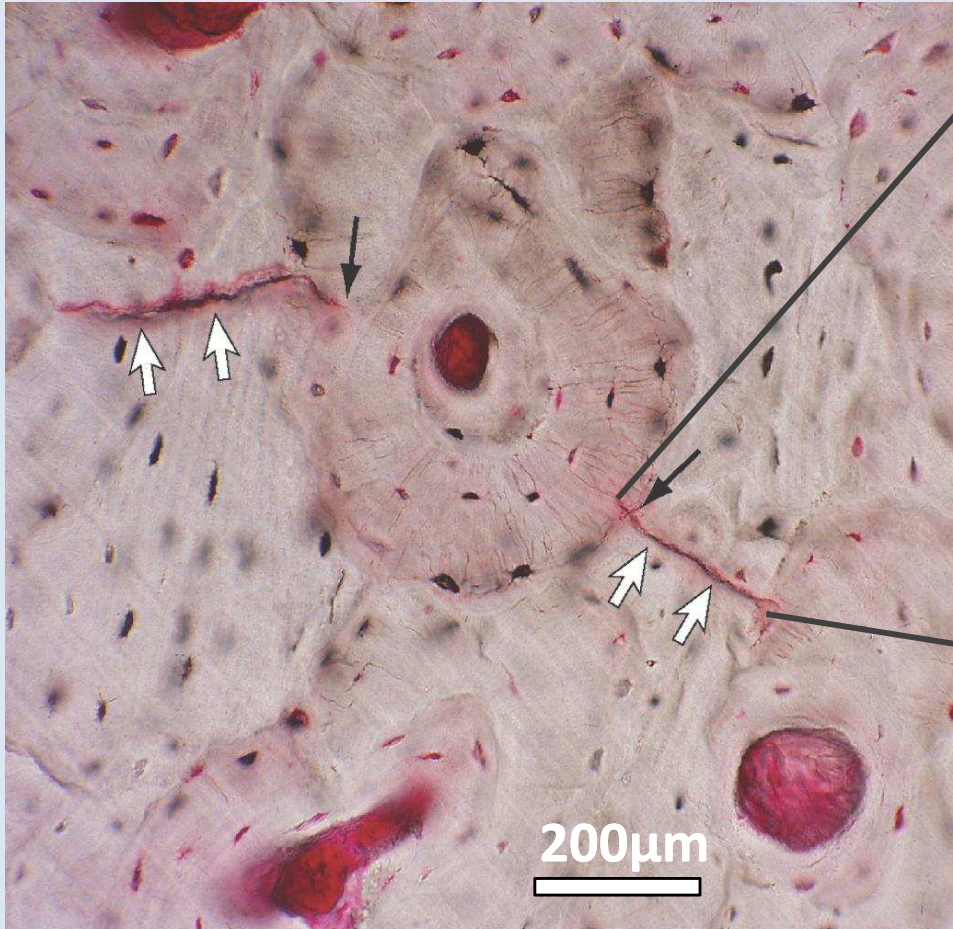
Thématique 1 : Suivi de l'endommagement osseux

Contexte


- **L'accumulation de micro-endommagement osseux** entraînerait une **diminution** de la **résistance** :
 - à la déformation élastique (**raideur**)
 - et à la propagation des fissures (**tenacité**).
- **Augmentation** de la **fragilité** du squelette et du risque de **fracture**

*La caractérisation du micro-endommagement **IN VIVO** est **cruciale** pour déterminer la **qualité** de l'os et prévenir le risque de fracture*

Microfissures



- Longueur : $>100 \mu\text{m}$
- Epaisseur : $<1 \mu\text{m}$
- Densité : faible, $<1/\text{mm}^2$

 Robling AG, et al. 2006.
Annu. Rev. Biomed. Eng. 8:455–98

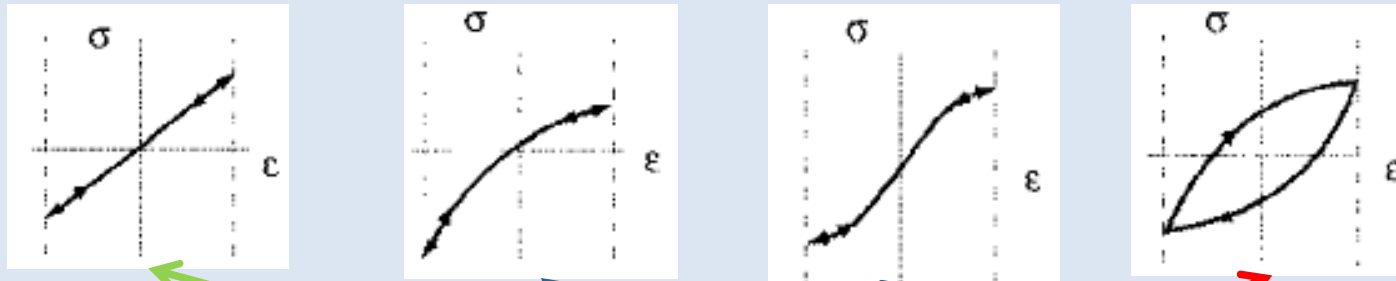
Elasticité non linéaire: Base théorique

- Basé sur la relation contrainte (σ)/déformation(ε) :

– Cas Linéaire: $\sigma = K_0 \varepsilon$

– Cas Non-Linéaire (NL): $\sigma = \int K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) d\varepsilon$

Van Den Abeele et al, RNE, 2000



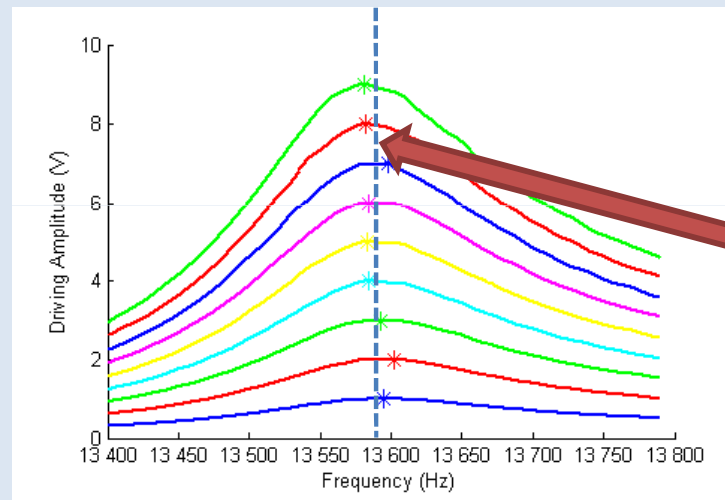
$$K(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = K_0 \left\{ 1 - \underbrace{\beta \varepsilon - \delta \varepsilon^2}_{\text{NL classique}} - \dots - \underbrace{\alpha [\Delta \varepsilon + \varepsilon(t) \text{sign}(\dot{\varepsilon})]}_{\text{NL non classique = hystérétique}} \right\}$$

- But : Extraire α , β et δ pour quantifier les non linéarités

Evaluation de l'endommagement par NRUS

- NRUS: Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy.
 - Cas linéaire: fréquence de résonance reste **constante** quel que soit le niveau de déformation appliqué.

Intact

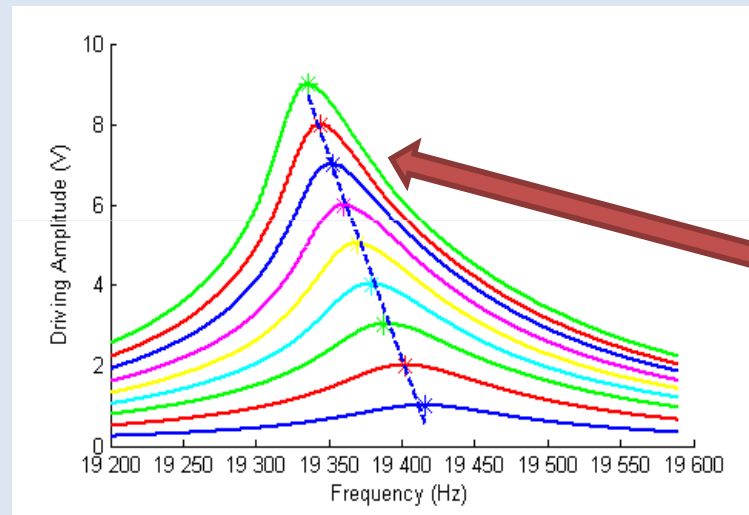


pas de pente

Evaluation de l'endommagement par NRUS

- NRUS: Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy.
 - **Cas NL**: La fréquence de résonance **diminue** quand le taux de déformation **augmente** (paramètre hystérétique α)

Endommagé

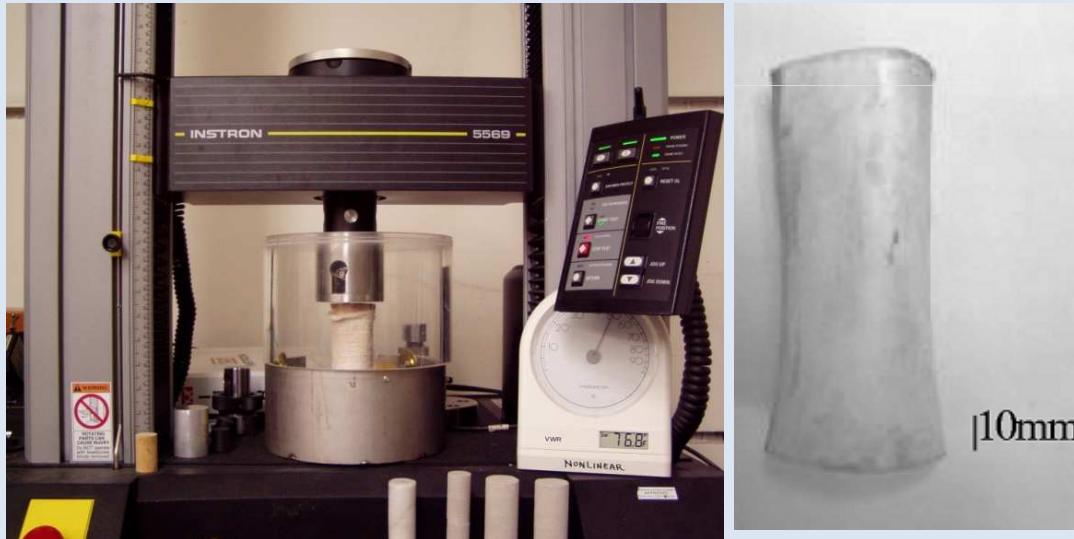


$$\frac{f(\varepsilon) - f_0}{f_0} = \frac{\alpha_e}{2} \varepsilon$$

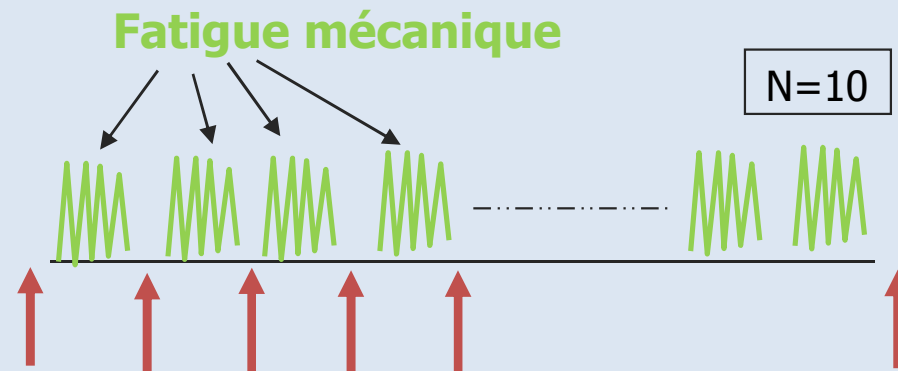
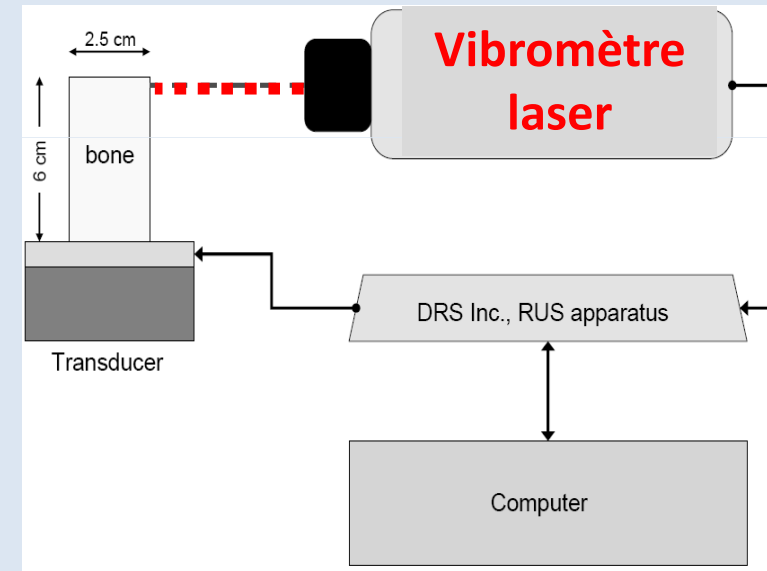
Pente (décalage fréquentiel)

Evaluation de l'endommagement par NRUS

- **Fatigue mécanique :**
30 diaphyses fémorales

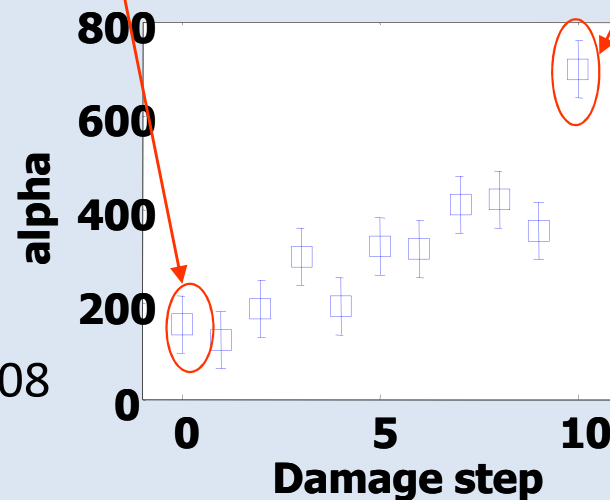
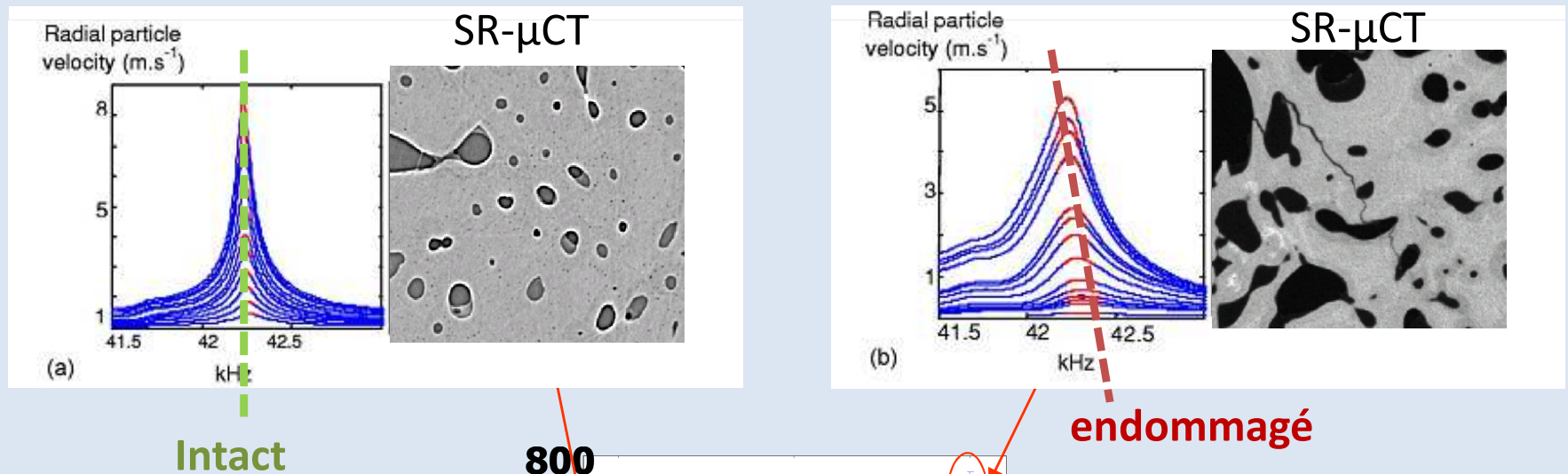


- **Mesures NRUS :** extraction de α



Evaluation de l'endommagement par NRUS

- **Résultats** : Le paramètre non linéaire hystérétique α **augmente** quand l'endommagement **augmente**



[2] Muller et al, Ultrasonics, 2006

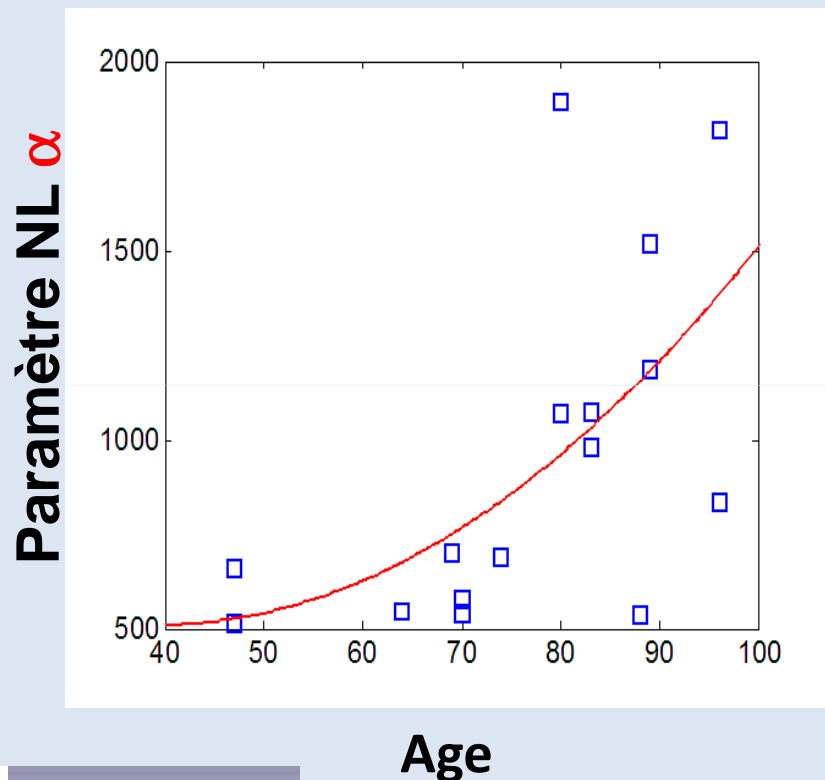
[3] Muller et al, JASA, 2006

[4] Muller et al, J. Biomechanics, 2008

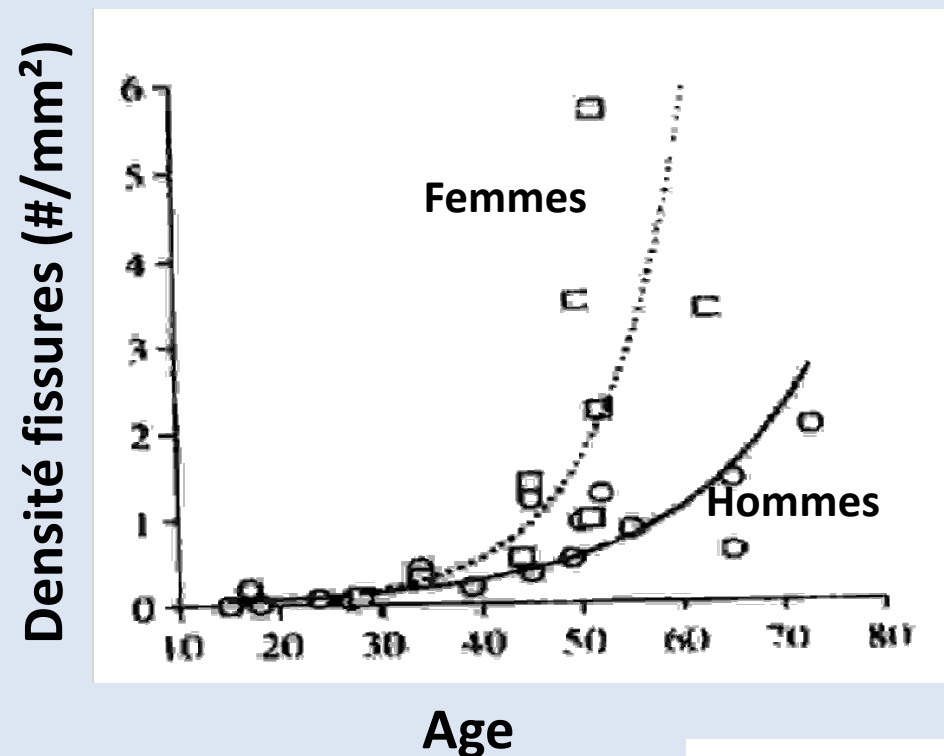
Evaluation de l'endommagement par NRUS

- **Résultats** : Le paramètre non linéaire hystérétique α **augmente** avec l'âge comme la **densité de microfissures**

Muller et al, J. Biomechanics, 2008



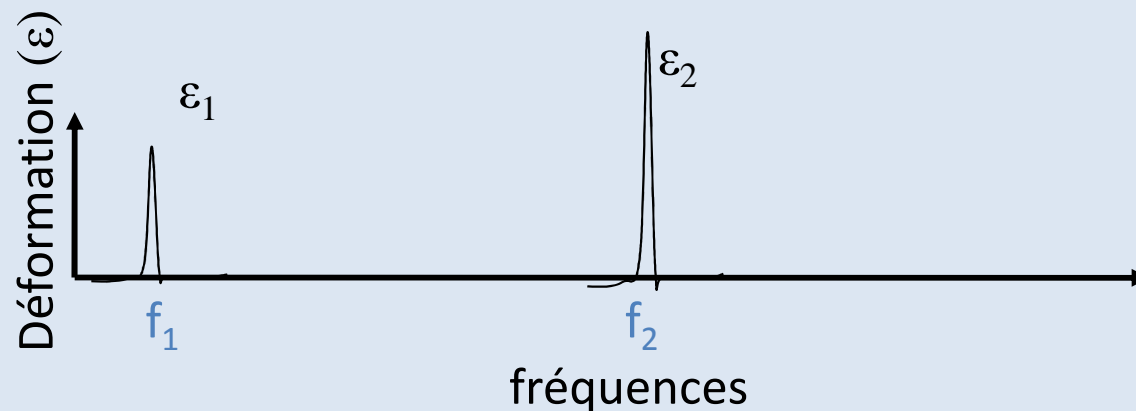
Schaffler et al, Bone, 1995



Evaluation de l'endommagement par NWMS

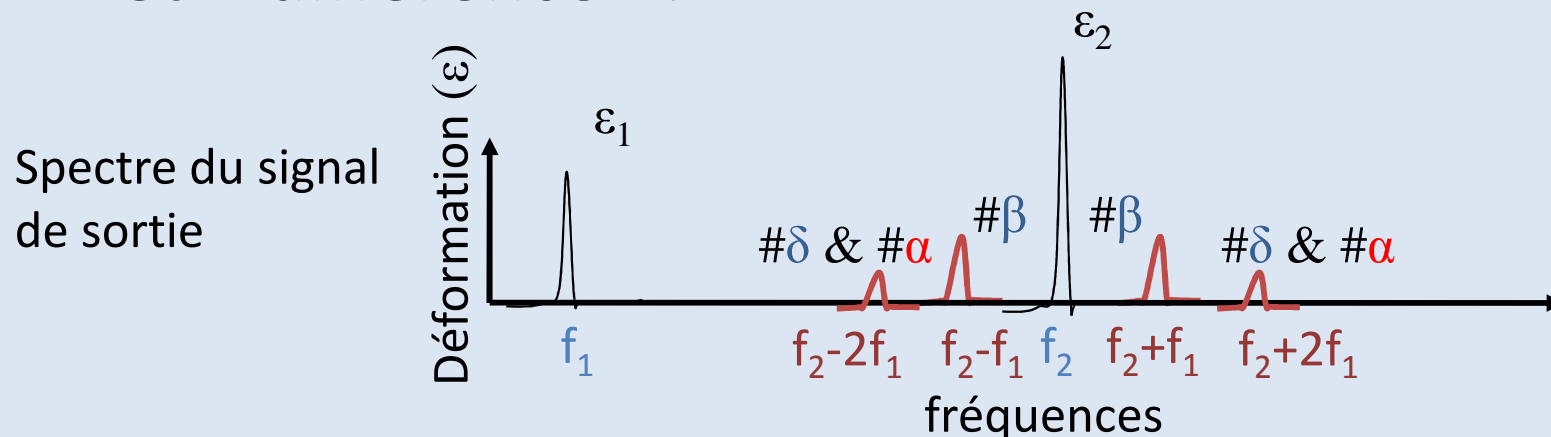
- **NMWS**: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy
- **Excitation**: 2 ondes monochromatiques ($f_1 \neq f_2$)
- **Intact** : pas de mélange de fréquences ($\beta = \delta = \alpha = 0$)

Spectre du signal de sortie



Evaluation de l'endommagement par NWMS

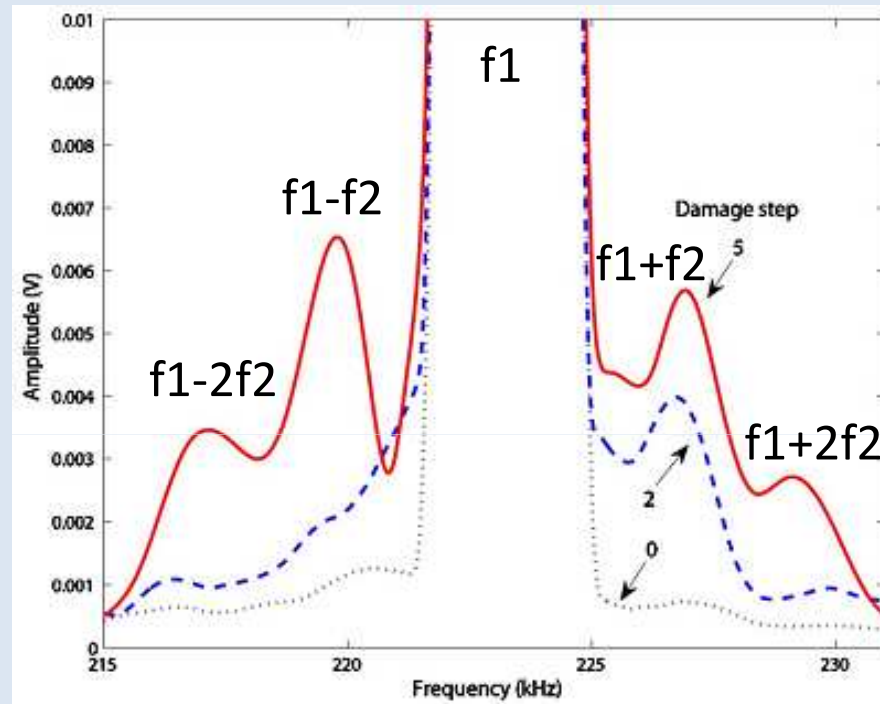
- **NMWS**: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy
- **Excitation**: 2 ondes monochromatiques ($f_1 \neq f_2$)
- **Endommagé**: mélange de fréquences ($\beta \neq 0$, $\delta \neq 0$, $\alpha \neq 0$).
→ Génération d'ondes avec des fréquences « somme » et « différence ».



*Identité trigonométrique: $\cos(a)\cos(b) = 0,5 * [\cos(a-b) + \cos(a+b)]$*

Evaluation de l'endommagement par NWMS

- **Expérience** : Similaire à Marie Muller
- **Résultat**: Les paramètres NL β et δ **augmentent** quand l'endommagement **augmente**



Ulrich et al, Applied Physics Letters, 2007

Evaluation de l'endommagement par DAET

- **DAET:** Dynamic AcoustoElastic Testing
- **Principe:** Interaction entre :
 - Une onde stationnaire (LF) BF
 - Des pulses ultrasonores (US) HF
 - Induit variation du TOF des US (effet élastique) et modulation de l'énergie des pulses US (effet dissipatif)
- **Conditions:** Le champ LF doit être
 - *Quasi-uniforme* dans la zone sondée, $\lambda_{LF} \gg$ largeur zone
 - *Quasi-statique* comparé au temps de vol US (Time Of Flight = TOF), $T_{LF} \gg TOF_{US}$

Evaluation de l'endommagement par DAET

- Extraction des paramètres NL classiques β et δ :

On part de : $K = K_0(1 - \beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots) \Rightarrow \frac{\delta K}{K_0} = -\beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots$

Or $V_{US} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \Rightarrow \frac{\delta V_{US}}{V_{US}} = \frac{\delta K}{2K_0} - \frac{\delta \rho}{2\rho_0}$

$\text{TOF} = \frac{L}{V_{US}} \Rightarrow \frac{\delta \text{TOF}}{\text{TOF}} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta V_{US}}{V_{US}}$

- Avec
- V_{US} vitesse US;
 - K module élastique;
 - ρ densité;
 - L distance de propagation

- Renaud et al, IEEE UFFC, 2008
- Renaud et al, 2010 (*Brevet et publication en cours*)

Evaluation de l'endommagement par DAET

- Extraction des paramètres NL classiques β et δ :

On part de : $K = K_0(1 - \beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots) \Rightarrow \frac{\delta K}{K_0} = -\beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots$

Or $V_{US} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \Rightarrow \frac{\delta V_{US}}{V_{US}} = \frac{\delta K}{2K_0} - \frac{\delta \rho}{2\rho_0}$

$\text{TOF} = \frac{L}{V_{US}} \Rightarrow \frac{\delta \text{TOF}}{\text{TOF}} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta V_{US}}{V_{US}}$

$$\frac{\delta \text{TOF}}{\text{TOF}} = -\frac{\delta K}{2K_0} = \frac{1}{2}(\beta \varepsilon_{LF} + \delta \varepsilon_{LF}^2 + \dots)$$

- Avec
- V_{US} vitesse US;
 - K module élastique;
 - ρ densité;
 - L distance de propagation

- Renaud et al, IEEE UFFC, 2008
- Renaud et al, 2010 (*Brevet et publication en cours*)

Evaluation de l'endommagement par DAET

- Extraction des paramètres NL classiques β et δ :

On part de : $K = K_0(1 - \beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots) \Rightarrow \frac{\delta K}{K_0} = -\beta \varepsilon_{LF} - \delta \varepsilon_{LF}^2 - \dots$

Or $V_{US} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \Rightarrow \frac{\delta V_{US}}{V_{US}} = \frac{\delta K}{2K_0} - \frac{\delta \rho}{2\rho_0}$

$\text{TOF} = \frac{L}{V_{US}} \Rightarrow \frac{\delta \text{TOF}}{\text{TOF}} = \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta V_{US}}{V_{US}}$

$$\frac{\delta \text{TOF}}{\text{TOF}} = -\frac{\delta K}{2K_0} = \frac{1}{2} (\beta \varepsilon_{LF} + \delta \varepsilon_{LF}^2 + \dots)$$

Avec - V_{US} vitesse US;
 - K module élastique;
 - ρ densité;
 - L distance de propagation

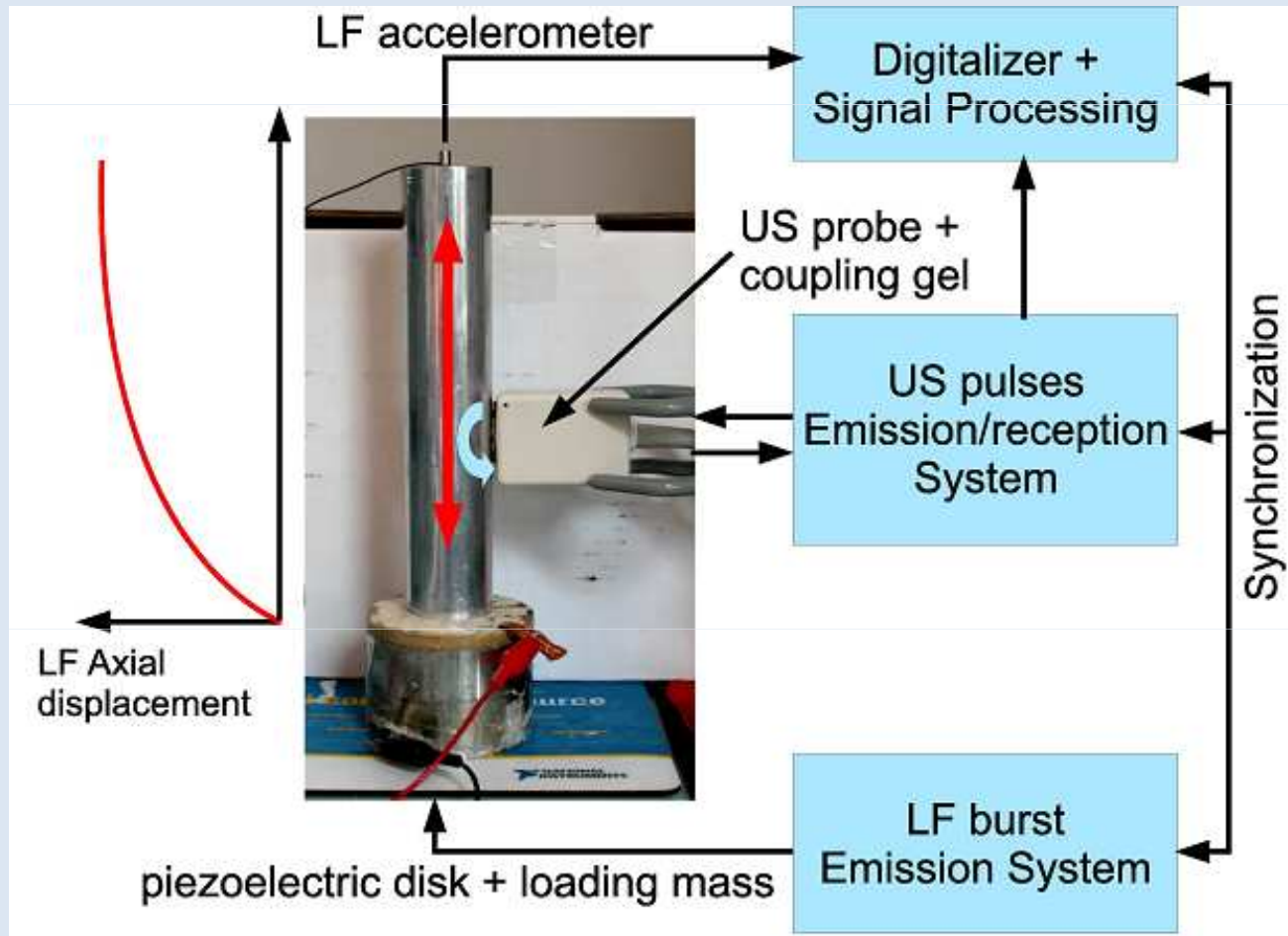
➔ Il suffit de mesurer le TOF et la vibration LF (ε_{LF}) pour extraire les 2 paramètres NL classiques:

β NL quadratique : pente du $\text{TOF} = f(\varepsilon_{LF})$
 δ NL cubique: courbure du $\text{TOF} = f(\varepsilon_{LF})$

- Renaud et al, IEEE UFFC, 2008
- Renaud et al, 2010 (*Brevet et publication en cours*)

Evaluation de l'endommagement par DAET

• Setup expérimental

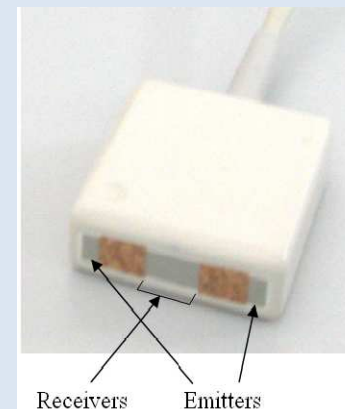


Onde stationnaire LF

- Disque PZT + masse
- 1^{er} mode de compression (KHz)
- $\varepsilon > 10^{-5}$

Pulse US

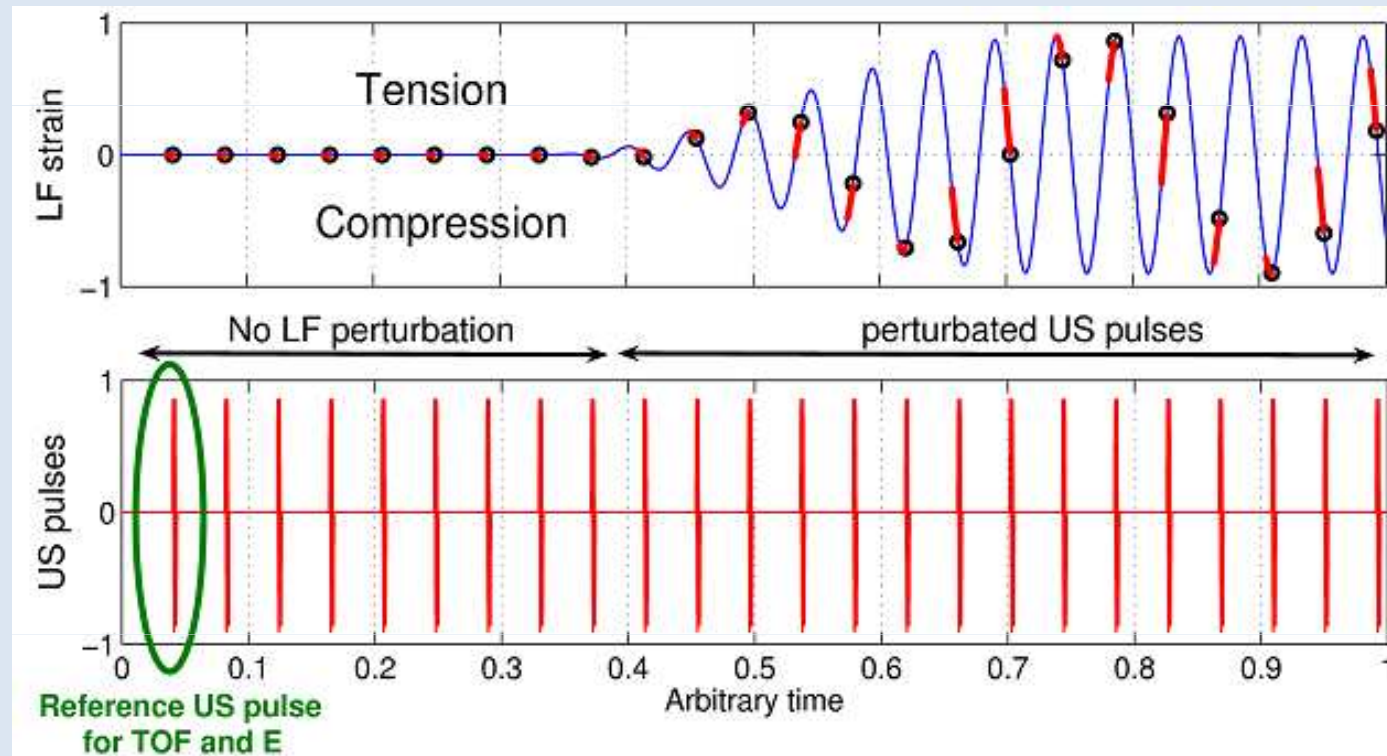
- Sonde développée au LIP
- Propagation axiale (1/2 MHz)
- Mesure le temps d'arrivée (TOF) de l'onde de tête



Evaluation de l'endommagement par DAET

- **Analyse des données: 2 signaux temporels**

Onde stationnaire BF

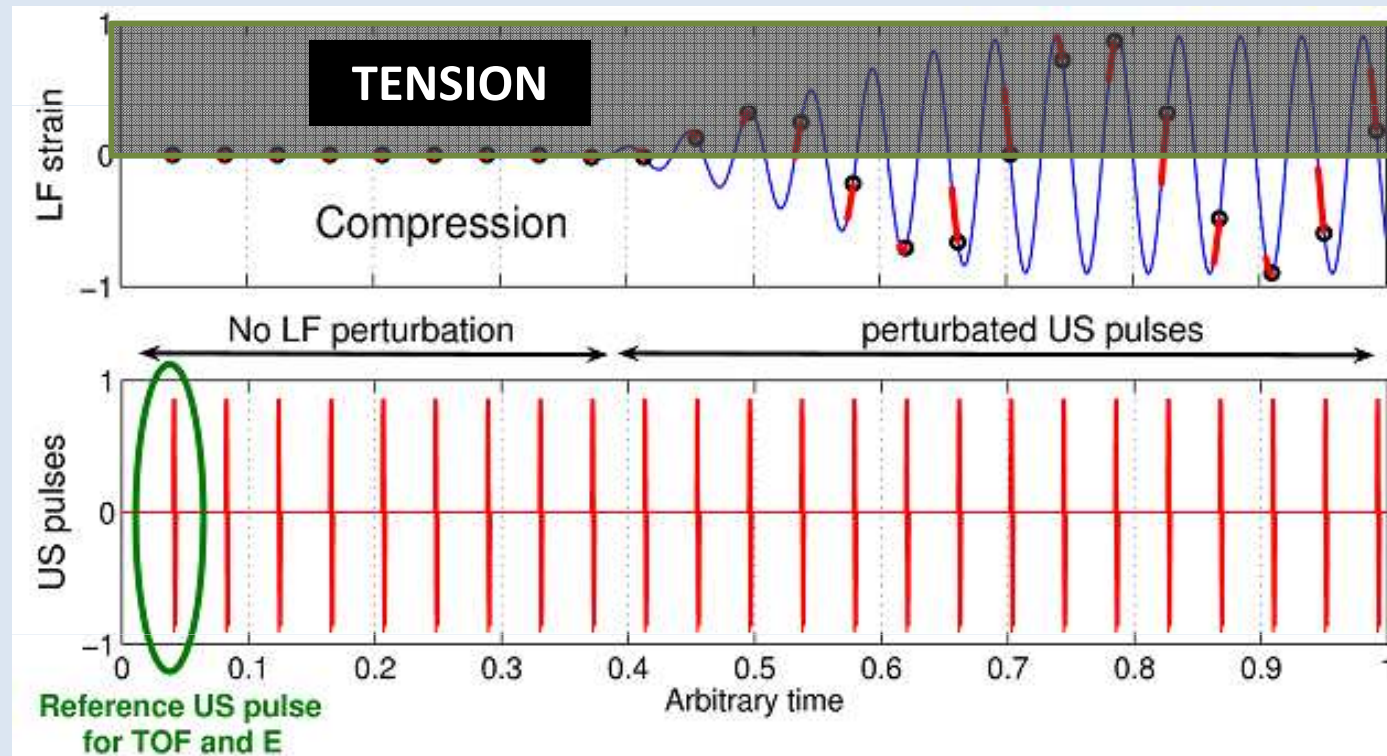


Pulse US HF

Evaluation de l'endommagement par DAET

- **Analyse des données**

Onde stationnaire BF



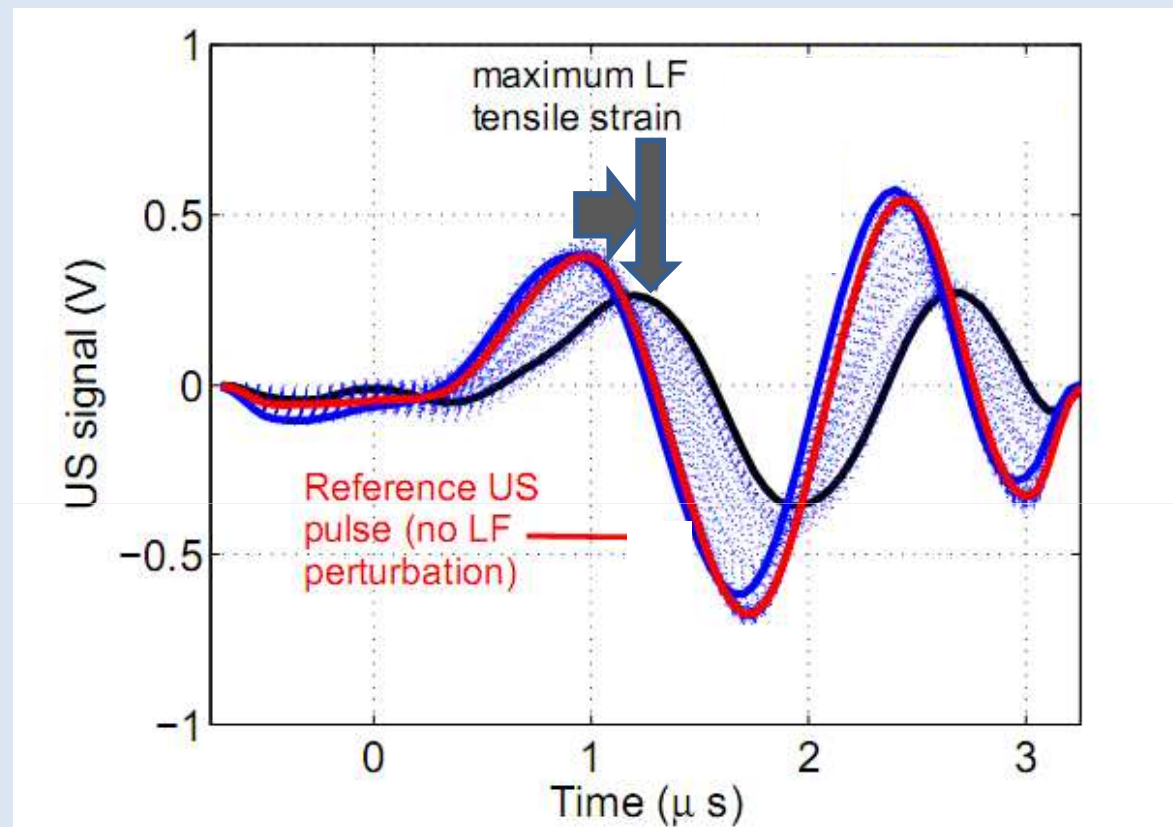
Pulse US HF

TENSION: Ouverture des microfissures, disjonction des grains...

Evaluation de l'endommagement par DAET

- **Pulse US** : Différence de temps de vol dans une roche calcaire (= granulaire)

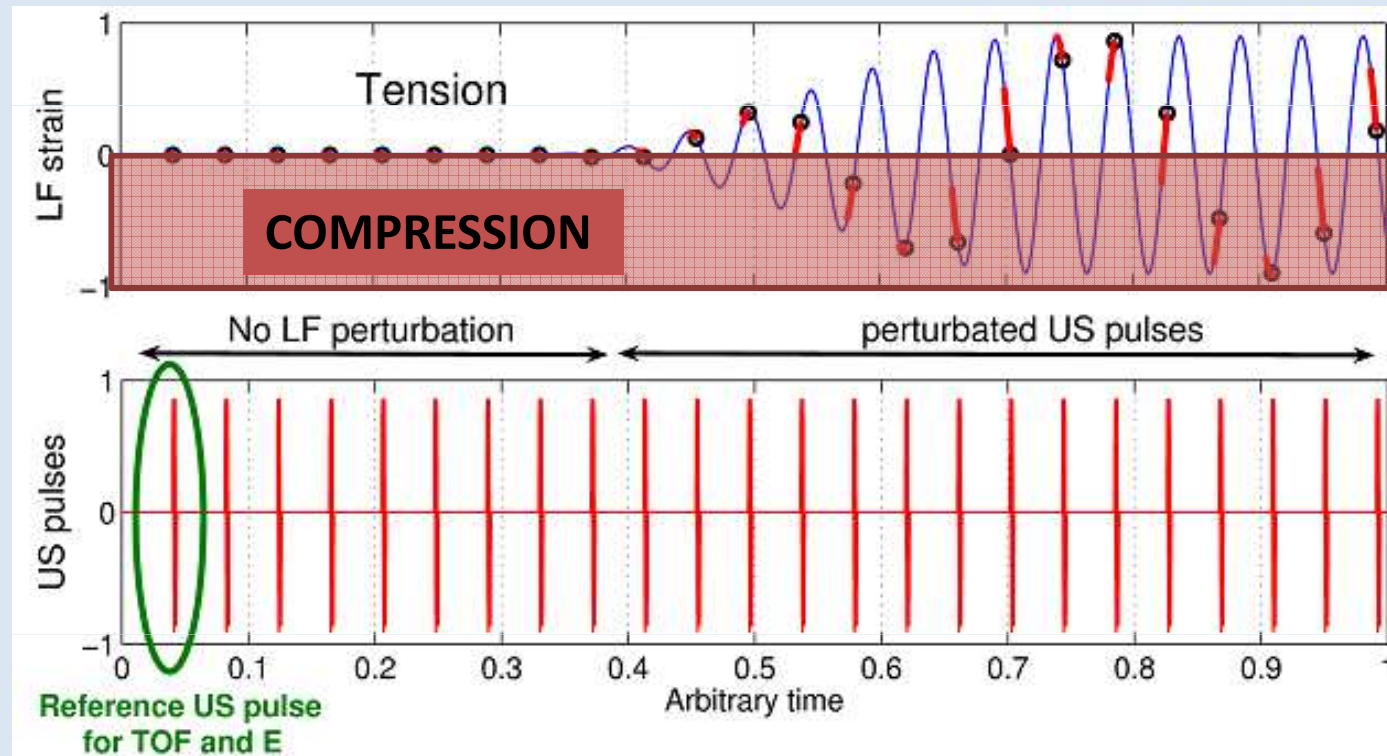
1. Ralentissement
2. Atténuation



Evaluation de l'endommagement par DAET

- **Analyse des données**

Onde stationnaire BF



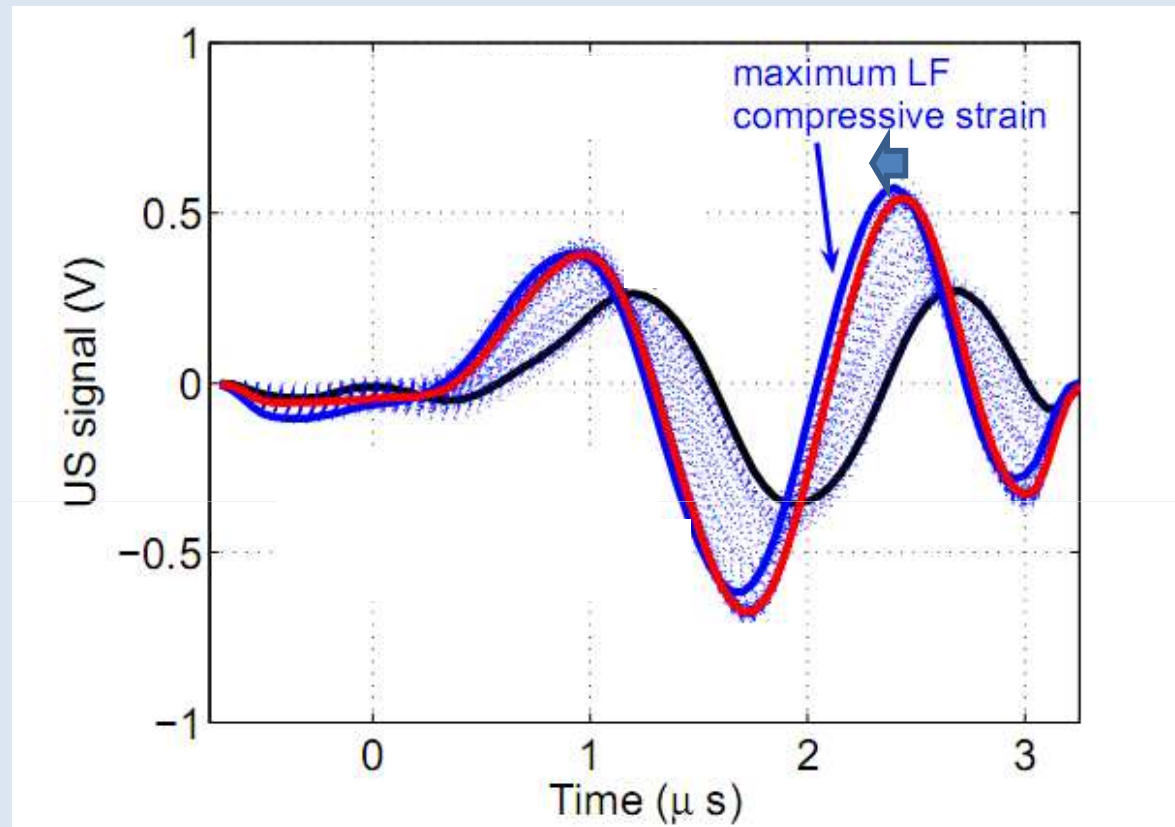
Pulse US HF

COMPRESSION : Fermeture des microfissures, augmentation du module élastique localement...

Evaluation de l'endommagement par DAET

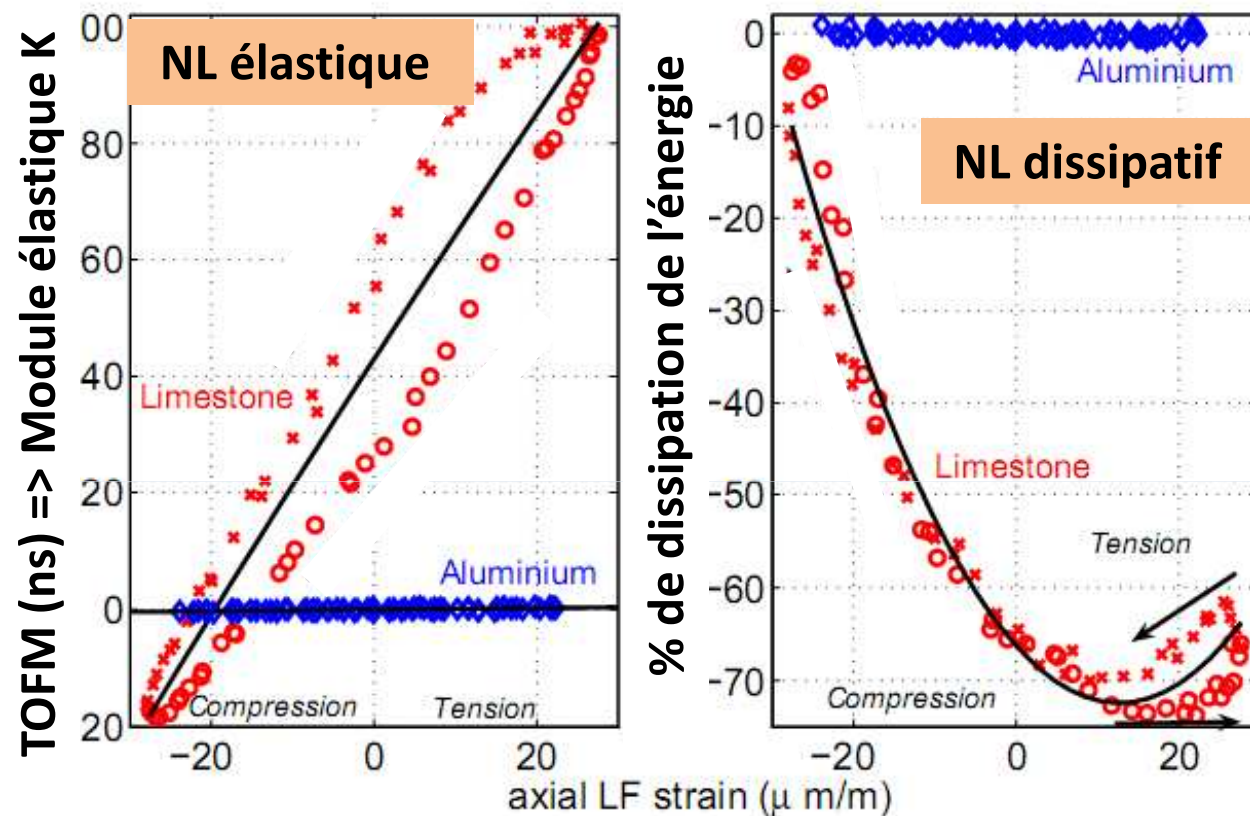
- Différence de temps de vol dans une roche calcaire (= granulaire)

1. Vitesse augmentée
2. Pas d'atténuation



Evaluation de l'endommagement par DAET

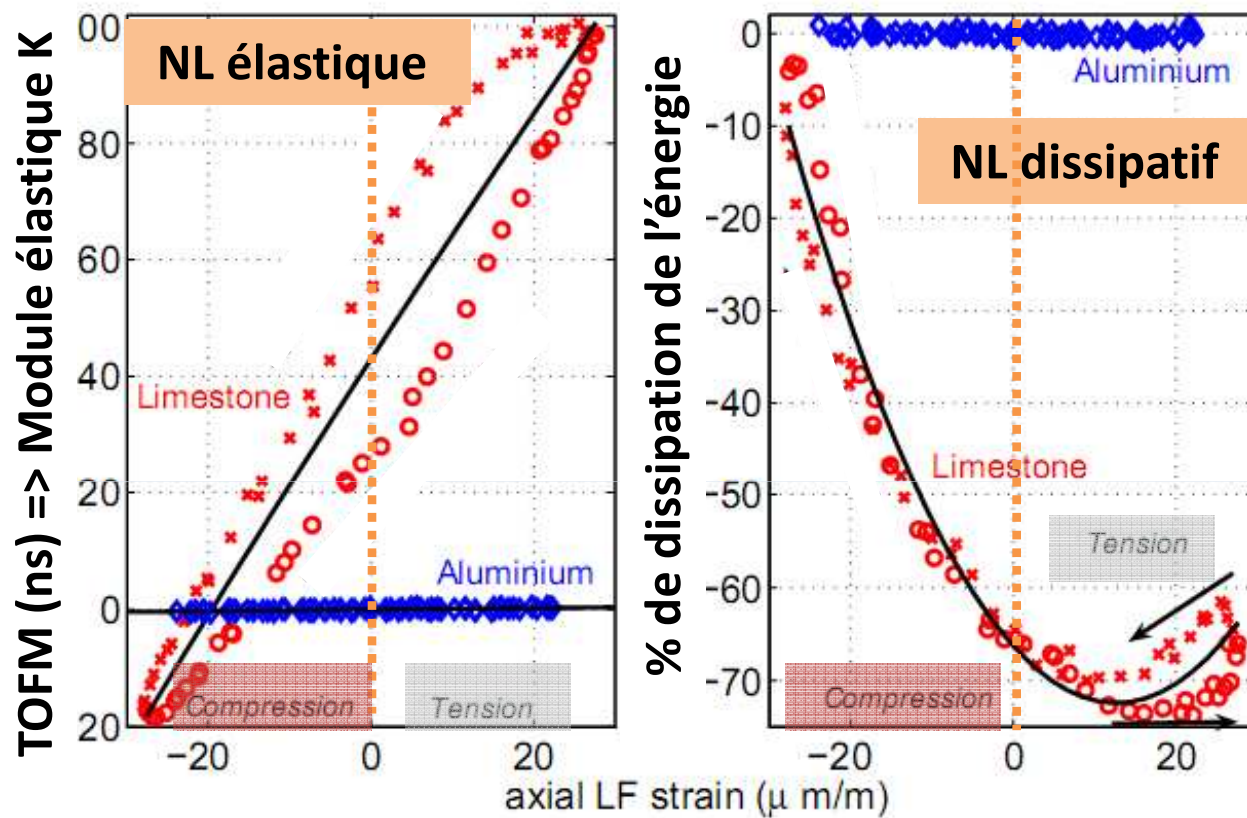
- Résultats non linéaires:
 - Calcaire (très NL) vs Aluminium (peu NL)



1. Mesures locales des non linéarités élastiques ET dissipatives acoustiques

Evaluation de l'endommagement par DAET

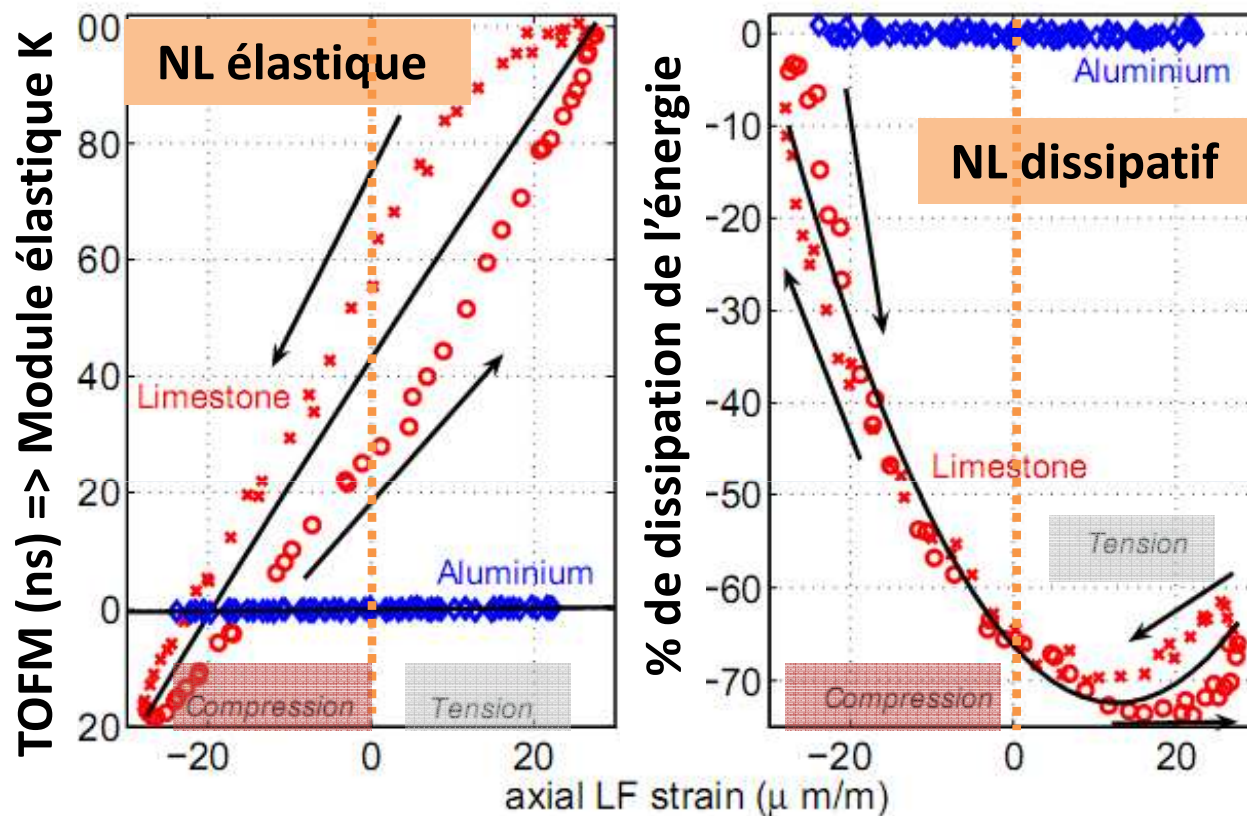
- Résultats non linéaires:
 - Calcaire (très NL) vs Aluminium (peu NL)



1. Mesures locales des non linéarités élastiques ET dissipatives acoustiques
2. Comportement asymétrique entre tension et compression

Evaluation de l'endommagement par DAET

- Résultats non linéaires:
 - Calcaire (très NL) vs Aluminium (peu NL)



1. Mesures locales des non linéarités **élastiques ET dissipatives** acoustiques
2. Comportement **asymétrique** entre tension et compression
3. Visualisation de l'**hystéresis** quand la déformation augmente ou diminue

Thématique 2 : Vers le contrôle et le suivi de l'ostéointégration d'implants

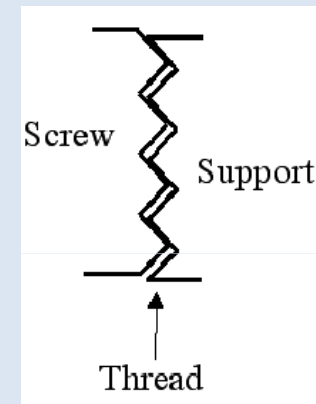
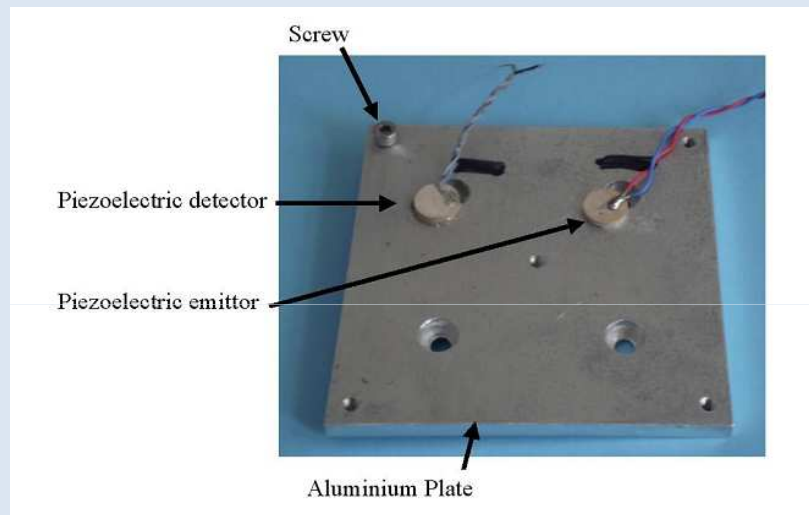
Contexte

- Durée de vie des implants (dentaires, prothèse de hanche...) est liée au vieillissement des matériaux mais aussi à la **stabilité** de la prothèse.
- **L'ostéointégration** de l'implant est un point clé. Le processus commence après l'implantation.
- Actuellement, il n'existe pas de méthodes permettant de :
 - Suivre la qualité du processus d'ostéointégration post-opératoire.
 - Détecter en amont un descellement de prothèse.

Pré-étude sur un modèle

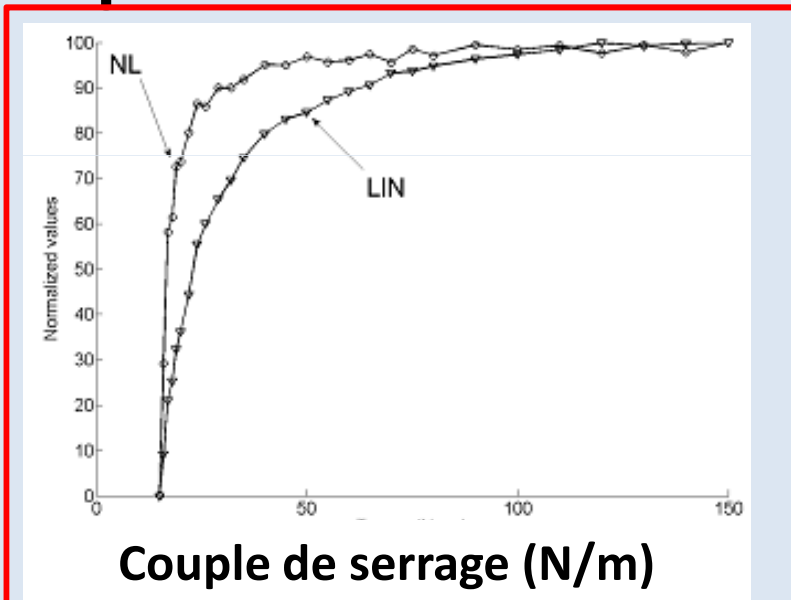
[8] Rivière J. Journal of Applied Physics, 2010 (*soumis*)

- **Modèle:** Stabilité d'une vis dans une plaque d'aluminium
- **Paramètres expérimentaux:**
 - La *stabilité* est simulée en variant le couple de serrage
 - Méthode: Mesures NRUS pour **différents modes de résonances**



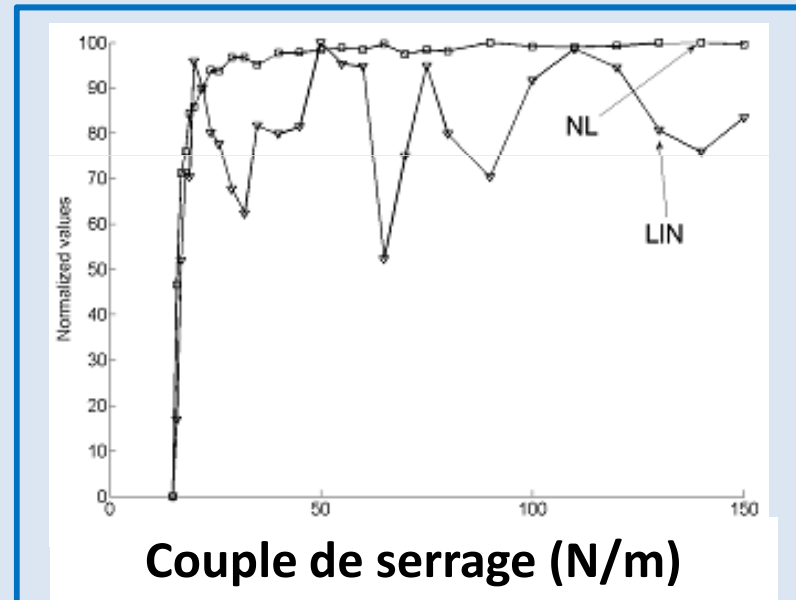
Résultat: Stabilité d'une vis

- **Comparaison: LINéaire vs Non Linéaire**



Paramètres **élastiques** :

- Linéaire**: fréquence
- Non linéaire**: décalage fréquentiel



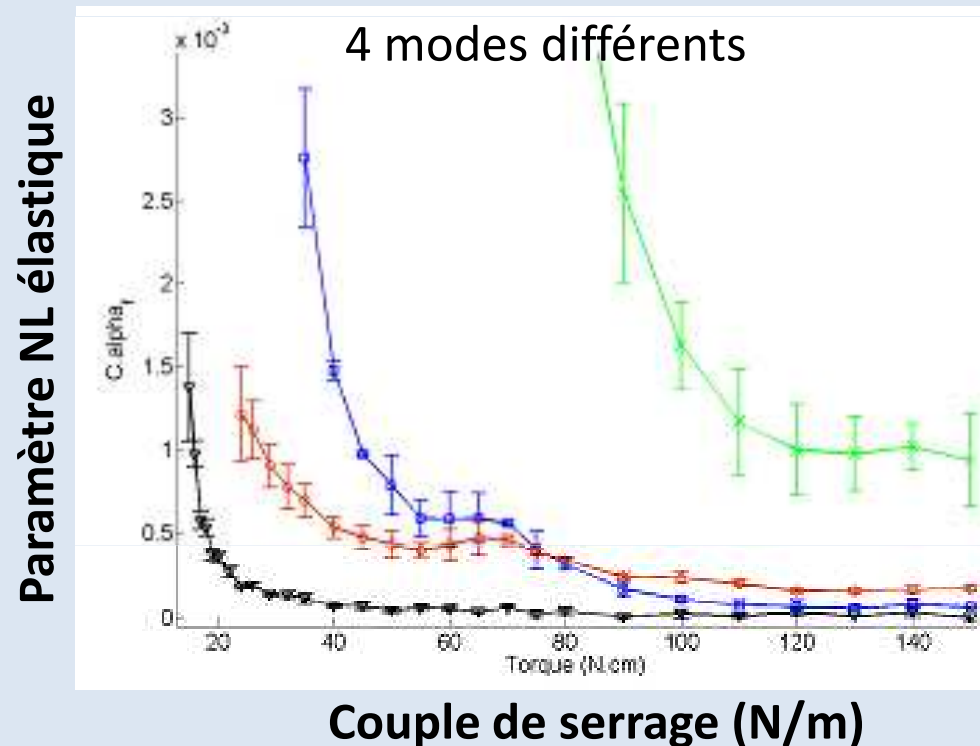
Paramètres **dissipatifs**:

- Linéaire**: atténuation ($1/Q$)
- Non linéaire**: variation de $1/Q$

- Les paramètres LIN et NL varient en fonction de la stabilité de la vis.
→ Complémentaires car sensible à des phénomènes physiques différents
(LINEAIRE → élasticité, NL → qualité du contact)

Résultat: Stabilité d'une vis

- **Comparaison entre les modes:**
 - Sensibilité différente suivant le mode et le couple



→ Pertinence d'une analyse **multimodale**

Conclusion et perspectives

- Les techniques d'acoustique NL semblent être pertinentes pour nos problématiques
- Perspectives :
 - Corréler les paramètres NL (β , δ , α) aux caractéristiques :
 - de l'endommagement (densité de fissures, taille, orientation, localisation...)
 - ou d'ostéointégration (surface et qualité du contact)
 - Adapter les techniques NL à l'*in-vivo* (en particulier comment atteindre des niveaux de déformation $> 10^{-5}$)

Collaborations principales

Collaborations principales

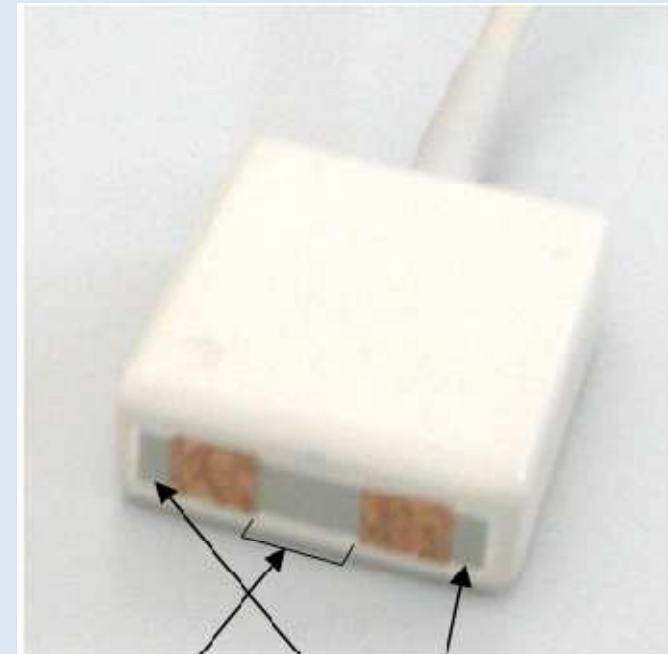
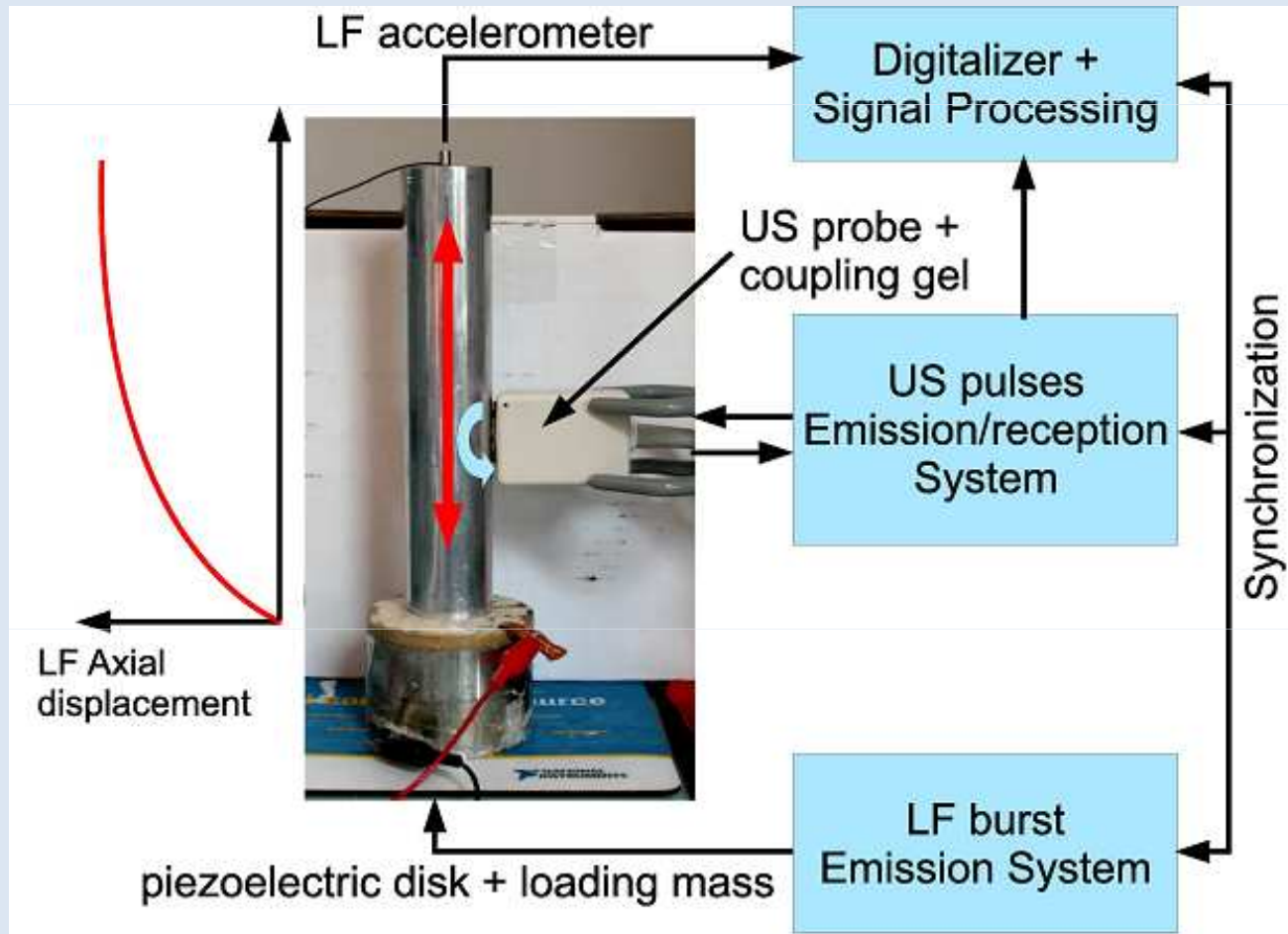
- **En France: Financement ANR. Partenaires:**
 - LUSI à Tours (Marielle Defontaine et Samuel Callé)
 - LBM à Paris (David Mitton et Sandra Guérard)
 - ESRF à Grenoble (Françoise Peyrin)
 - Guillaume Renaud (Post-Doc au LIP maintenant à Rotterdam)
- **Aux USA:**
 - LANL, Los Alamos, Nouveau-Mexique, USA (Paul Johnson, TJ Ulrich...)
 - Stevens Institut of Technology, Davidson Laboratory, New Jersey, USA (Alexander Sutin)

Merci pour votre attention



Evaluation de l'endommagement par DAET

- **Setup expérimental**



Receivers Emitters

1 MHz Linear array
emitters surrounding a single group
of 14 receivers extending on 1cm