

# Traitement et Analyse du Signal Ultrasonore pour la Caractérisation de l'Os Cortical

Magali Sasso  
– 14 février 2008 –

► Lab. de Biomécanique et Biomatériaux Ostéo-Articulaires

Université Paris 12, UMR CNRS 7052

- directeur de thèse : *Salah Naili*
- encadrant : *Guillaume Haiat*

► Laboratoire d'Imagerie Paramétrique

Université Pierre & Marie Curie - Paris 6, UMR CNR 7623

- *Pascal Laugier & Maryline Talmant*

► Laboratory of Ultrasonics Electronics

Université Doshisha, Kyoto, Japon

- *Mami Matsukawa*

## 1. Contexte de la thèse

- le tissu osseux
- caractérisation ultrasonore de l'os

## 2. Atténuation ultrasonore dans l'os cortical bovin

## 3. Traitement et analyse de signaux acquis en transmission axiale

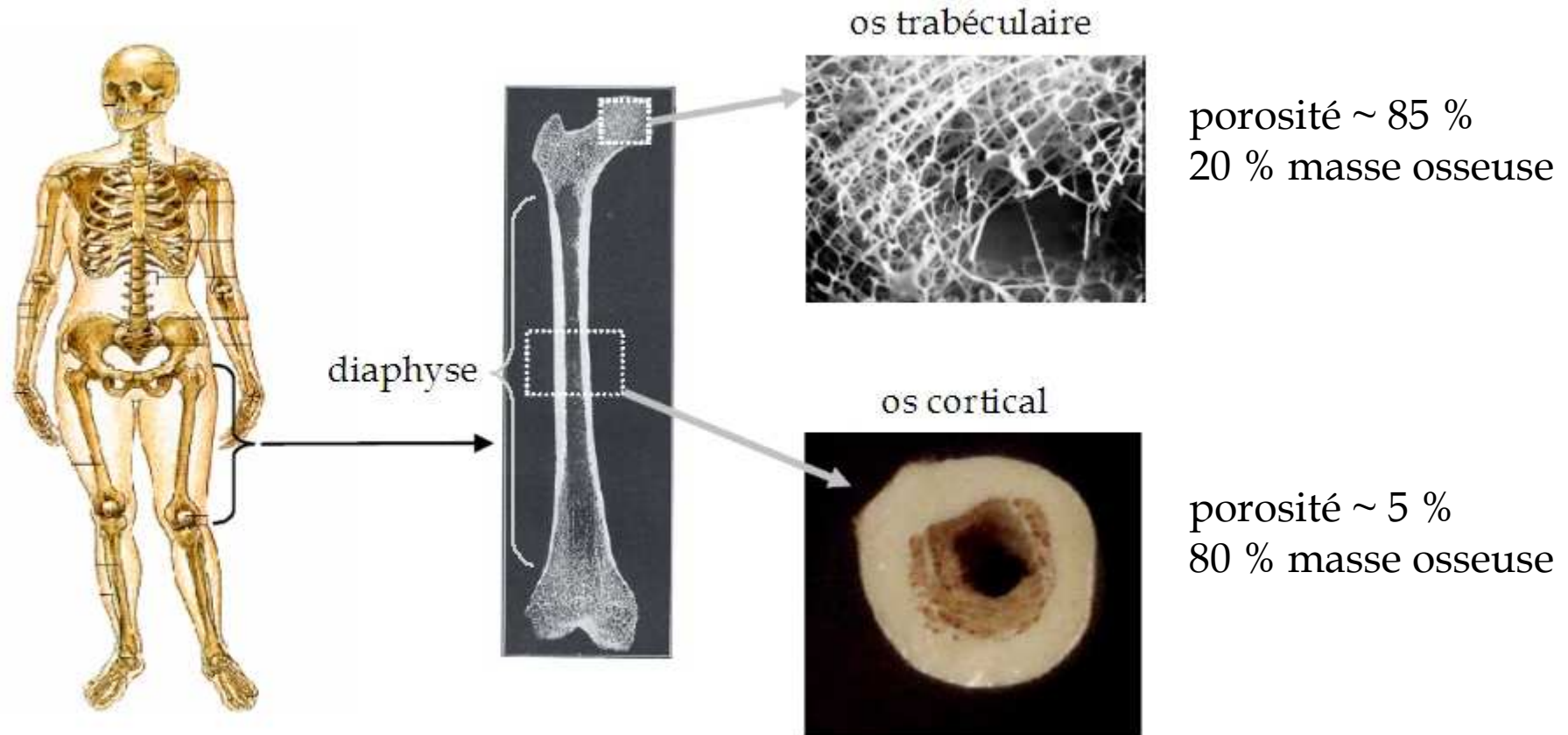
## 1. Contexte de la thèse

- le tissu osseux
- caractérisation ultrasonore de l'os

## 2. Atténuation ultrasonore dans l'os cortical bovin

## 3. Traitement et analyse de signaux acquis en transmission axiale

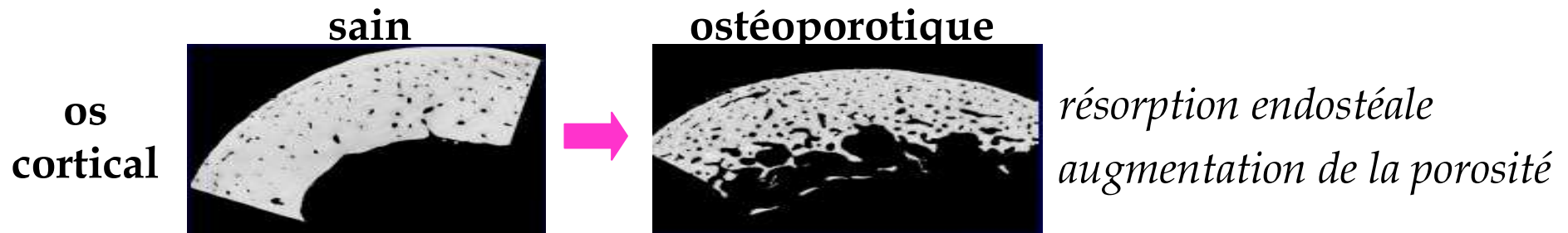
# Le tissu osseux



# Fragilité osseuse

---

- ▶ fragilité osseuse : perte en **quantité** et **qualité** d'os
- ▶ ostéoporose : enjeu majeur de santé publique



- ▶ diagnostic : DXA → évalue la densité minérale osseuse
- ▶ nécessité d'évaluer des **paramètres complémentaires**

# Caractérisation de l'os par ultrasons

## ▶ ultrasons : technique complémentaire ?

- ondes élastiques :
  - ⇒ densité, paramètres physiques, architecturaux...
- non-ionisants, non-invasifs, peu coûteux...

## ▶ transmission transverse

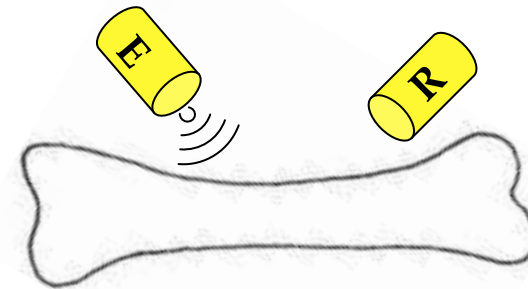
- os trabéculaire
- vitesse, atténuation



*image GE Healthcare*

## ▶ transmission axiale

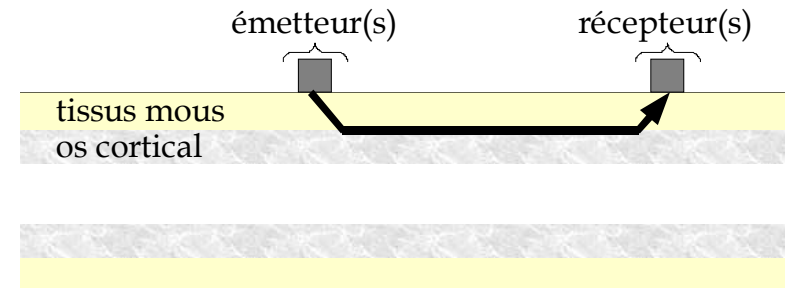
- os cortical
- vitesse



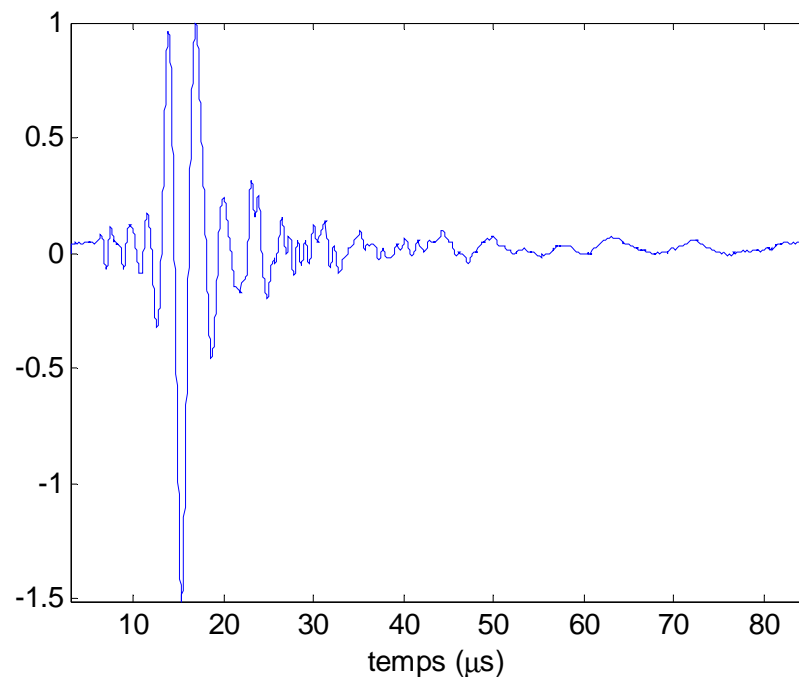
# Transmission axiale

## ► configuration transmission axiale :

- différents dispositifs
- 100 kHz ~ 2 MHz



- excite de multiples contributions  
⇒ dépendantes de propriétés osseuses spécifiques



⇒ **signal riche**



# Paramètres ultrasonores mesurés

---

## 1. vitesse du FAS (First Arriving Signal) :

- index robuste
- discriminer patients sains / ostéoporotiques
- dispositifs commerciaux

Barkmann *J Clin Densitom* 2000

Foldes *Bone* 1995

Hans *Lancet* 1996

Stegman *Osteoporos Int* 1995

## 2. vitesse d'une autre contribution arrivant après le FAS :

- onde guidée de type onde de flexion
- comparaison à un modèle de propagation
- approche de type inversion
- traitement du signal spécifique

Nicholson *Physiol Med* 2002

Lefebvre *J Biomed Mater Res* 2002

Moilanen *UMB* 2006

Tatarinov *Ultrasonics* 2005

Ta *Ultrasonics* 2005

Protopappas *IEEE Biomed Eng* 2007

- ▶ signal ultrasonore riche
- ▶ nouveaux paramètres pertinents ?
  1. atténuation ultrasonore
    - étude *in vitro* dans l'os cortical bovin
  2. analyse d'une autre contribution que le FAS
    - prototype de sonde en transmission axiale

## 1. Contexte de la thèse

- le tissu osseux
- caractérisation ultrasonore de l'os

## 2. Atténuation ultrasonore dans l'os cortical bovin

## 3. Traitement et analyse de signaux acquis en transmission axiale

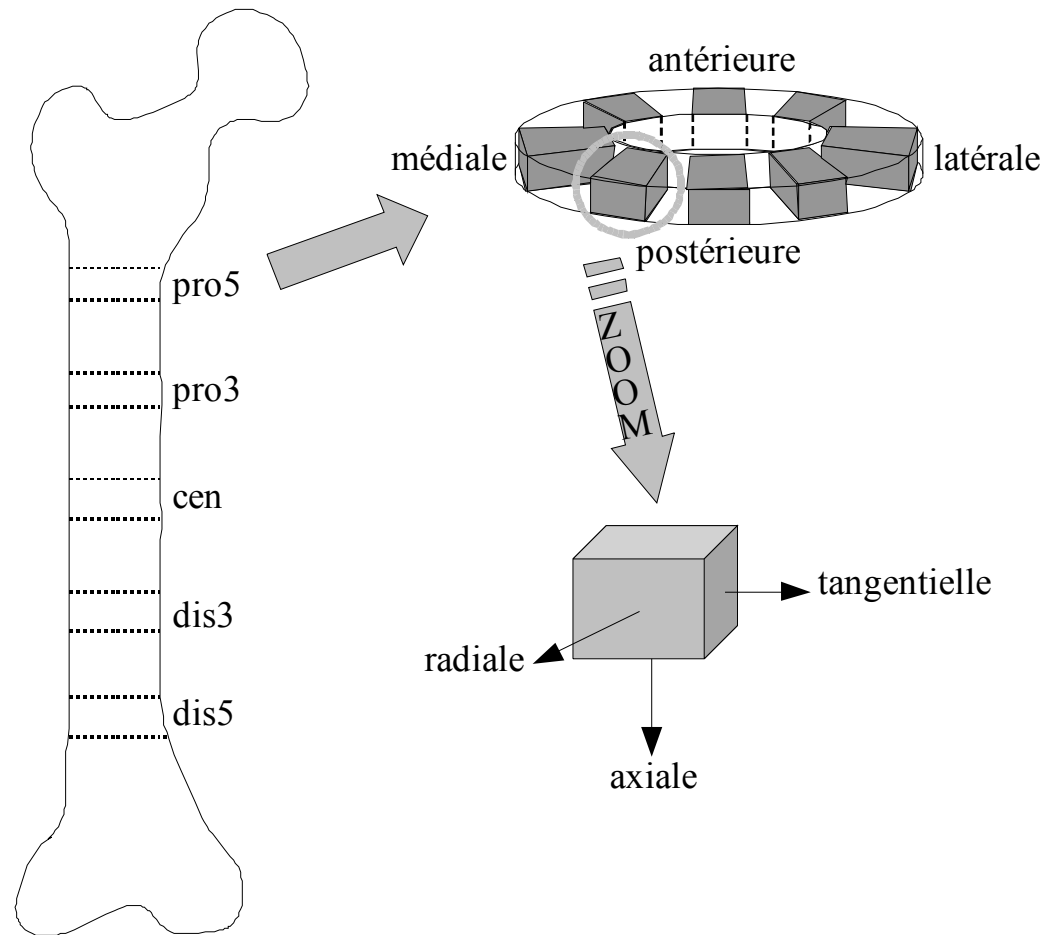
# Atténuation ultrasonore dans l'os cortical bovin

---

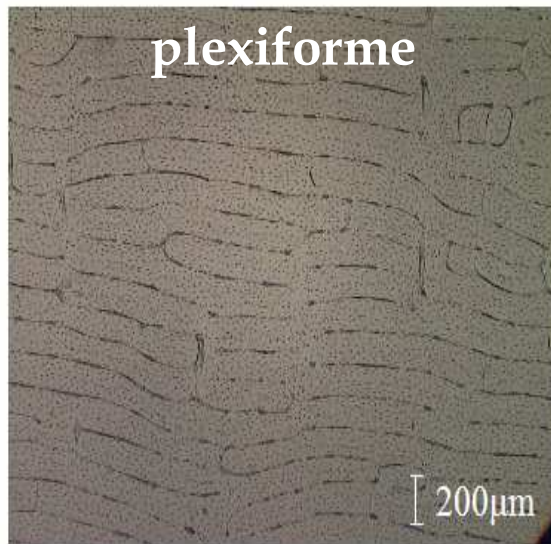
- ▶ objectifs :
  - dépendance fréquentielle de l'atténuation
  - mise en relation avec les propriétés osseuses
  - intérêt pour la caractérisation de l'os cortical
  
- ▶ expériences réalisées au Laboratory of Ultrasonics Electronics
  - suite étude réalisée par Yamato *et al.*

# Préparation des échantillons

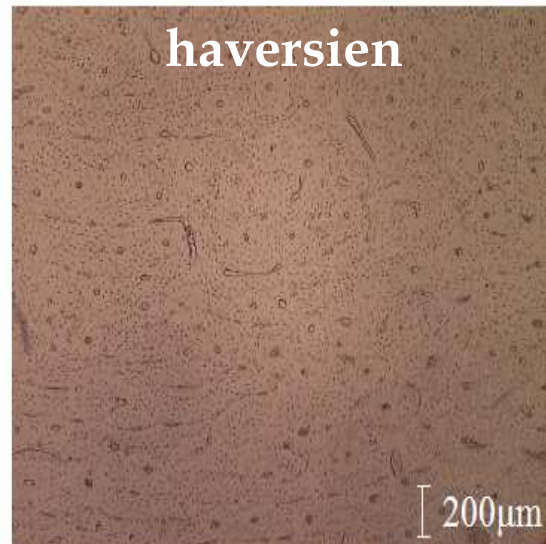
- ▶ 3 fémurs bovins, 36 mois
- ▶ parallélépipèdes 4~11 mm de côté



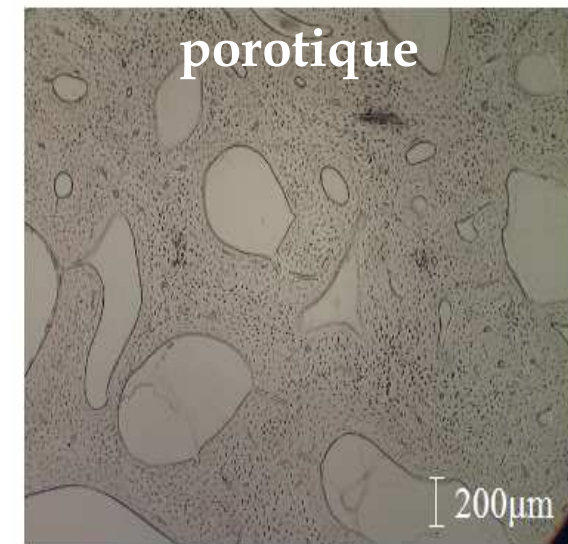
# Microstructure de l'os cortical bovin



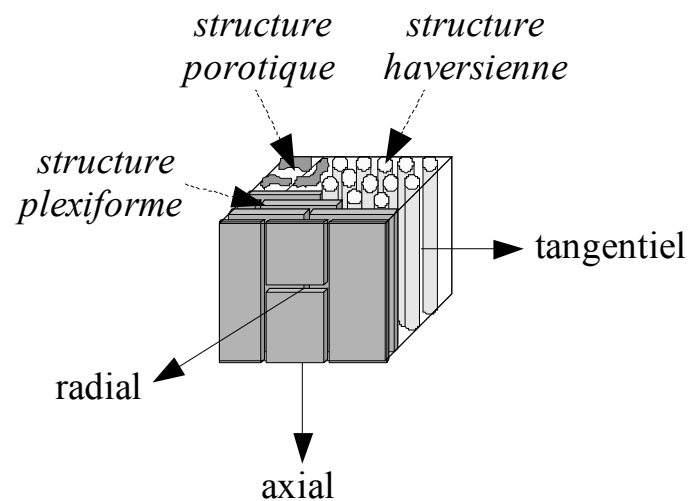
- lamelles : 100~200 µm
- pores : 8~12 µm



- ostéons : 150~300 µm
- pores : 20~50 µm

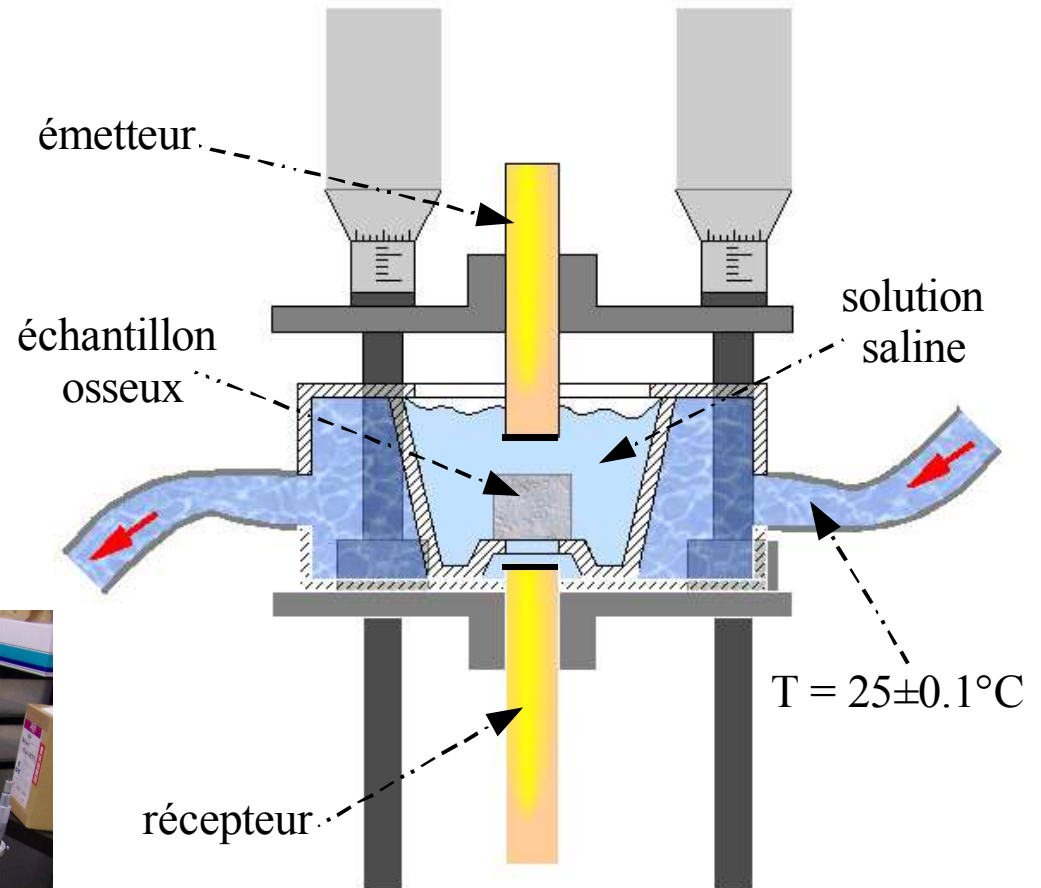
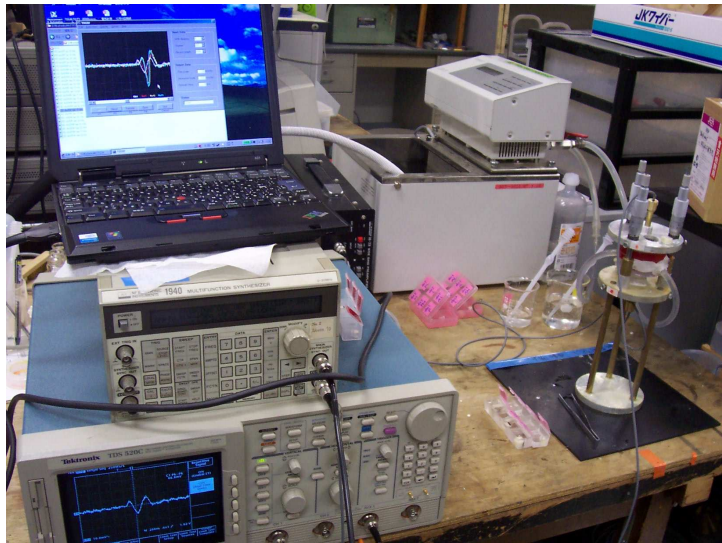


- pores : 50~300 µm



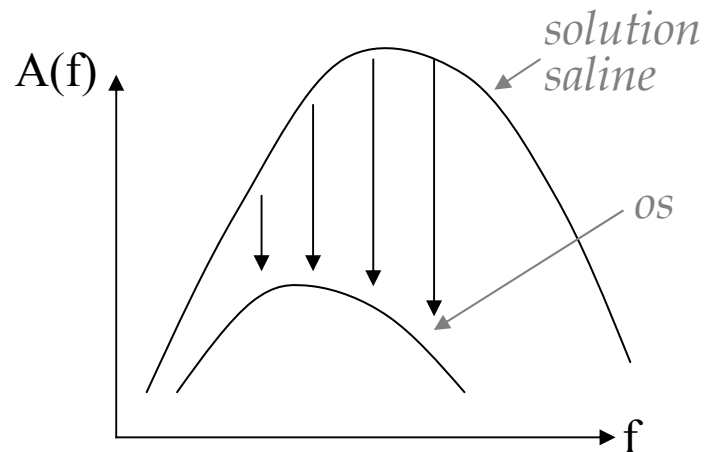
# Evaluation des échantillons

- ▶ **mesure ultrasonore**  
*2~10 MHz, en transmission*  
*transducteurs PVDF*
- ▶ **microstructure**  
*microscope optique*
- ▶ **densité de masse**  
*théorème d'Archimède*
- ▶ **Densité Minérale Osseuse**  
*DXA*



# Atténuation ultrasonore

## ► technique de substitution



$$\alpha_{dB}(f) = \frac{8.67}{L} \left( \ln \frac{|A_o(f)|}{|A_s(f)|} + \ln(T(f)) \right)$$

*spectre dans l'os* (pointing to  $|A_o(f)|$ )  
*coefficient de transmission* (pointing to  $\ln(T(f))$ )  
*taille de l'échantillon* (pointing to  $L$ )  
*spectre dans la solution saline* (pointing to  $|A_s(f)|$ )

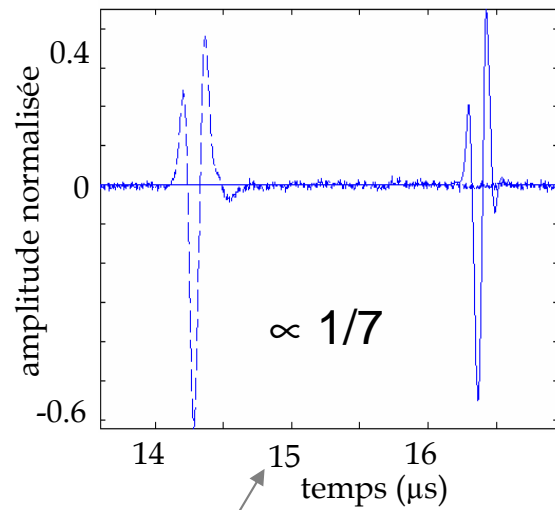
## ► Broadband Ultrasonic Attenuation (BUA) en $\text{dB.cm}^{-1}.\text{MHz}^{-1}$

- pente de  $\alpha_{dB}(f)$  sur une étendue spectrale limitée
- évalué par régression linéaire

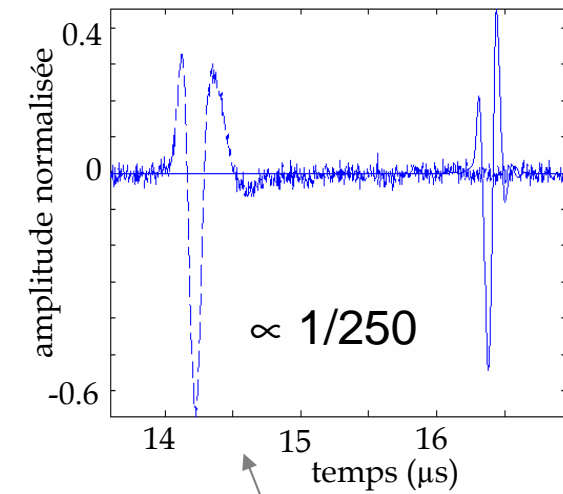


# Exemple d'atténuation ultrasonore

signaux



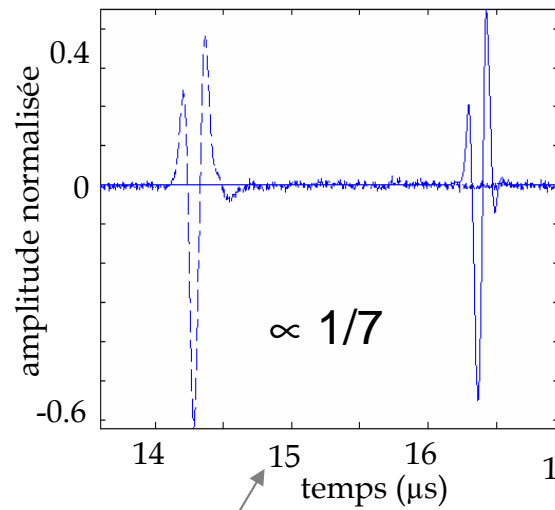
faible atténuation



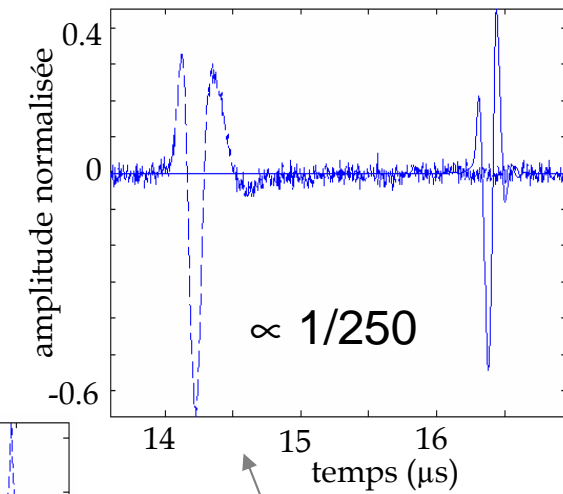
forte atténuation

# Exemple d'atténuation ultrasonore

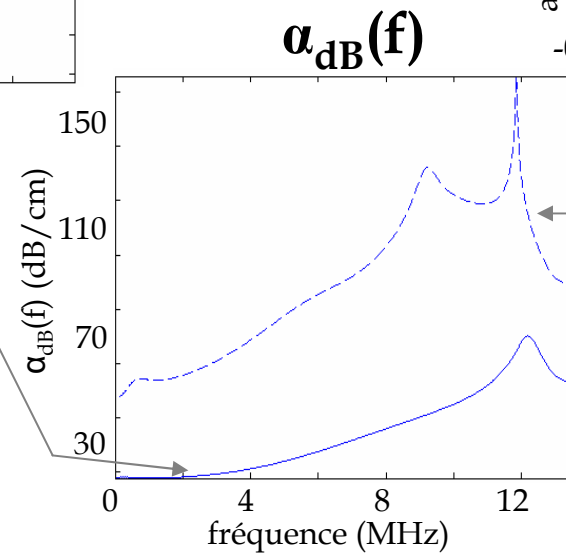
signaux RF



faible atténuation

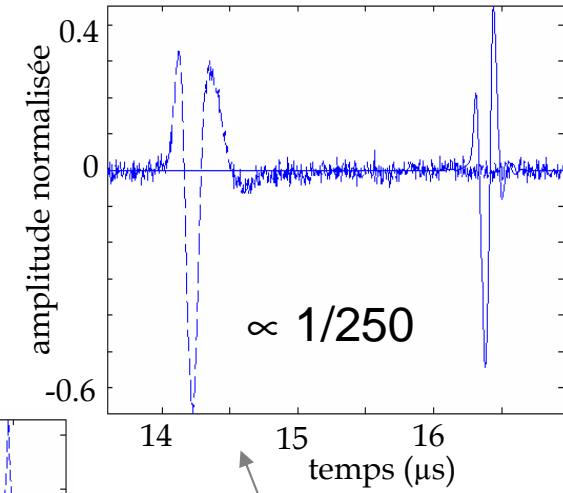
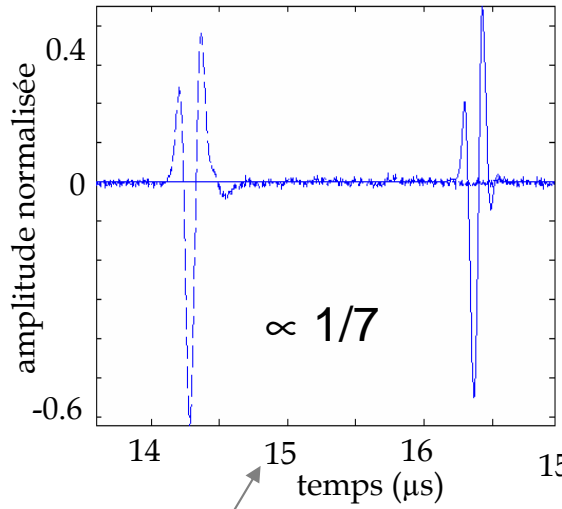


forte atténuation



# Exemple d'atténuation ultrasonore

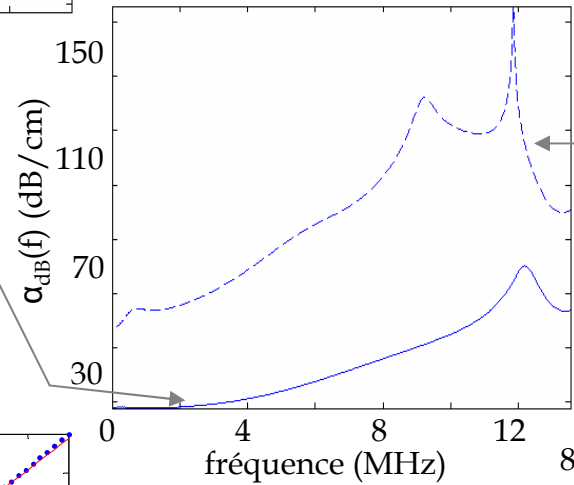
signaux RF



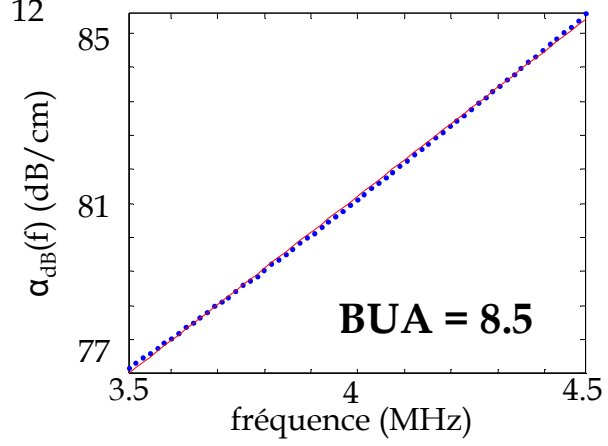
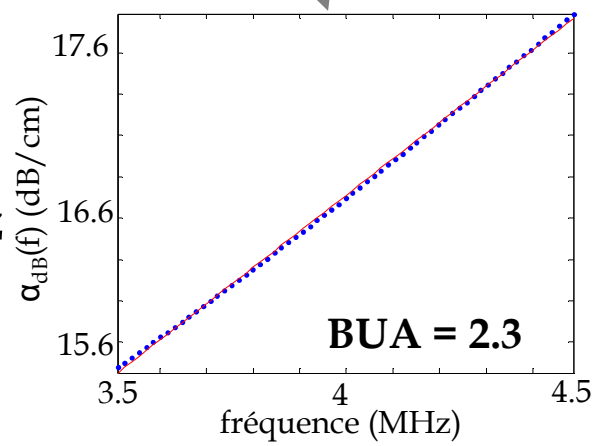
$\alpha_{dB}(f)$

faible atténuation

forte atténuation



$\alpha_{dB}(f)$   
3.5-4.5MHz



# Choix de l'étendue spectrale optimale

► compromis, même étendue spectrale :

- pour tous les échantillons
- dans les trois directions

1. fréquence centrale

→ **4 MHz**

- fréquence suffisamment élevée → sensible à la microstructure
- rapport signal-sur-bruit satisfaisant

2. étendue spectrale

→ **1 MHz**

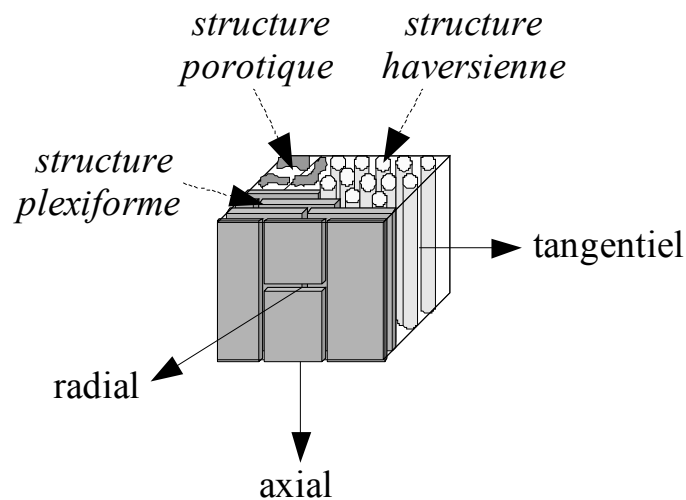
- variation quasi linéaire de  $\alpha(f)$  ( $r > 0.97$ )
- adéquation satisfaisante entre  $\alpha(f)$  et droite de régression
- étendue spectrale la plus large possible

⇒ BUA évalué entre **3.5** et **4.5 MHz**

# BUA dans les 3 directions

direction	BUA (dB.cm <sup>-1</sup> .MHz <sup>-1</sup> )
<b>axiale</b>	<b>3.2 ± 2.0</b>
<b>radiale</b>	<b>4.2 ± 2.4</b>
<b>tangentielle</b>	<b>4.4 ± 2.9</b>

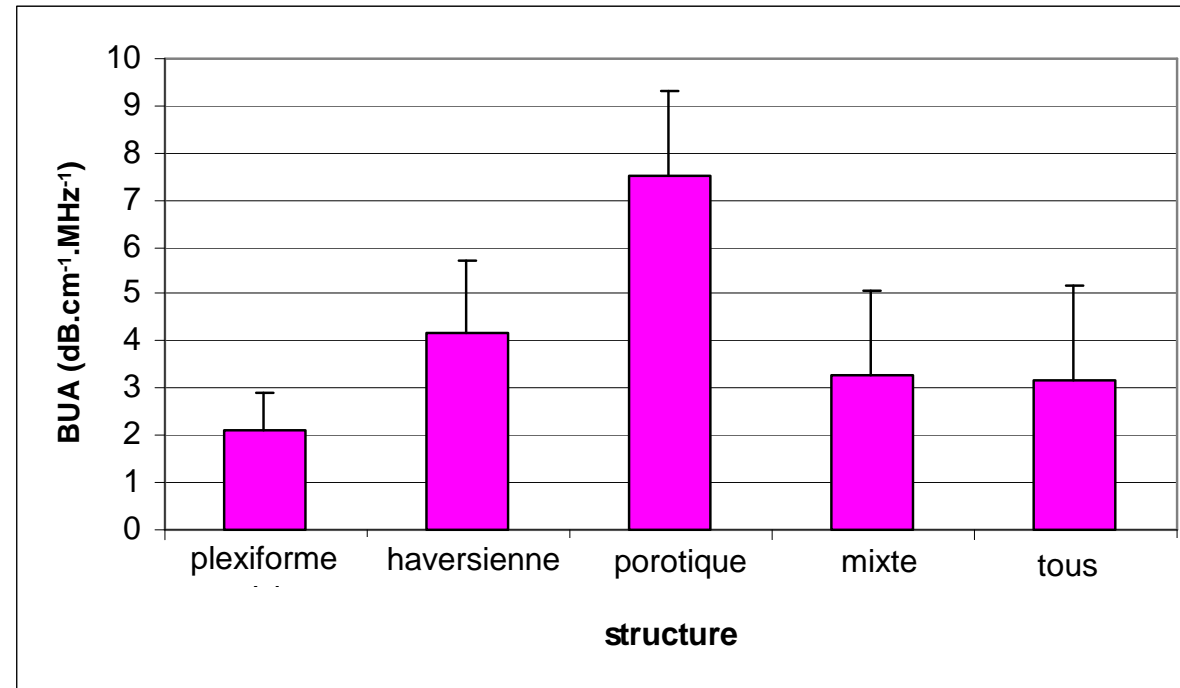
- ▶ effet significatif de la direction ( $p < 10^{-5}$ )
  - axiale significativement différente de radiale et tangentielle
- ▶ comportement **isotrope transverse**



- ▶ orientation principale direction axiale
  - **phénomène de diffusion**

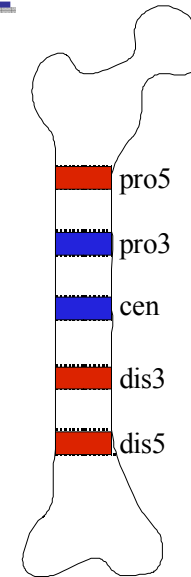
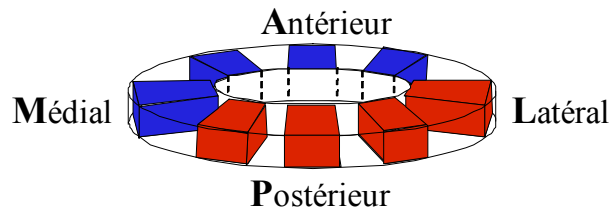
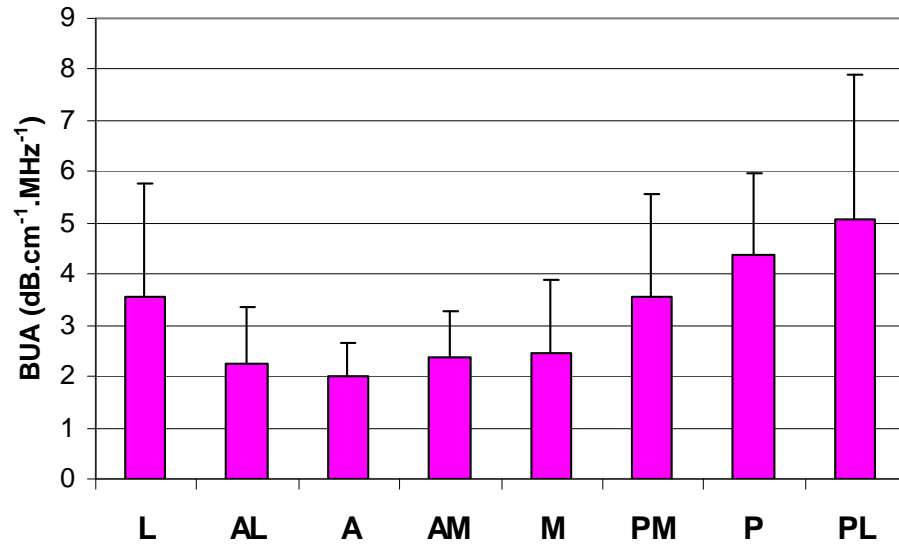
# Dépendance du BUA vis-à-vis de la microstructure

- ▶ échantillons classifiés manuellement selon leur microstructure

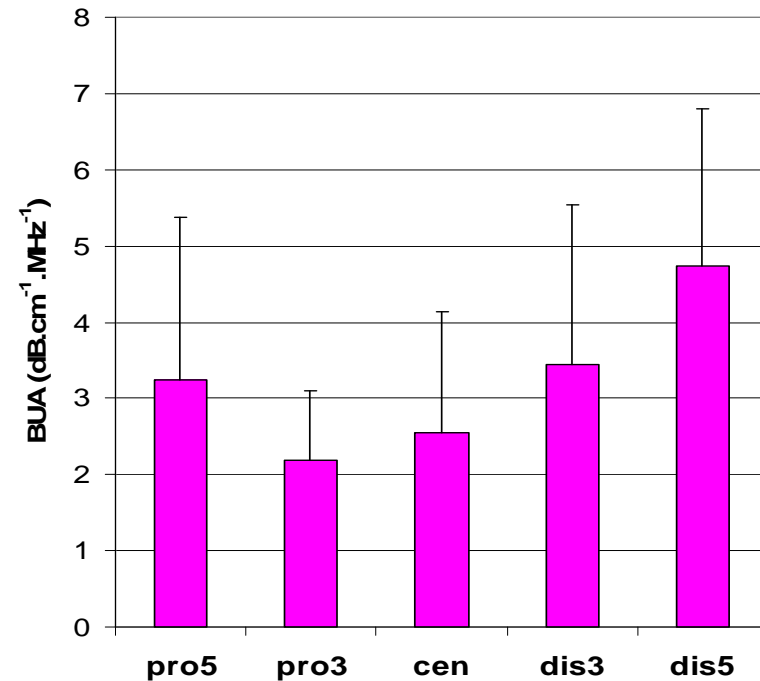


- ▶ effet significatif de la microstructure ( $p < 10^{-5}$ )
- ▶ BUA / microstructure réparti comme la taille des pores :
  - **phénomène de diffusion**

# Répartition spatiale du BUA

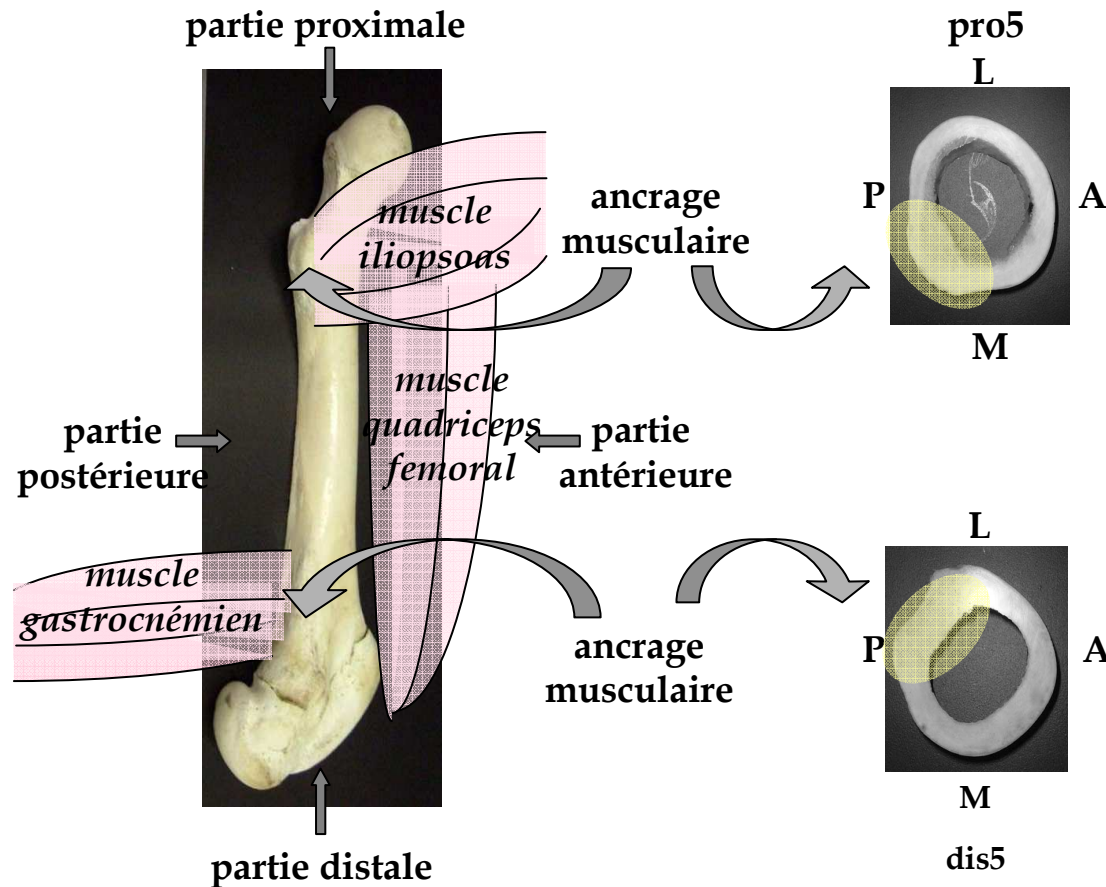


⇒ effet significatif de la position  
 autour / le long de la diaphyse  
 ( $p < 10^{-5}$ )



# Macrostructure osseuse

- ▶ variabilité spatiale du BUA :
  - effet de la microstructure



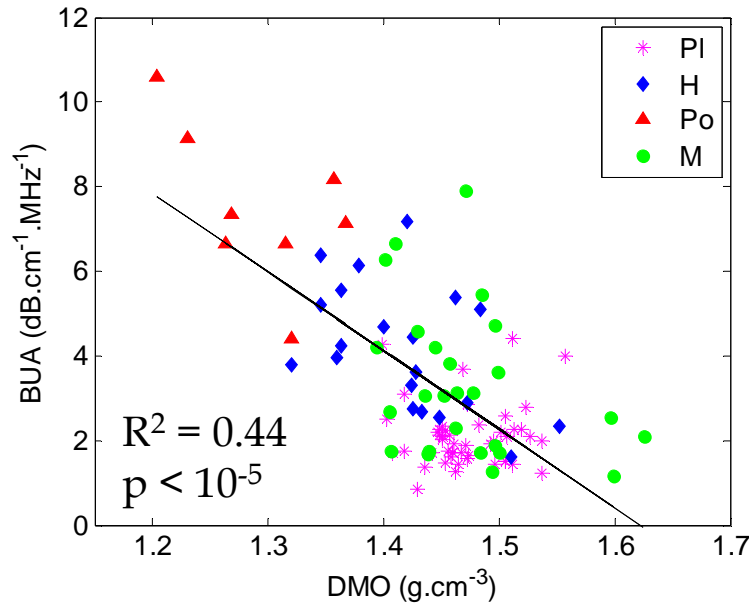
zones	μstructure	BUA
extrémités	porotique haversien	+++
P-M-L	haversien	+++
centrale	plexiforme	---
AM	plexiforme	---

- ▶ remodelage
  - ⇒ plexiforme → haversien

- ▶ BUA ↑ :
  - contraintes mécaniques importantes

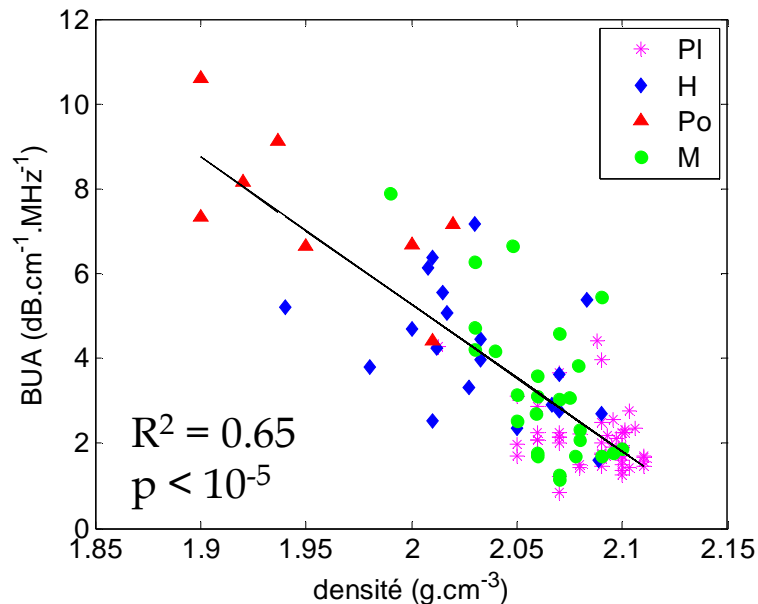


# Dépendance du BUA vis-à-vis des propriétés matérielles



➤ BUA ↓ avec densités ↑  
 Serpe and Rho *J Biomech* 1996  
 Han *Osteoporos Int* 1996

➤ structure plexiforme :  
 • pas de corrélation avec les densités  
 ⇒ taille des pores petite /  $\lambda$   
 ⇒ viscoélasticité ?



	DMO	densité
<i>vitesse</i>	$R^2 = 0.21$	$R^2 = 0.60$
<i>BUA</i>	$R^2 = 0.44$	$R^2 = 0.65$

Iyo *J Biomech* 2004  
 Lakes & Katz *J Biomech* 1979

# Conclusions partielles

---

- dépendance fréquentielle de l'atténuation
- faisabilité du BUA dans l'os cortical
  
- origine de l'atténuation :
  - diffusion
  - viscoélasticité
  
- BUA a le potentiel de :
  - discriminer les différentes microstructures
  - fournir des indicateurs sur les propriétés matérielles
  
- paramètre pertinent

# Plan de l'exposé

---

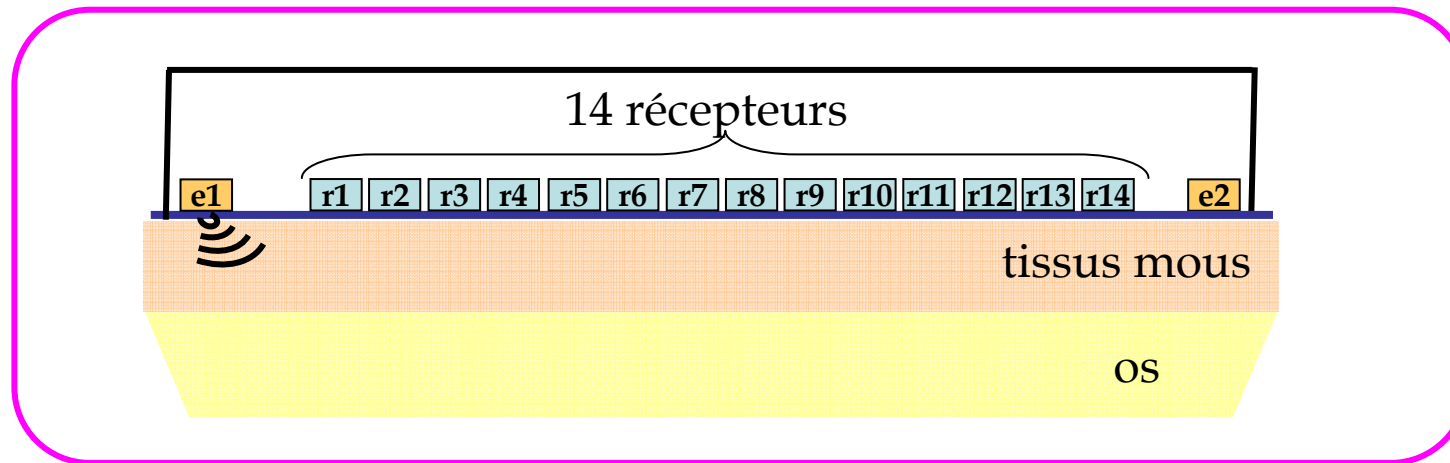
## 1. Contexte de la thèse

- le tissu osseux
- caractérisation ultrasonore de l'os

## 2. Atténuation ultrasonore dans l'os cortical bovin

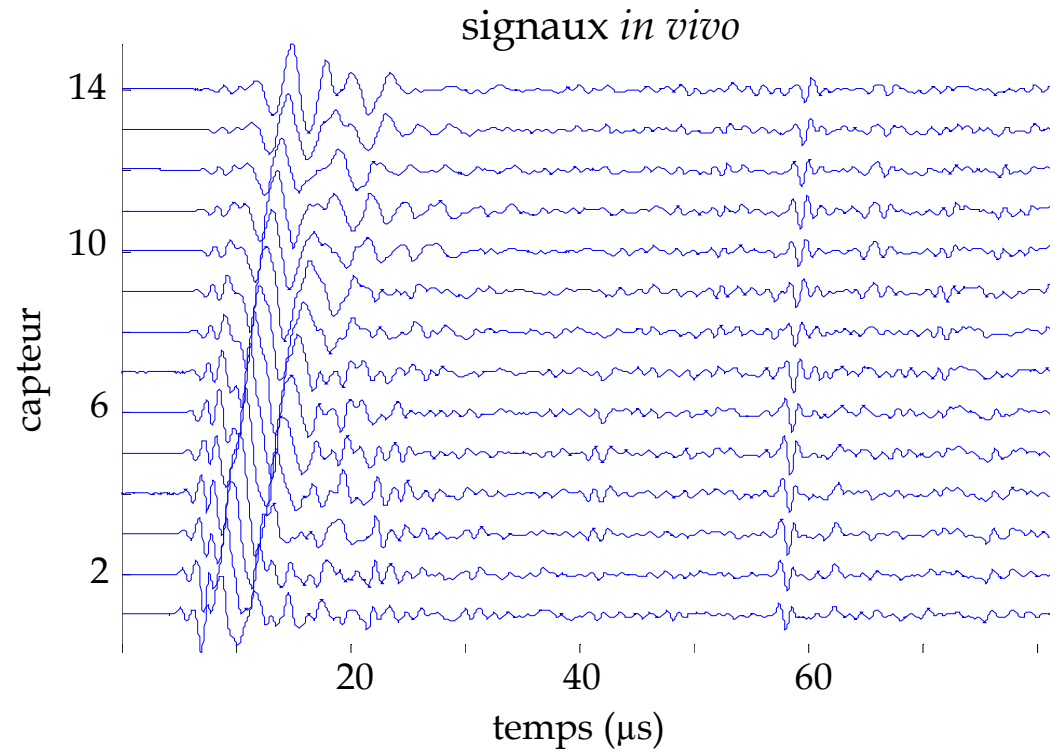
## 3. Traitement et analyse de signaux acquis en transmission axiale

# Sonde bi-directionnelle multirécepteur



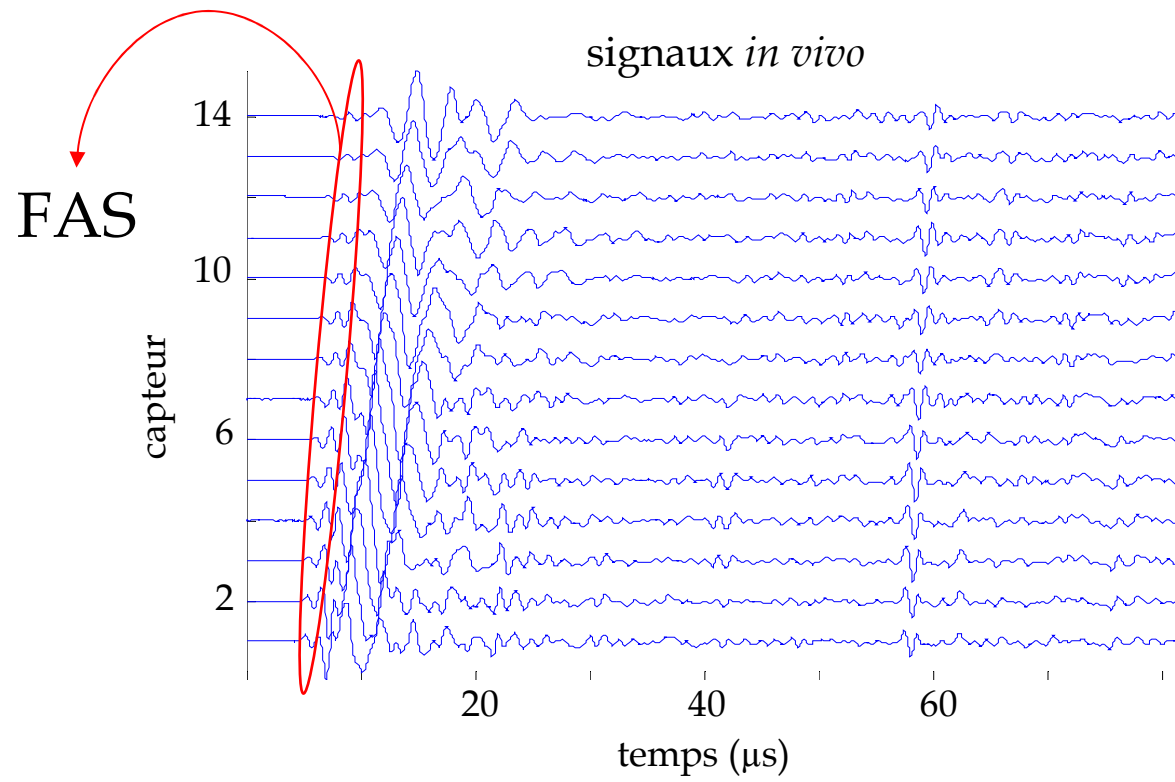
- conçue par le LIP
- évaluation de l'os cortical au radius
- 1 MHz
- vitesse du FAS évaluée :
  - compensation automatique des effets dus aux tissus mous



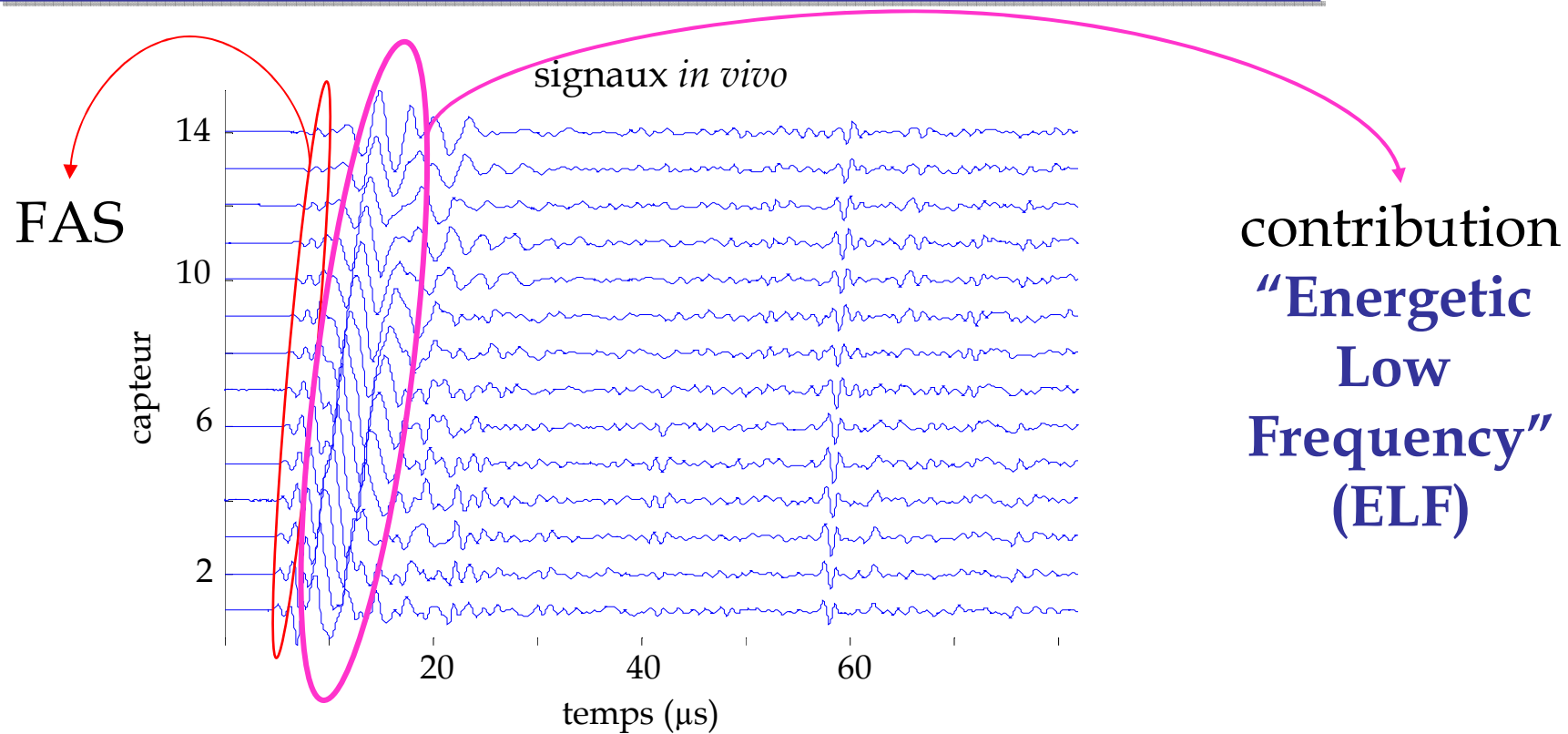


# Contexte

---



# Contexte



- ▶ amplitude dominante
- ▶ contenu fréquentiel différent du FAS (280 kHz)
- ▶ plus lente que le FAS
- ▶ mode de propagation différent ?

⇒ *séparation d'ondes*

# Algorithme de séparation d'ondes

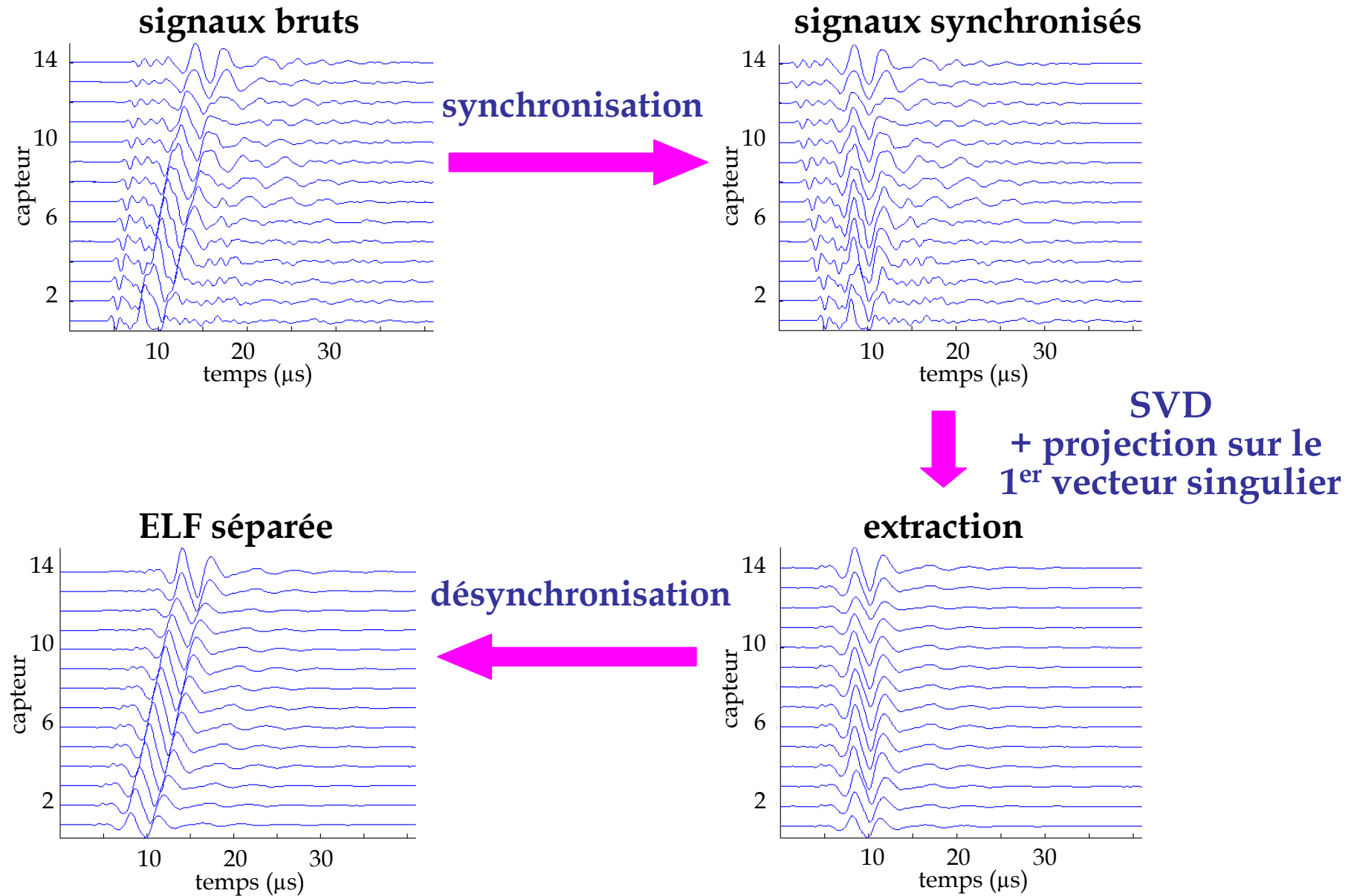
⇒ séparation d'un front d'onde d'amplitude dominante  
Singular Value Decomposition (SVD)

## ALGORITHME BASÉ SUR LA SVD

1. **Synchronisation** des signaux reçus  $X$  / ELF
2. **Singular Value Decomposition** (SVD) de  $X^S$
3. **Projection** de  $X^S$  sur le premier vecteur singulier
4. **Désynchronisation** : réintroduction des délais initiaux



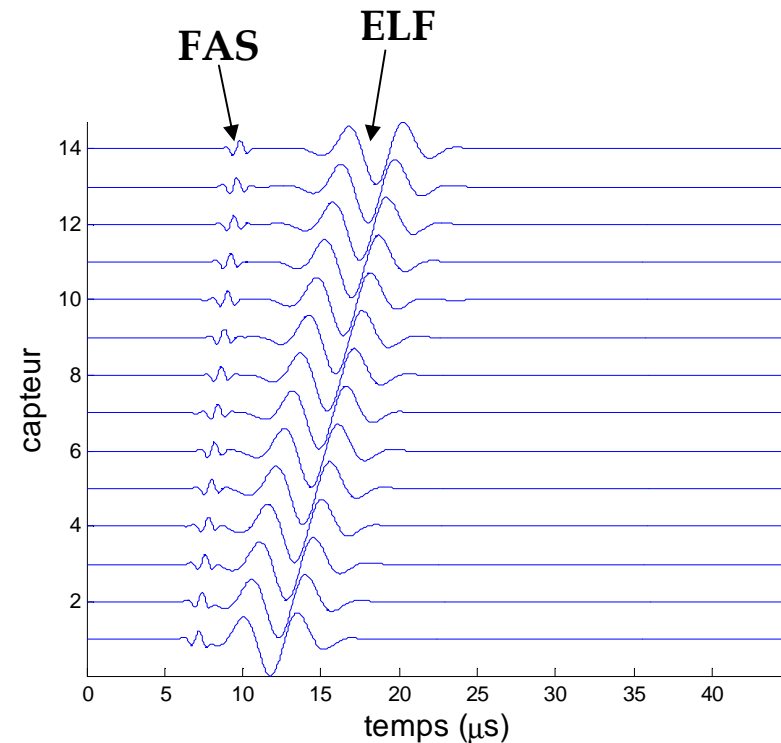
# Illustration sur des signaux *in vivo*



# Création de signaux synthétiques

► 2 contributions :

- ELF
  - FAS
- paramètres évalués in vivo*  
*20 volontaires*



## Modèle des signaux synthétiques

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^{P+2} A_p \cos(2\pi f_p - \delta t_p) e^{-\left(\frac{t - \delta t_p - 0.5a_p}{a_p}\right)^2} + N_{i,j}$$

→ fréquence, bande passante,  
vitesse, temps d'arrivée

# Création de signaux synthétiques

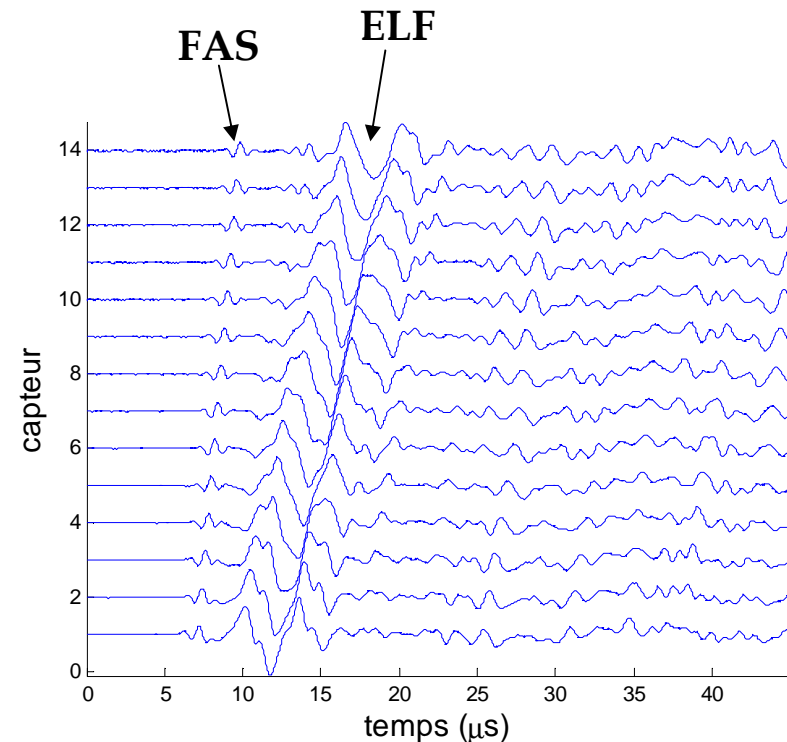
## ► 2 contributions :

- ELF
  - FAS
- } paramètres évalués *in vivo*  
20 volontaires

## ► $P$ contributions interférant

- paramètres ?  
⇒ tirés aléatoirement entre ceux du FAS et de la ELF

## ► bruit blanc gaussien



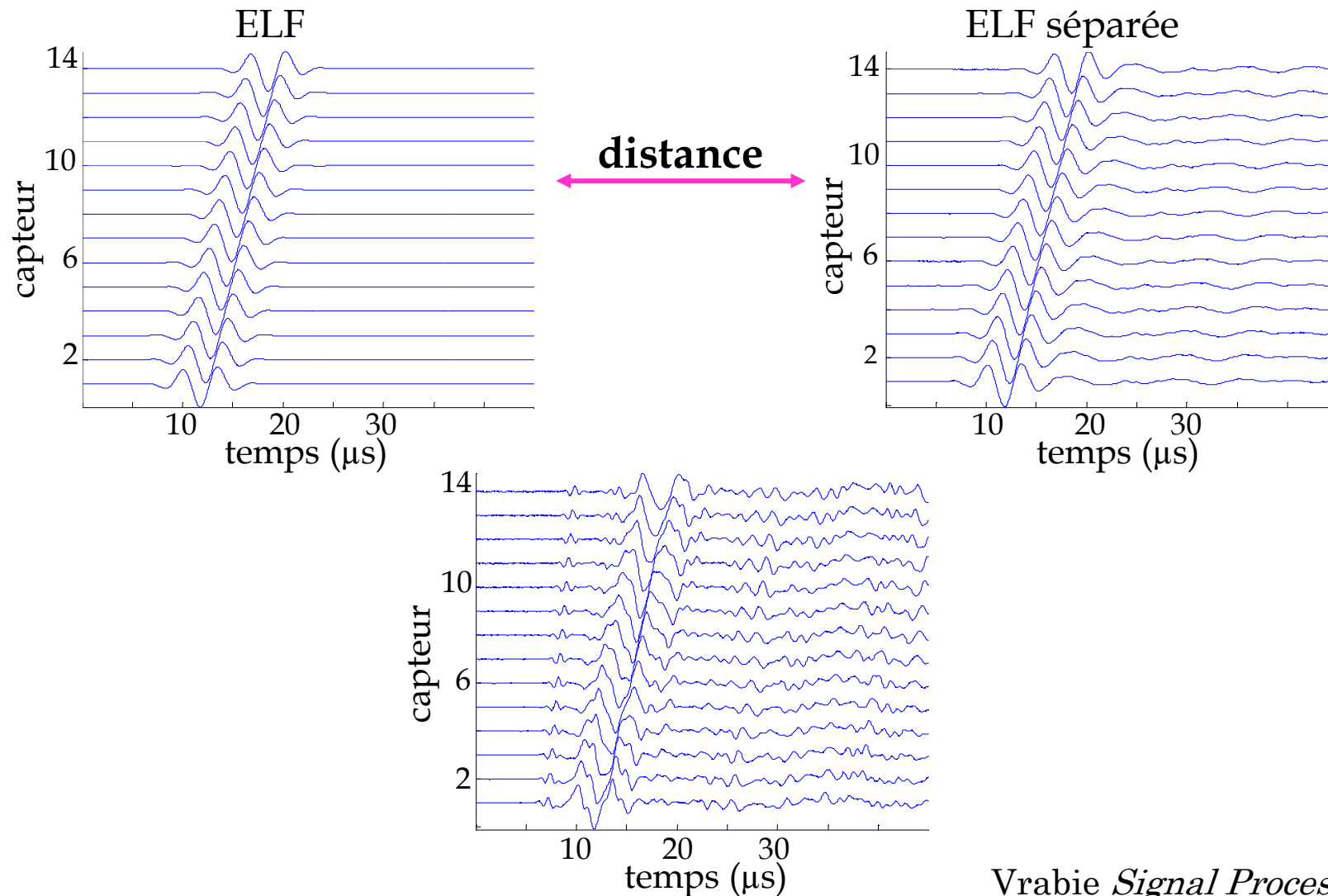
### Modèle des signaux synthétiques

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^{P+2} A_p \cos(2\pi f_p - \delta t_p) e^{-\left(\frac{t - \delta t_p - 0.5a_p}{a_p}\right)^2} + N_{i,j}$$

→ fréquence, bande passante, vitesse, temps d'arrivée

# Performances de la technique de séparation

► Mean Square Error :  $MSE = \frac{1}{M \times \Delta t} \|ELF - S_{ELF}\|^2$



# Performances de la technique de séparation

- influence du bruit (RSB = 28 dB) et des interférences ( $N_{CA}$ )

$N_{CA}$	<i>MSE ELF – ELF extraite</i>	<i>MSE ELF – signaux bruts</i>	
0	0.0003	0.03	} ⇒ 50 dB
20	0.18	0.52	
40	0.38	1.01	} ⇒ 10 dB
60	0.58	1.50	

- ⇒ influence minimale du bruit
- ⇒ influence des interférences
- ⇒ **séparation efficace**

# Analyse de la contribution ELF

---

- ▶ étude préliminaire sur des radius humains *in vitro*

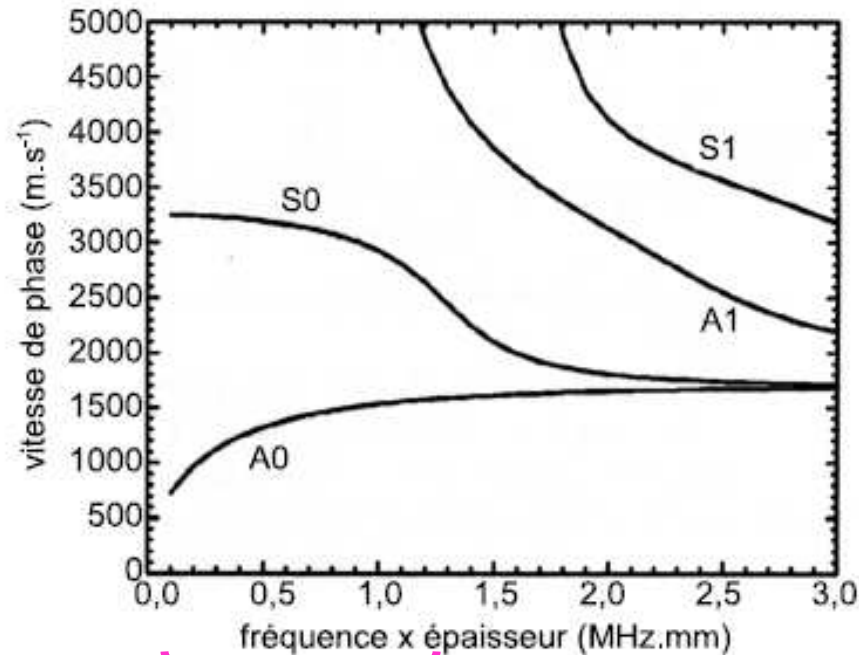
$V_{\text{ELF}} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$1286 \pm 130$	[1063 ; 1569]	} origine ?

- ▶ vitesse mesurée par un dispositif basse-fréquence (Univ. Jyväskylä)

$V_{\text{BF}} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$ Muller <i>UMB</i> 2005	$1280 \pm 130$	[1009 ; 1587]	} associée à une onde guidée de flexion ⇒ <b>onde dispersive</b>

- ⇒ comparaison à un modèle analytique de propagation :
  - nécessité d'avoir une vitesse de phase ou de groupe
  - FFT-2D non applicable avec la configuration de la sonde
- ⇒ vitesse après séparation par SVD sur onde dispersive ?

# Simulations $\Rightarrow$ situation contrôlée



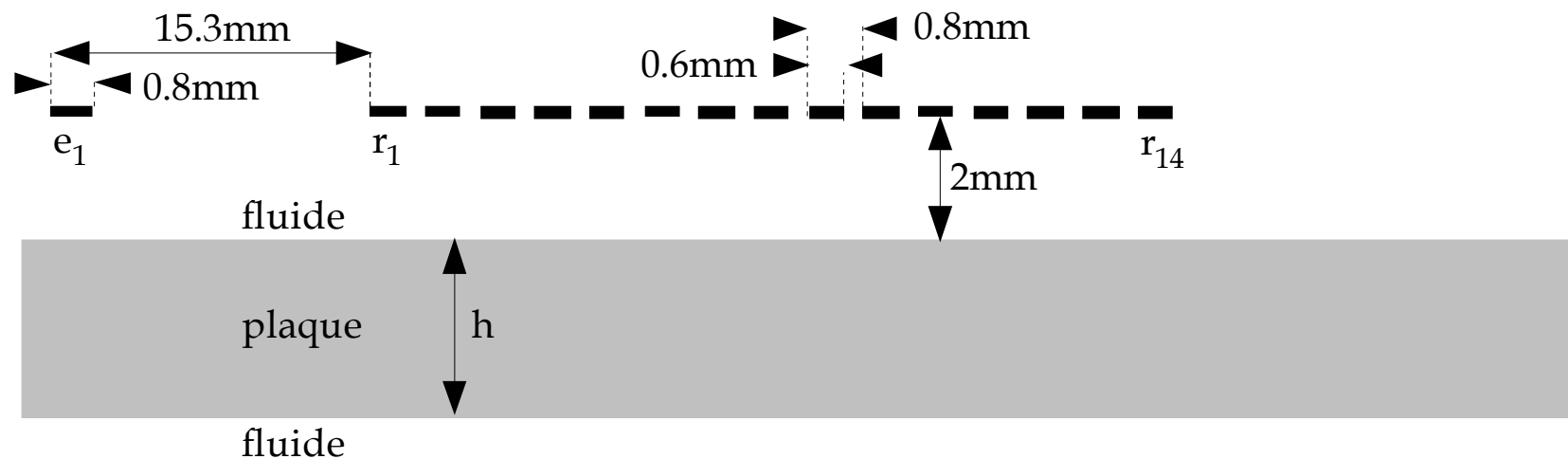
ondes guidées dans les  
plaques élastiques :  
• modes de Lamb

contribution d'amplitude dominante : mode A0

- $\Rightarrow$  produit fréquence - épaisseur  $< 1000$  kHz.mm
- $\Rightarrow$  évaluation de la vitesse après séparation par SVD
- $\Rightarrow$  comparaison avec les courbes de vitesse théoriques

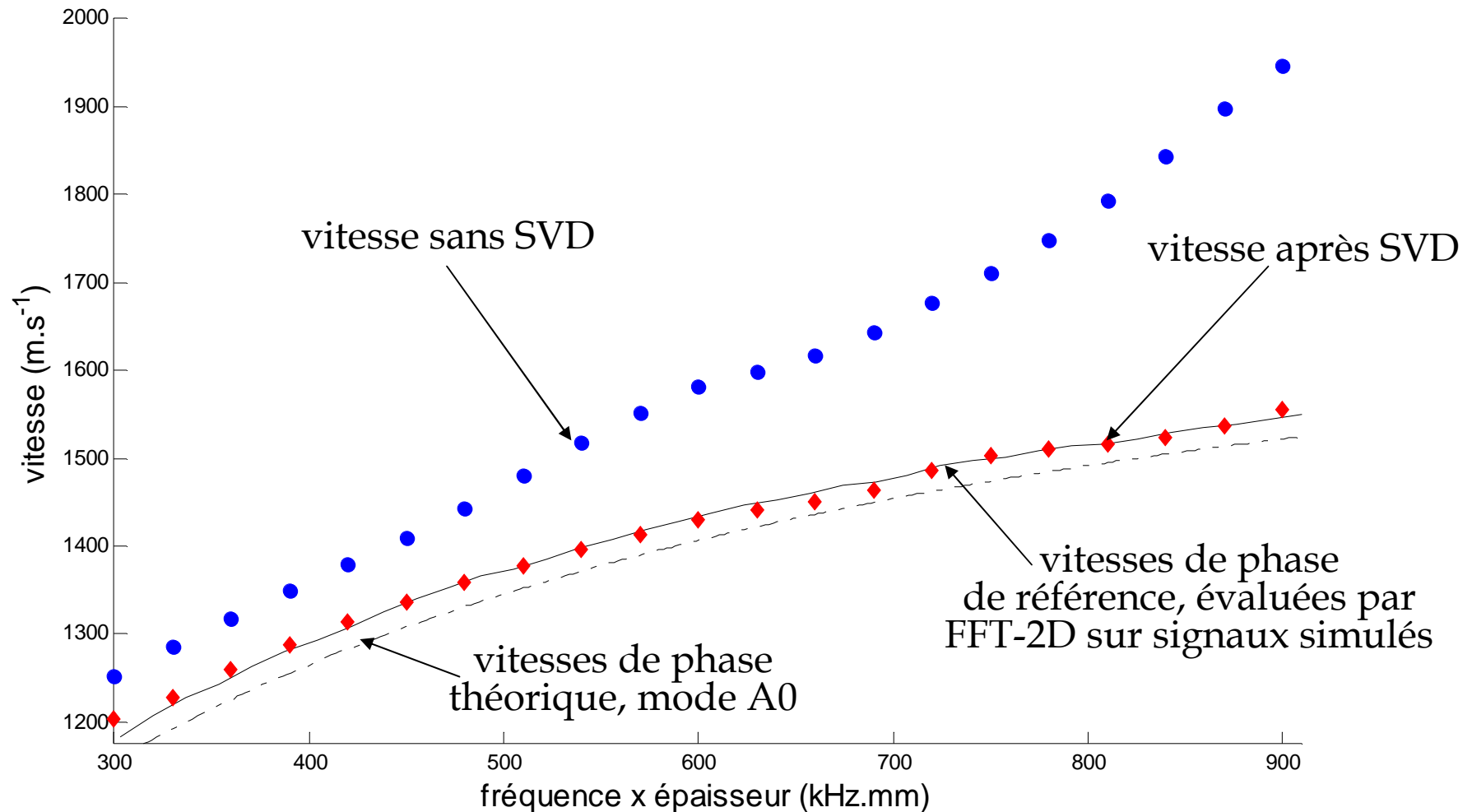
# Configuration des simulations

- ▶ simulations aux différences finies (Simsonic, LIP)
  - $f_e = 300$  kHz, BP = 100%
  - plaques d'épaisseurs  $h$  différentes,  $h \in [1;3]$  mm
  - propriétés isotropes transverses (os cortical)



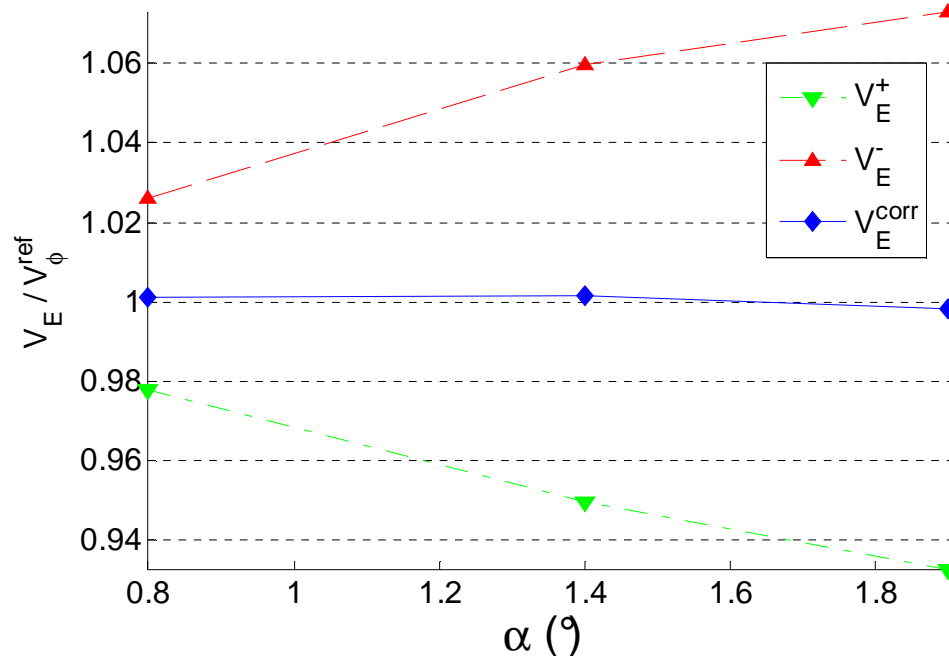
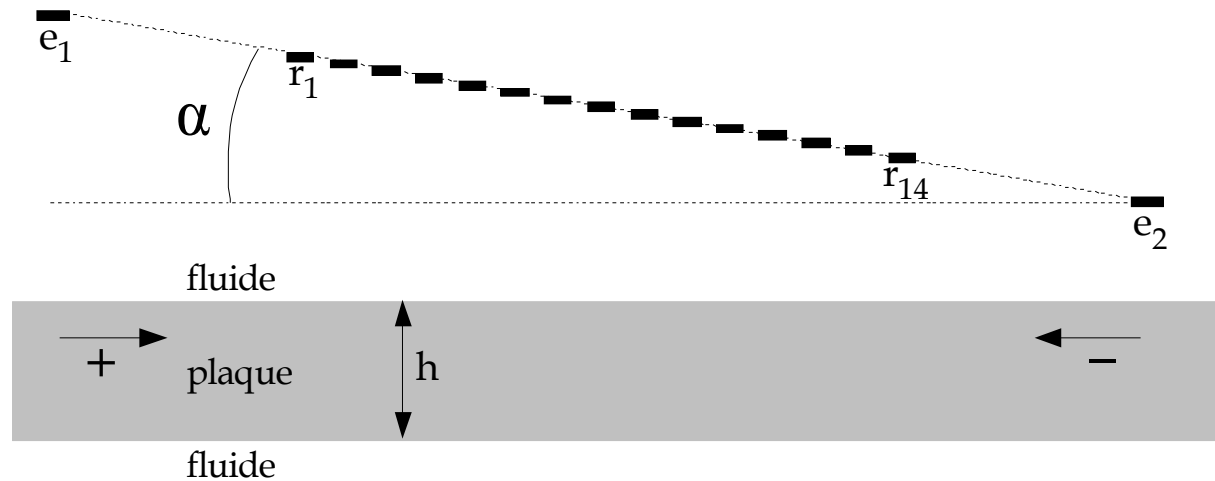


# Vitesse après séparation par SVD



- ▶ vitesse de la contribution énergétique après séparation par SVD :  
⇔ vitesse de phase à la fréquence centrale

# Correction de l'angle de pendage



combinaison des temps de vol dans les 2 sens opposés  
identique à celle pour l'évaluation du FAS

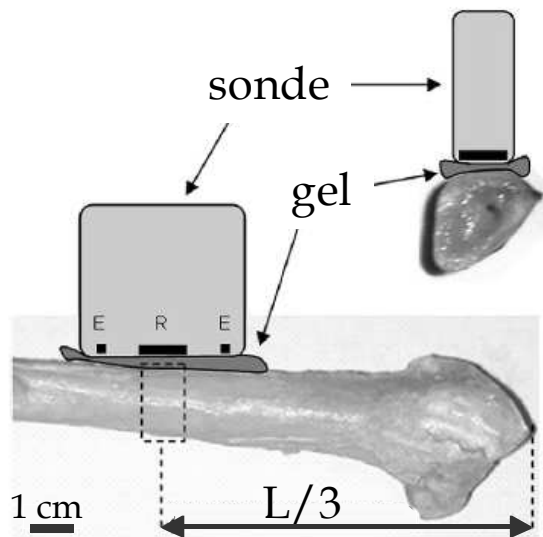
effet dû à l'inclinaison des capteurs par rapport à l'interface **corrigé**

# Analyse de la contribution ELF *in vitro*

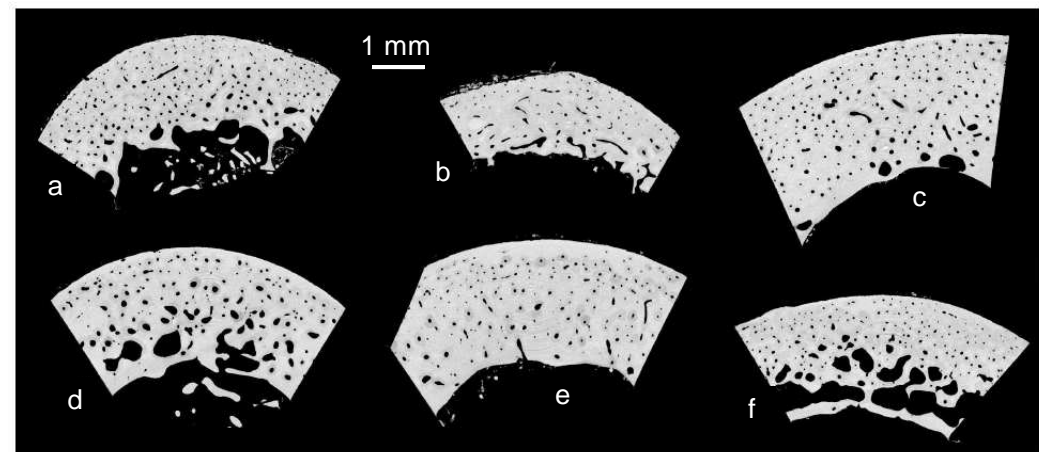
- ▶ 39 radius humains excisés
  - 17 femmes, 22 hommes
  - âge :  $73 \pm 10$  ans
- ▶ thèse Emmanuel Bossy



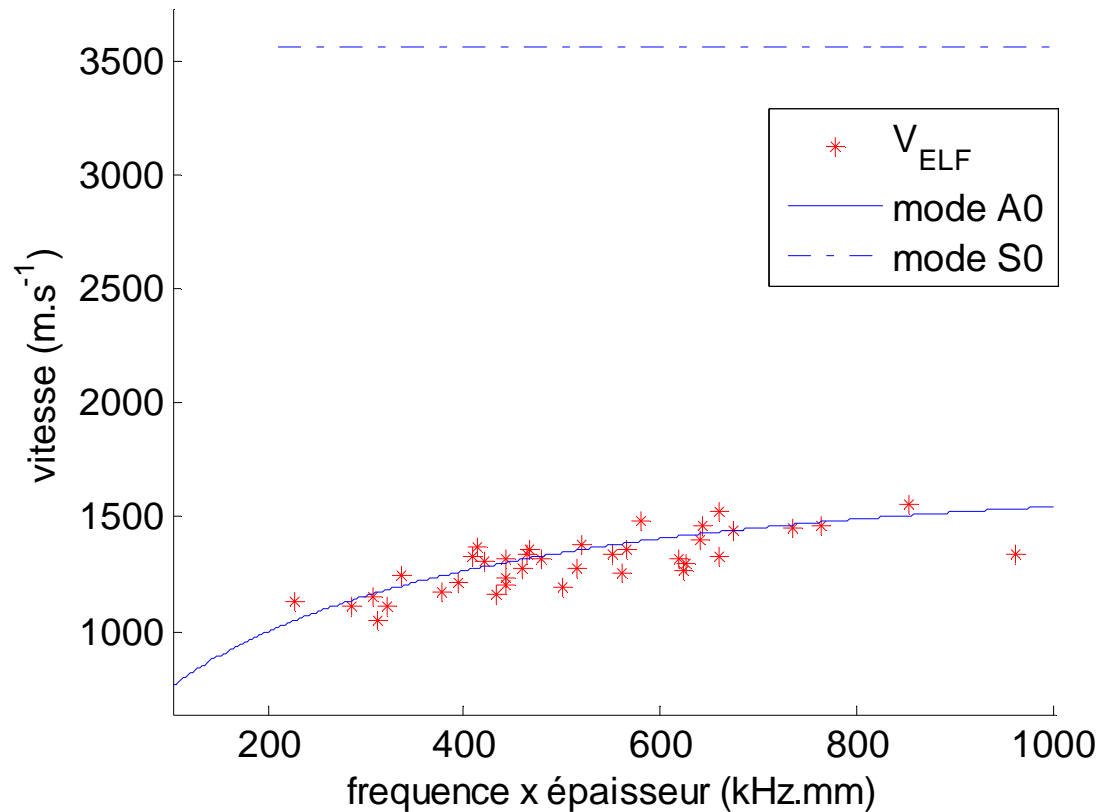
- ▶ acquisitions ultrasonores



- ▶ propriétés (Synchrotron, Grenoble)  
épaisseur, porosité, minéralisation, DMO

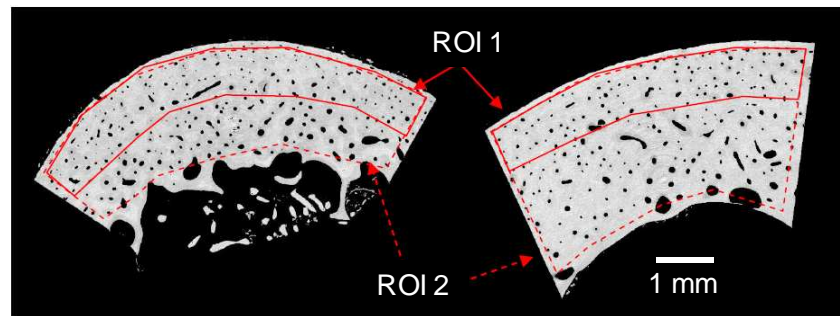


# Comparaison avec un modèle analytique



- contribution ELF  $\Rightarrow$  mode propagé par l'os cortical
- onde guidée de flexion
- similaire à la contribution analysée par un dispositif basse fréquence

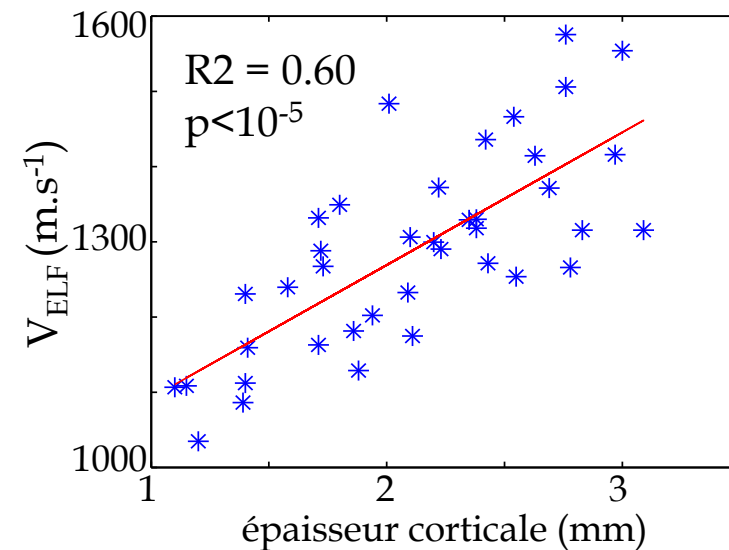
# Dépendance vis-à-vis des propriétés osseuses



ROI 1 → **périostéale**  
ROI 2 → **totale**

propriété	R <sup>2</sup>
épaisseur	0.60*
porosité <sub>per</sub>	0.22***
porosité <sub>tot</sub>	0
DMO <sub>per</sub>	0.34**
DMO <sub>tot</sub>	0.01
minéralisation <sub>per</sub>	0.16***
minéralisation <sub>tot</sub>	0.12***

\*  $p < 10^{-5}$ , \*\*  $p < 10^{-3}$ , \*\*\*  $p < 0.05$



- $V_{ELF}$  significativement dépendante de l'épaisseur corticale  
⇒ facteur déterminant de la résistance osseuse

# Comparaison ELF / FAS

propriété	$R^2 V_{\text{ELF}}$	$R^2 V_{\text{FAS}}$
épaisseur	0.60*	0.13***
porosité <sub>per</sub>	0.22***	0.33***
porosité <sub>tot</sub>	0	0.24***
DMO <sub>per</sub>	0.34**	0.59*
DMO <sub>tot</sub>	0.01	0.35**
minéralisation <sub>per</sub>	0.16***	0.33**
minéralisation <sub>tot</sub>	0.12***	0.19***

\*  $p < 10^{-5}$ , \*\*  $p < 10^{-3}$ , \*\*\*  $p < 0.05$

- ▶ combinaison FAS / ELF
  - propriété osseuses différentes
- ▶ évaluation simultanée :
  - meilleure caractérisation de l'os
  - multimode / multifréquence

# Conclusions partielles

---

- ▶ analyse d'une **autre contribution** que le FAS
- ▶ développement d'une technique de **séparation d'ondes**
  - automatique
  - performances satisfaisantes, évaluées sur signaux synthétiques
- ▶ séparation par SVD :
  - sur une onde dispersive d'amplitude dominante
    - **vitesse de phase** à la fréquence centrale de l'onde
    - **correction de l'angle de pendage**
- ▶ contribution ELF :
  - onde guidée de type **onde de flexion**
  - **pertinente** pour le diagnostic
    - complémentaire au FAS
    - dépendante de l'**épaisseur corticale**

# Conclusion générale

---

- ▶ caractérisation ultrasonore de l'os cortical
  - traitement et analyse du signal ultrasonore
  
- 1. atténuation ultrasonore
  - paramètre pertinent
  - dépendant de la microstructure et des propriétés osseuses
- étude sur de l'os cortical humain
- mesure de l'atténuation en transmission axiale
  
- 2. analyse d'une autre contribution que le FAS
  - pertinente pour la caractérisation de l'os cortical
  - approche multimode / multifréquence
  - intérêt des techniques de traitement du signal
- étude de la contribution ELF *in vivo*
- estimation des paramètres osseux
- analyse de nouvelles contributions



merci de votre attention