



Ondes guidées et os cortical

mesure de vitesses de phase d'**ondes guidées**

M. Cherrad, J. Foiret, J.-G. Minonzio, M. Talmant, et P. Laugier

email : jean-gabriel.minonzio@upmc.fr

ACOUSTIQUE ET MILIEUX BIOLOGIQUES 19 mars 2010

Journée autour de thématiques communes du

Laboratoire d'Imagerie Paramétrique et de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert

Contexte: évaluation ultrasonore de l'os cortical

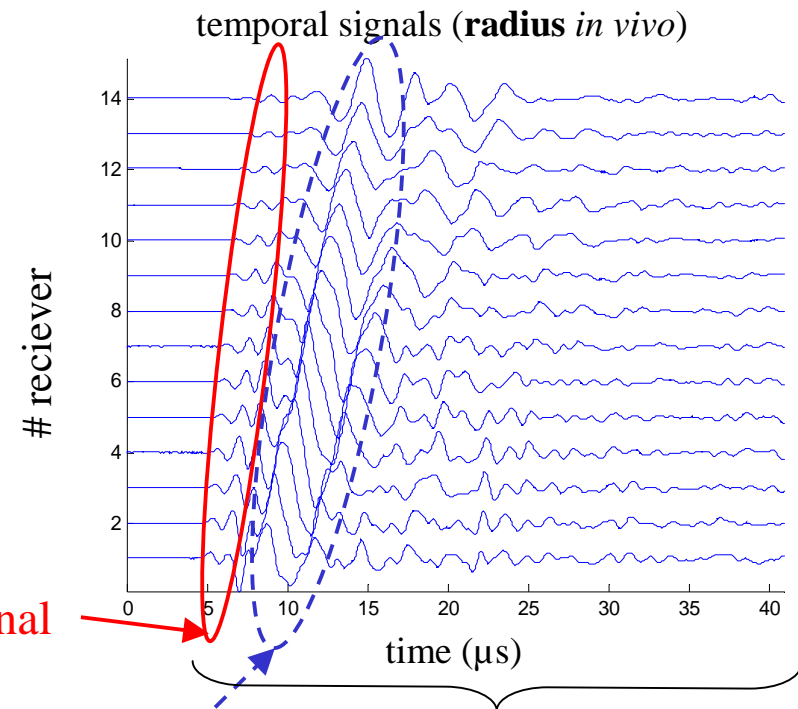
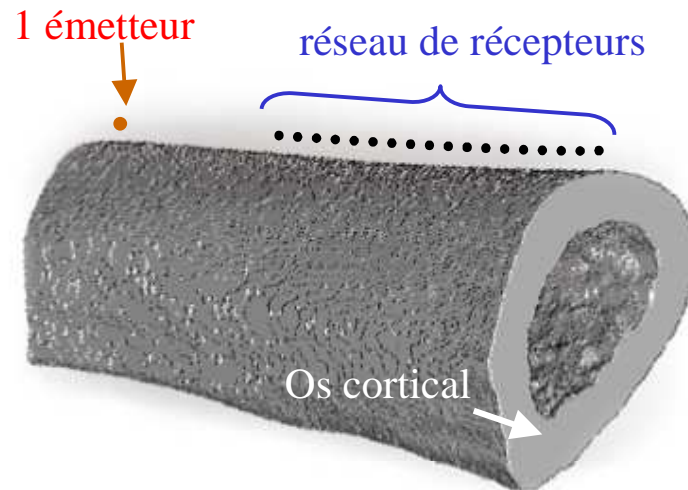
Introduction :

1. déterminer des **paramètres ultrasonores** (vitesses ...)
indicateurs de la **résistance osseuse**
point de vue clinique : évaluation du risque de fracture

2. évaluer des **propriétés géométriques et élastiques**
(épaisseur, porosité ...)
caractérisation multi-paramétrique de l'os

Contexte : ondes guidées dans l'os cortical (mesures temporelles)

transmission axiale (LIP, PhD E. Camus, E. Bossy ...)



FAS : first arriving signal

ELA: energetic late arrival

signaux temporels
associés aux ondes guidées

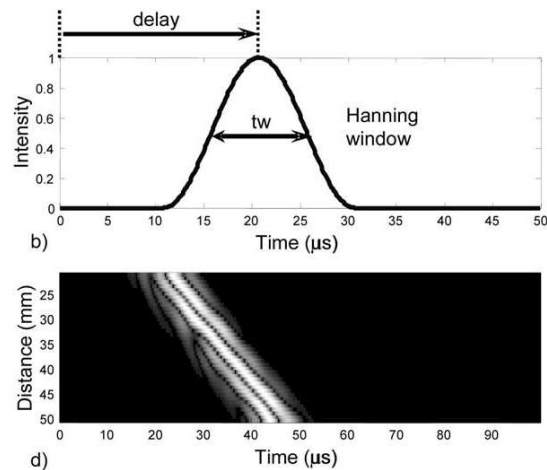
E. Bossy *et al.* "Bidirectional axial transmission ..."

IEEE Trans. UFFC. **51**, 71–79 (2004).

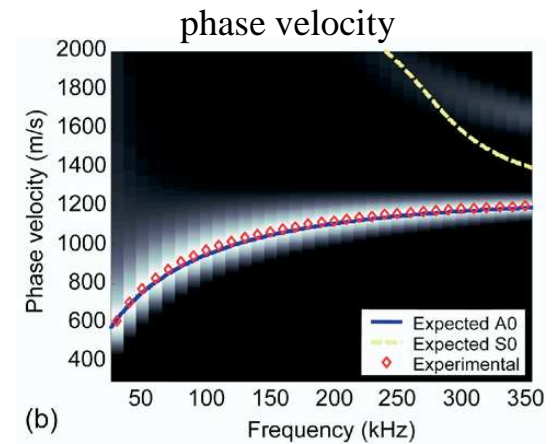
M. Sasso *et al.* "Analysis of the most energetic late arrival ..."

IEEE Trans. UFFC. **56**, 2463-70 (2009).

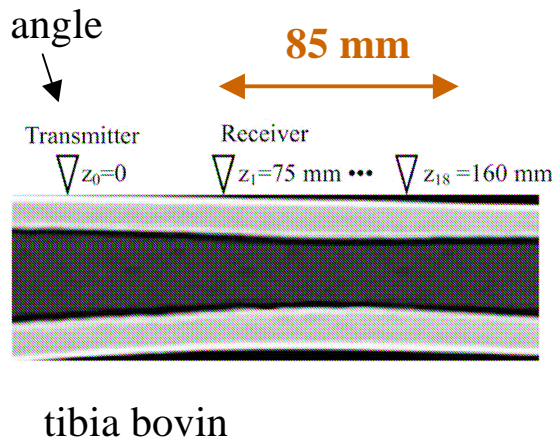
Contexte : ondes guidées dans l'os cortical



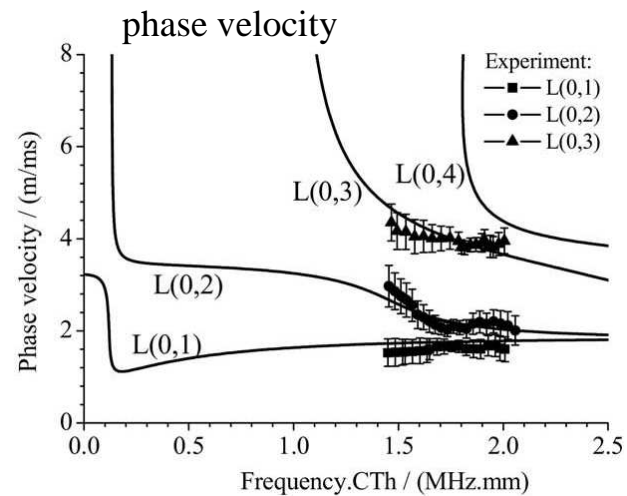
transformée
Fourier 2D



P. Moilanen *et al.* "Measuring guided waves in long bones..." *Ultrasound in Med. and Bio.* **32**, 709–719 (2006).



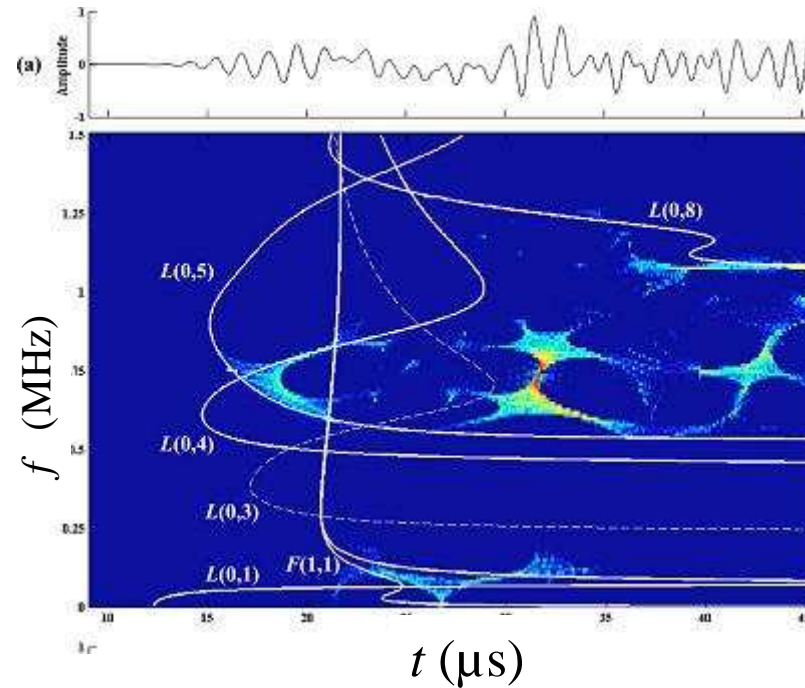
spectrum method



D. Ta *et al.* "Measurement of the dispersion and attenuation ..." *Ultrasound in Med. and Bio.* **35**, 641–652 (2009).

Contexte : ondes guidées dans l'os cortical (temps-fréquence)

1 émetteur
1 récepteur



analyse
temps-fréquence

Exp : tibia de mouton

Th : mode de plaque (Lamb), éléments finis 3D

V. C. Protopappas ... "Guided ultrasound wave propagation in intact and healing long bones," *UMB* **32**, 693-708 (2006).

V. C. Protopappas ... "Three-dimensional finite element modeling ..." *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 3907-3921 (2007).

**Contexte : mesure clinique de l'os cortical,
sonde EVA (anr tec-san)**



Contexte : ondes guidées dans l'os cortical

objectif: analyser l'ensemble du signal (multi-émetteurs, multi-récepteurs)
sans connaissance a priori
méthode adaptable (seuils)

outil: étude dans le domaine de Fourier space (k, f)
⇒ mesurer des vitesses de phases d'ondes guidées dans l'os cortical
⇒ mesurer la relation de dispersion expérimentale $f = f(k)$

Principe de la nouvelle méthode

Exemple sur plaque de cuivre
comparaison avec la transformée de Fourier 2D

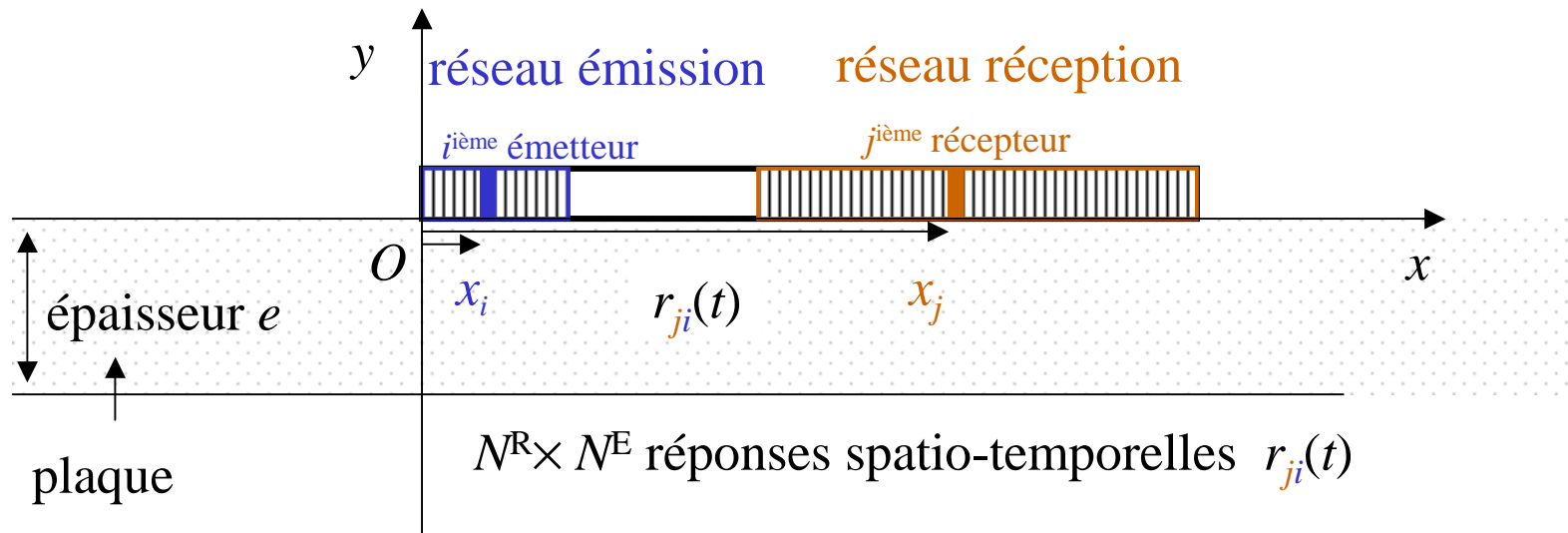
Milieu anisotrope ?

Correction des tissus mous : correction bi-directionnelle

Mesure *in vitro* sur radius

Conclusion

Principe de la méthode : analyse de la matrice de réponse



1. Acquisition des réponses $r_{ji}(t)$
2. Transformée de Fourier temporelle $R_{ji}(f)$ (matrice réponse)
3. Décomposition en Valeurs Singulières (SVD)
4. **Séparation signal / bruit** (en utilisant les valeurs singulières)
5. **Nouvelle image** dans le plan (k, f) (en utilisant les vecteurs singuliers)

Principe de la méthode : analyse de la matrice de réponse

une **matrice réponse** $\mathbf{R}(f)$ par fréquence f , de dimension $N^R \times N^E$

La décomposition en valeurs singulières (SVD) s'écrit

nombre d'émetteurs

$$\mathbf{R}(f) = \sum_{n=1}^{N^E} \mathbf{U}_n(x^R, f) \sigma_n(f) {}^t \mathbf{V}_n^*(x^E, f)$$

vecteurs singuliers : \mathbf{U}_n réception / \mathbf{V}_n émission

valeurs singulières $\sigma_n(f)$: classification en « niveau d'énergie »

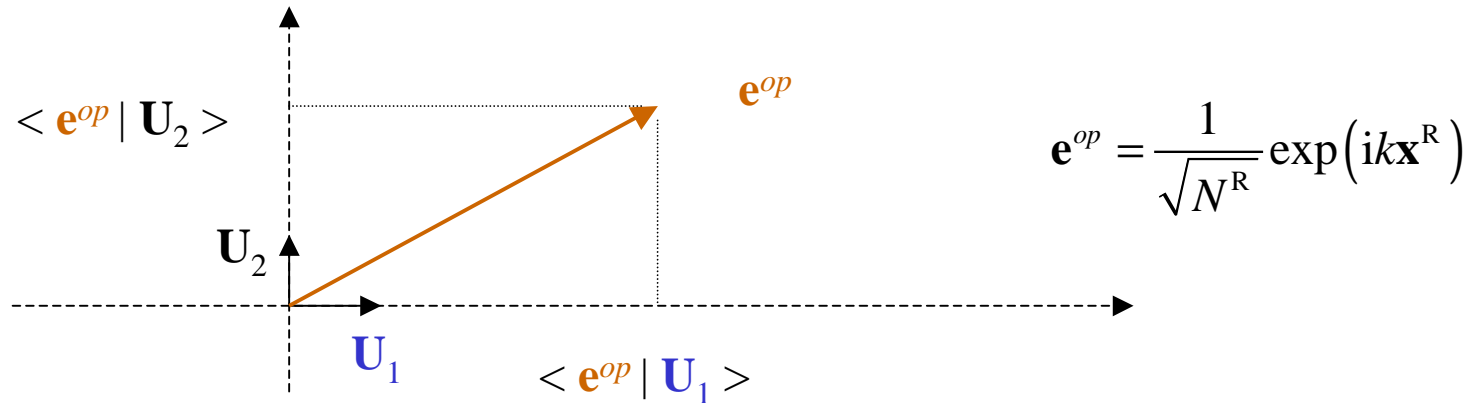
$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \dots t_1 \dots > \sigma_{N^E}$$

si $\sigma_n(f) > \text{seuil } t_1$
 \mathbf{U}_n associé avec le **signal** (conservé)

si $\sigma_n(f) < \text{seuil } t_1$
 \mathbf{U}_n associé avec le **bruit** (éliminé)

Principe de la méthode : image dans le plan (k, f)

Les vecteurs singuliers (en réception) \mathbf{U}_n forment une **base orthogonale** des signaux reçus
projection d'une **onde plane spatiale** \mathbf{e}^{op} (de vecteur d'onde k réel pour une fréquence fixée f)



$$\mathbf{e}^{op} = \sum_{n \text{ conservé}} \langle \mathbf{e}^{op} | \mathbf{U}_n \rangle \mathbf{U}_n + \sum_{n \text{ éliminé}} \langle \mathbf{e}^{op} | \mathbf{U}_n \rangle \mathbf{U}_n$$

$$Norm(k, f) = \sum_{n \text{ conservé}} \left| \langle \mathbf{e}^{op} | \mathbf{U}_n \rangle \right|^2$$

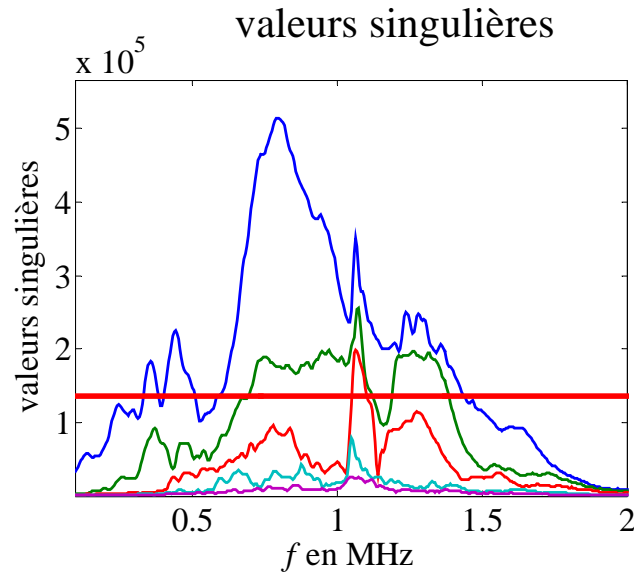
nouvelle image dans le plan (k, f)

$$0 < Norm(k, f) < 1$$

si $\max[Norm(k, f)] > \text{seuil } t_2$

le signal reçu contient l'onde guidée de fréquence spatiale $k(f)$

Image dans le plan (k, f) , exemple



si $\sigma_n(f) > \text{seuil } t_1$
Un associé avec le **signal** (conservé)

si $\sigma_n(f) < \text{seuil } t_1$
Un associé avec le **bruit** (éliminé)

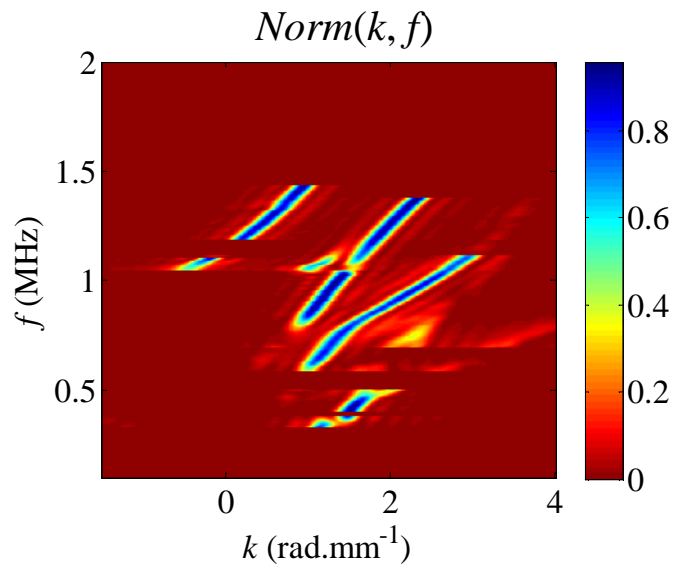
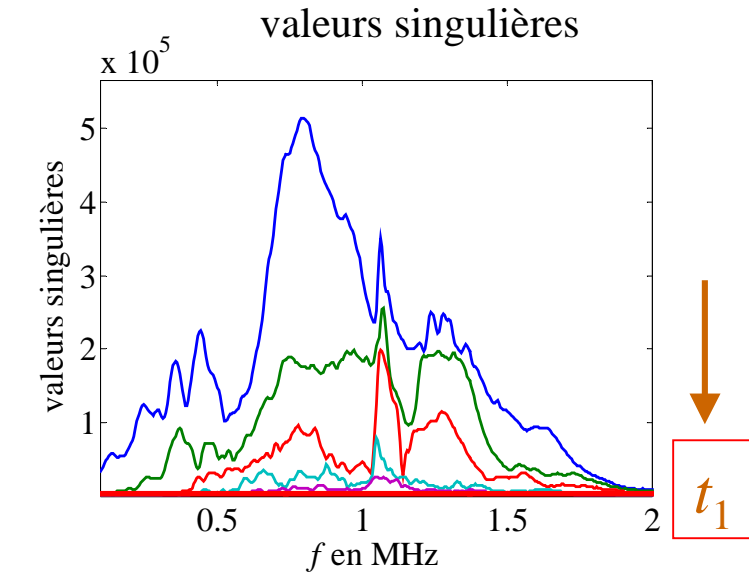


image dans le plan (k, f)

$$Norm(k, f) = \sum_{n \text{ kept}} \left| \langle \mathbf{e}^{pw} | \mathbf{U}_n \rangle \right|^2$$

Image dans le plan (k, f) , exemple



si $\sigma_n(f) > \text{seuil } t_1$
Un associé avec le **signal** (conservé)

si $\sigma_n(f) < \text{seuil } t_1$
Un associé avec le **bruit** (éliminé)

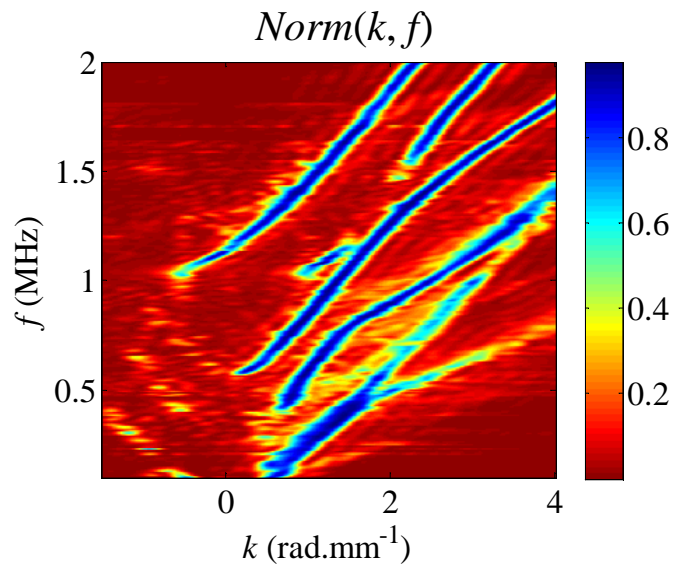


Image dans le plan (k, f) , exemple

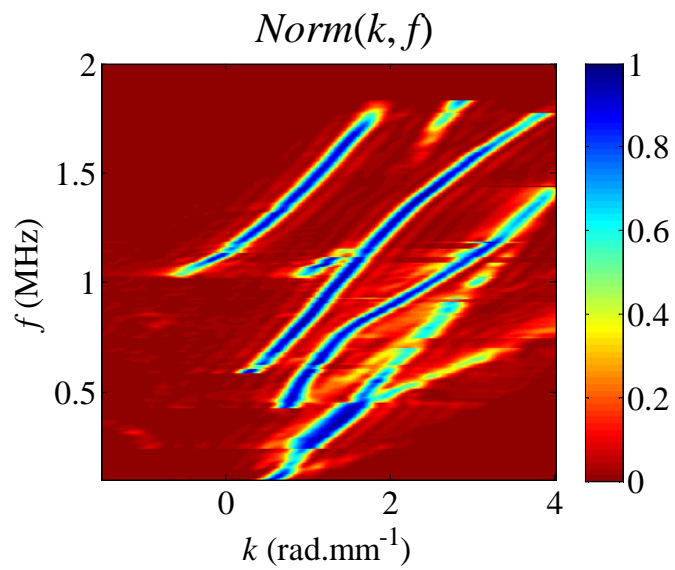
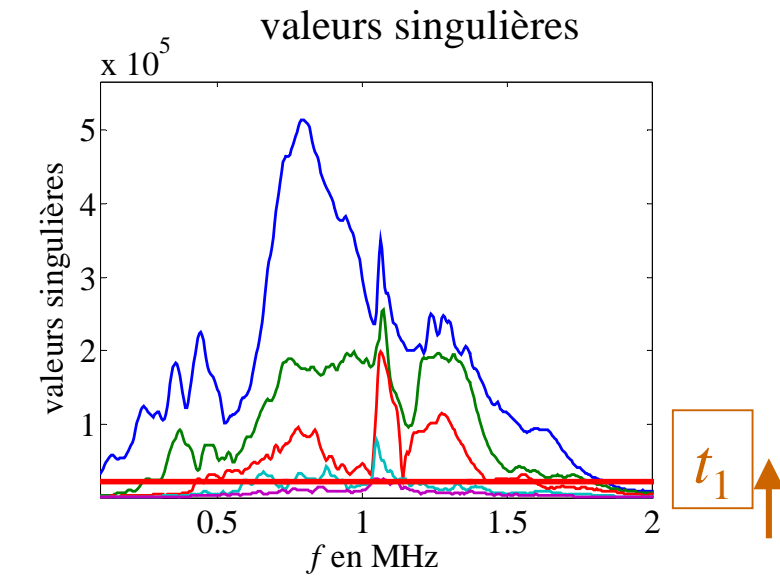
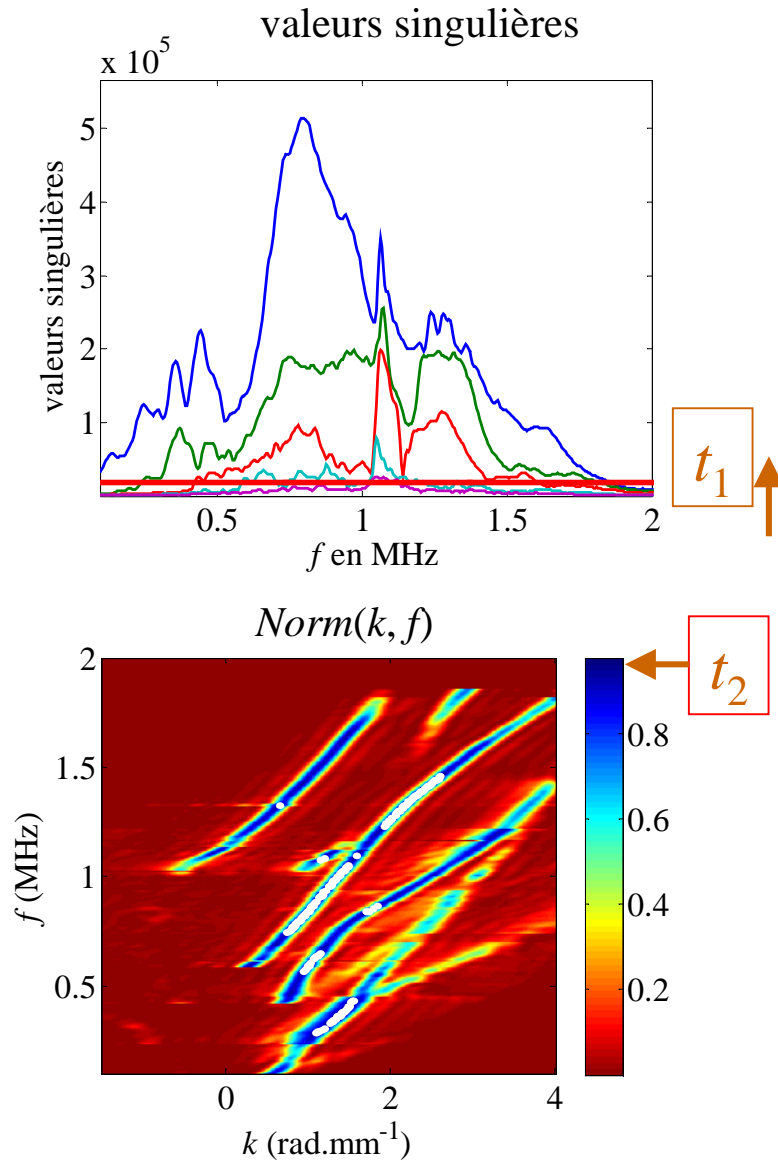


Image dans le plan (k, f) , exemple



second seuil t_2 ($0 < t_2 < 1$)

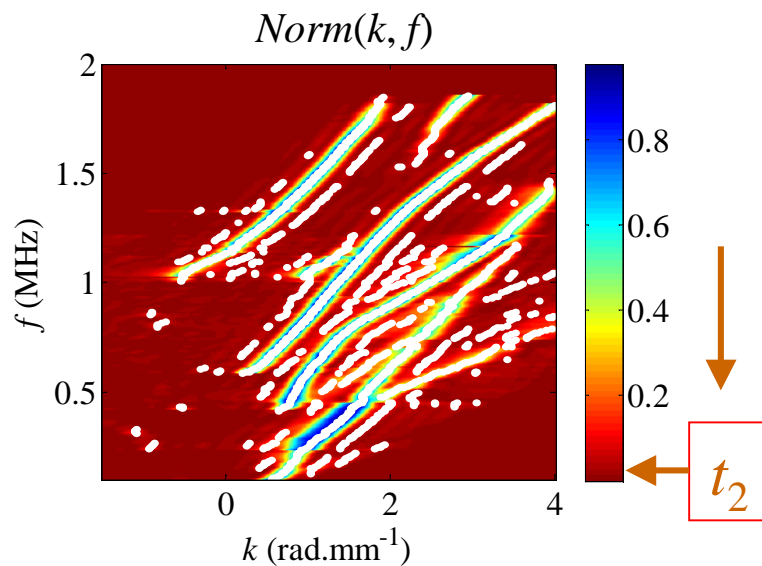
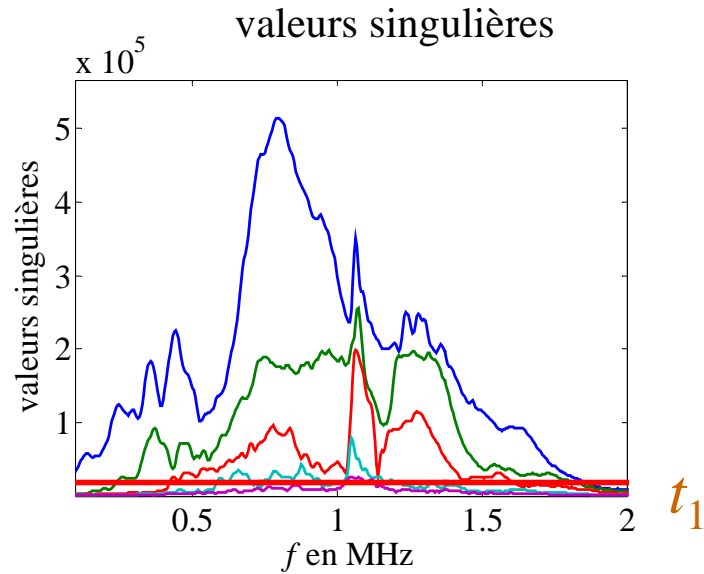
$im(k, f) > t_2$

mode guidé présent

$im(k, f) < t_2$

pas de mode guidé

Image dans le plan (k, f) , exemple

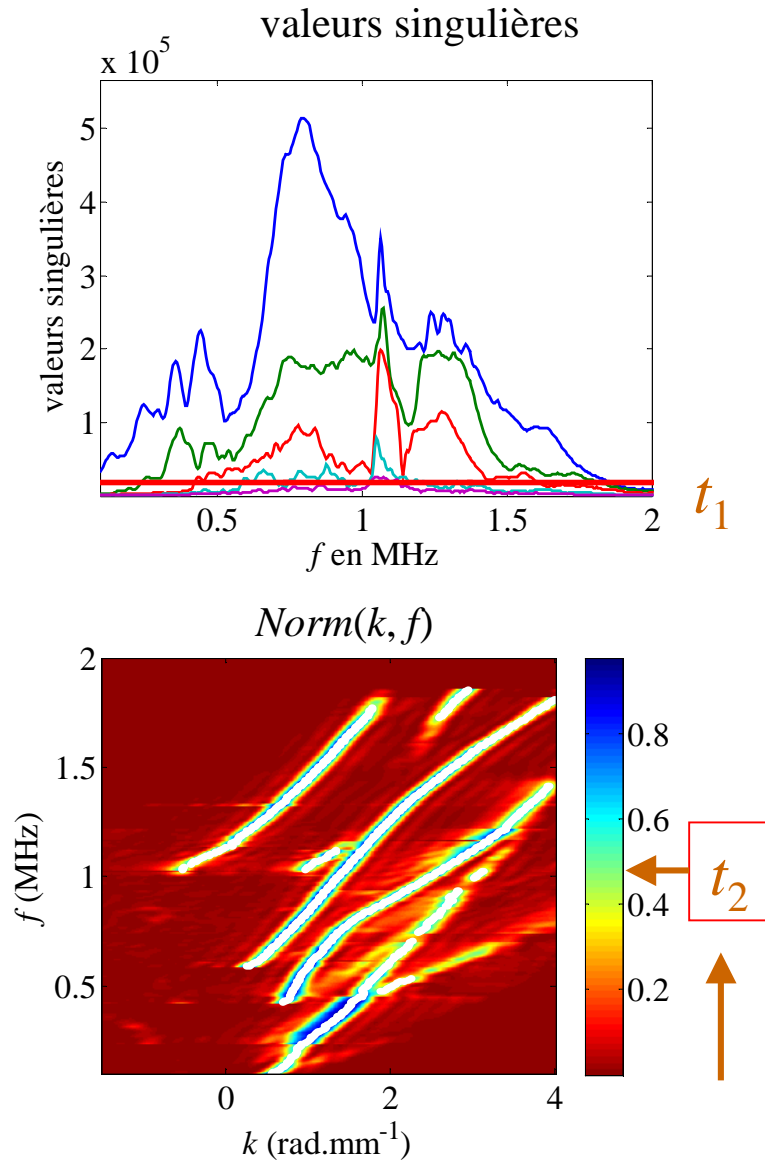


second seuil t_2 ($0 < t_2 < 1$)

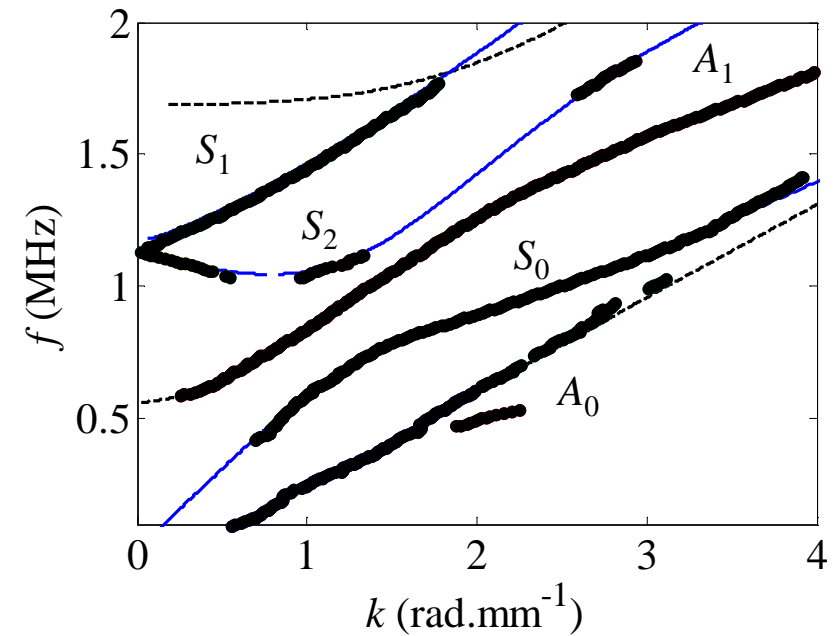
$Norm(k, f) > t_2$ mode guidé présent

$Norm(k, f) < t_2$ pas de mode guidé

Image dans le plan (k, f) , exemple

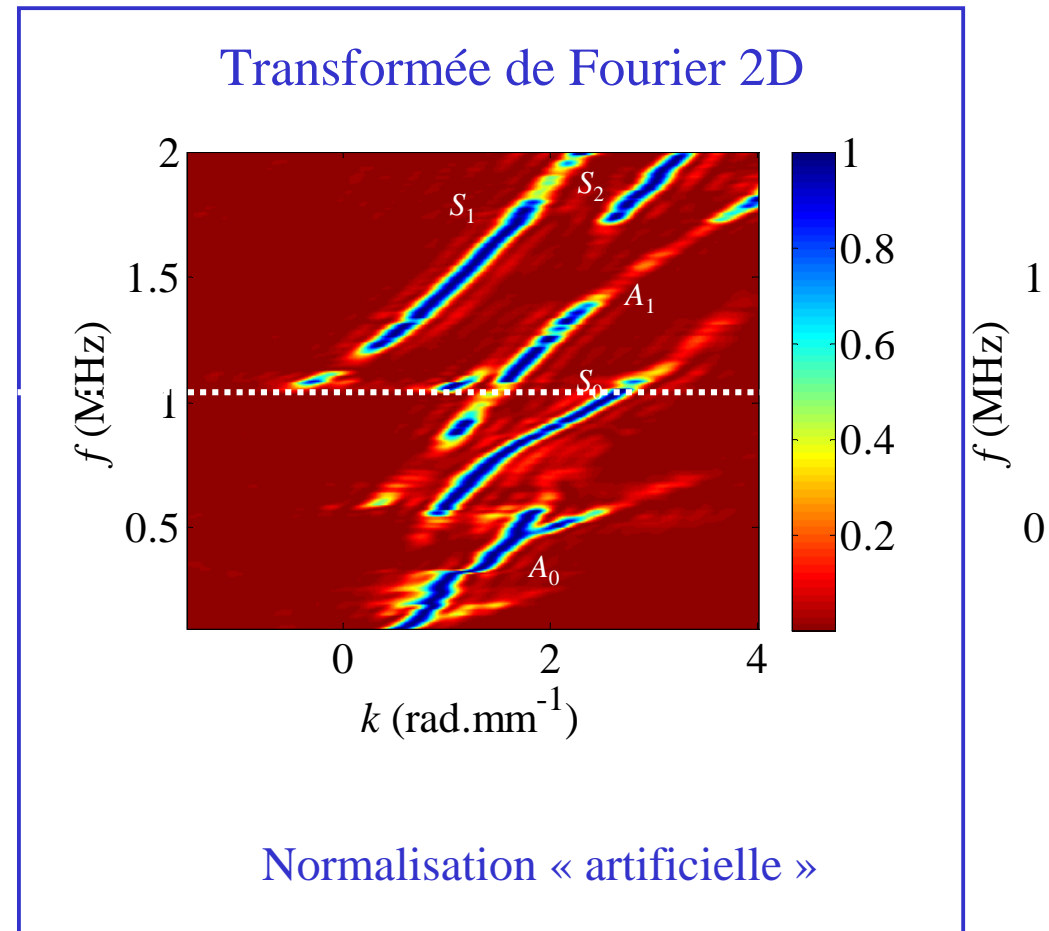
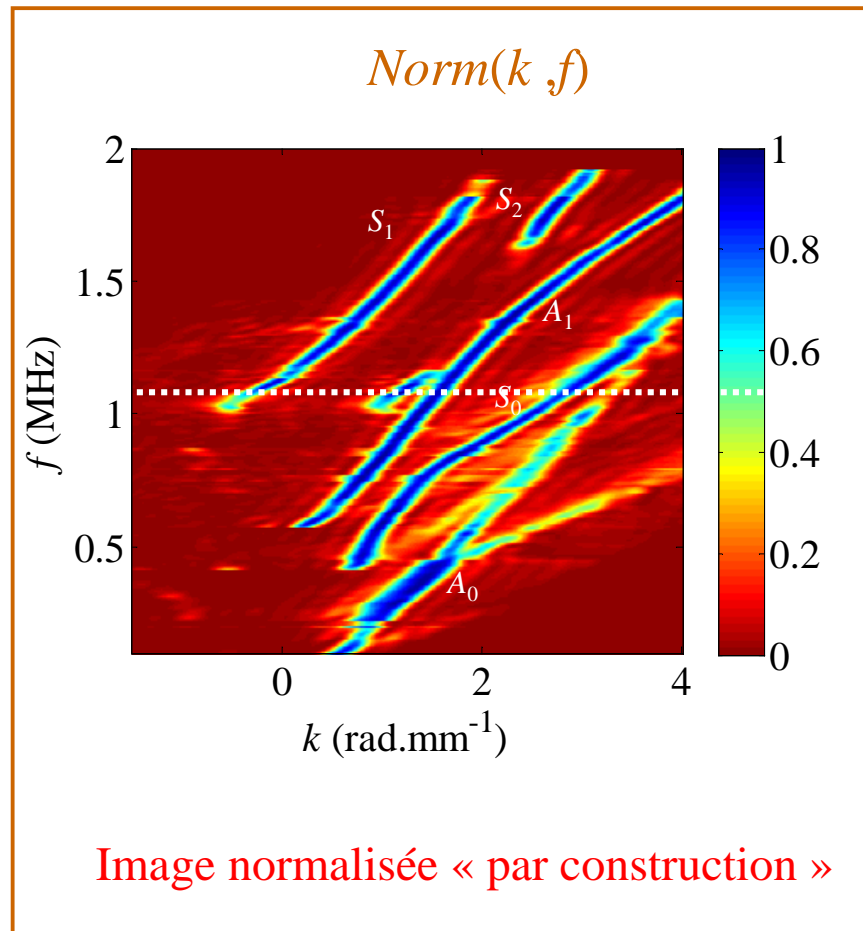


courbe de dispersion expérimentale



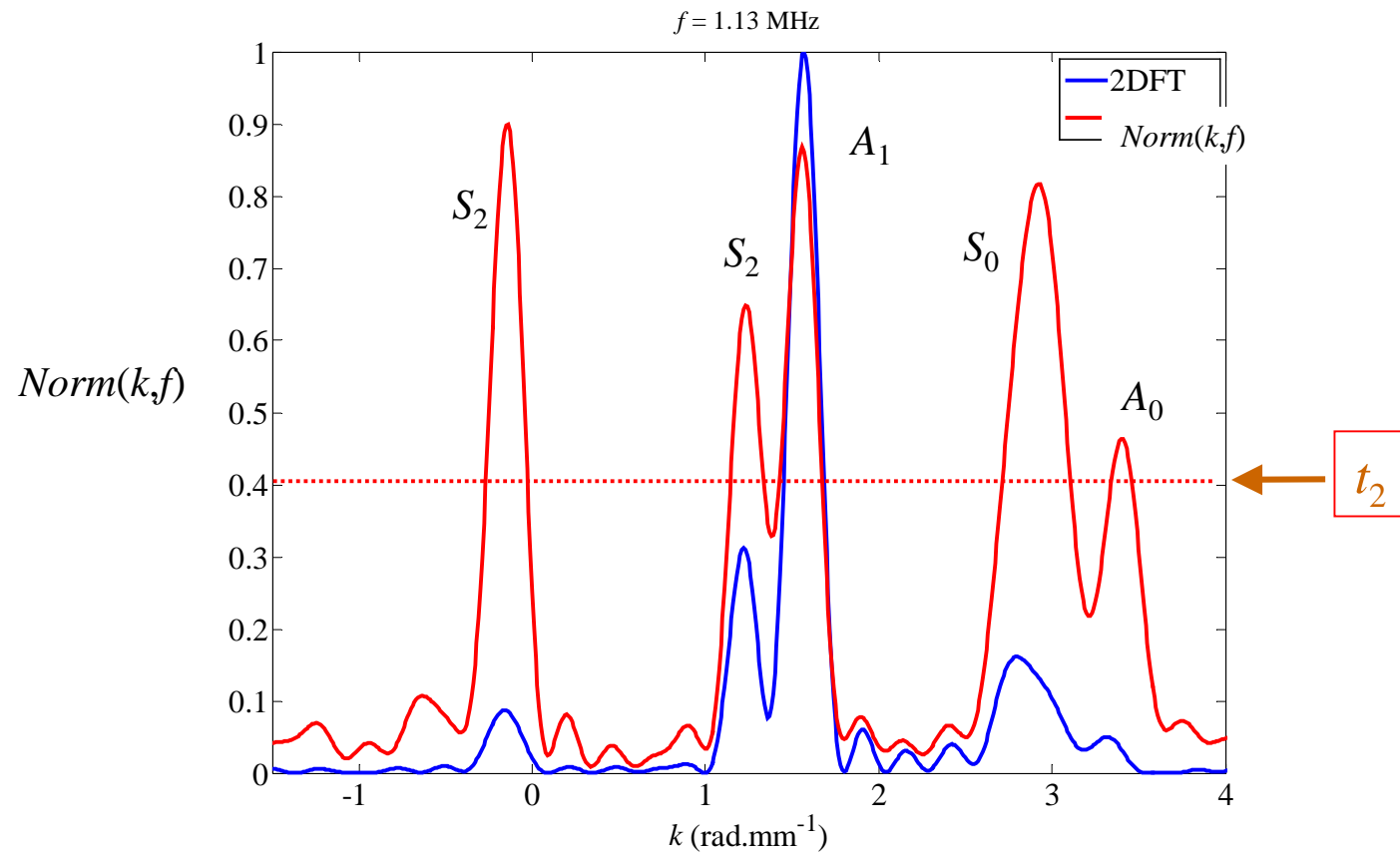
Validation : comparaison avec la transformée de Fourier 2D

seuil 2



+ de vitesses mesurées
et mieux évaluées (meilleur contraste / dynamique des modes)

Validation : comparaison avec la transformée de Fourier 2D



+ de vitesses mesurées
et mieux évaluées (meilleur contraste / dynamique des modes)

Contexte : mesure clinique de l'os cortical

Milieu anisotrope ?

milieu anisotrope : ex. le bois

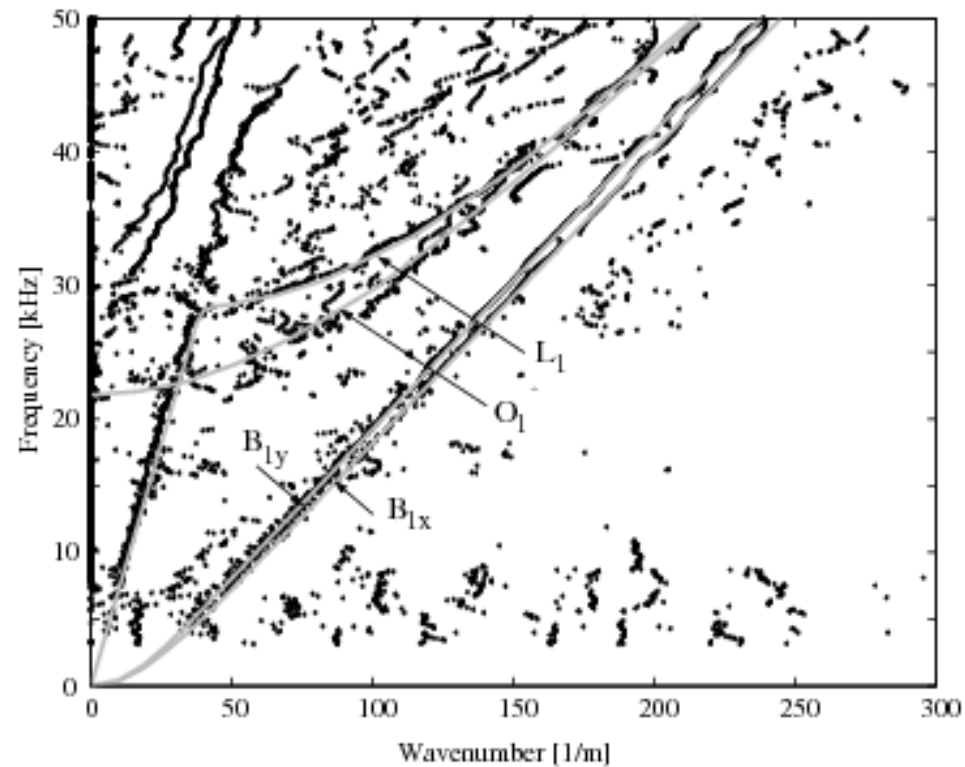
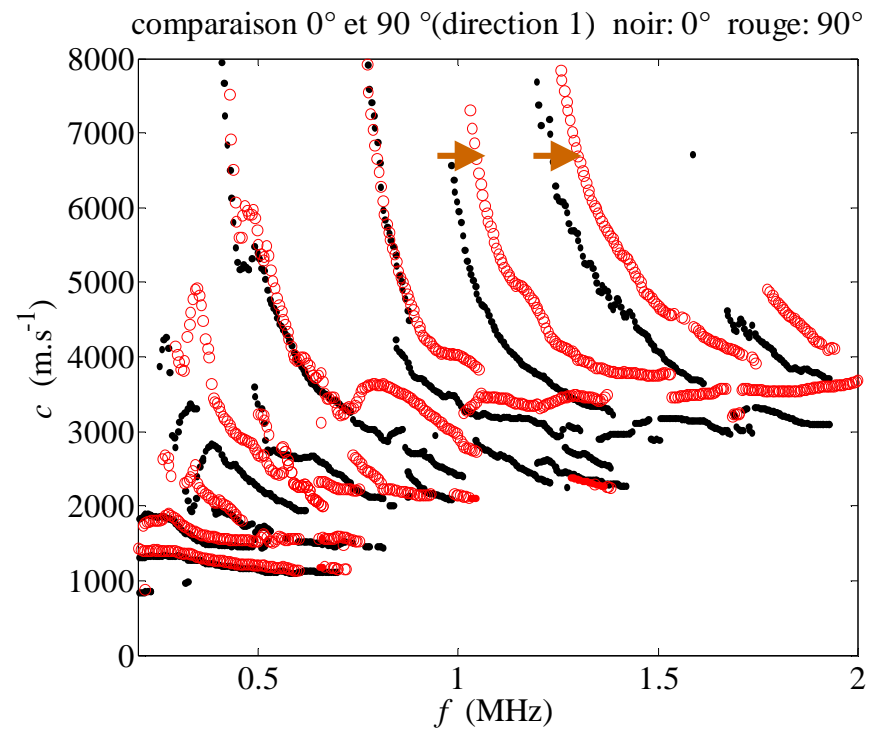
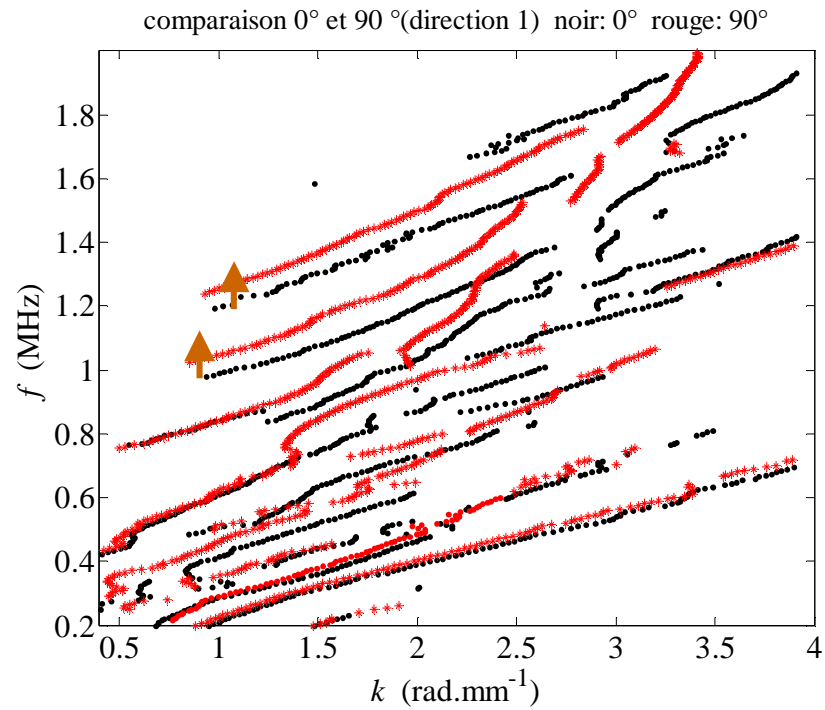
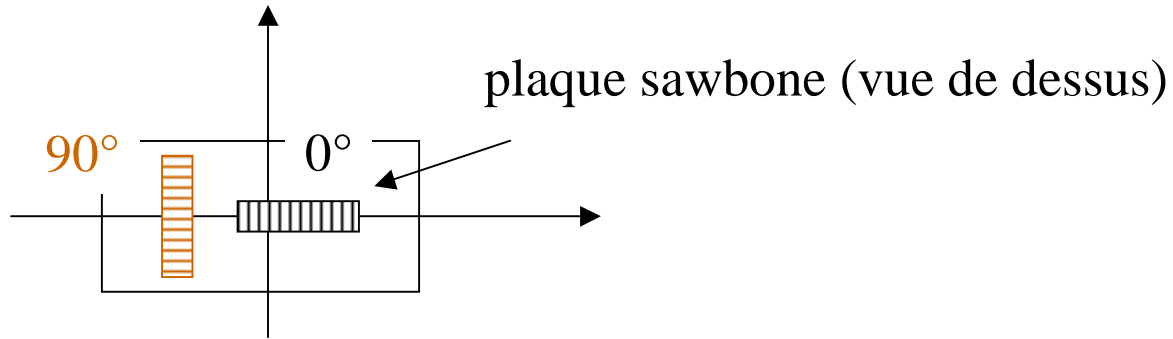


Fig. 7. Measured and calculated dispersion curves.

piezo , laser, linear prediction method

A. Veres and M. B. Sayir, "Wave propagation in a wooden bar," *Ultrasonics* 42(1-9), 495-499 (2004).



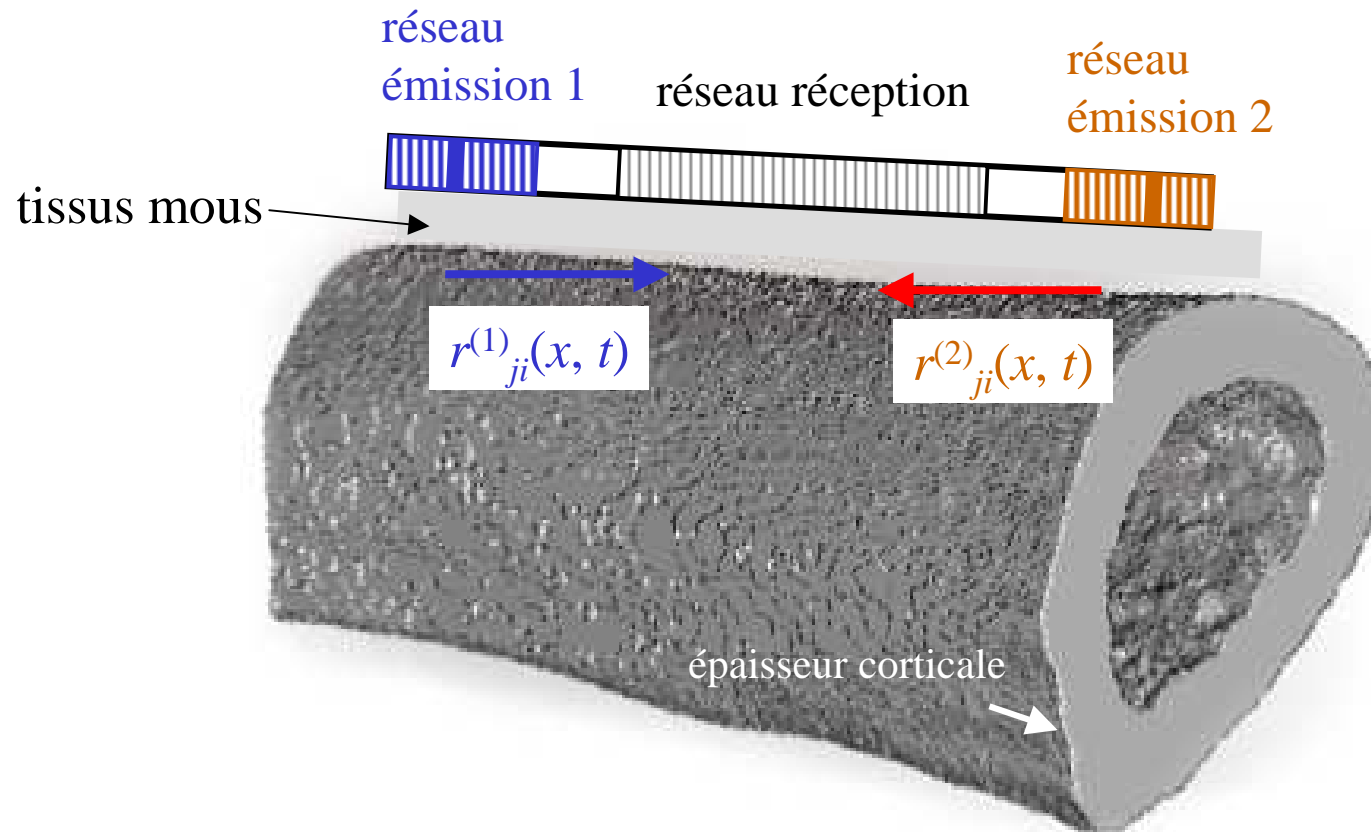
Contexte : mesure clinique de l'os cortical

Corrections des tissus mous ?

**Contexte : mesure clinique de l'os cortical,
sonde EVA (anr tec-san)**



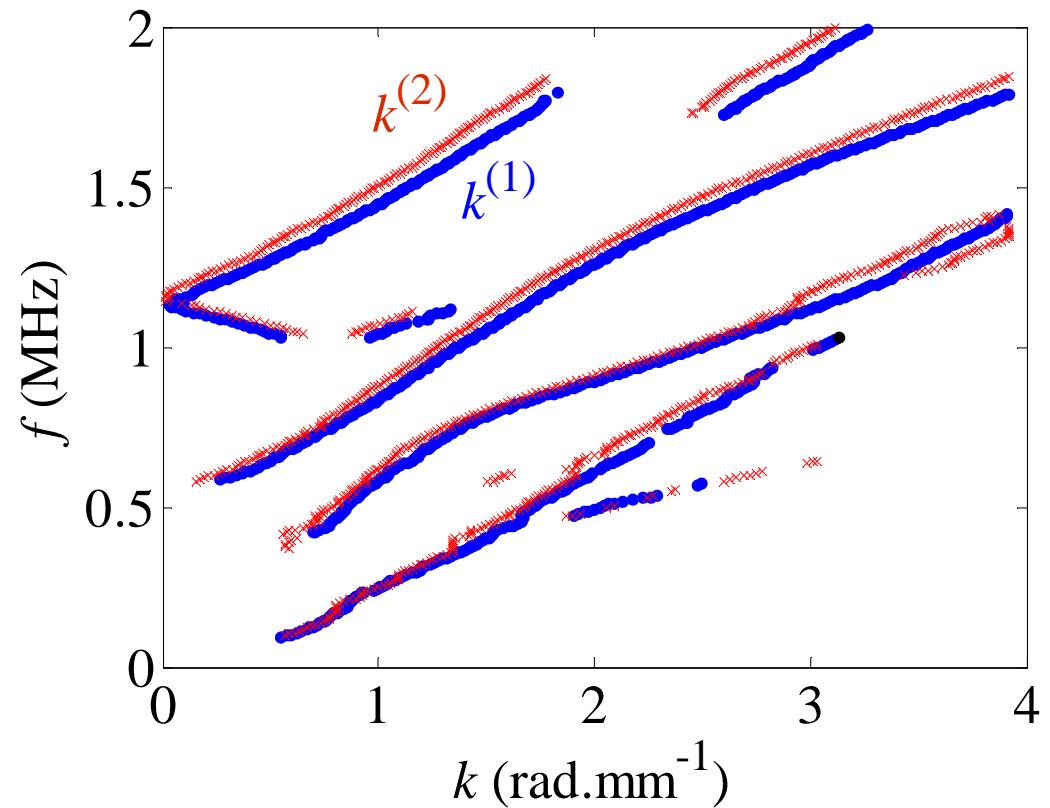
Contexte : mesure clinique de l'os cortical, correction bi-directionnelle



$2 \times N^R \times N^E$ réponses spatio-temporelles
→ analyse des 2 matrices de réponses $\mathbf{R}^{(1)}$ et $\mathbf{R}^{(2)}$

Contexte : mesure clinique de l'os cortical, correction bi-directionnelle

exemple : sonde EVA
fréquence centrale 1 MHz
2×5 émetteurs / 32 récepteurs
angle interne $\approx 0,4^\circ$



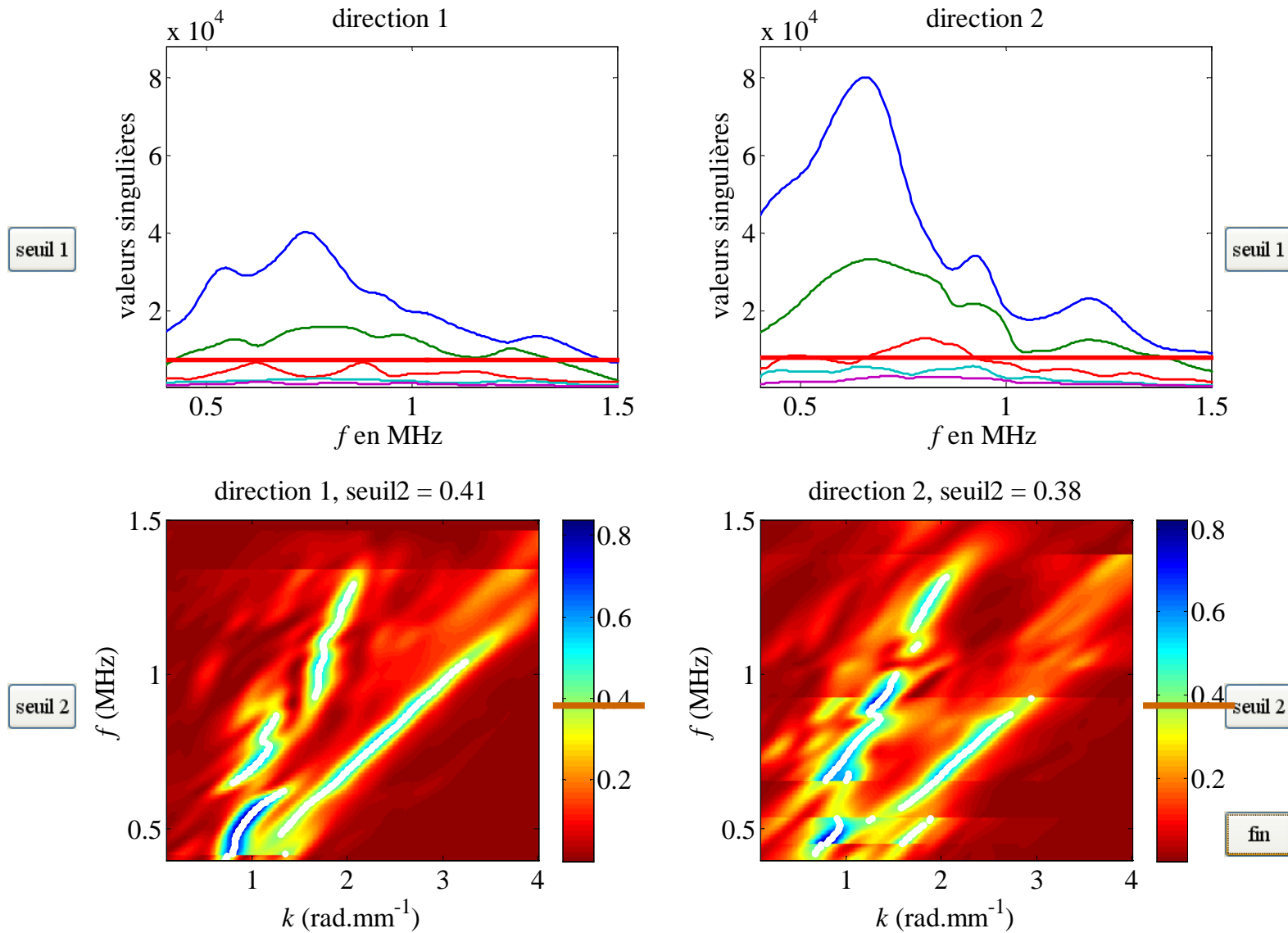
correction bi-directionnelle :
corrige de la variation d'épaisseur des tissus mous
(Bossy *et al.* IEEE UFFC 2004)

$$k^{\text{bidir}} = \frac{1}{2} (k^{(1)} + k^{(2)})$$

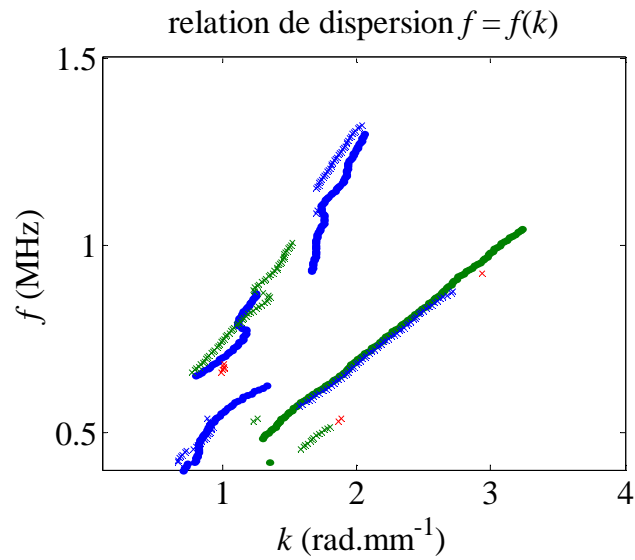
Contexte : mesure clinique de l'os cortical

mesure *in vitro* sur le radius?

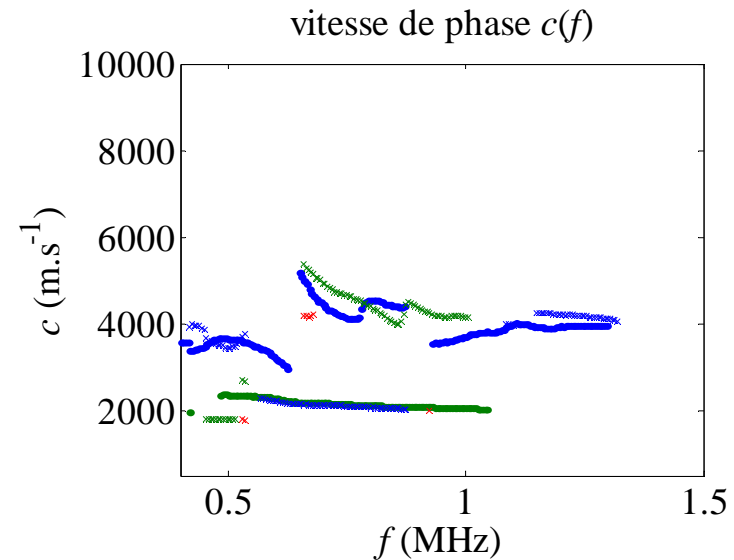
Contexte : mesure clinique de l'os cortical, radius



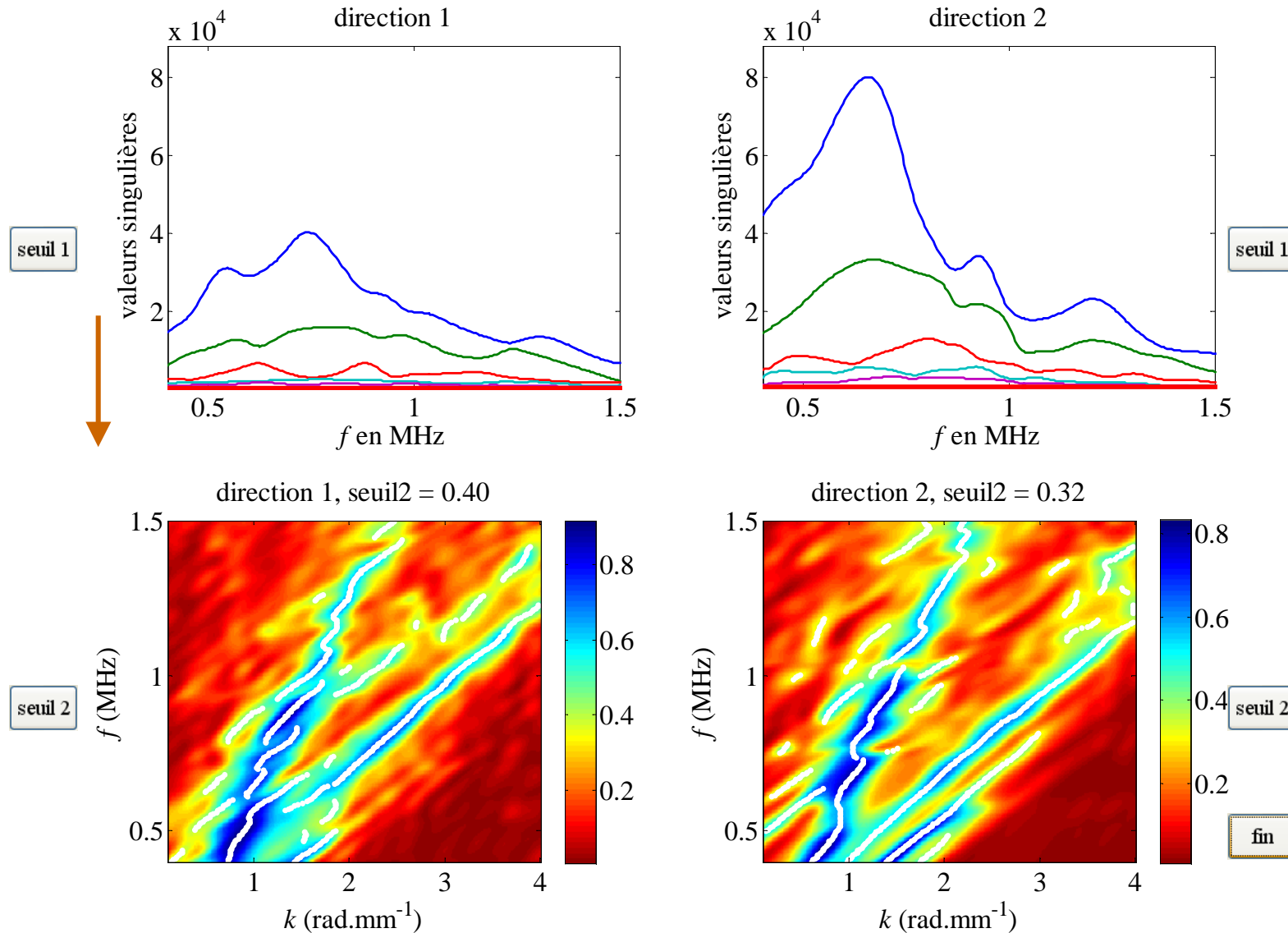
Contexte : mesure clinique de l'os cortical, radius



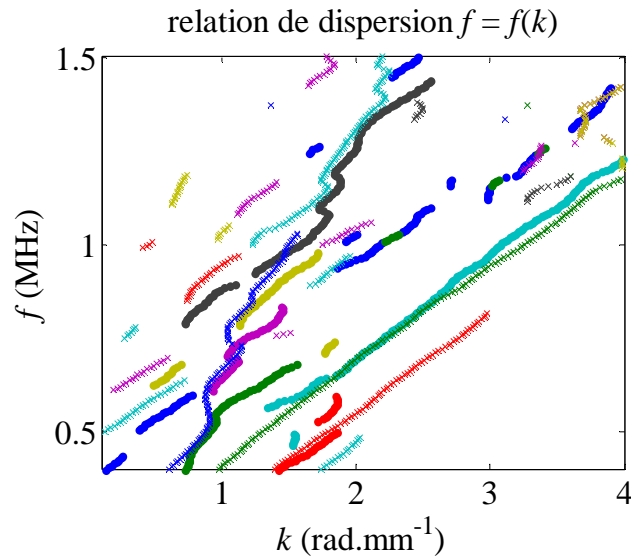
2 vitesses
 $\sim 4000 \text{ m.s}^{-1}$ et 2000 m.s^{-1}



Contexte : mesure clinique de l'os cortical, radius

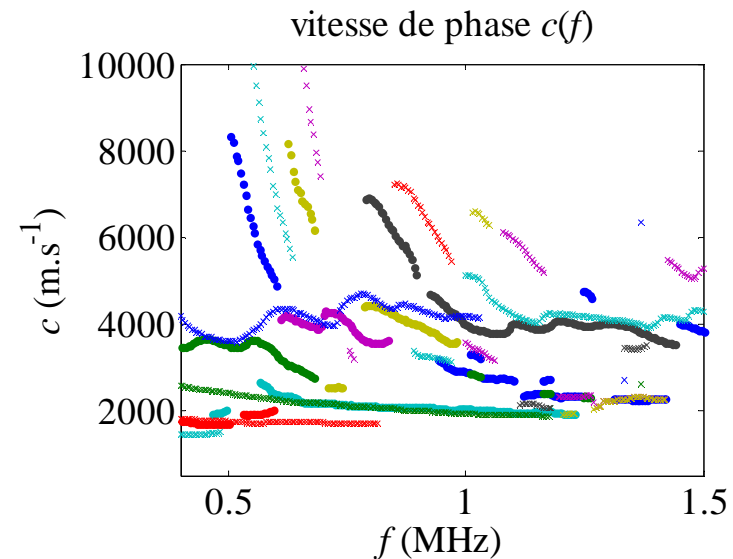


Contexte : mesure clinique de l'os cortical, radius



2 vitesses
~ 4000 m.s⁻¹ et 2000 m.s⁻¹

+ branches ??



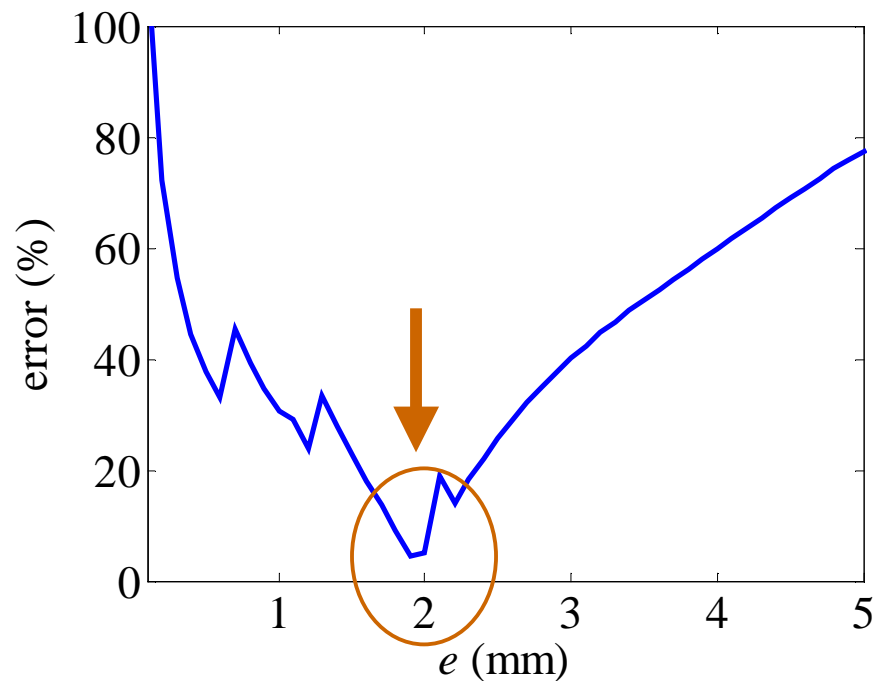
Perspectives : évaluation multi-paramètre et caractérisation de l'os cortical

détermination des différents paramètres
comparaison théorie / expériences

exemple : plaque de cuivre 2 mm (EVA)
détermination de e (c_L et c_T connues)

recherche du minimum de l'écart
entre k^{bidir} et k^{th}

$$\text{erreur} = 100 \sum_{n=1}^{N^{\text{mode}}} \frac{\|k_n^{\text{bidir}} - k_n^{\text{th}}\|_f}{\|k_n^{\text{th}}\|_f}$$



Perspectives : évaluation multi-paramètre et caractérisation de l'os cortical

conclusion : k^{exp}

- mesure des ondes guidées dans le plan (k, f)
 - multi-paramètre
- analyse des signaux multi-émetteurs, multi-récepteurs
- méthode sans a priori et adaptable (utilisations de seuil
- correction des tissus mous

perspectives : k^{th} géométrie irrégulière
milieu anisotrope
atténuation

⇒ recherche minimum écart exp. / théorie