

CFA 2016 Le Mans



Ultrasonic waves in anisotropic porous media : concrete and bone

Cécile Baron

UMR CNRS 7287, Institut des Sciences du Mouvement - Etienne-Jules Marey, F-13288 Marseille, France.

April 13, 2016

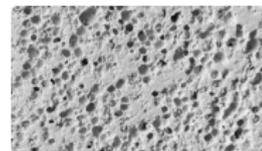
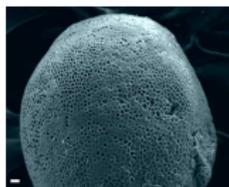
- 1 Interaction milieux poreux et ondes US
- 2 Caractérisation ultrasonore d'un milieu poreux
 - Propagation US dans un FGM, un micro-béton
 - Propagation US dans un FGM, l'os cortical
 - Propagation US dans un milieu biphasique, l'os cortical
- 3 Stimulation ultrasonore d'un milieu à double niveaux de porosité

Milieux poreux

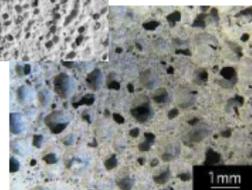
roche



corail



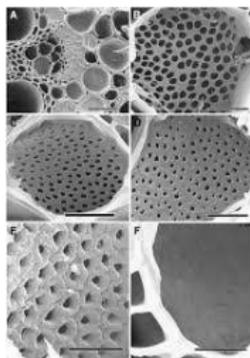
béton



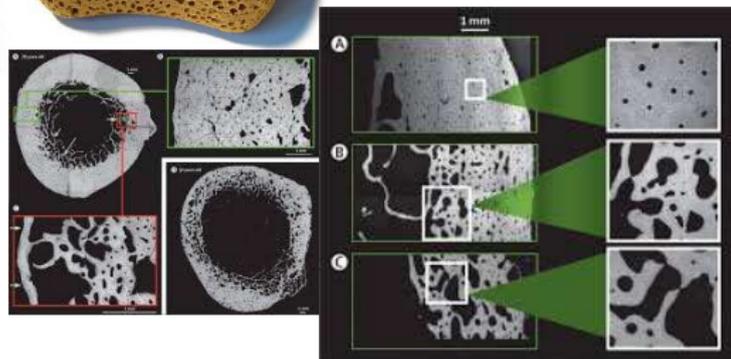
éponge



bambou



os cortical

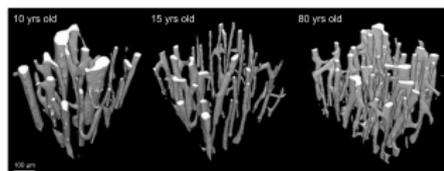


Milieu poreux et onde US

Comment modéliser l'interaction ondes US milieux poreux ?

Quelques exemples :

- deux milieux **faiblement** poreux et anisotropes : le béton et l'os cortical ;
- $\lambda >$ taille caractéristique des pores (no scattering) ;
- deux modélisations de la structure porale
 - ▶ milieu monophasique équivalent : modèles d'homogénéisation (FGM, micromécaniques) ou poroélasticité (*Biot 1935, 1941*)
 - ▶ milieu biphasique reconstruction 3D du réseau de pores

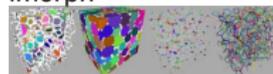


Lyos

Bala et al. *accepted*

⇒ corrélation méca / morpho

imorph



imorph.fr

Caractérisation US d'un FGM poreux : un micro-béton

Functionally Graded Material : variation continue des propriétés caractéristiques dans une direction de l'espace.

Propagation d'ondes ultrasonores dans un FGM

- modélisation par milieu multicouche = discrétisation du problème
- modèle semi-analytique : développement en série de Peano du matricant - formalisme de Stroh
⇒ implémentation C++

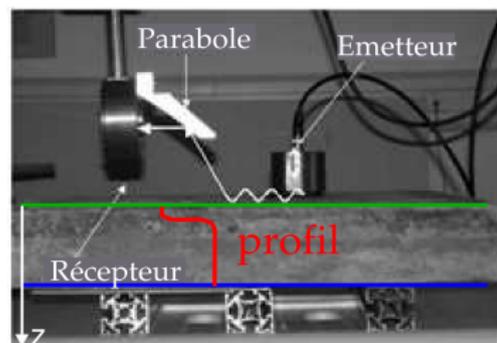
Shuvalov et al. (2004), Baron et al. (2007), Baron et al., Chapter 4 in «Materials and Acoustics Handbook» (2009).

Exemple expérimental :

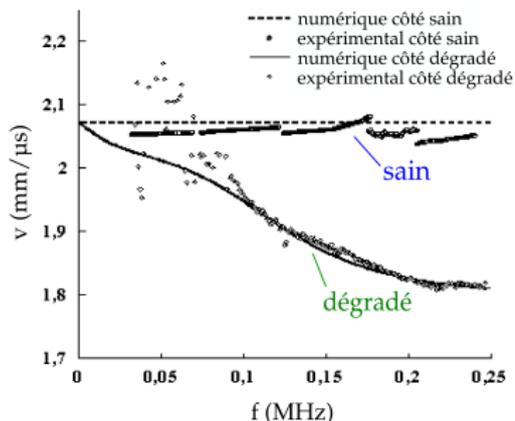
- matériau : plaque de microbéton isotrope transverse avec variation de la porosité dans l'épaisseur (EDF R&D).
- onde US : onde de surface de type onde de Rayleigh $\lambda \gg$ taille caractéristique des pores
- dispositif : transducteur au contact et couplage par air

C'est du béton !

- anisotropie
- hétérogénéité



$p\%(z) \rightarrow C_{ij}(z), \rho(z)$



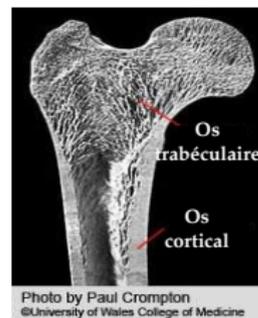
Caractérisation du profil de propriétés mécaniques \rightarrow caractérisation du profil de porosité

Evaluation de la qualité osseuse

Deux types d'os :

- trabéculaire (porosité > 80%)
- cortical (porosité < 15%)

Méthode de référence :



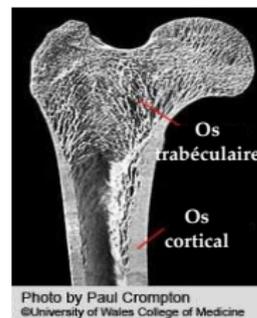
Evaluation de la qualité osseuse

Deux types d'os :

- trabéculaire (porosité > 80%)
- cortical (porosité < 15%)

Méthode de référence :

- densitométrie RX \implies quantité d'os



BESOIN : qualité mécanique de l'os

Evaluation de la qualité osseuse

Deux types d'os :

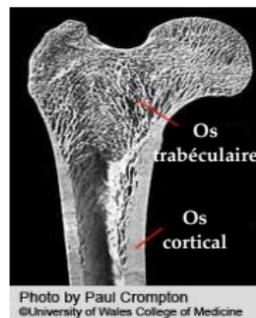
- trabéculaire (porosité > 80%)
- cortical (porosité < 15%)

Méthode de référence :

- densitométrie RX \implies quantité d'os

☹️ **INSUFFISANT**

BESOIN : qualité mécanique de l'os 😊



Ondes ultrasonores = vecteur d'information pertinent

Evaluation de la qualité osseuse

Deux types d'os :

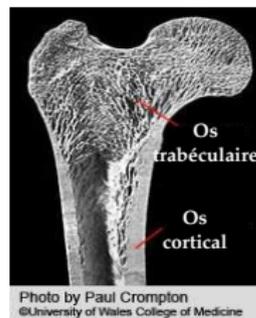
- trabéculaire (porosité > 80%)
- cortical (porosité < 15%)

Méthode de référence :

- densitométrie RX \implies quantité d'os

☹️ **INSUFFISANT**

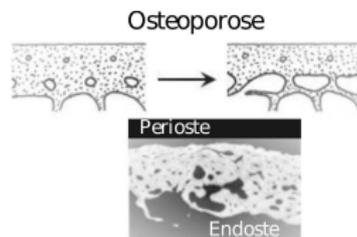
BESOIN : qualité mécanique de l'os 😊



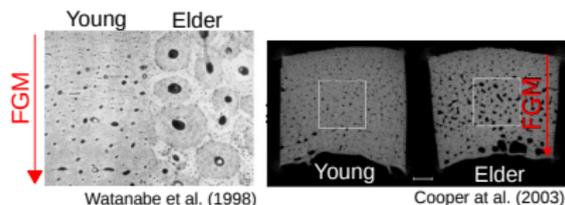
Ondes ultrasonores = vecteur d'information pertinent

Os cortical = matériau FGM

- Variation de la porosité dans l'épaisseur = marqueur du processus de vieillissement



- Variation de porosité corticale
 → variation des propriétés élastiques (C_{ij} et ρ)



Os cortical = FGM

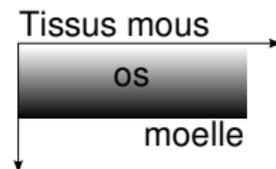
Hypothèse :

Les ondes ultrasonores sont sensibles aux variations de propriétés (porosité, C_{ij} et ρ) dans l'épaisseur corticale.

Deux modèles d'os cortical

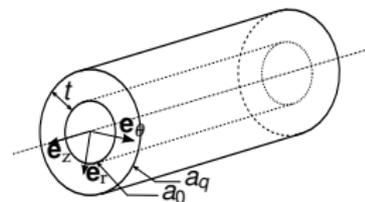
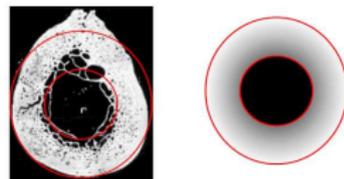
● L'os long (*in vivo*)

- ▶ Géométrie : plaque sous chargement fluide (non symétrique)
- ▶ Anisotropie : isotropie transverse
- ▶ Hétérogénéité : gradient dans l'épaisseur

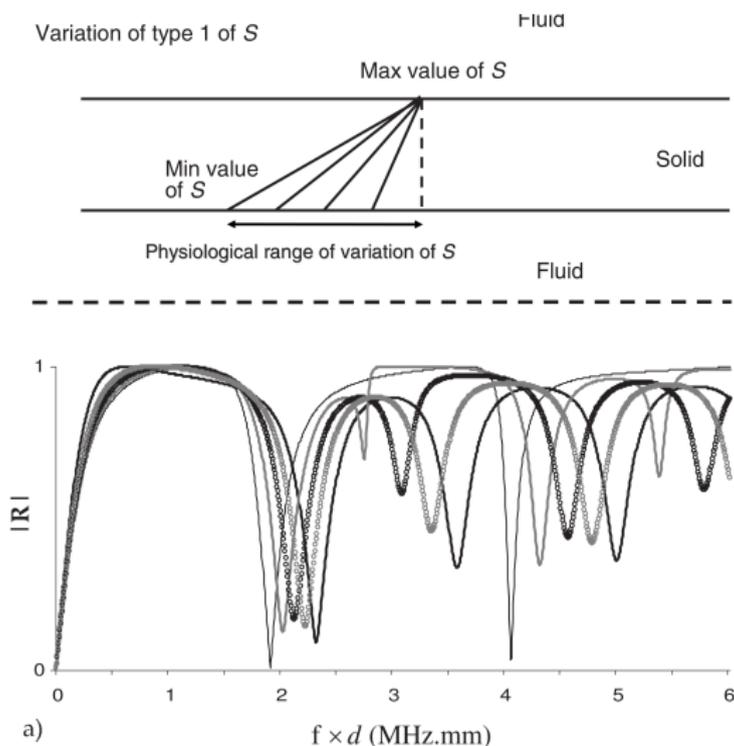


● L'os long

- ▶ Géométrie : tube anisotrope dans le vide
- ▶ Anisotropie : isotropie transverse
- ▶ Hétérogénéité : gradient radial

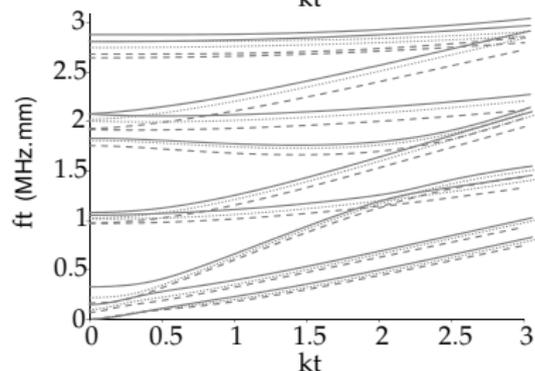
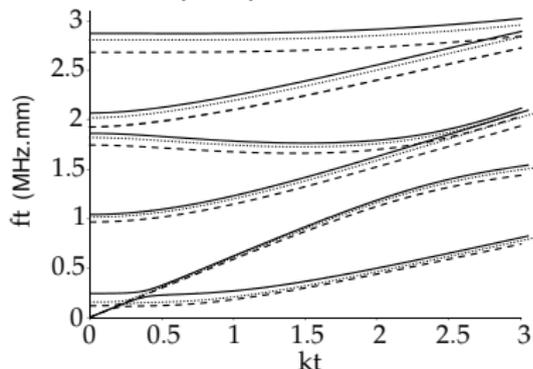
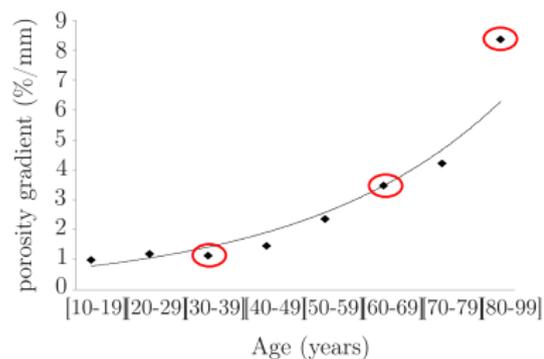


Plaque FGM sous chargement fluide



Cylindre FGM dans le vide

- Ondes longitudinales $L(0, m)$ et ondes de flexion $F(1, m)$



Bousson et al. (2001), Grimal et al. (2011)

Baron (2012)

Interaction Os / US : schema FDTD - SimSonic

Modélisation os cortical :

- géométrie : parallélépipède (repère cartésien)
- matériau : fluide parfait + solide élastique anisotrope
- structure : reconstruction 3D réseau poral ($20 \mu\text{m}$) - taille caractéristique des pores $\sim 100 \mu\text{m}$

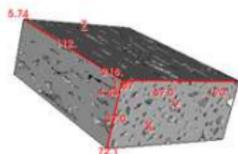
Caractéristique onde US :

- fréquence : $1 \text{ MHz} \rightarrow \lambda \sim 4 \text{ mm} \gg$ taille pores
- type : onde de volume compression et cisaillement
- forme :

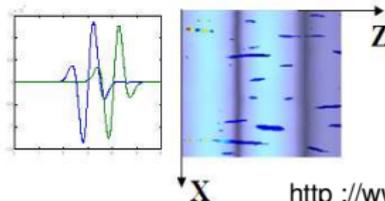


Interaction Os / US : schema FDTD - SimSonic

1. Bloc reconstruit

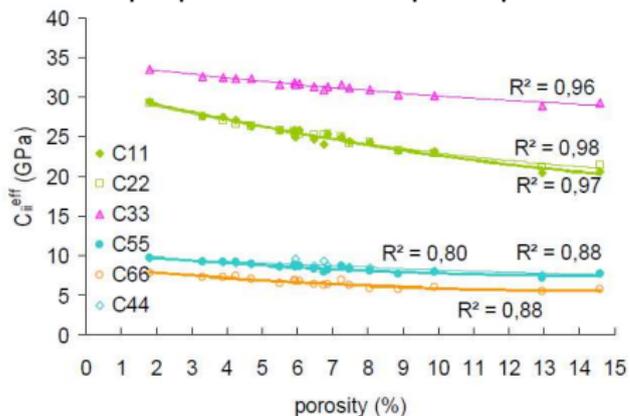


2. Simulation (FDTD)



<http://www.simsonic.fr/>

3. Relation propriétés mécaniques / porosité



Baron et al. (2008)

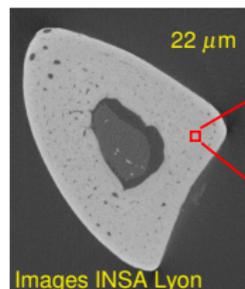
Stimulation US de la cicatrisation osseuse

Low Intensity Pulsed US (LIPUS) :

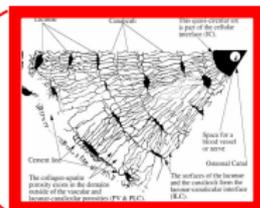
- Os cortical = 2 niveaux de porosité

Goulet 2008.

- ▶ porosité vasculaire reconstruction 3D (images RX)
- ▶ porosité lacuno-caniculaire poroélasticité *Biot 1935, 1941*



Duarte (1983), Claes et Willie (2007), Padilla (2014)



Cowin, 1999

- Paramètres acoustiques : $I_{SATA}=30 \text{ mW/cm}^2$, $f_0=1 \text{ MHz}$, $p_{rf}=1 \text{ kHz}$, $\text{duty cycle}=20\%$

Exogen

- Paramètres poroélastiques anisotropes

Goulet et al. 2008, NGuyen et al. 2016

- Propriétés de la matrice extralacunaire

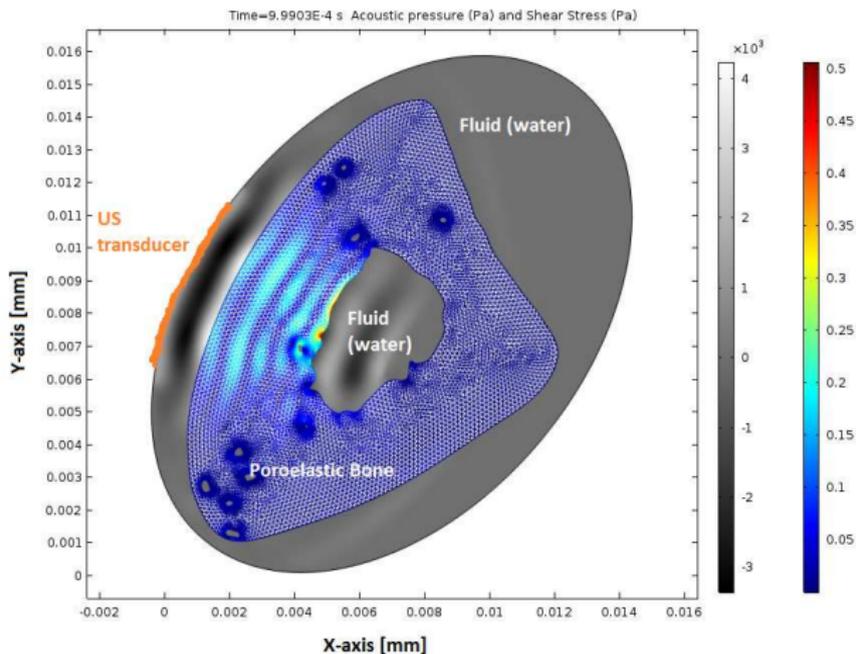
Scheiner et al. 2015

Stimulation US de la cicatrisation osseuse

Simulation EF Comsol Multiphysics 2D
Poroélasticité : formulation variationnelle

NGuyen et al. 2016

US
↓
cisaillement du fluide
interstitiel
↓
mécano-transduction



Remerciements

