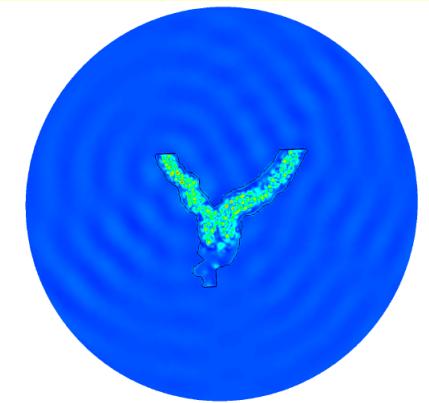


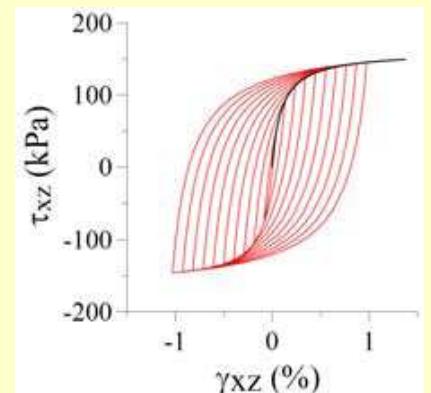
# Modélisation numérique de la propagation de vibrations, d'ondes sismiques et acoustiques

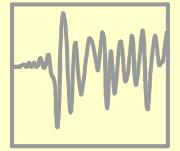


Jean-François Semblat,  
Luca Lenti

Département Géotechnique, Environnement,  
Risques naturels et Sciences de la Terre  
Laboratoire « Séismes et Vibrations »

[jean-francois.semblat@ifsttar.fr](mailto:jean-francois.semblat@ifsttar.fr)



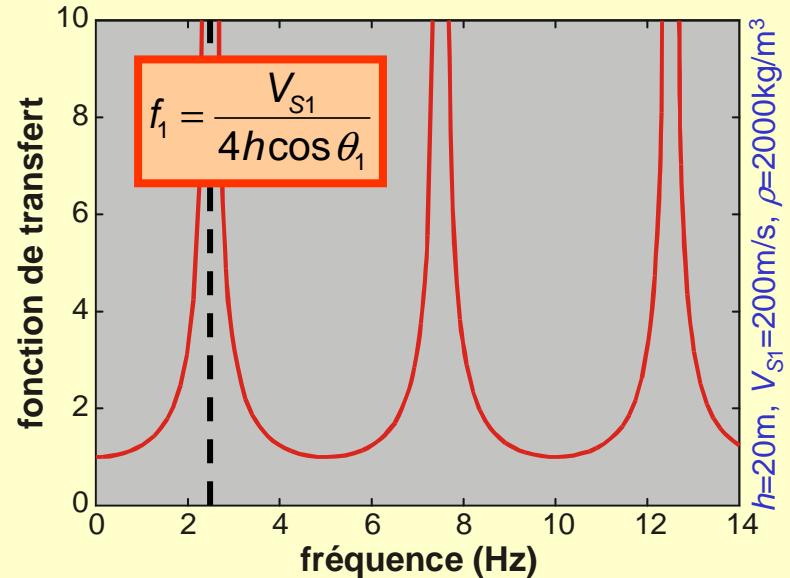


# 1/ Quels phénomènes et quelles méthodes ?



# Séismes : quels modèles ?

- Source, propag. (**amplification/conversion**)
- Milieu continu/discontinu  
(failles, glissements)
- Milieu isotrope ?
- Comportement :
  - linéaire (viscoélastique)
  - linéaire « équivalent »
  - non linéaire (élastique, élastoplastique...)
- Validation :
  - Mesures site (propagation), essais labo (comportement)
  - Bases de données (publiques) : RESIF, Kik-net...





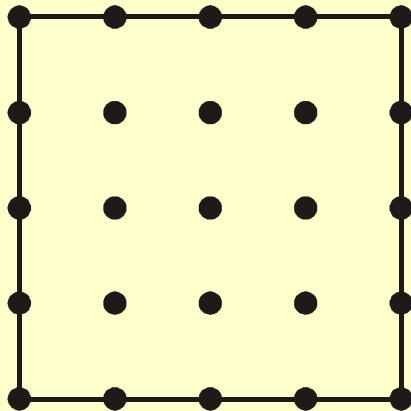
# Quelles méthodes ?

- Différences finies (FDM)
- Éléments finis (FEM)
- Éléments spectraux (SEM)
- Éléments de frontière (BEM)
- Volumes finis (VFM)
- Galerkin discontinu (DGM)
- Éléments distincts (DEM)
- ...modèles physiques (centrifugeuse 1/100è)
- Couplage/chaînage de différentes méthodes

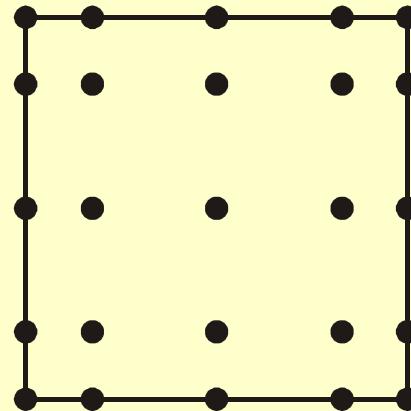


# Modéliser la propagation

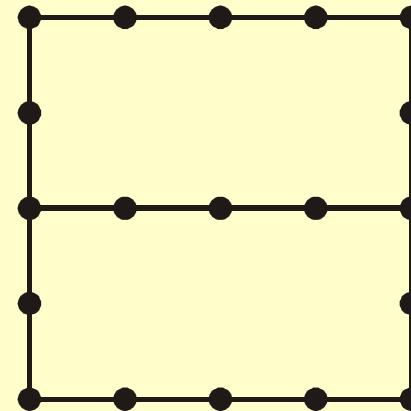
Éléments finis



Éléments spectraux



Éléments frontière



FEM/SEM:

- Fortes hétérogénéités
- Comportements non linéaires
- Dispersion numérique
- Réflexions parasites

couplage,  
méthodes  
hybrides

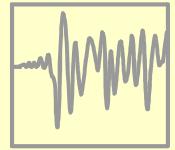
BEM:

- Faibles hétérog.
- Comportement linéaire
- Pas d'erreur cumulative
- Milieux infinis

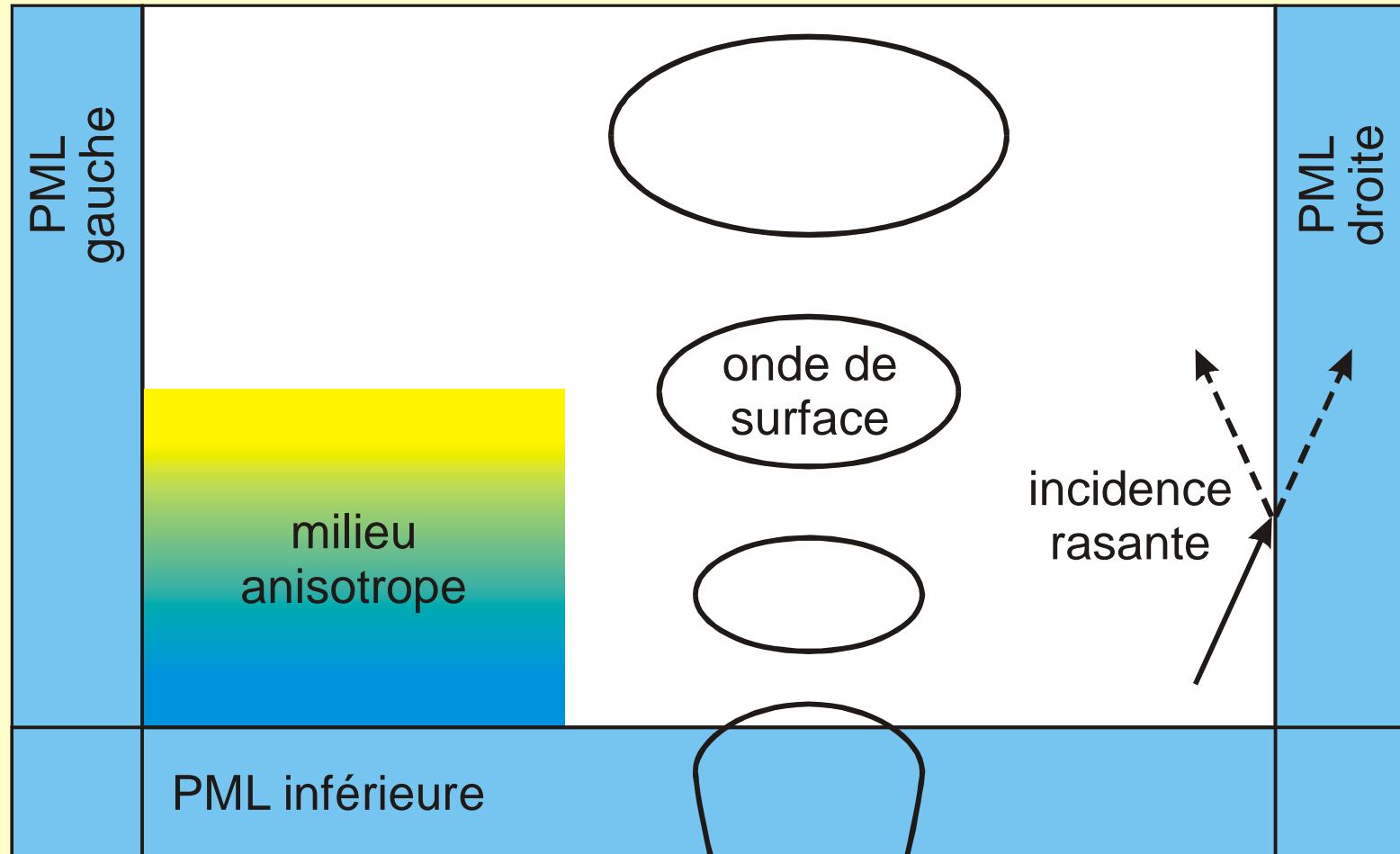


## 2/ Méthodes des éléments finis

*a/ Réflexions parasites*



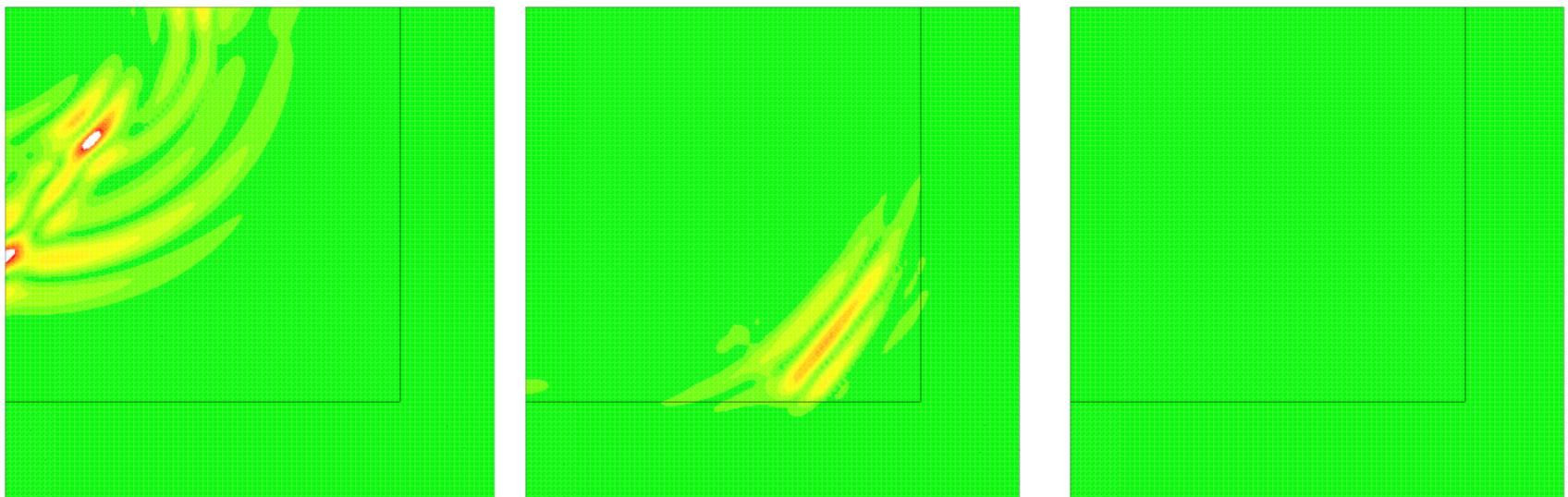
# Couches absorb.: instabilités





# Méthode simple

- Couches avec amortissement de Rayleigh  
(**« Caughey Absorbing Layer Method »**),
- Amortissement homogène ou variable





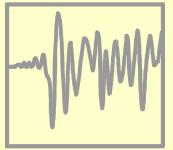
# PMLs "multidirectionnelles"

- Pour des incidences rasantes ou des milieux anisotropes, les PMLs classiques peuvent s'avérer instables
- Meza-Fajardo et Papageorgiou (2008) ont proposé une formulation de PMLs "multidirectionnelles"

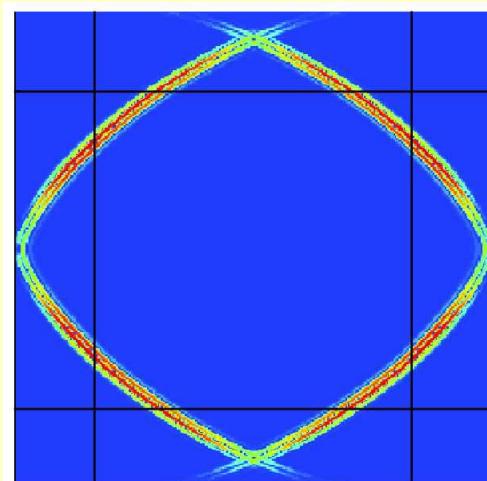
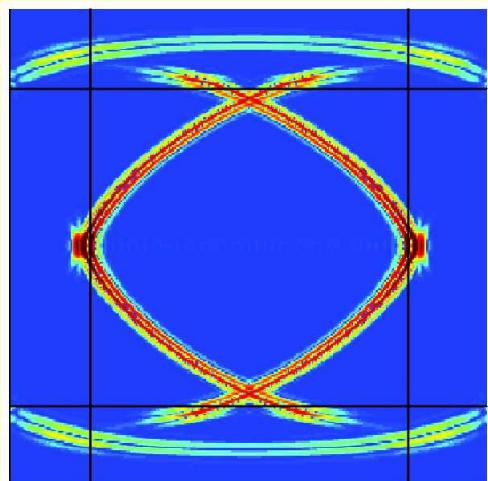
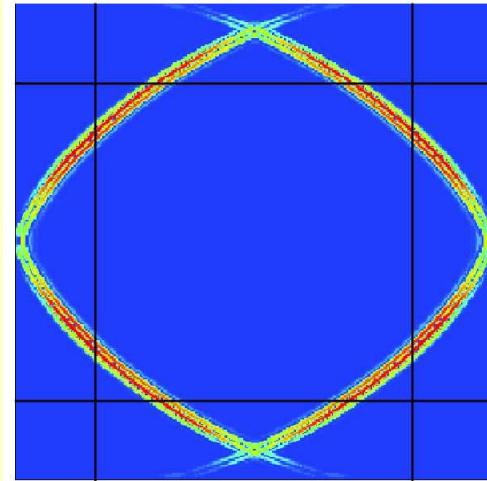
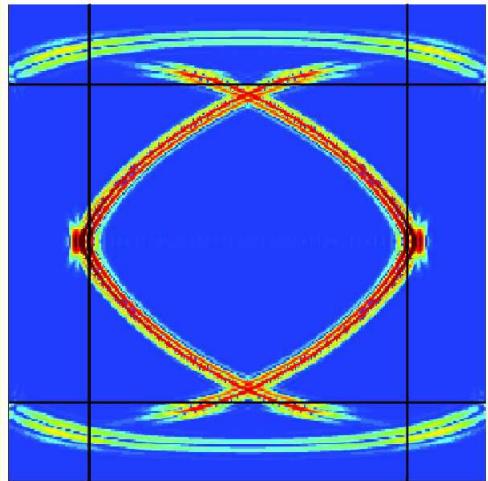
$$\tilde{x} = x + \frac{1}{i\omega} \alpha_x^{(x)} x ; \quad \tilde{y} = y + \frac{1}{i\omega} \alpha_y^{(x)} y ; \quad \tilde{z} = z + \frac{1}{i\omega} \alpha_z^{(x)} z$$

alors que :  $\alpha_y^{(x)} = \alpha_z^{(x)} = 0$  pour la formulation classique

- La formulation "MPML" autorise un choix optimal de la direction du "vecteur atténuation"



# Efficacités des "MPML"

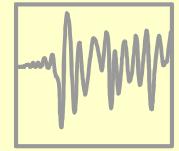


(Meza-Fajardo & Papageorgiou, 2008)



## 2/ Méthodes des éléments finis

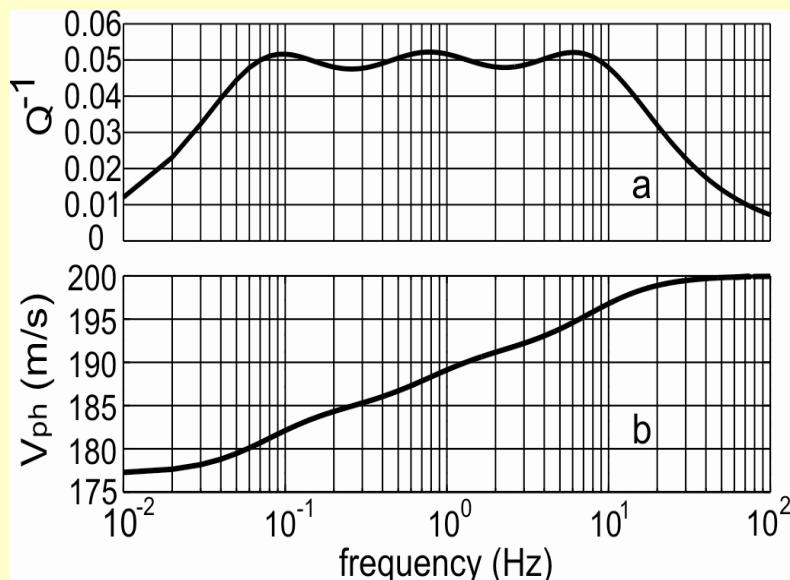
*b/ Modèles dissipatifs linéaire  
et non linéaire*



# Modèle « NCQ »

- Amortissement varie général<sup>t</sup> peu avec la fréquence  
→ modèle Maxwell généralisé (Emmerich & Korn, 1987)
- Loi de comportement en temps :

$$s_{ij}(t) = 2M_U \left[ e_{ij}(t) - \sum_{l=1}^n \zeta_l(t) \right]$$



(a) Facteur qualité quasi-constant

$$Q^{-1}(\omega) \approx \sum_{j=1}^n y_j \frac{\omega / \omega_j}{1 + (\omega / \omega_j)^2}$$

(b) Vitesse de phase à faible sollicitation

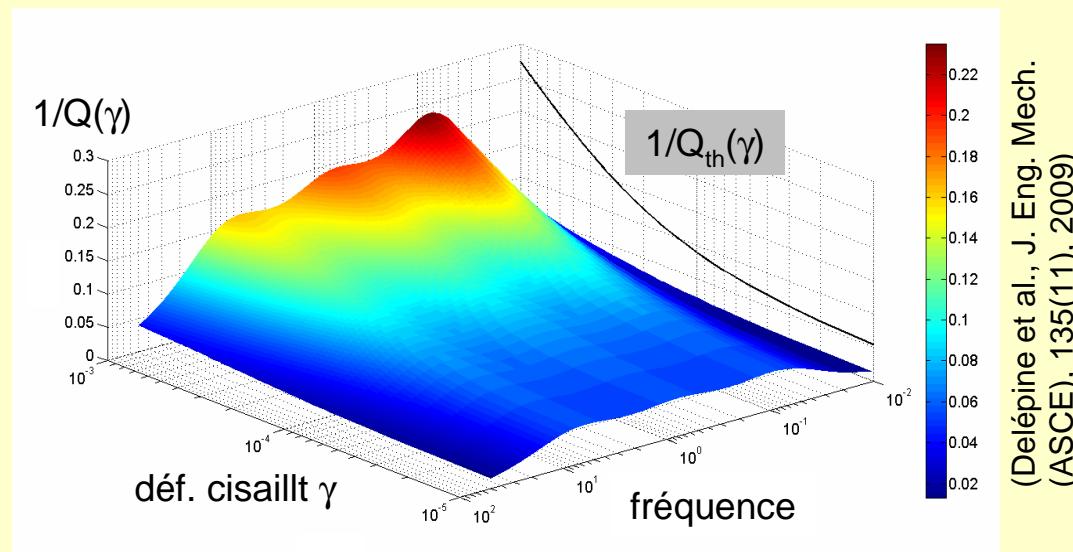


# Modèle non linéaire "X-NCQ"

- Extension de la loi de comportement dans le domaine non linéaire (élasticité non lin. + viscosité non linéaire)

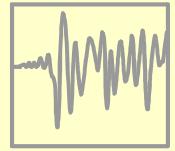
$$s_{ij}(t) = 2M_U(J_2) \left[ e_{ij}(t) - \sum_{l=1}^n \zeta_l(t, y_l(J_2)) \right]$$

Variations  $Q^{-1}$  vs fréq.  
et déformation

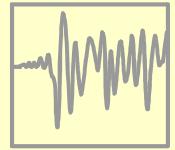


(Delépine et al., J. Eng. Mech.  
(ASCE), 135(11), 2009)

- Identification : essais colonne résonnante  $G(\gamma)$  et  $\beta(\gamma)$



## 3/ Méthode des éléments de frontière



# BEM classique/rapide

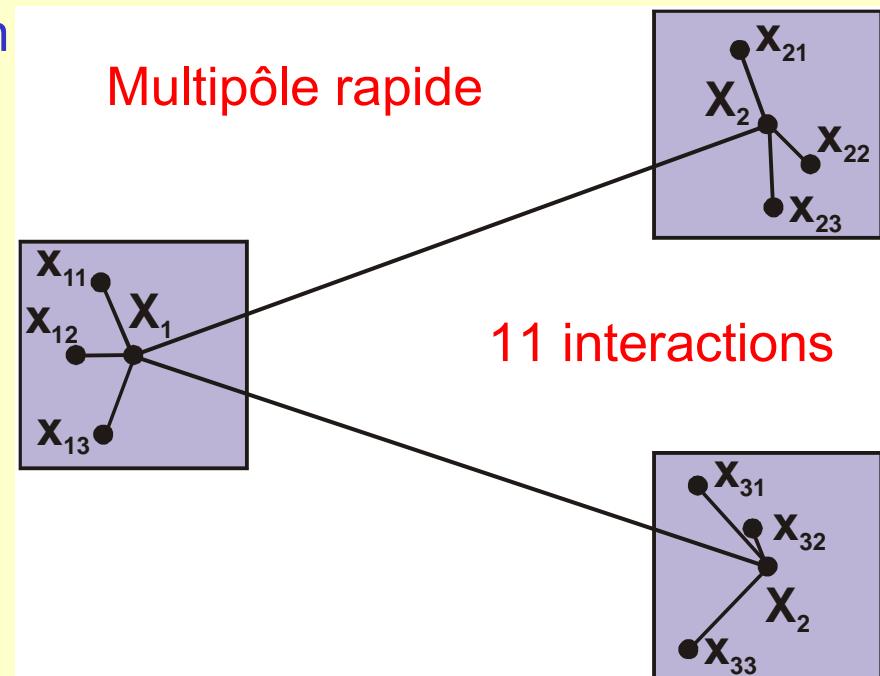
- *BEM* : efficace pour *problèmes en milieux infinis* mais coût élevé en propagation ondes 3D
- Formulation accélérée : **FMM**

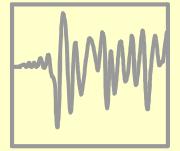
**FMM = Fast Multipole Method**

→ Grouper points observation et points source

→ Réduire coût numérique et volume de stockage

$N \leq 10^4$  DOFs  
(surface)

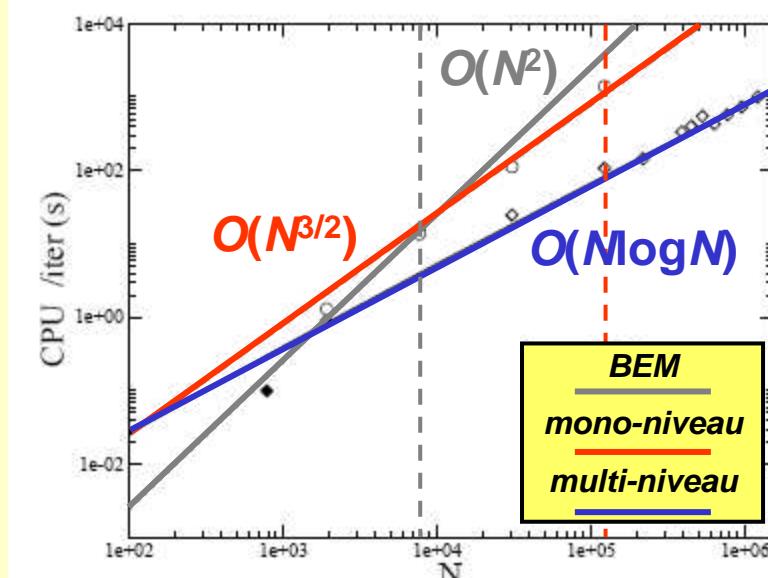




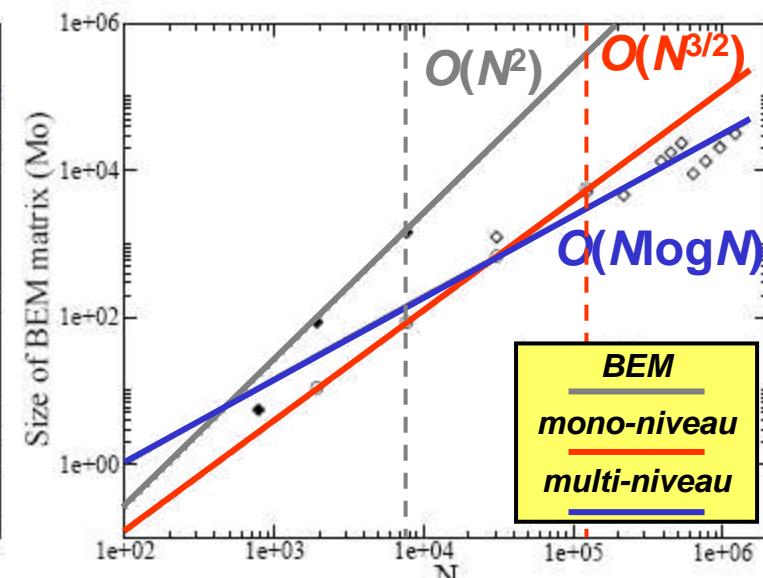
# Efficacité de la FMM

- Comparaisons entre BEM standard, FMM mono-niveau et FMM multi-niveaux (*cavité sous pression*)

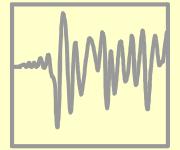
Temps CPU



Taille mémoire

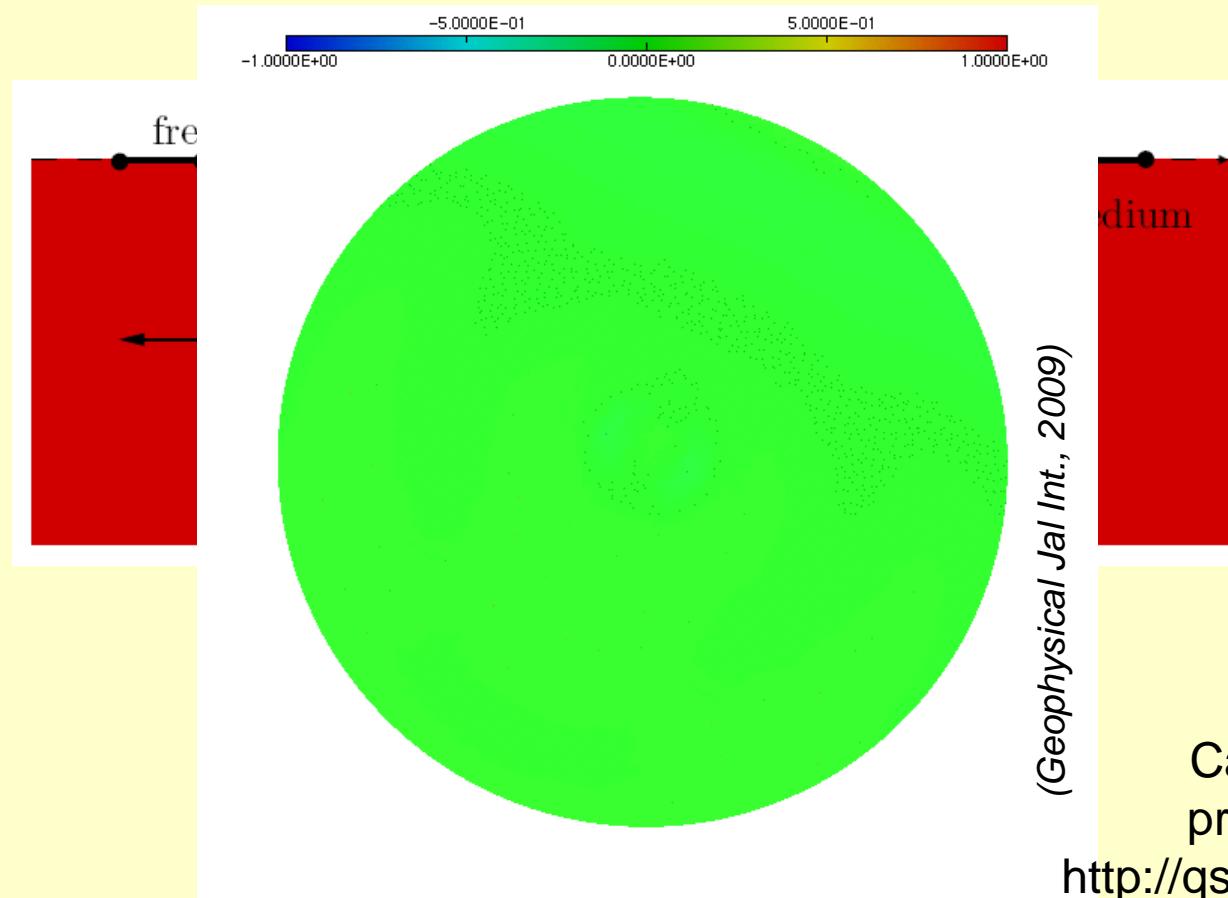


(CMAME, 2008)



# Ex.1 : Onde sismique en 3D

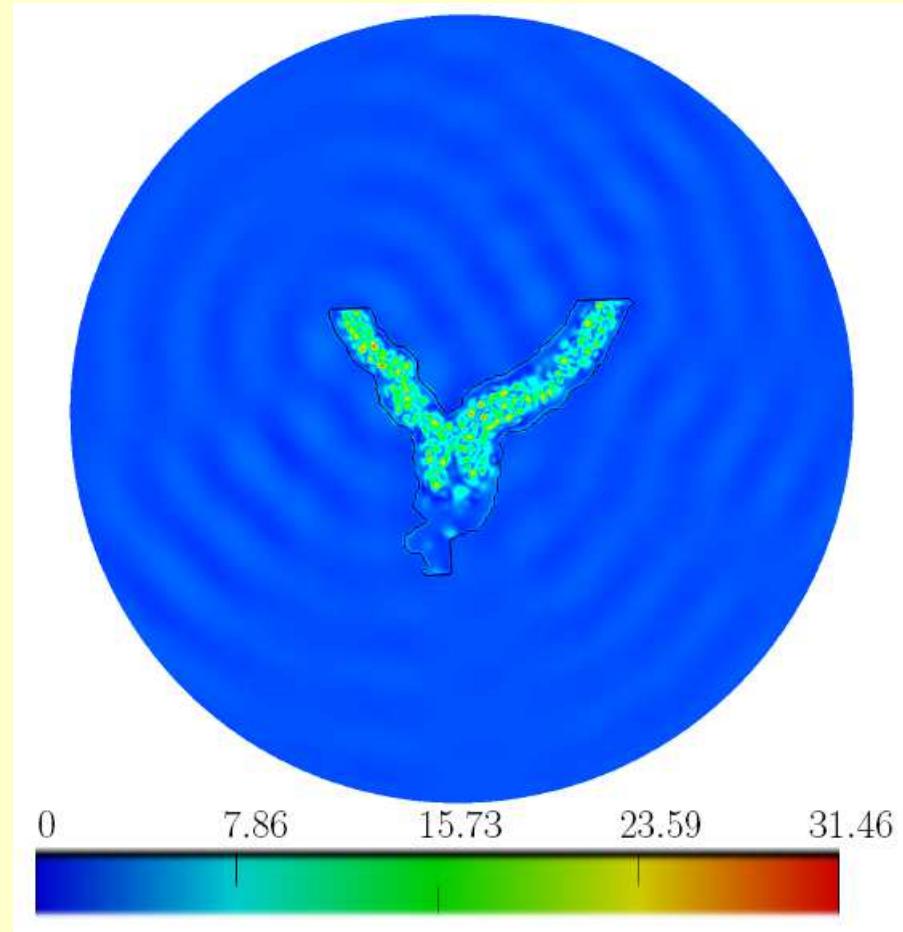
- Réf.: Mossessian & Dravinski, EESD 1990





## Ex.2 : bassin Grenoble

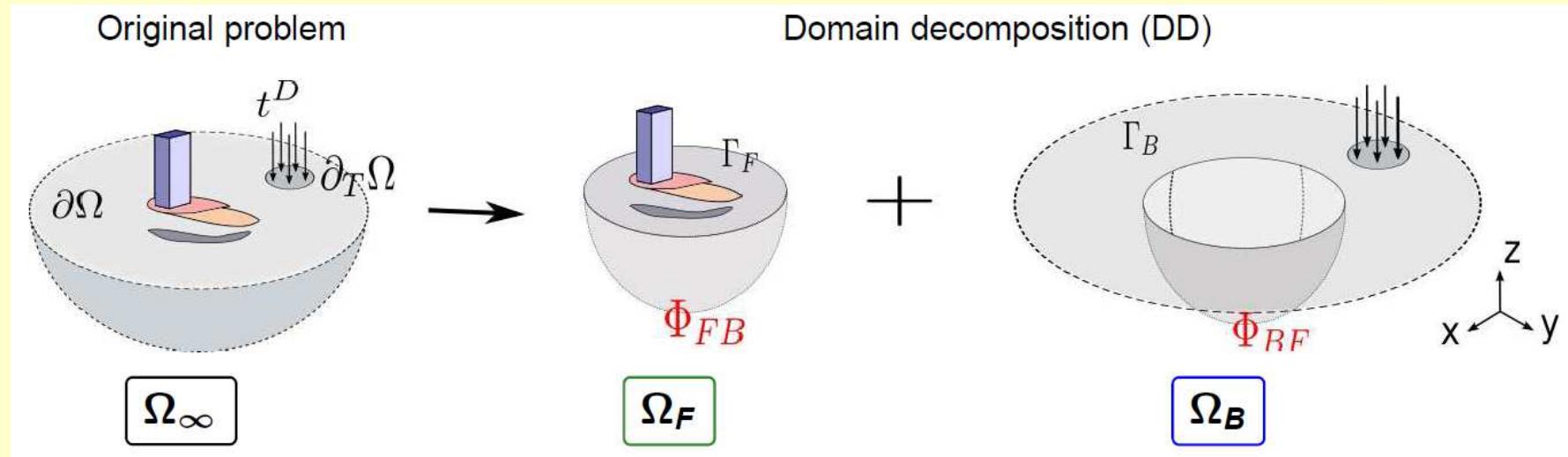
- Maillage 3D
- Onde plane
- Module du déplacement vertical à  $f=0.6\text{Hz}$
- Calcul :  
 $N=141288$   
747 itérat. avec préconditionnement



(S. Chaillat, J-F Sembat, M. Bonnet, CiCP, 2011)

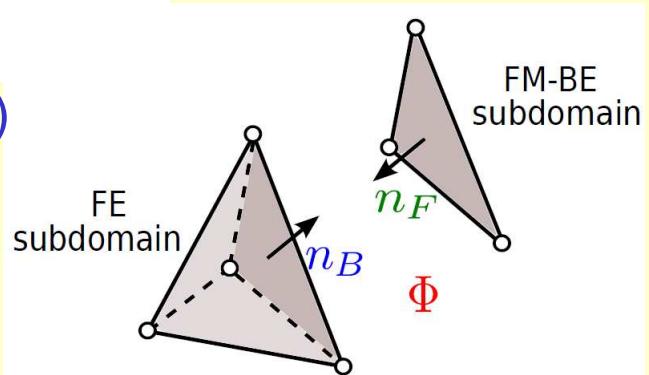


# Couplage FEM/Fast BEM



- Éqs du mouvement :  
$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s(\mathbf{x}) + \rho\omega^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}) = 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u}_s + \nabla \mathbf{u}_s^T)(\mathbf{x}) \\ \boldsymbol{\sigma}_s(\mathbf{x}) = \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_s(\mathbf{x}) \end{cases}$$
- Conditions fortes (maillages conformes)

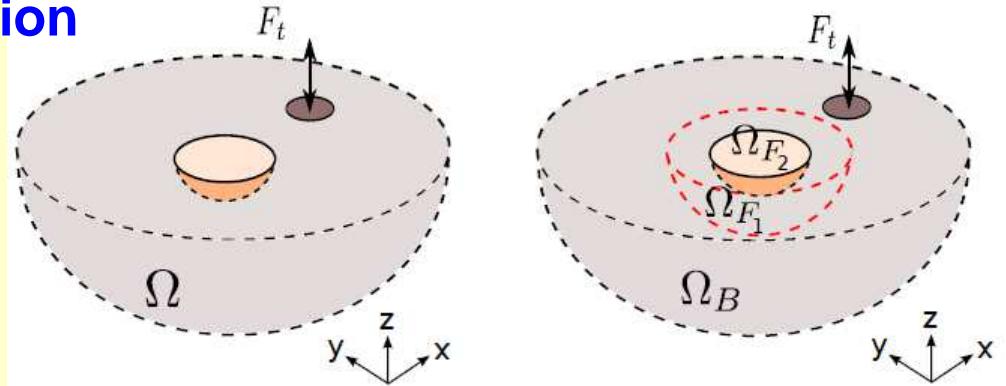
$$\begin{cases} \mathbf{u}^F(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^B(\mathbf{x}) \\ \mathbf{t}^F(\mathbf{x}) + \mathbf{t}^B(\mathbf{x}) = 0 \end{cases}$$



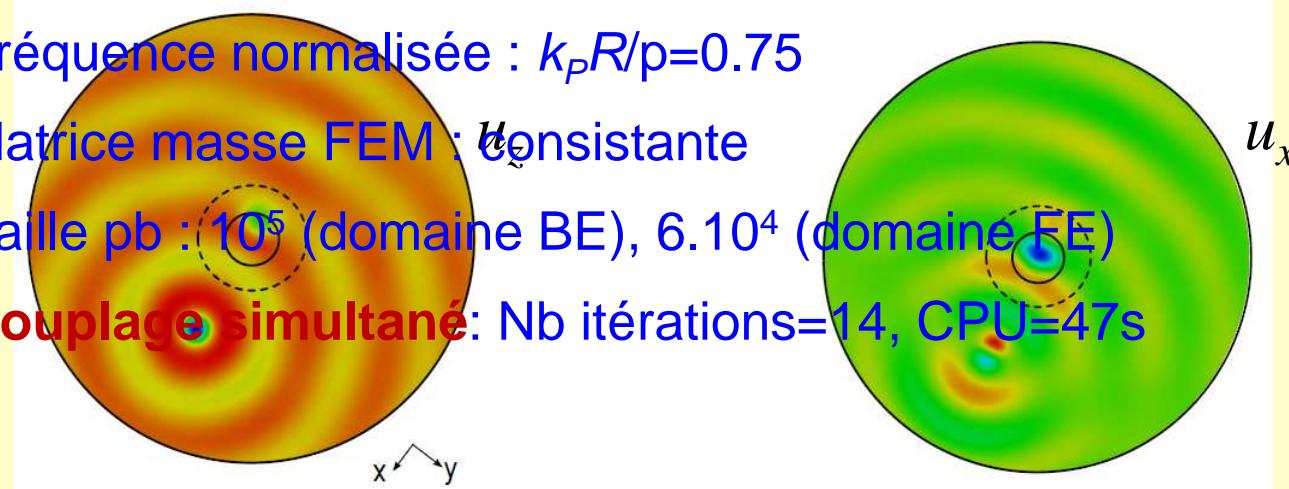


# Couplage : exemple

## Inclusion



- Fréquence normalisée :  $k_p R/p = 0.75$
- Matrice masse FEM :  $u_x$  consistante
- Taille pb :  $10^5$  (domaine BE),  $6 \cdot 10^4$  (domaine FE)
- **Couplage simultané**: Nb itérations=14, CPU=47s



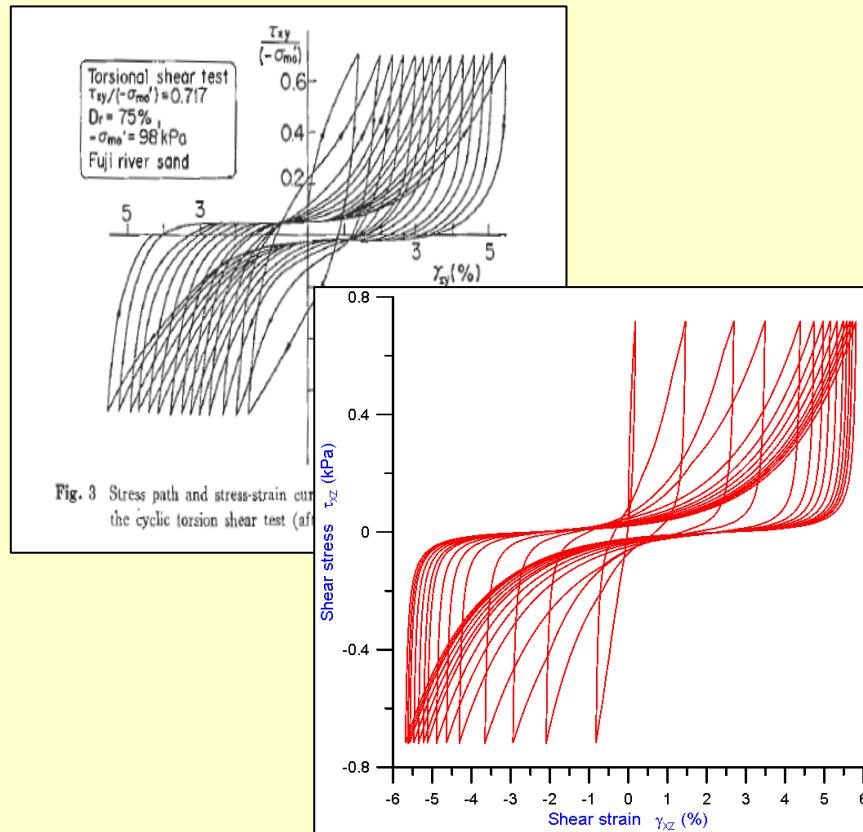


## 4/ Interactions squelette/fluide



# Effet pression intersticielle

- Modèle vs essai labo :



Liquéfaction



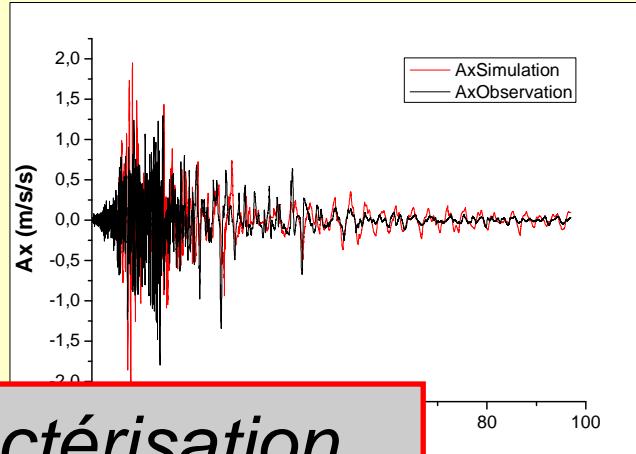
(Christchurch, NZ, 2011)



# Effet sur propagation

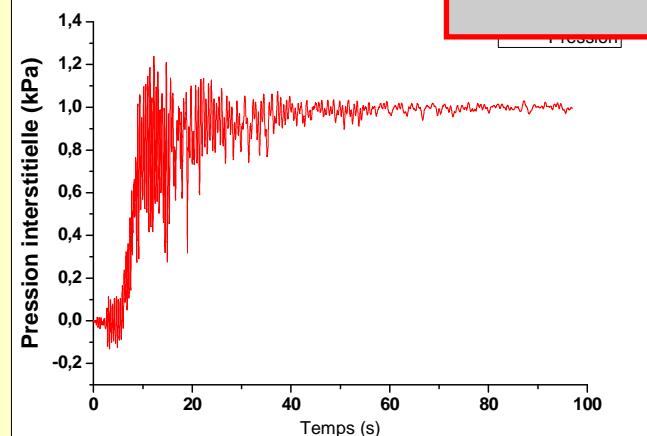
- Séisme Californie :

Accélération X

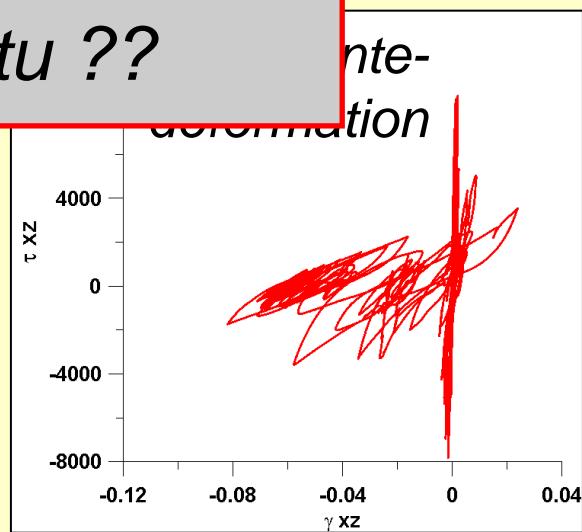


Caractérisation  
in situ ??

Accumulation plu-



inte-  
deformation





# Merci !



<http://perso.lcpc.fr/semblat.jean-francois>

**Bard P.Y., Chazelas J.L., Guéguen P., Kham M., Semblat J.F.**, Assessing and managing earthquake risk - Chap.5 : Site-city interaction, Springer, 2005.

**Becache E., Fauqueux S., Joly P.** (2003). Stability of perfectly matched layers, group velocities and anisotropic waves, *Jal Computational Physics*, 188(2), pp.399-433.

**Bonnet M.**, Boundary integral equation methods for solids and fluids, Wiley, Chichester, UK, 1999.

**Chaillat S., Bonnet M., Semblat J.F.** (2009). A new fast multi-domain BEM to model seismic wave propagation and amplification in 3D geological structures, *Geophysical Journal International*, 177(2), pp.509-531.

**Clouteau D., Aubry D.** (2001). Modifications of the ground motion in dense urban areas, *Journal of Computational Acoustics*, 9, pp.1659-1675.

**Dangla P., Semblat J.-F., Xiao H.H., Delépine N.**, A simple and efficient regularization method for 3D BEM: application to frequency-domain elastodynamics, *Bull. of Seismological Soc. of America*, 95(5): 1916-1927, 2005.

**Delépine N., Bonnet G., Lenti L., Semblat J.F.** (2009). Nonlinear viscoelastic wave propagation: an extension of Nearly Constant Attenuation models, *Journal of Eng. Mechanics (ASCE)*, 135(11), pp.1305-1314.

**Festa G., Villette J.P., Delavaud E.** (2005). Interaction between surface waves and absorbing boundaries for wave propagation in geological basins : 2D numerical simulations, *Geophysical research letters*, 32(20), pp.L20306.1-L20306.4.

**Kham M., Semblat J.F., Bard P.Y., Dangla P.**, Site-City Interaction: Main Governing Phenomena Through Simplified Numerical Models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96(5): 1934-1951, 2006.

**Meza-Fajardo K., Papageorgiou A.** (2008). A nonconvolutional, split-field, perfectly matched layer for wave propagation in isotropic and anisotropic elastic media: stability analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98(4), pp.1811-1836.

**Semblat J.F., Lenti L., Gandomzadeh A.** A simple and efficient absorbing layer method in elastodynamics, *Int. Journal for Numerical Methods in Eng.*, 2011.

**Semblat J.F., Pecker A.** Waves and vibrations in soils, IUSS Press, 500 p., 2009.

**Semblat J.F., Kham M., Bard P.Y.**, Seismic wave propagation in alluvial basins and influence of Site-City Interaction, *Bull. Seism. Soc. of America*, 98(4), 2008.

**Semblat J.F., Kham M., Parara E., Bard P.Y., Pitilakis K., Makra K., Raptakis D.** (2005). Site effects: basin geometry vs soil layering, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, 25(7-10), pp.529-538.

**Semblat J.F., Duval A.M., Dangla P.**, Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, 19(5): 347-362, 2000.

**Semblat J.F., Brioist J.J.**, Efficiency of higher order finite elements for the analysis of seismic wave propagation, *Journal of Sound and Vibration*, 231(2), pp.460-467, 2000.