



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Evaluation ultrasonore de l'os cortical par transmission axiale : modélisation et expérimentation *in vitro* et *in vivo*.

Emmanuel Bossy

Laboratoire d'Imagerie Paramétrique, CNRS-UMR 7623

Plan de l'exposé :

Contexte

Os et ostéoporose.

Transmission axiale. Etat de l'art.

Modélisation

Nature de l'onde détectée.

Sensibilité des mesure de vitesse.

Expérimentations

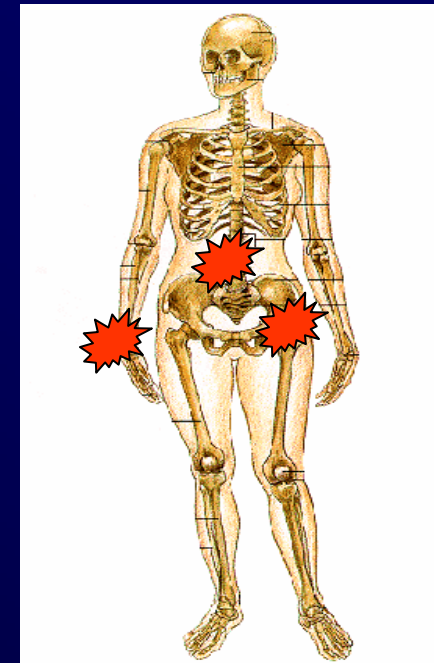
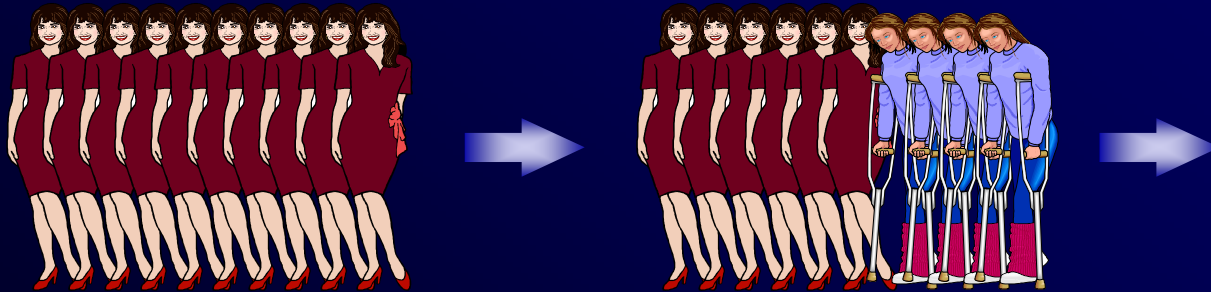
Dispositif expérimental.

Etudes *in vitro* et *in vivo*.

Conclusion et perspectives

Contexte. L'ostéoporose : un problème de santé publique.

Maladie du métabolisme osseux la plus fréquente chez les femmes



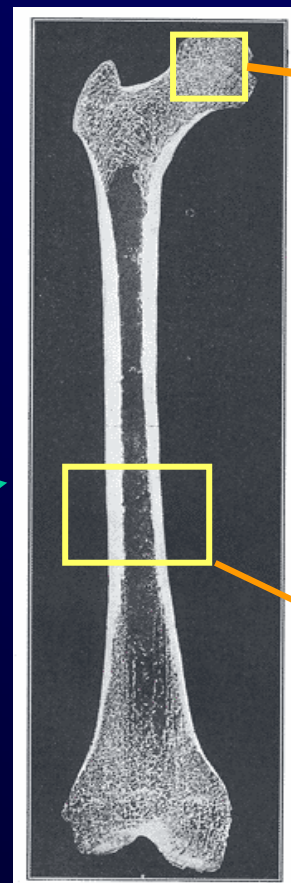
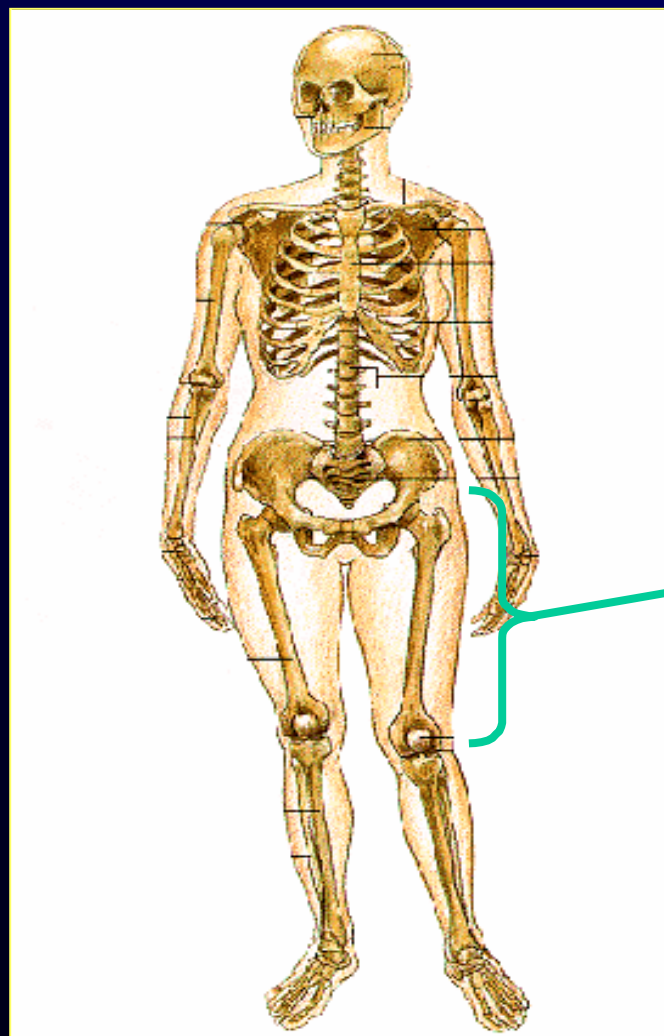
Femmes ménopausées : 35 % de fractures
(18 % hanche, 17 % colonne, 5% poignet)

250 Millions de personnes souffrent d'ostéoporose dans le monde

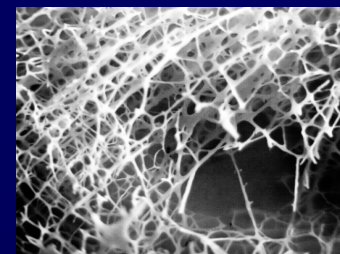
⇒ Mortalité importante

⇒ Coûts énormes

Contexte. Architecture de l'os : 2 types d'os.



Os trabéculaire



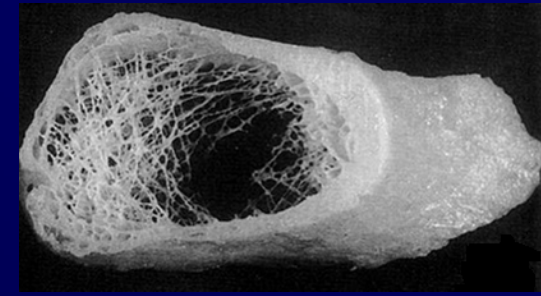
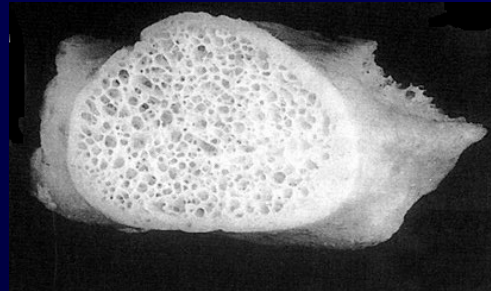
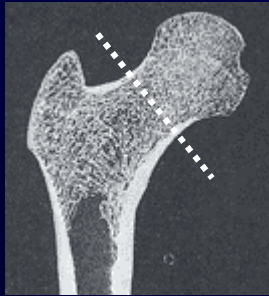
1 cm

Os cortical

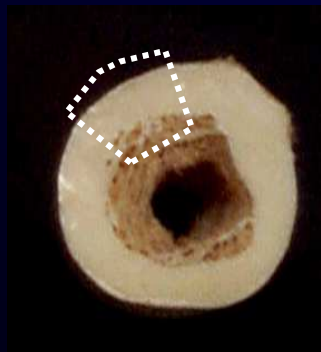


Contexte. Modifications dues à l'ostéoporose.

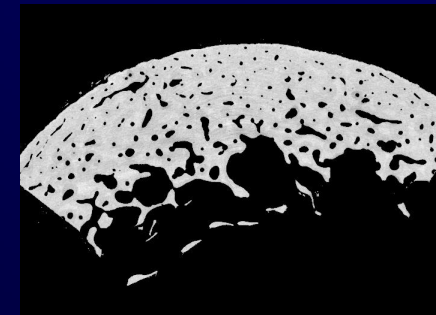
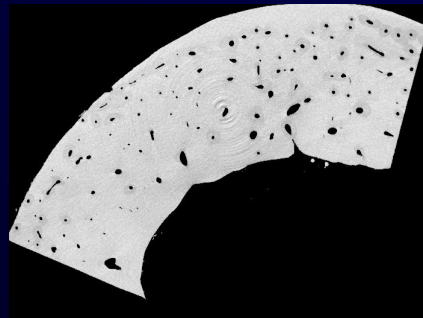
Os trabéculaire : amincissement des travées, perte de connectivité.



Os cortical : Résorption endostéale et accroissement de la porosité.



1 cm



Contexte. Besoin d'évaluation du risque de fracture.

Technique de référence : densitométrie rayons X

Inconvénients : ionisants, dispositifs lourds, coûteux.

Seule la masse osseuse est mesurée.

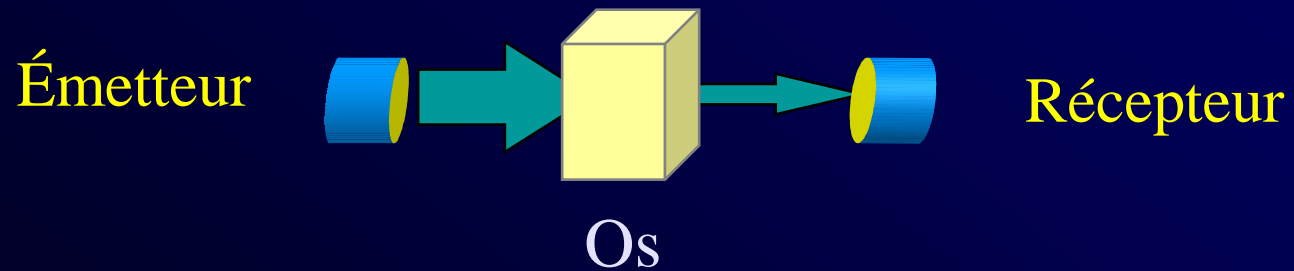
Techniques ultrasonores :

Pourraient constituer une alternative de choix.

Dispositifs non-ionisants, portables, moins coûteux.

Sensibilité potentielle : densité, l'élasticité, la géométrie, μ -architecture.

Contexte. Evaluation ultrasonore : transmission transverse.

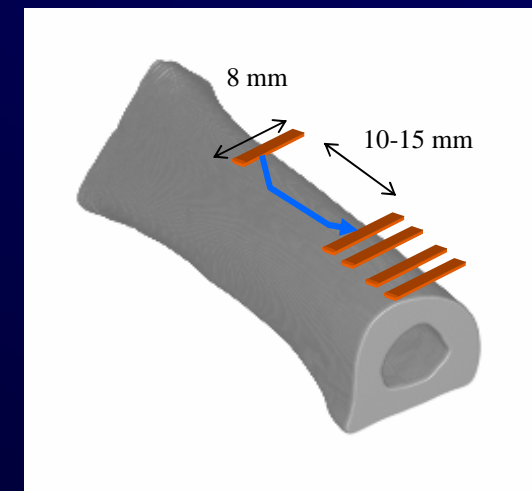
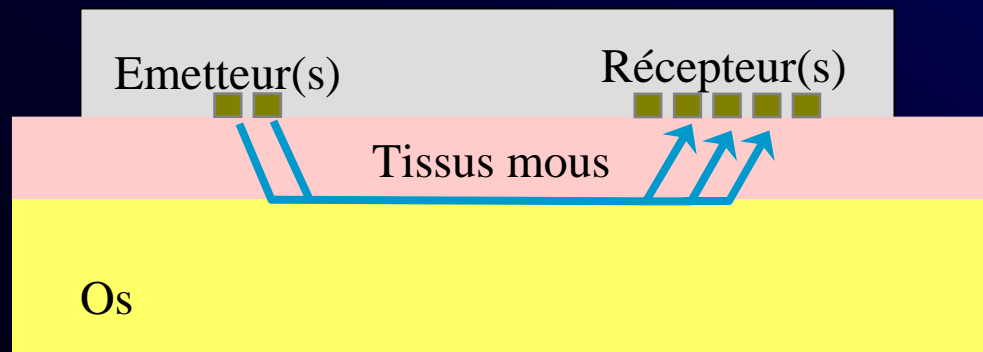


Paramètres mesurés : vitesse, atténuation

Contexte. Evaluation ultrasonore : transmission axiale.



Paramètre mesuré :
vitesse de l'onde de tête



Contexte. Transmission axiale. Etat de l'art.

Approches expérimentales :

- Etudes cliniques (Weiss 2000, Hans 1999).
- *In vitro* : Corrélation Vitesse/DMO, Vitesse/Module d'Young (Lee 1997).
- *In vitro & in vivo*: Effet de l'épaisseur sur la Vitesse (Njeh 1999, Prevrhal 2001).

Modélisation :

- Propagation de l'onde latérale (Camus 2000).

Contexte. Objectifs de la thèse.

Modélisation :

- Déterminer la nature de l'onde détectée.
- Quantifier les effets des paramètres osseux influant sur la mesure.
(géométrie, anisotropie, porosité)

Expérimentation :

- Développer un prototype adapté aux mesures *in vivo*.
- Etude *in vitro* : Déterminer les paramètres osseux influant sur la mesure.
- Etude *in vivo* : Obtenir une reproductibilité adéquate.
Mesures cliniques.

Contexte

Os et ostéoporose.

Transmission axiale.

Modélisation

Nature de l'onde détectée.

Sensibilité des mesure de vitesse.

Expérimentations

Dispositif expérimental.

Etudes *in vitro* et *in vivo*.

Conclusion et perspectives

Modélisation. Une approche basée sur la simulation numérique.

Méthode : simulation numérique à l'aide d'un code de propagation adéquat.

Contraintes :

Milieux fluides et solides.

Milieux anisotropes, hétérogènes.

Propagation d'ondes en régime transitoire.

Géométrie tridimensionnelle.

Choix du code : schéma aux différences finies dit "**de Virieux**".

Répond aux contraintes précédentes.

Hypothèse : milieux élastiques linéaires non absorbant.

Permet l'implémentation de PML.

Modélisation. Principe de la transmission axiale.

(film 1)

Fluide (tissus mous) →

Solide (Os)



(film 2)

→ Rayonnement le long de l'interface fluide/solide

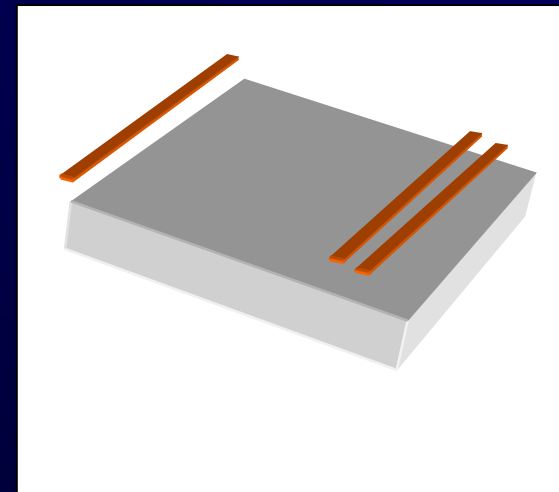
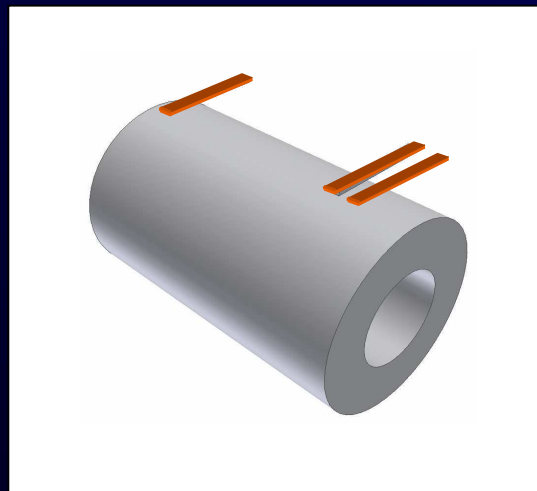
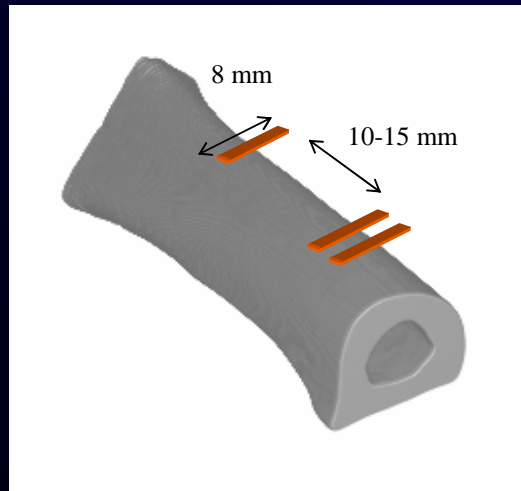
Modélisation. Configuration des mesures sur l'os et modélisation.



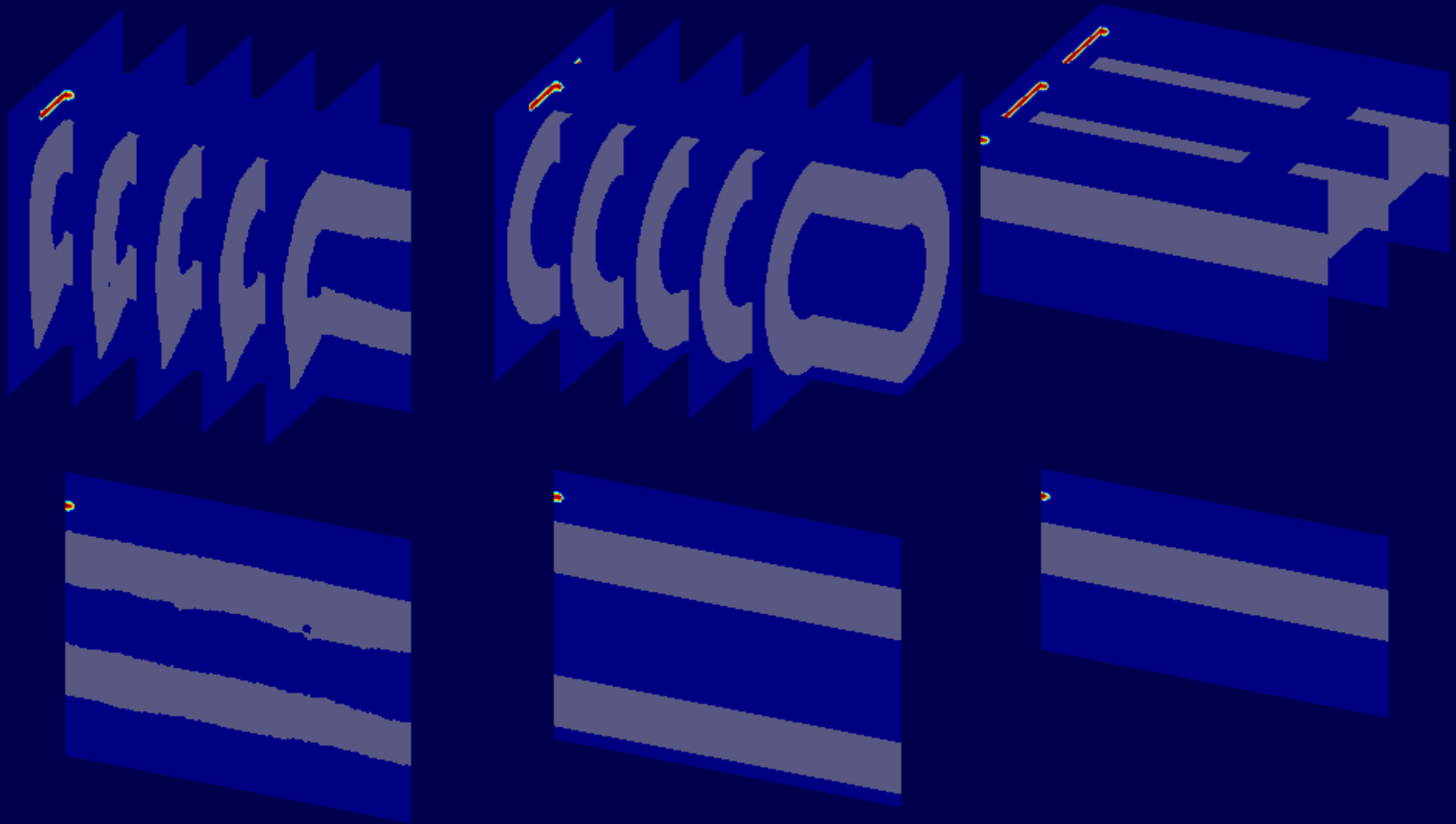
Géométrie réelle

Géométrie tubulaire

Géométrie 2-D



Modélisation. 2-D ou 3-D ?



Modélisation. Effet de l'épaisseur corticale sur la nature de l'onde.

$$e \gg \lambda$$



(film 4)

$$e \sim 2\lambda$$



(film 5)

$$e \sim \lambda/2$$



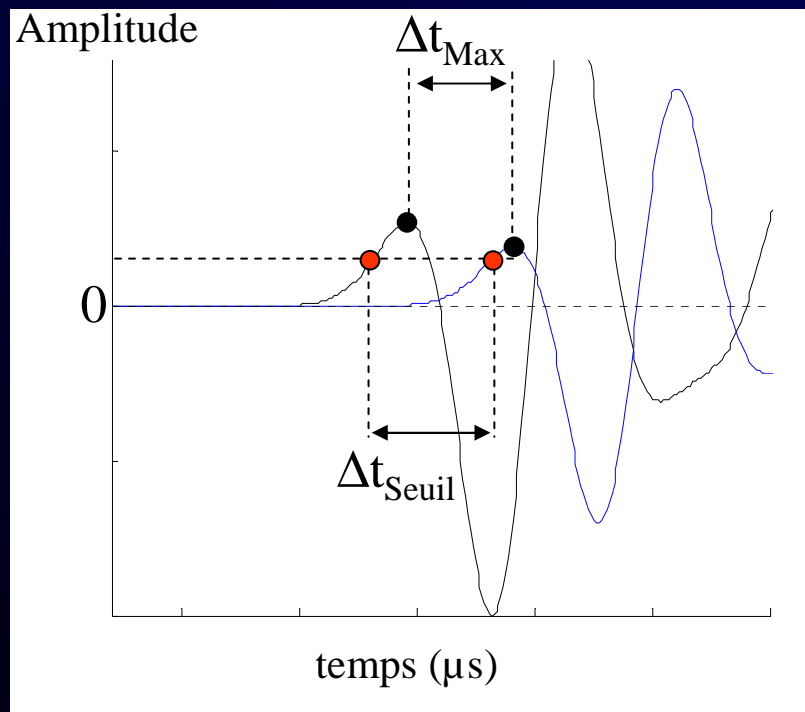
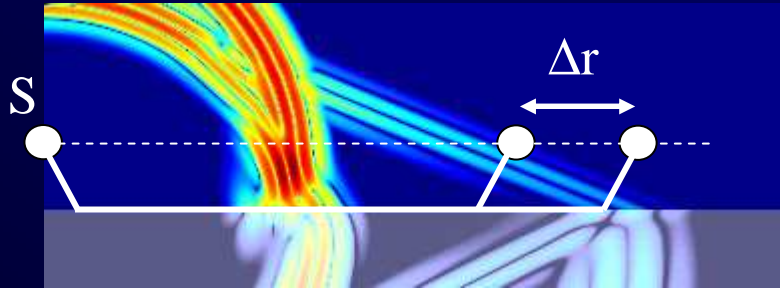
(film 6)

$$e \ll \lambda$$



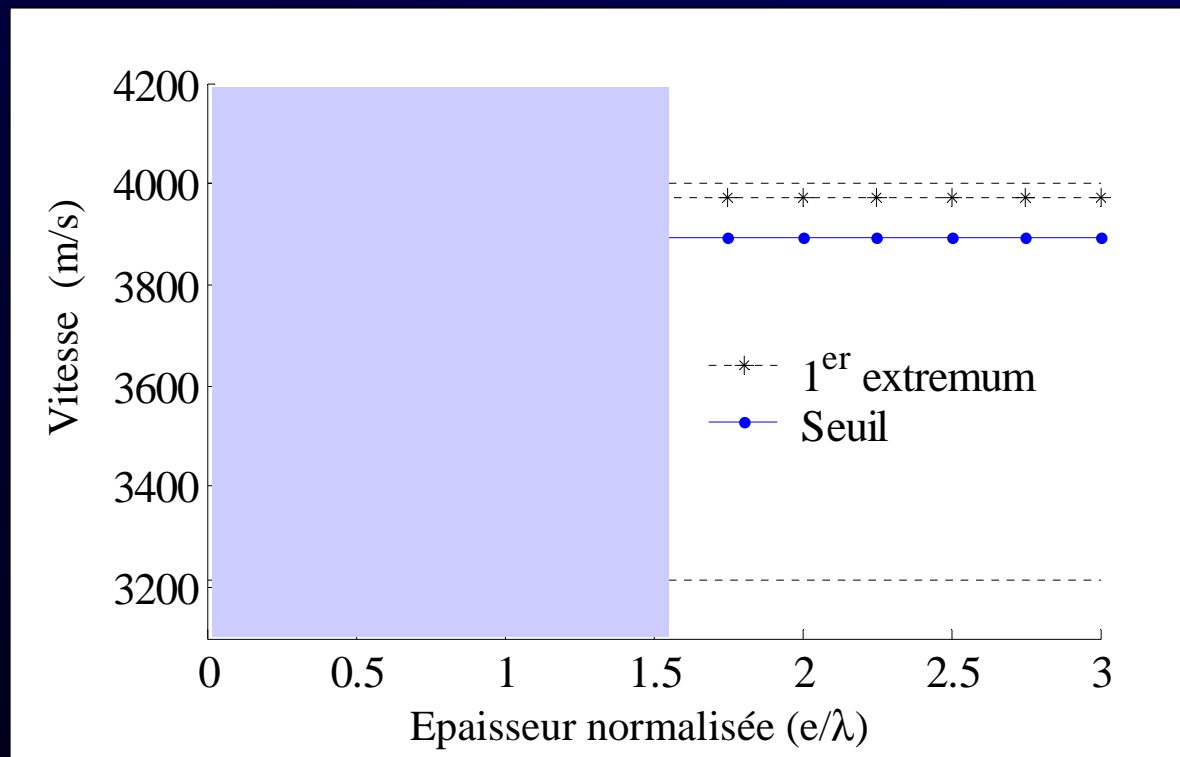
(film 7)

Modélisation. Conséquences sur la mesure de vitesse.



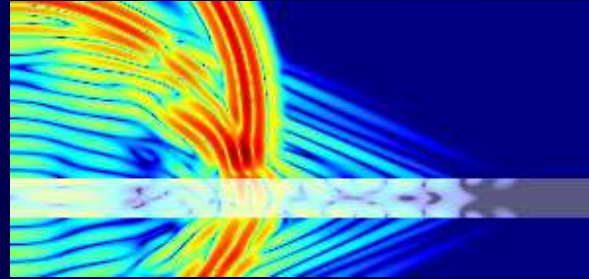
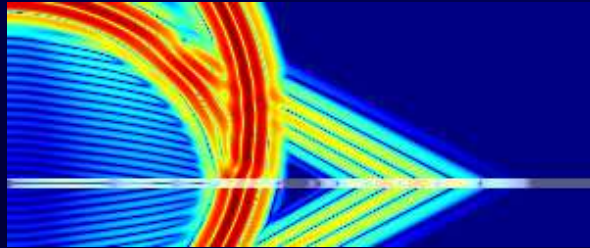
$$V_{Os} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

Modélisation. Conséquences sur la mesure de vitesse.

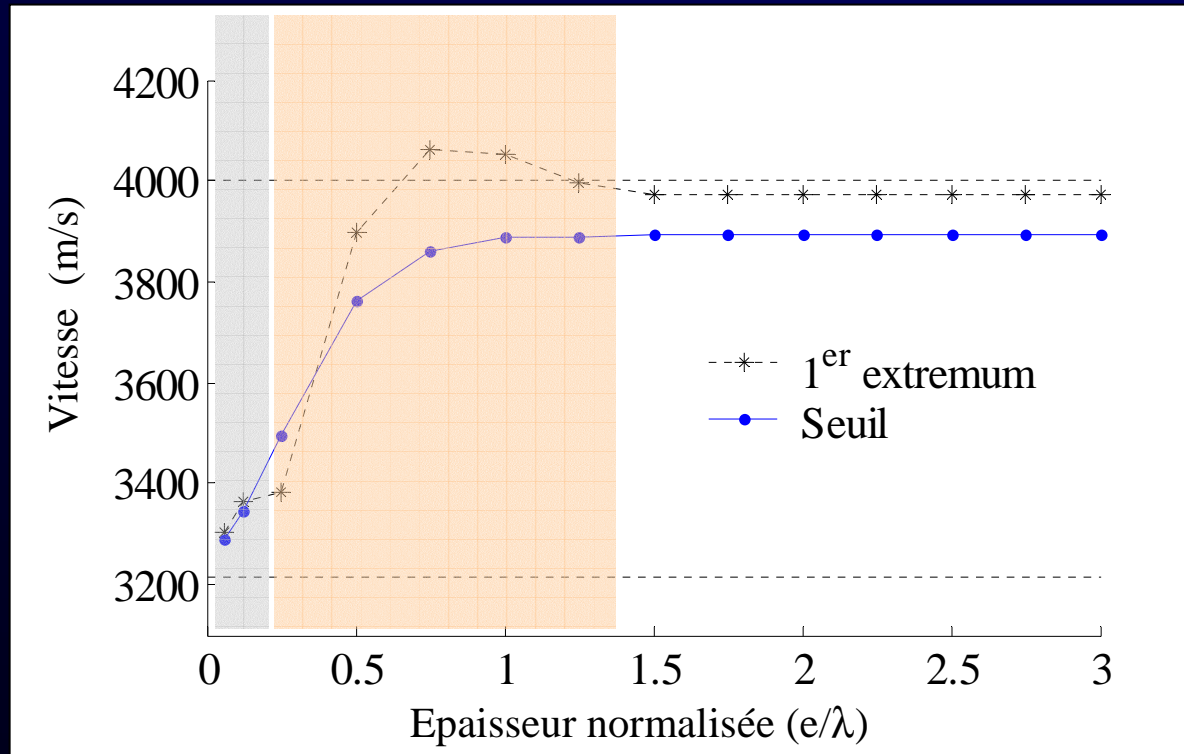
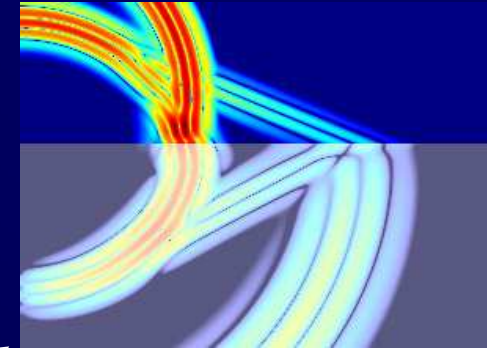


Modélisation. Conséquences sur la mesure de vitesse.

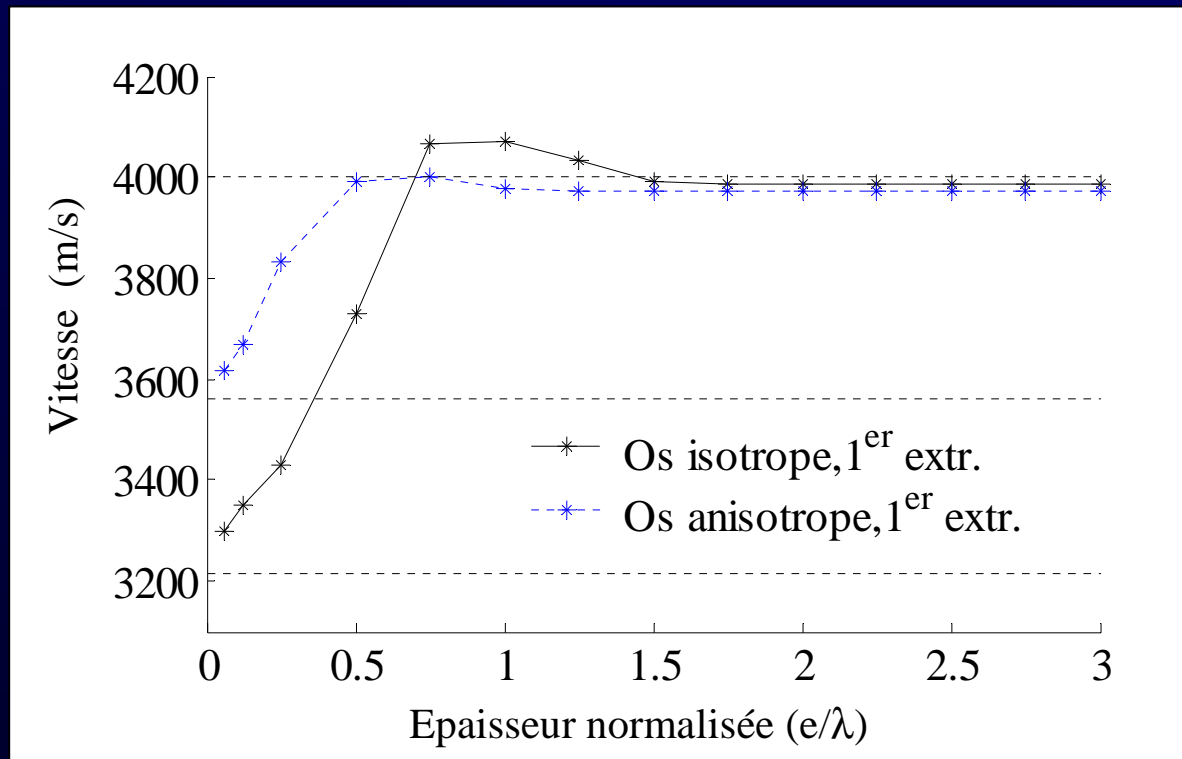
Mode S_0



Onde latérale

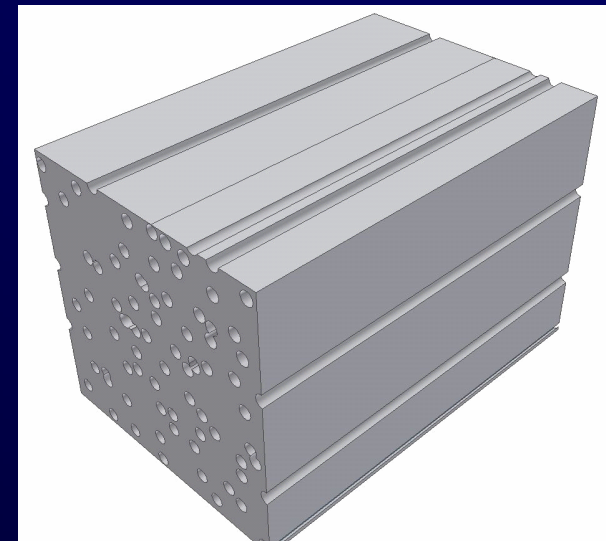
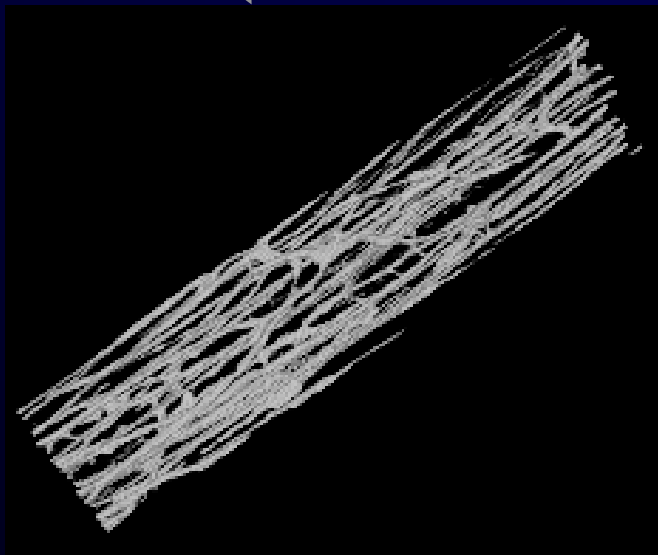
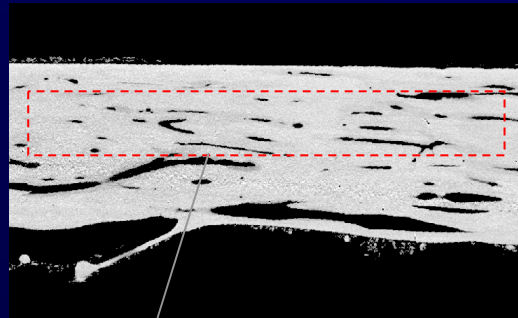
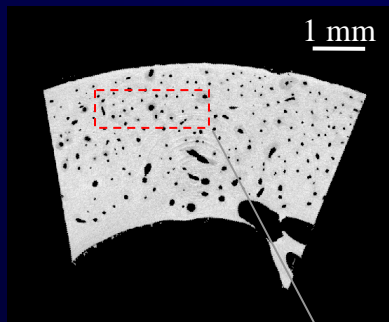


Modélisation. Conséquences de l'anisotropie sur la mesure de vitesse.

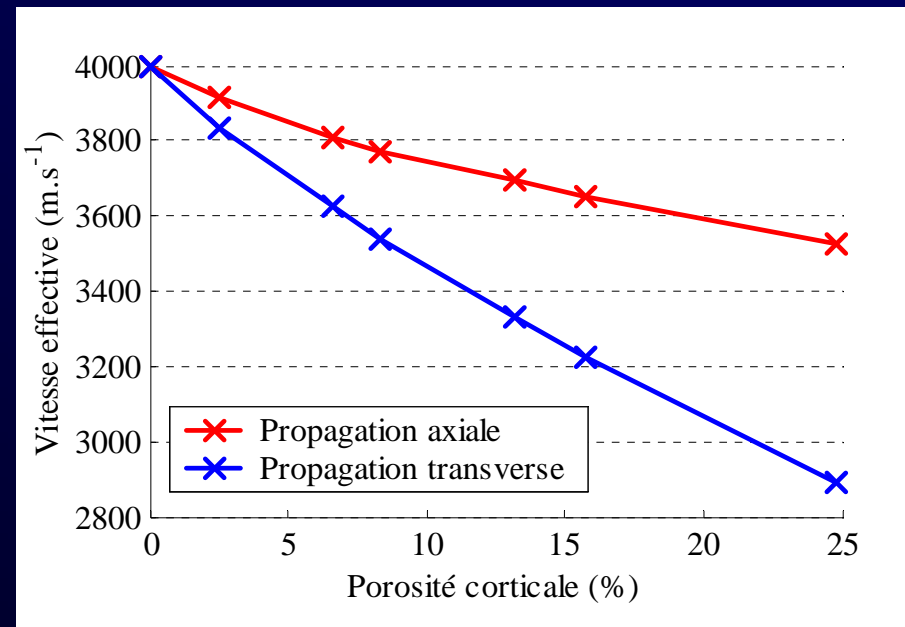
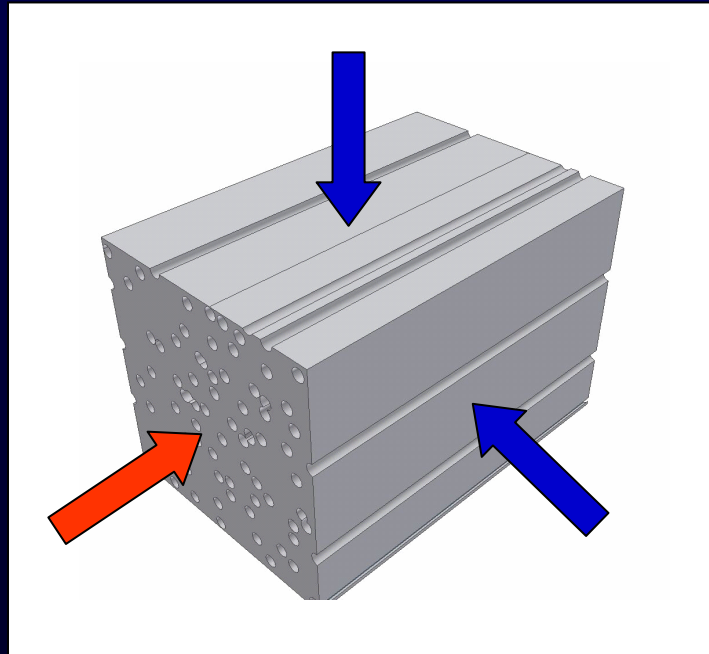


- Etendue des valeurs de vitesse : réduite de moitié
- **Sensibilité : domaine d'épaisseur réduit de moitié**

Modélisation. Effet de la porosité.



Modélisation. Effet de la porosité.



Modélisation. Conclusions.

- Une approche 2-D est suffisante pour prédire la vitesse de l'onde de tête.
- Changement de nature de l'onde de tête avec l'épaisseur.
- Sensibilité des mesures de vitesse à l'épaisseur corticale.
- Impact significatif de l'anisotropie.
- Effet de la porosité (cf. mesures *in vitro*)

Contexte

Os et ostéoporose.

Transmission axiale.

Modélisation

Nature de l'onde détectée.

Sensibilité des mesure de vitesse.

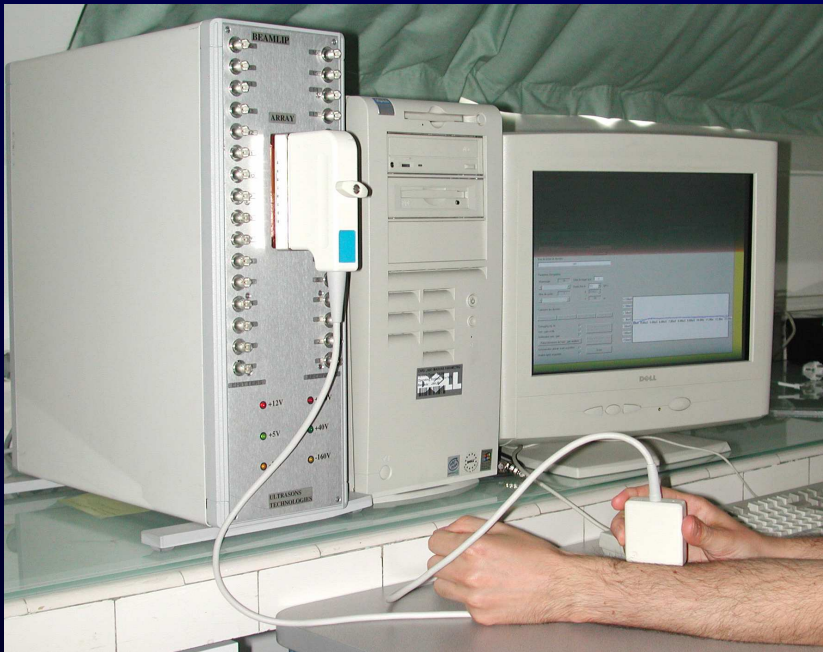
Expérimentations

Dispositif expérimental.

Etudes *in vitro* et *in vivo*.

Conclusion et perspectives

Dispositif expérimental. Spécificités, contraintes.



Quelques caractéristiques :

Sondes (1 MHz, 2 MHz) multi-éléments

Excitation/Réception multi-voies

Récurrence des tirs : 100 μ s

Numérisation jusqu'à 125 MHz, 12 bits

Excitation électrique : 160 V

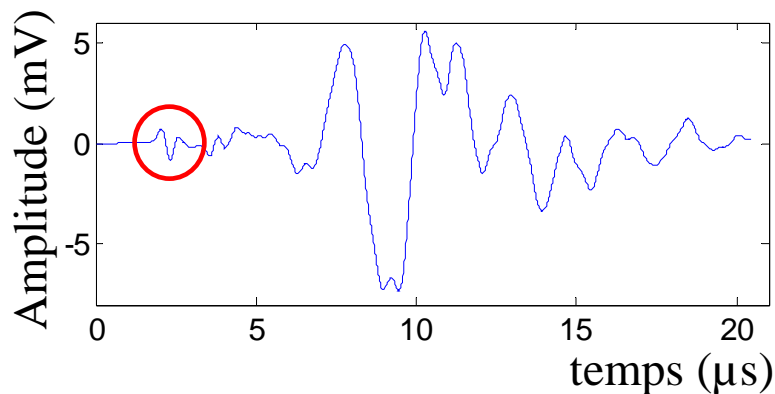
Spécificité :

Signal à détecter qq μ s après émission

Amplitude \sim mV (-105 dB sous excitation)

→ Fortes contraintes de découplage

Electrique + Acoustique



Dispositif expérimental. Mesures des valeurs de vitesses.

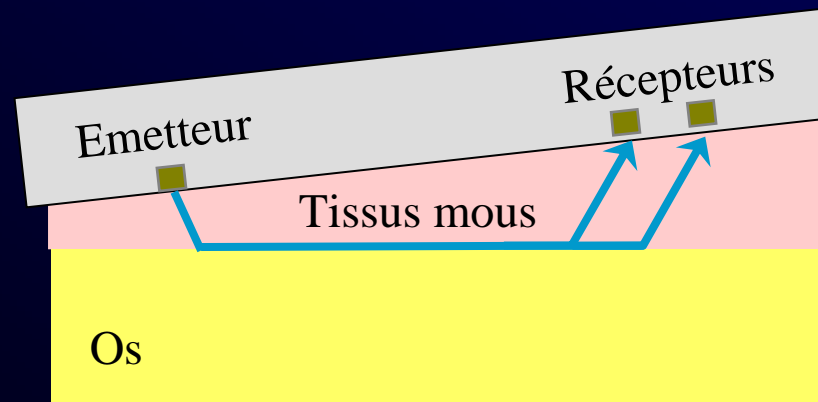
Facteurs pouvant influencer la mesure de vitesse :

Epaisseur du milieu intercalaire ?

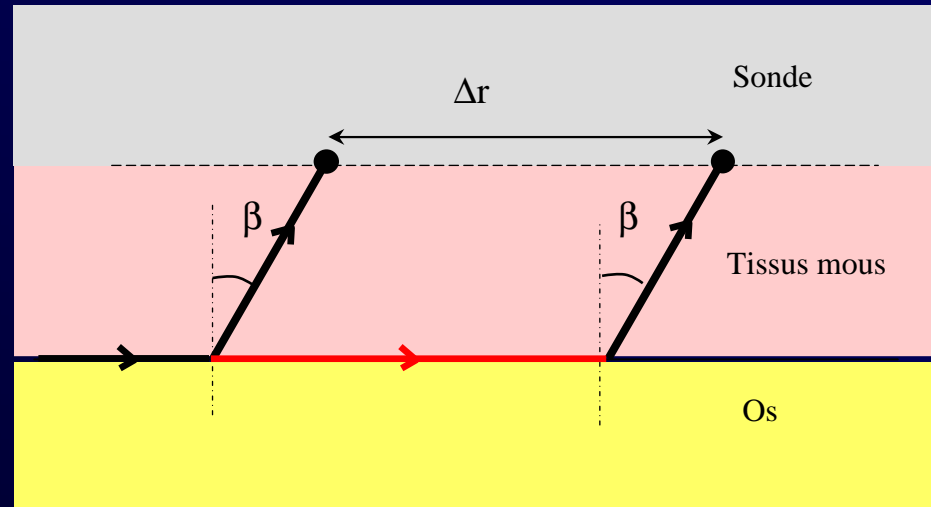
Vitesse des ondes dans le milieu intercalaire ?

Parallélisme sonde/interface ? (inconnu à quelques degrés près)

Alignement sonde/axe de l'os ? (inconnu à quelques degrés près)

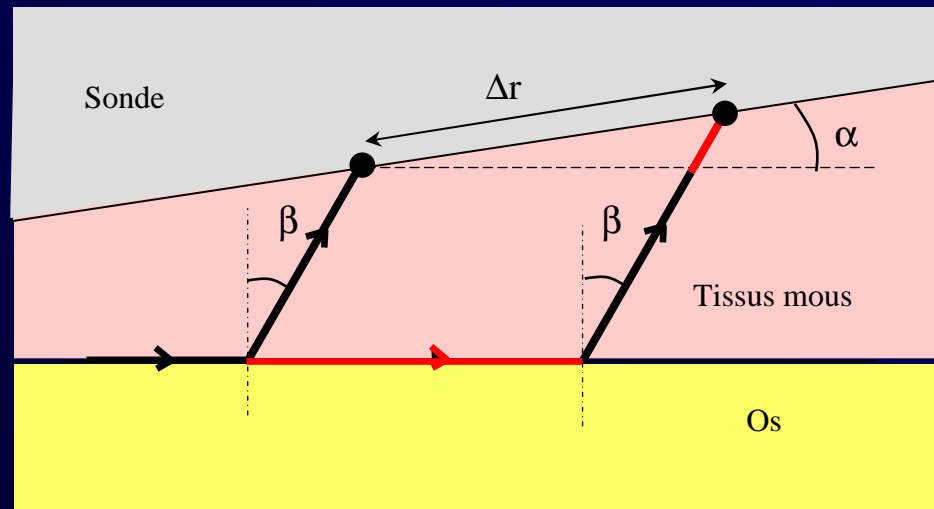


Dispositif expérimental. Effet du parallélisme sonde/interface (pendage).



$$V_{Os} = \frac{\Delta r}{\Delta t_0}$$

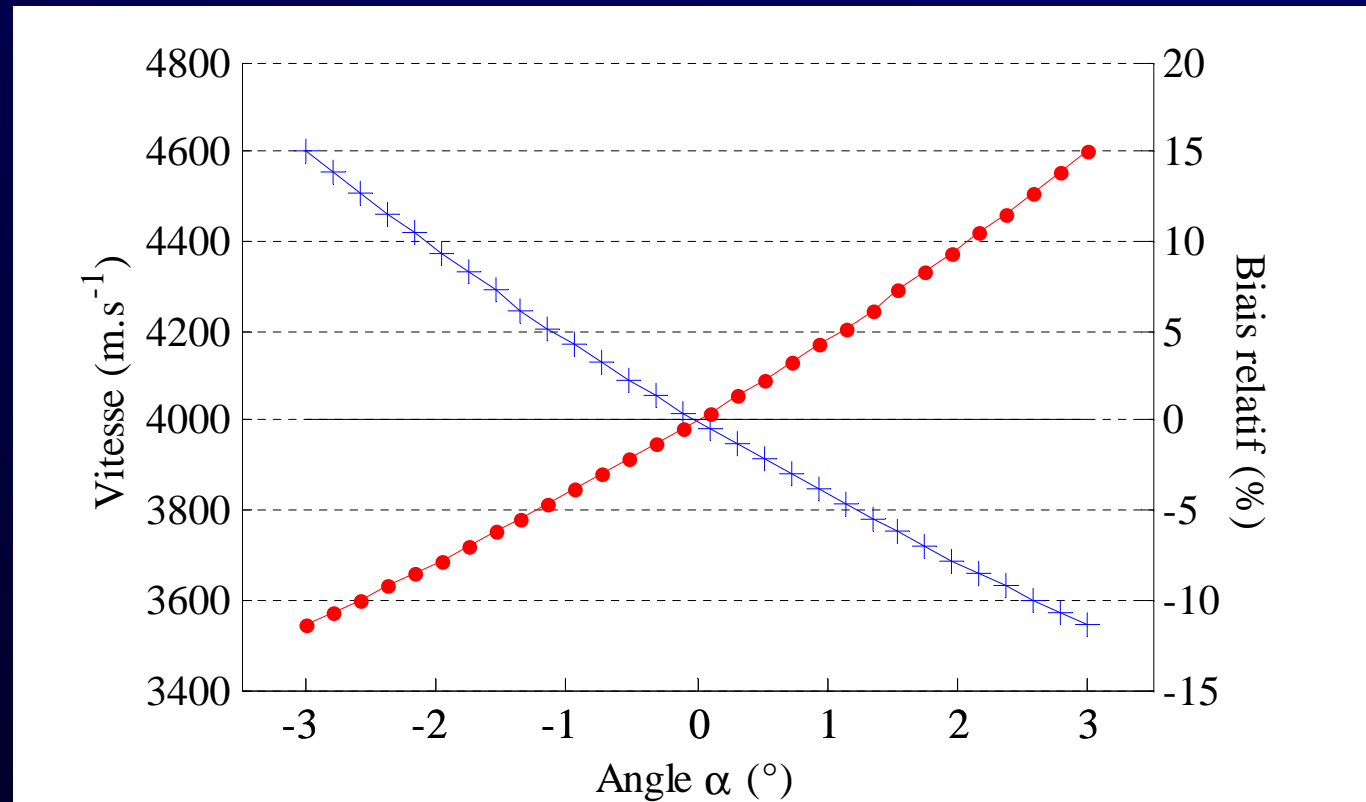
Dispositif expérimental. Effet du parallélisme sonde/interface (pendage).



$$\Delta t_{(\alpha, \beta)} = \Delta t_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(1 + \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\beta)}\right)$$

$$\left(\sin(\beta) = \frac{V_{tissus}}{V_{Os}} \right)$$

Dispositif expérimental. Effet du parallélisme sonde/interface (pendage).

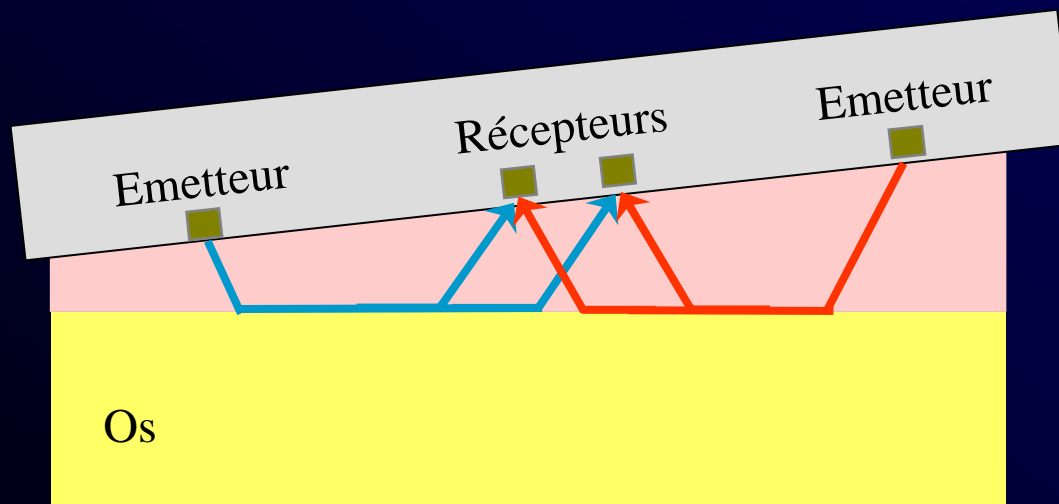


$$V_{(\alpha,\beta)} = V_0 \cdot \frac{1}{\cos(\alpha) \cdot \left(1 + \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\beta)}\right)}$$

Dispositif expérimental. Principe de la transmission bidirectionnelle.

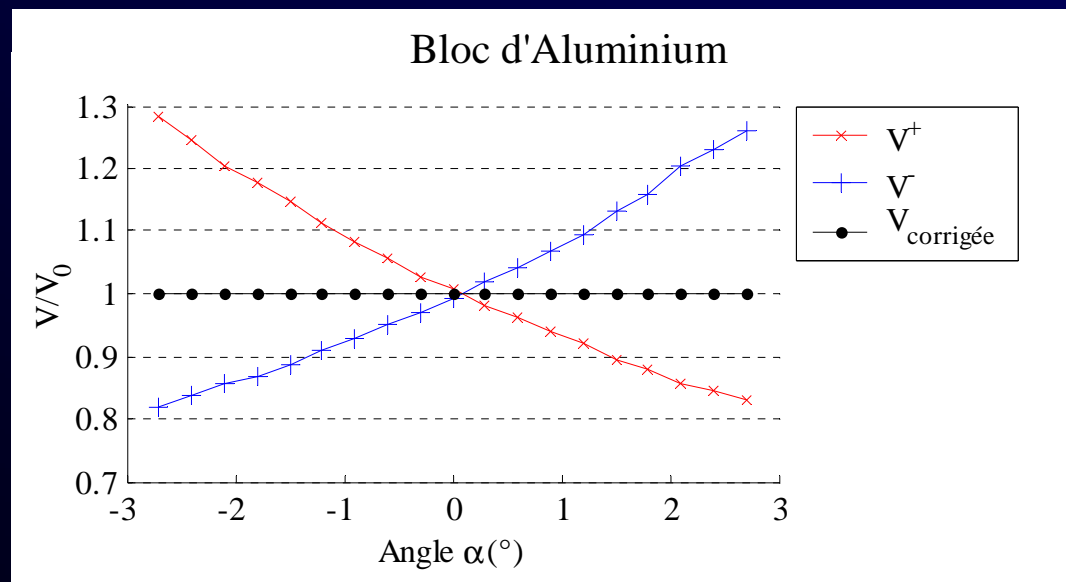
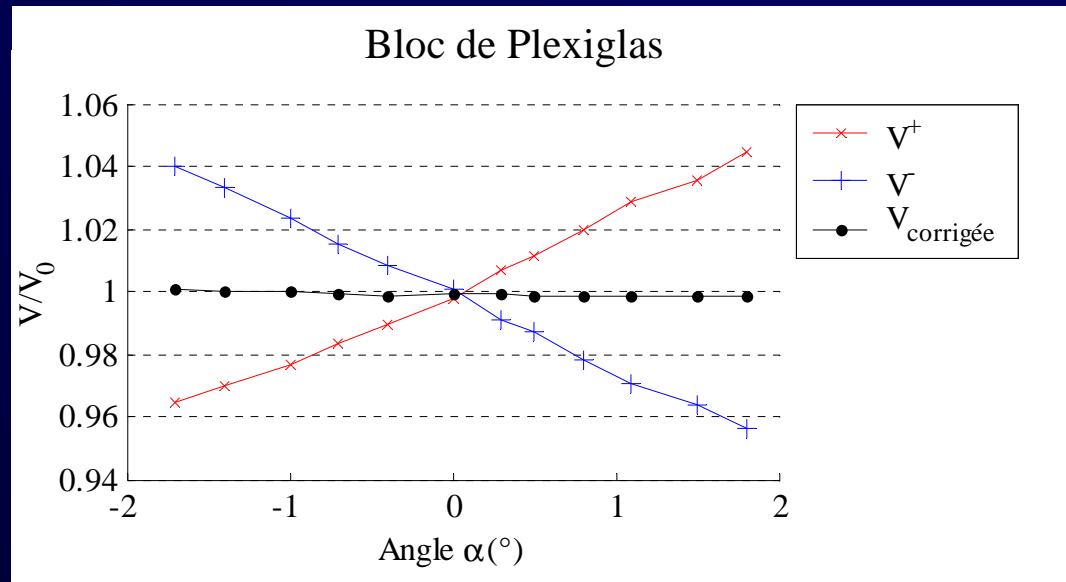
Principe de correction d'inclinaison de la sonde :

$$\Delta t_0 = \frac{\Delta t_{(\alpha,\beta)} + \Delta t_{(-\alpha,\beta)}}{2 \cdot \cos(\alpha)} \cong \frac{\Delta t_{(\alpha,\beta)} + \Delta t_{(-\alpha,\beta)}}{2}$$

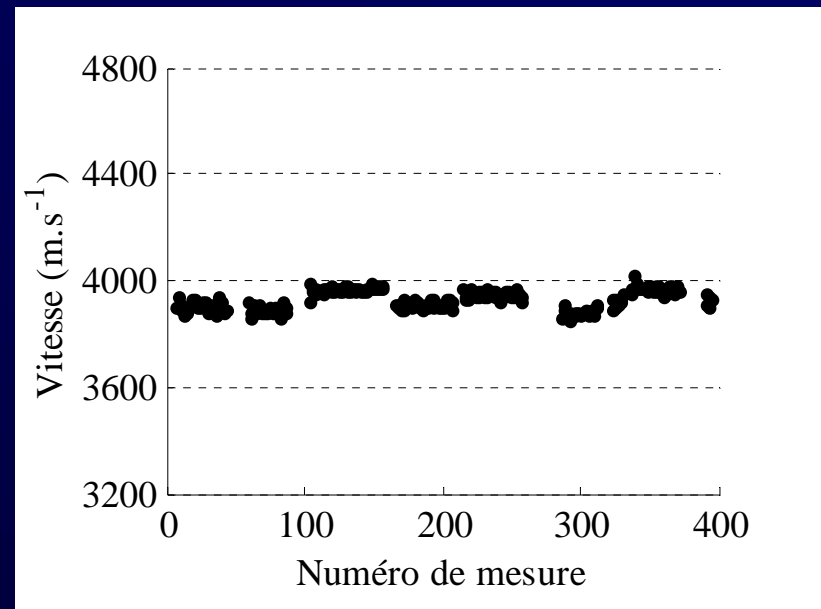
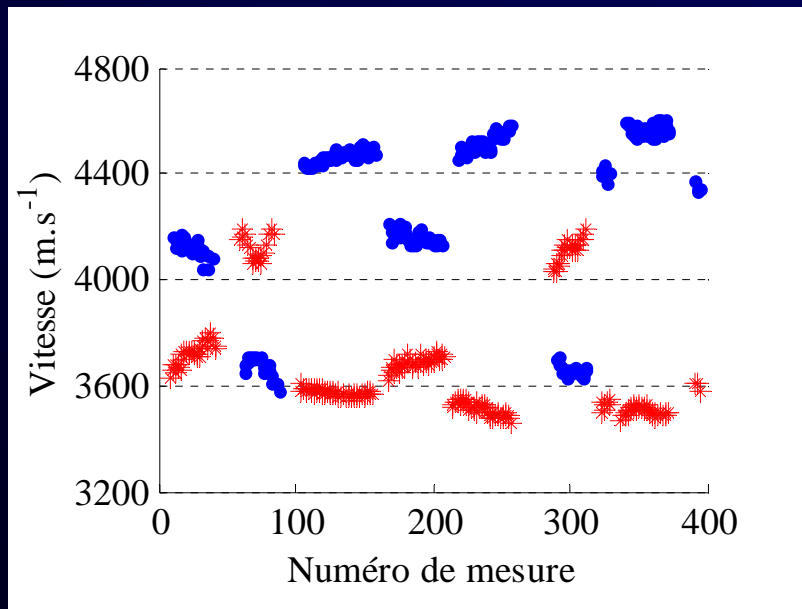


$$V_{Os} = \frac{\Delta r}{\Delta t_0}$$

Dispositif expérimental. Validation *in vitro*.



Dispositif expérimental. Validation *in vivo*.



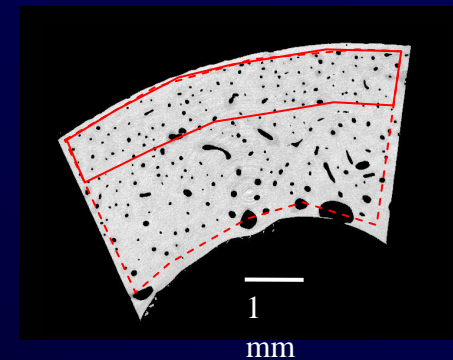
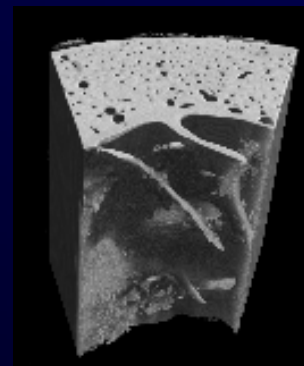
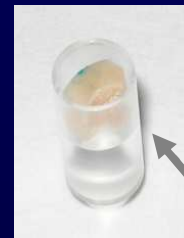
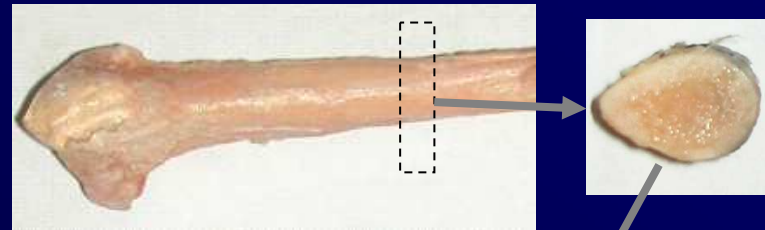
Etude *in vitro* au radius. Matériels et méthodes.

Objectifs: sensibilité de la mesure de vitesse aux paramètres osseux ?

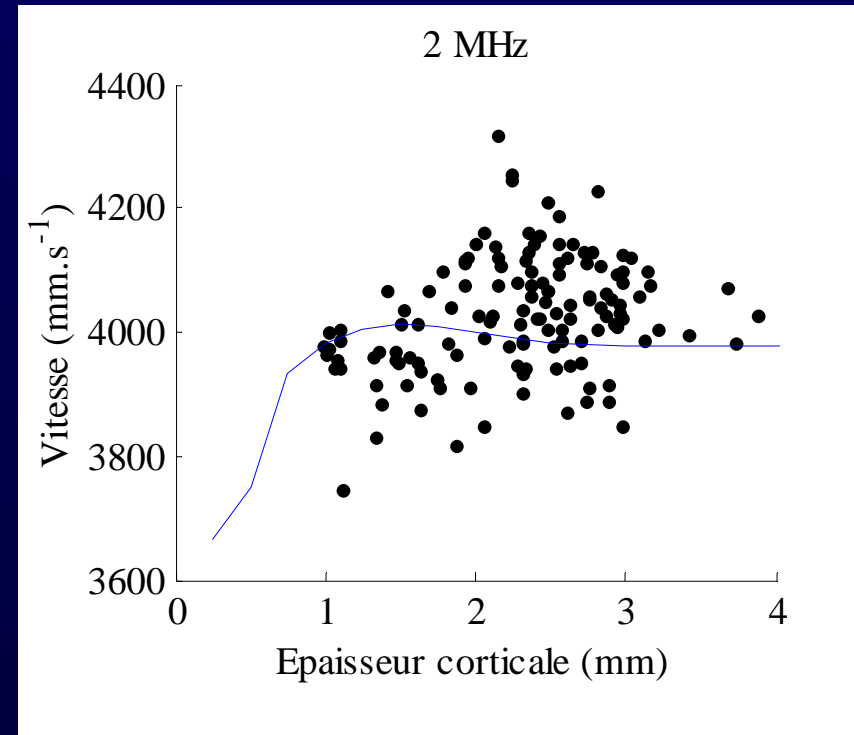
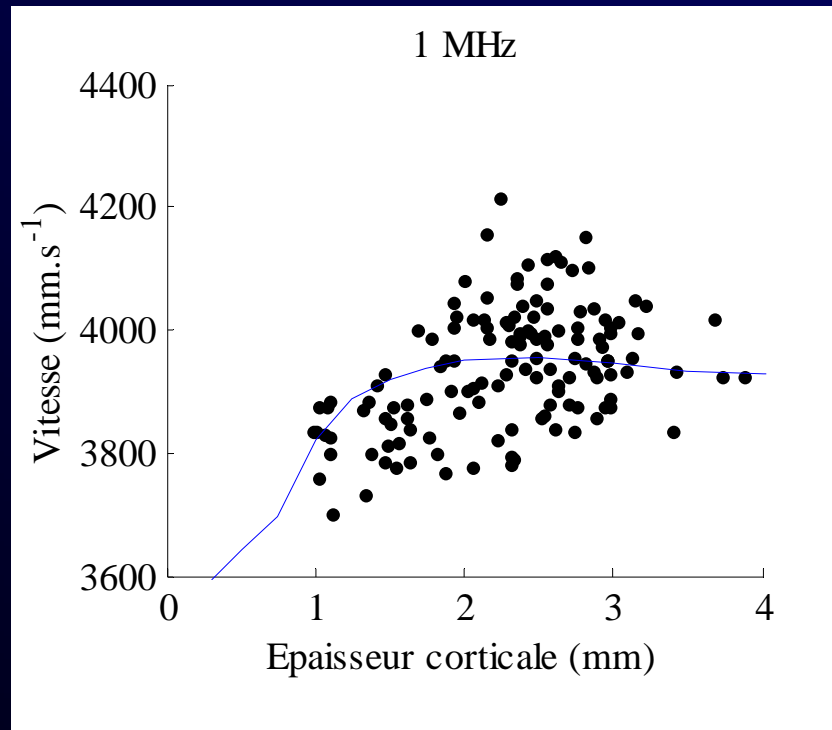
Scanner : épaisseur, DMO



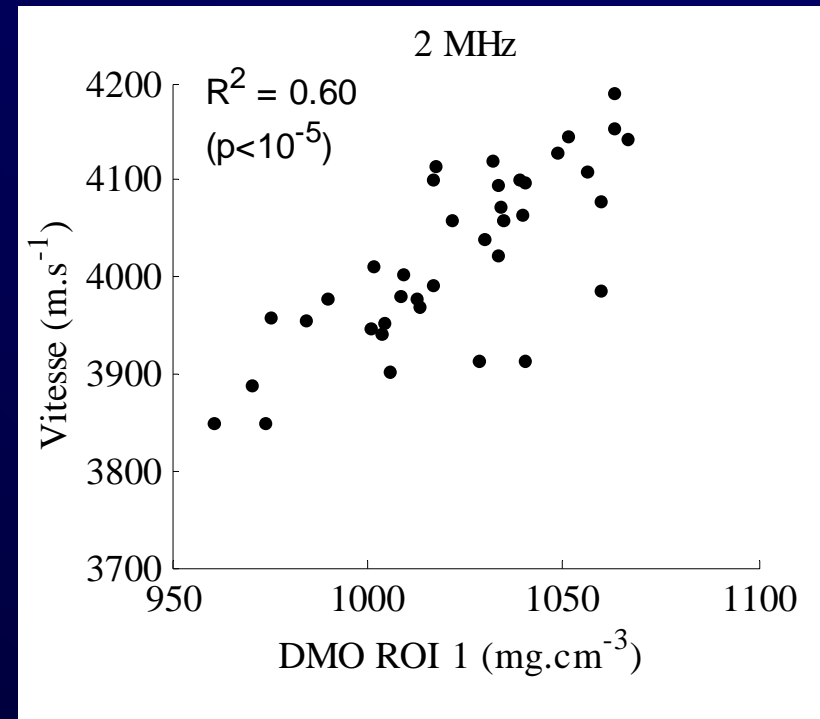
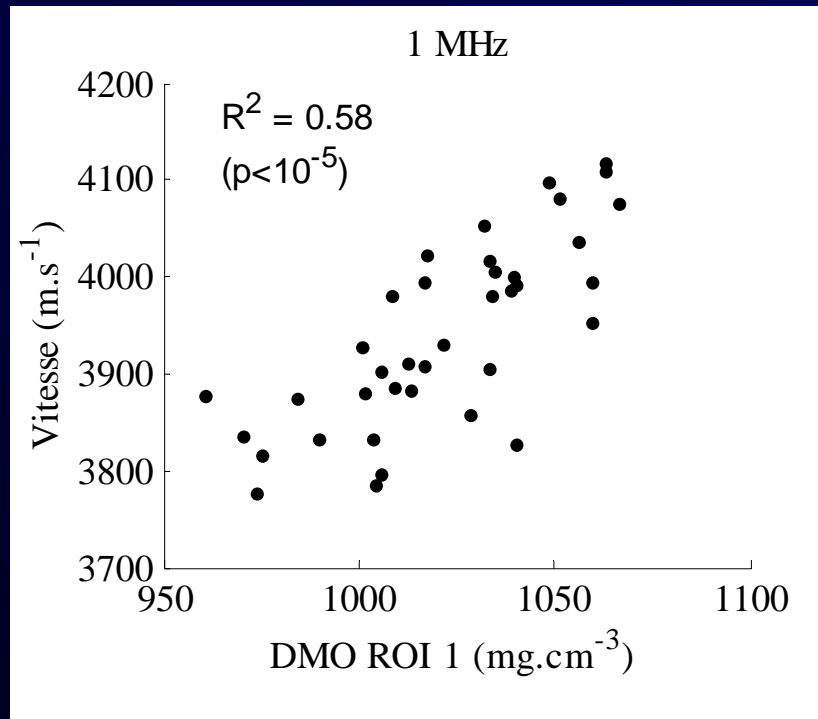
Synchrotron : épaisseur, DMO, DMM, porosité



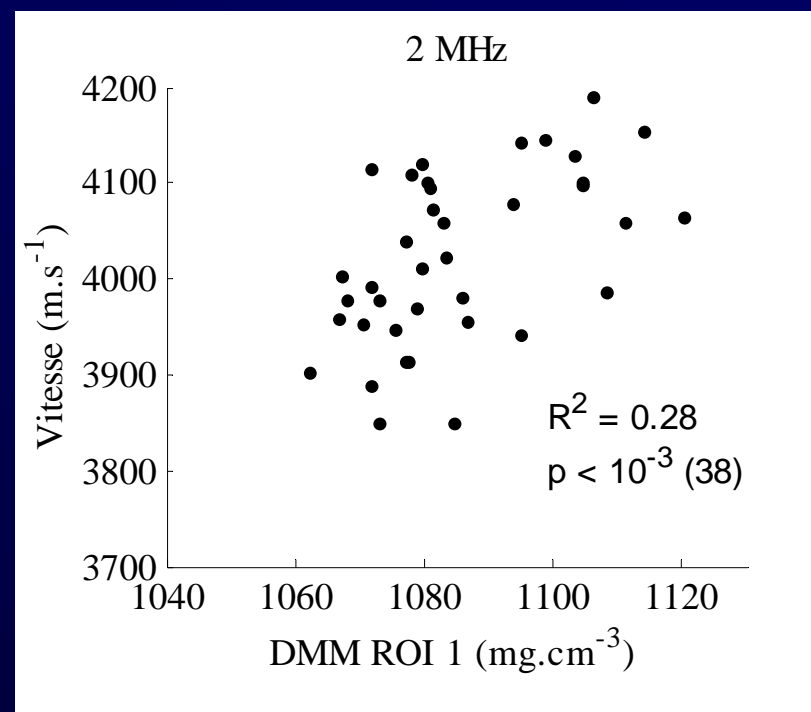
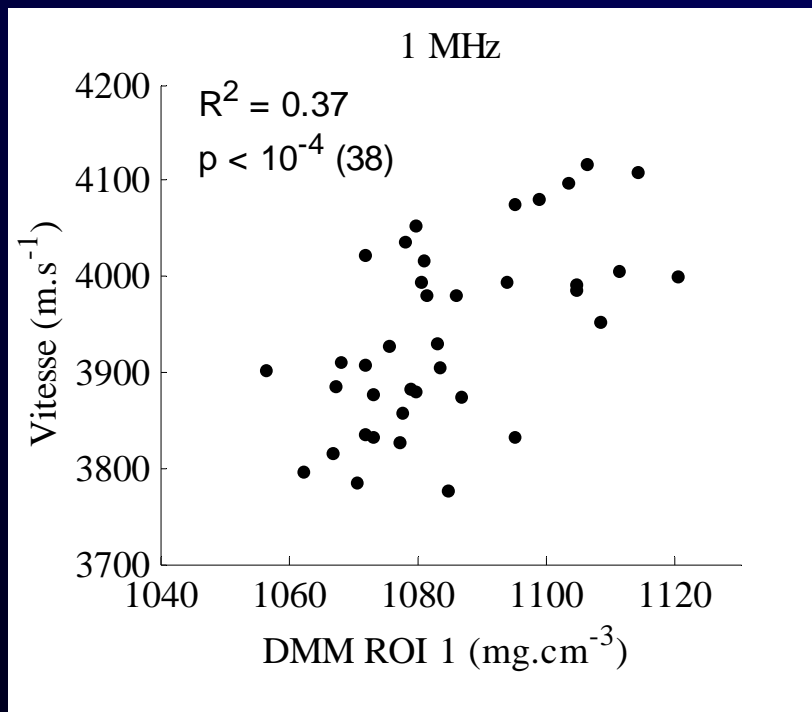
Etude *in vitro* au radius. Sensibilité à l'épaisseur (scanner).



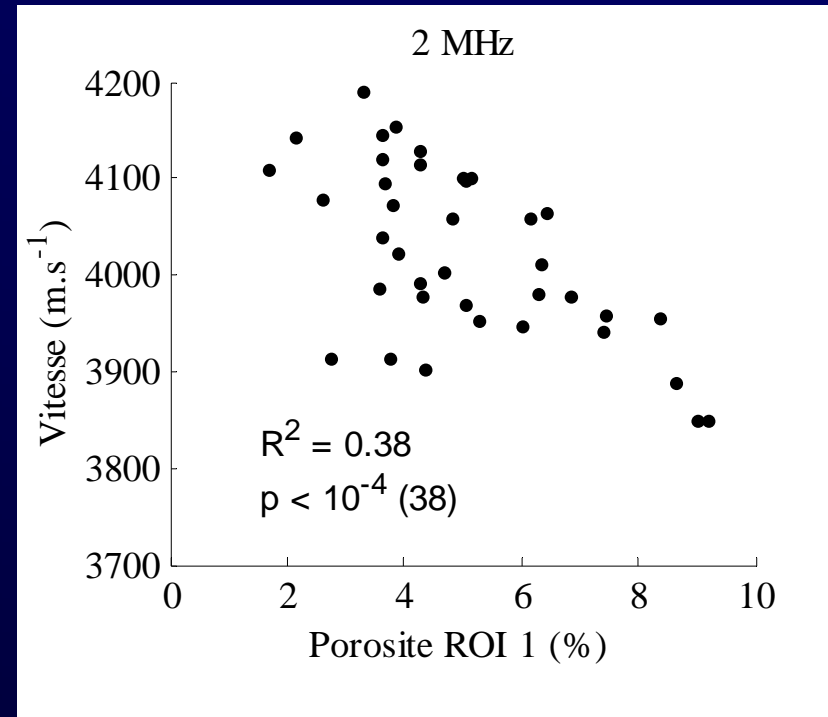
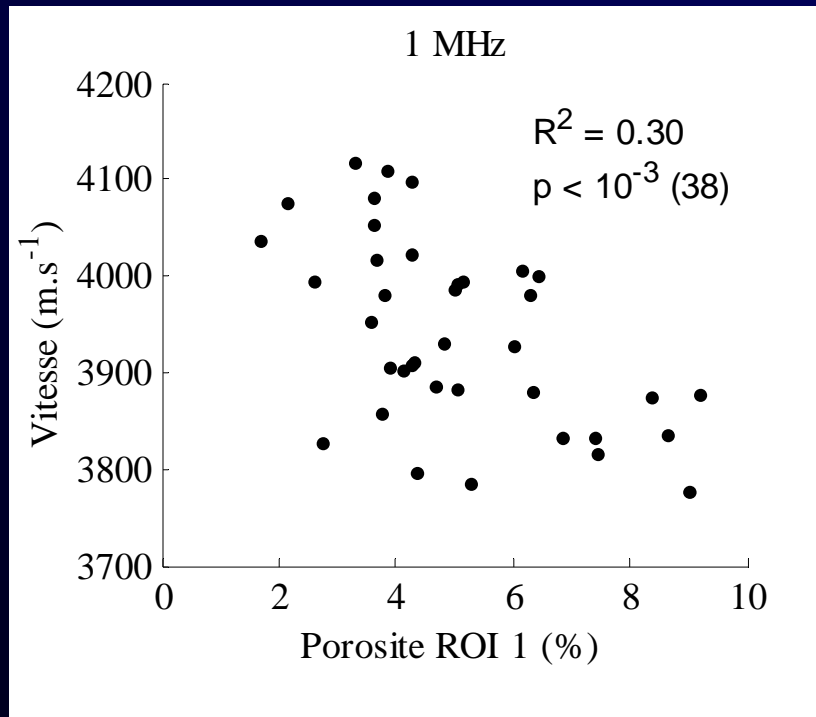
Etude *in vitro* au radius. Sensibilité à la DMO (synchrotron).



Etude *in vitro* au radius. Sensibilité à la minéralisation (DMM, synch.).



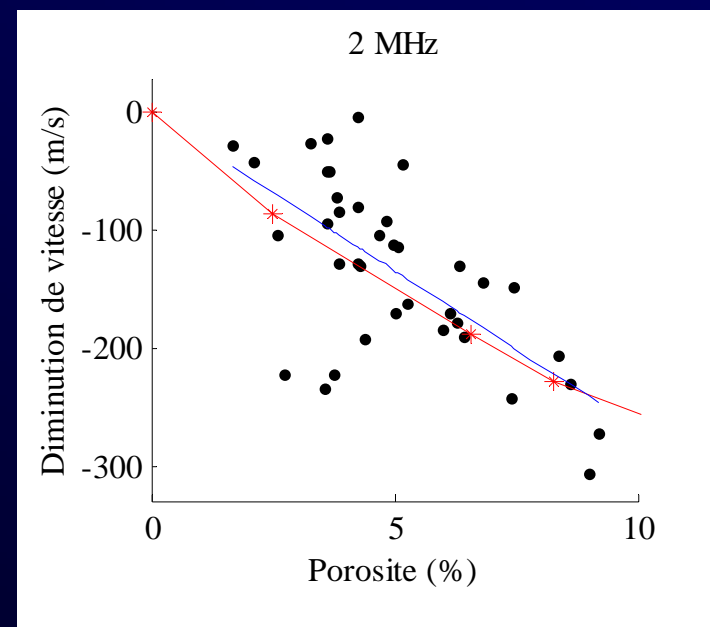
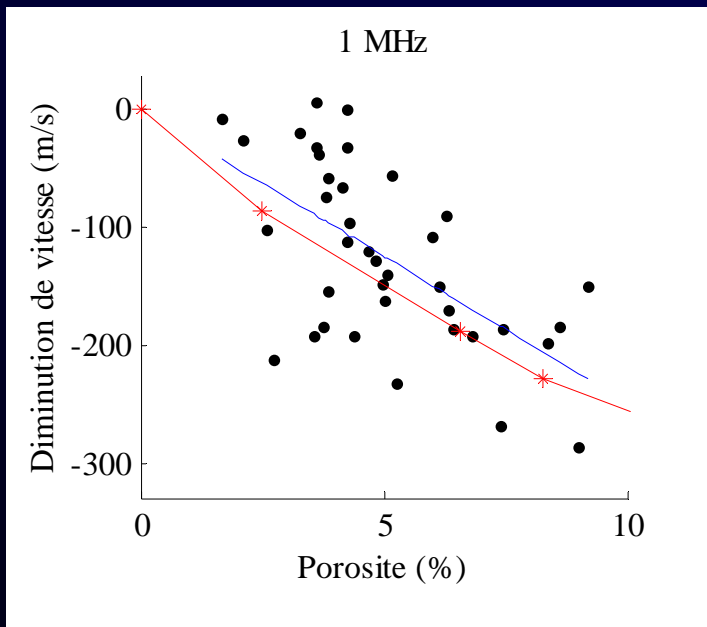
Etude *in vitro* au radius. Sensibilité à la porosité (synchrotron).



Etude *in vitro* au radius. Approche multi-paramétrique.

Modèle : vitesse = $b_0 + b_1 \times \text{DMM} + b_2 \times \text{Porosité}$

Fréquence	b_1	b_2	R^2	RMSE
1 MHz	3.4	-25	0.60	63
2 MHz	2.8	-27	0.60	59



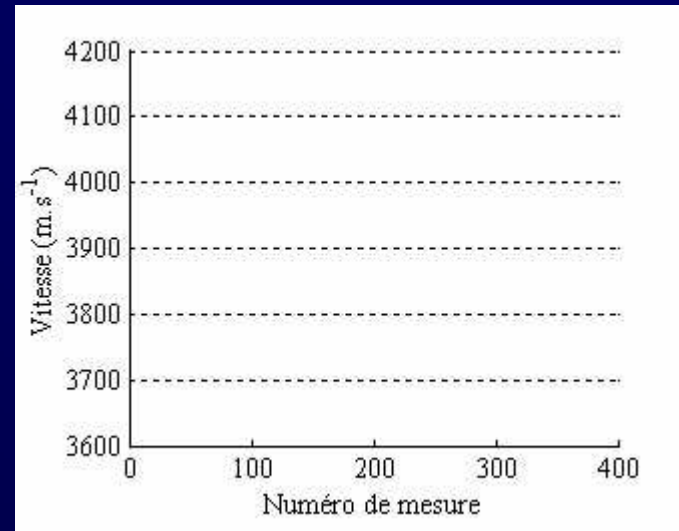
Etude *in vitro* au radius. Conclusions.

- La densité minérale osseuse (DMO) périostéale explique 60 % de la variabilité des valeurs de vitesse.
- La sensibilité à la DMO reflète les effets respectifs de la DMM (30 %) et de la porosité (30 %).
- La sensibilité à la porosité est en accord avec les résultats de simulations.
- Aux fréquences considérées, au radius : sensibilité à l'épaisseur limitée.

Etude *in vivo*. Méthodologie des mesures.



(film 8)



(film 9)

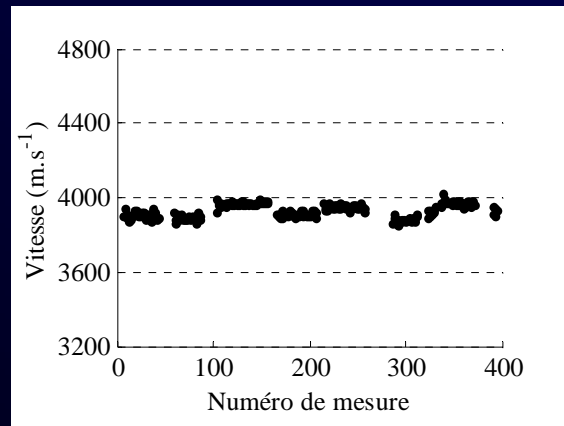
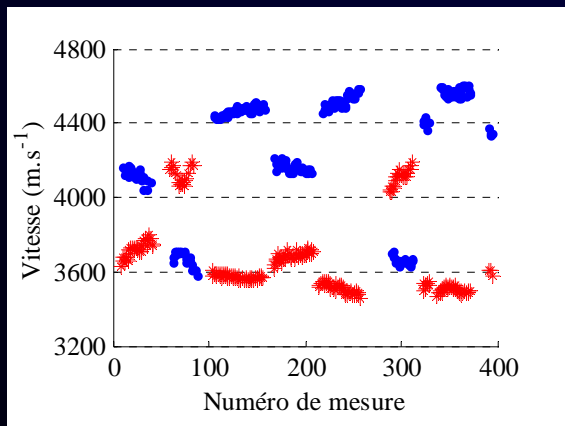
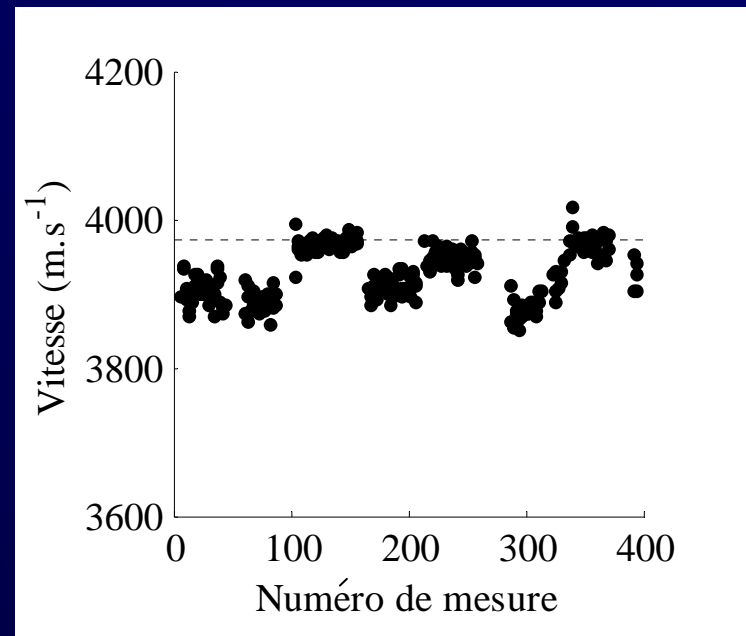
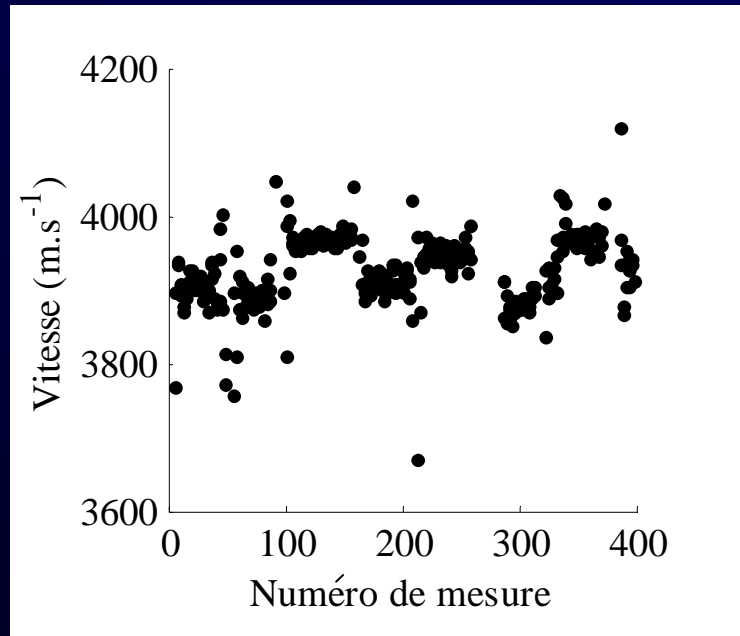
Conditions d'obtention d'une valeur de vitesse :

- Recherche des zones adéquates (cf. tissus mous)

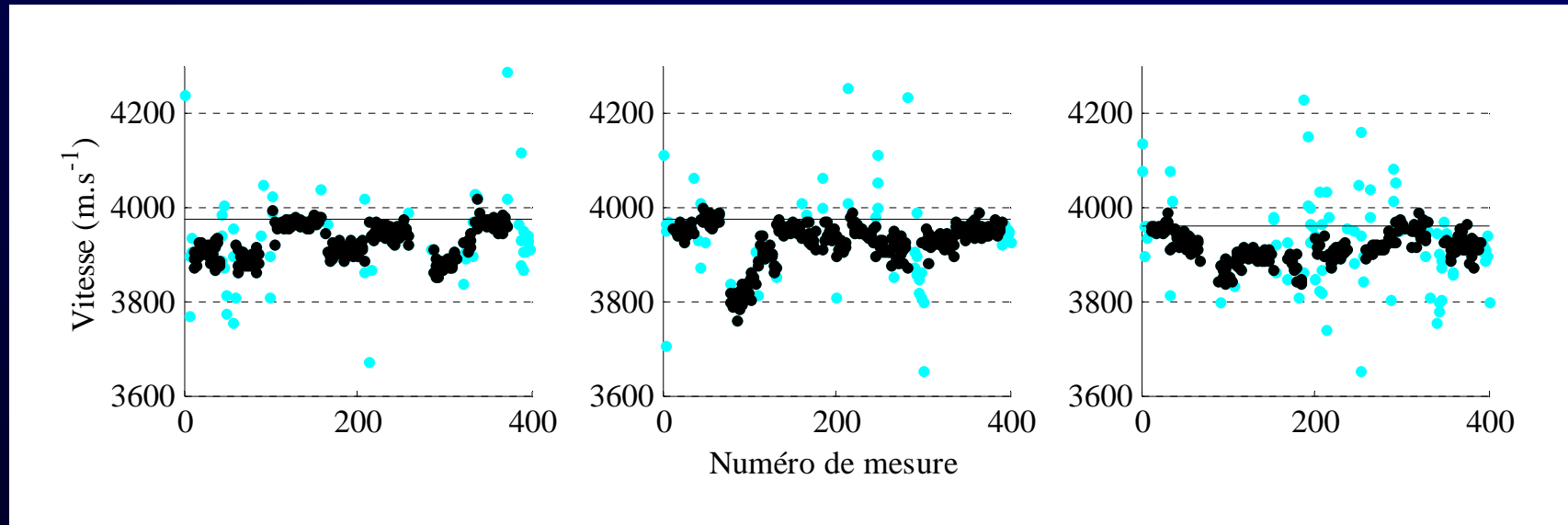
Conditions d'obtention d'une valeur de vitesse fiable :

- Immobilité de la sonde
- Alignement sonde/axe de l'os

Etude *in vivo*. Tri des valeurs de vitesse.



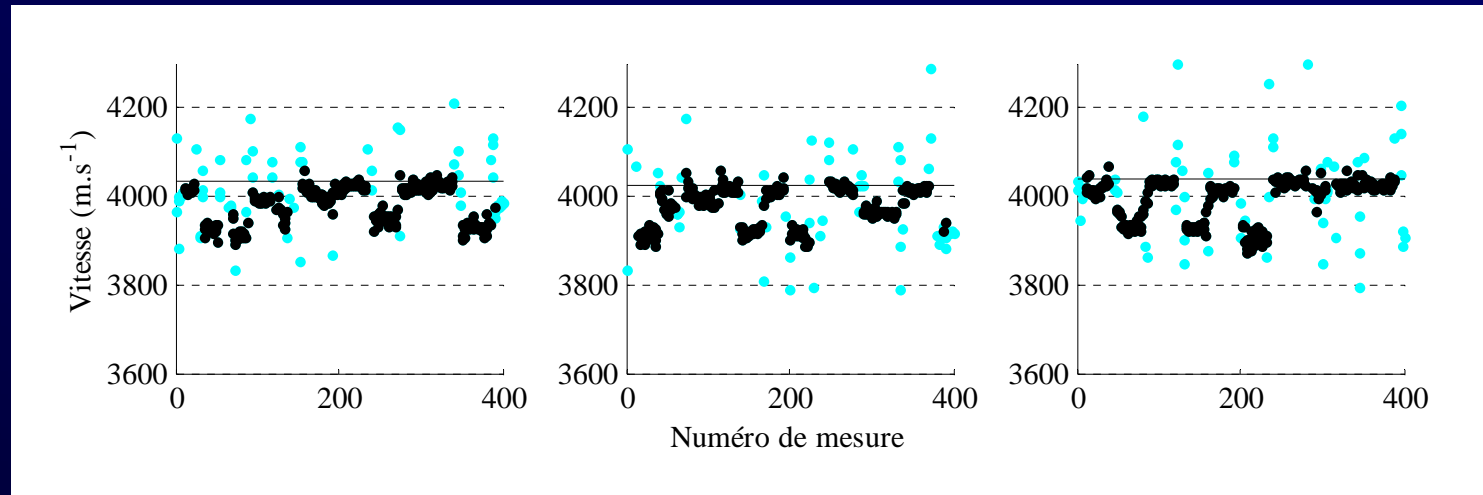
Etude *in vivo*. Protocole clinique.



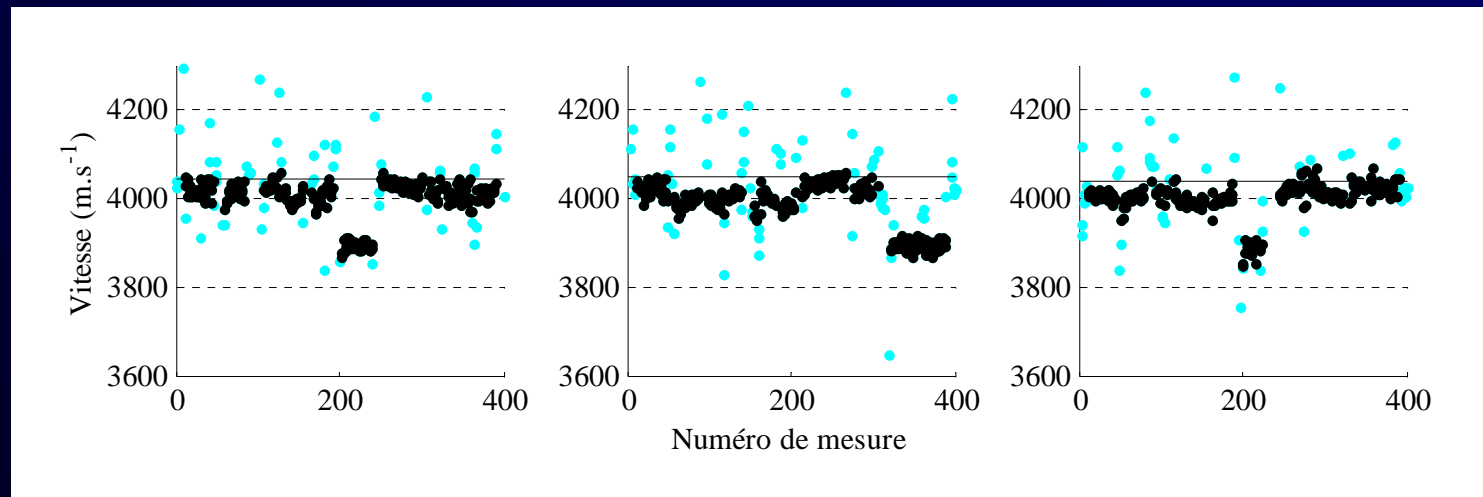
- Acquisitions successives de 3 distributions
- Déduction d'une valeur moyenne finale

Etude *in vivo*. Reproductibilité des mesures.

Opérateur 1 :



Opérateur 2 :



Reproductibilité • intra-opérateur: 0.4 % à 1 MHz, 0.5 % à 2 MHz

• inter-opérateur: 0.5 % à 1 MHz, 1.1 % à 2 MHz

Etude *in vivo*. Conclusions.

- Mise au point d'un protocole d'acquisition *in vivo*.
- Reproductibilité satisfaisante.
- Etude en cours (150 patients actuellement).

Conclusion générale et perspectives.

- **Modélisation : développement d'un outil de simulation.**

Modélisation en transmission axiale (problème direct).

Adapté également à d'autres techniques US.

Laboratoire "virtuel" : ostéoporose virtuelle, problème inverse.

- **Avancées expérimentales.**

Prototype (sonde bidirectionnelle) adapté aux mesures *in vivo*.

In vitro : influence des propriétés osseuses sur les mesures.

In vivo : Etude en cours.

Merci....