Modéliser la propagation d’ondes dans les sols

Jean-François Semblat, semblat@lcpc.fr

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

IFSTTAR, Département Géotechnique, Eau et Risques, Groupe Séismes et Vibrations, Paris, www.lcpc.fr

Plan de la présentation

I. Contexte : vibrations, séismes, etc.

II. Modéliser la propagation d'ondes

   1. ***Différentes méthodes numériques***
   2. ***Modéliser la propagation en milieu infini***
   3. ***Exemples***

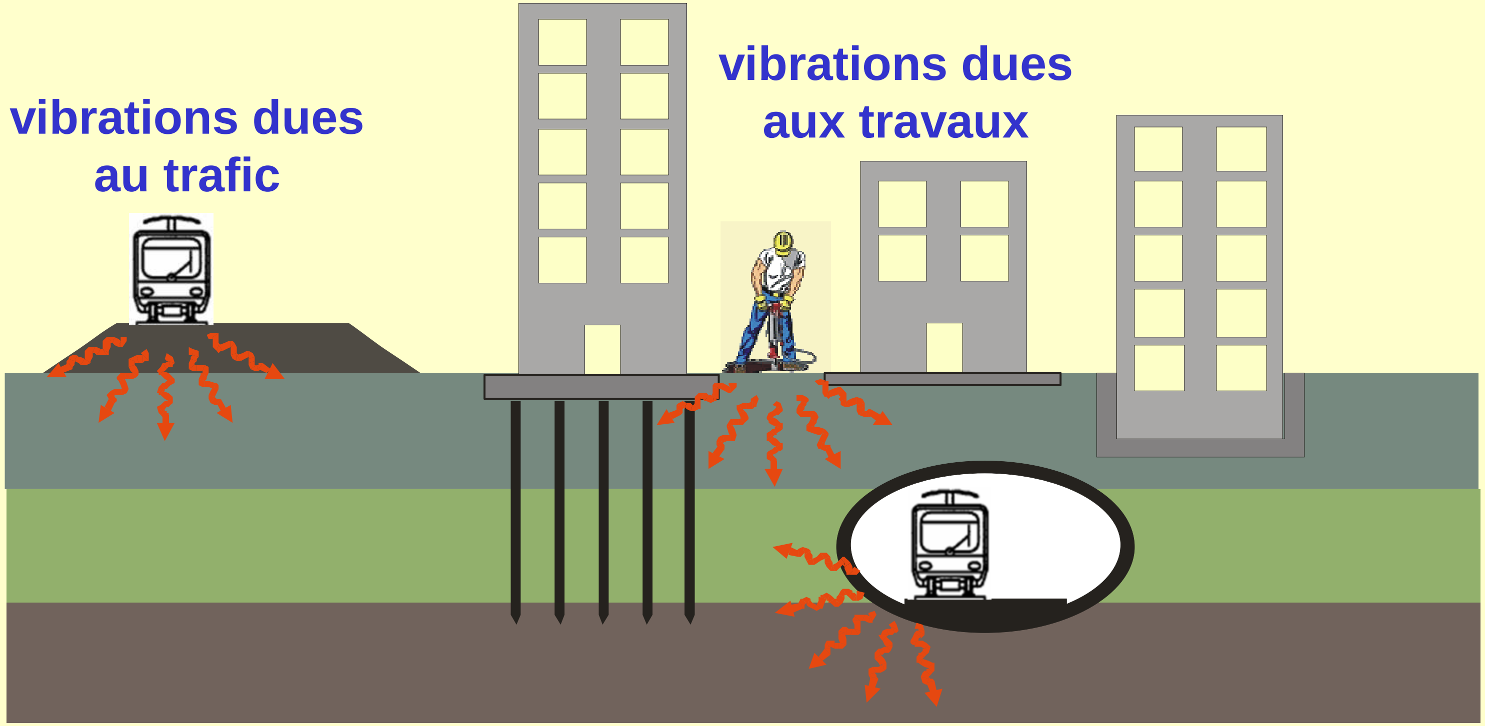
III. Ondes et comportement non linéaire

   1. ***Point de vue expérimental***
   2. ***Modèles simples et complexes***
   3. ***Modèle non linéaire « X-NCQ »***

IV. Intérêt de la méthode des élts de frontière

I/ Contexte

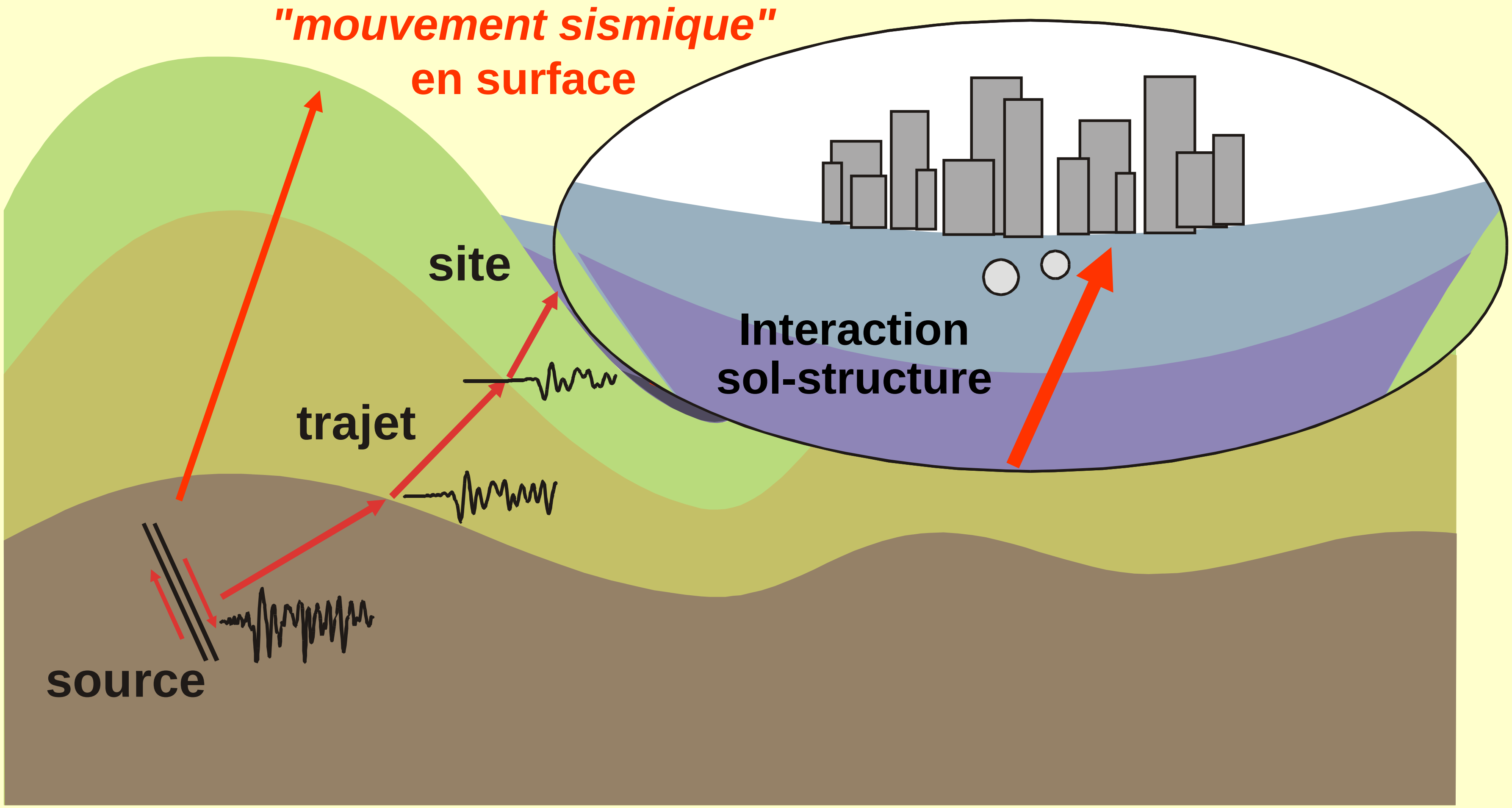
Vibrations dans l'environnement



nuisances ? dommages ?

↔ sources ? propagation ? ISS ?

Géotechnique sismique

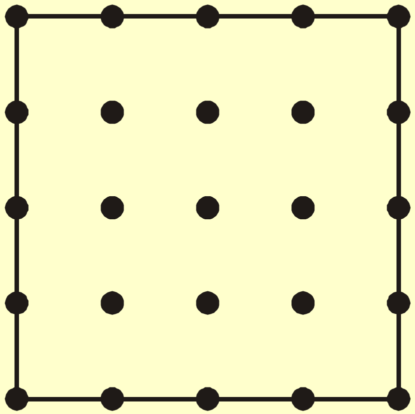


II/ Modéliser la propagation d'ondes

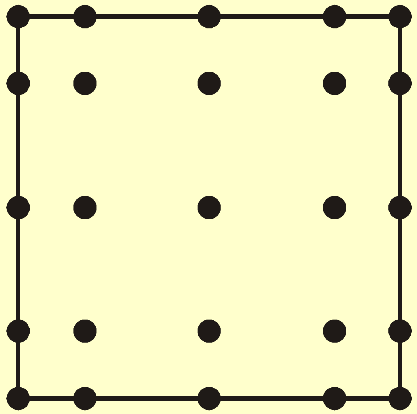
1/ Différentes méthodes numériques

Différentes méthodes numériques

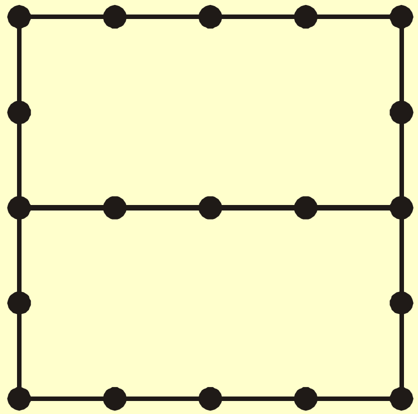
Éléments finis



Éléments spectraux



Éléments frontière



FEM/SEM:

- **Fortes hétérogéné**
- **Comportements c**
- **Dispersion numér**
- **Réflexions parasites**

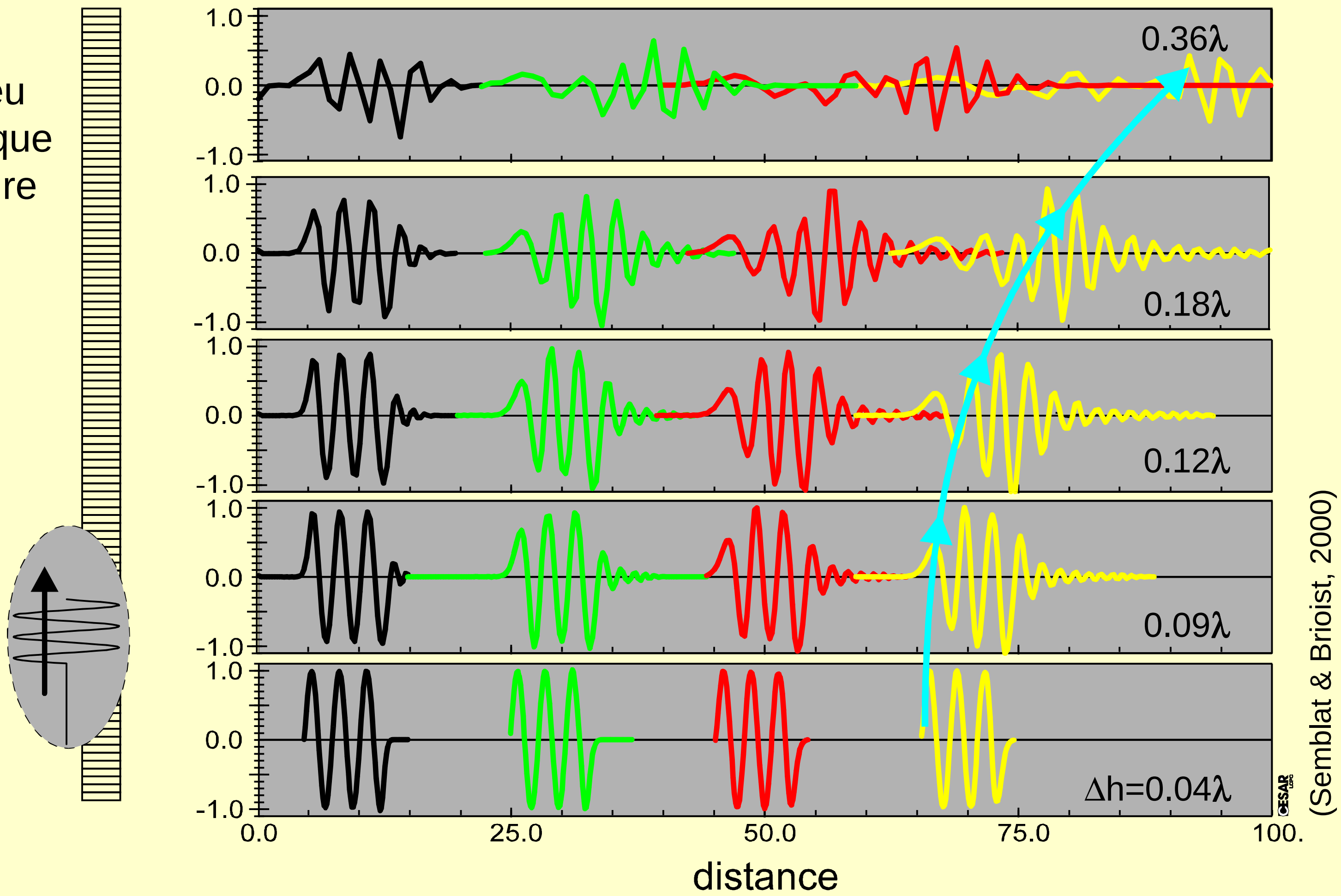
couplage, méthodes hybrides

BEM:

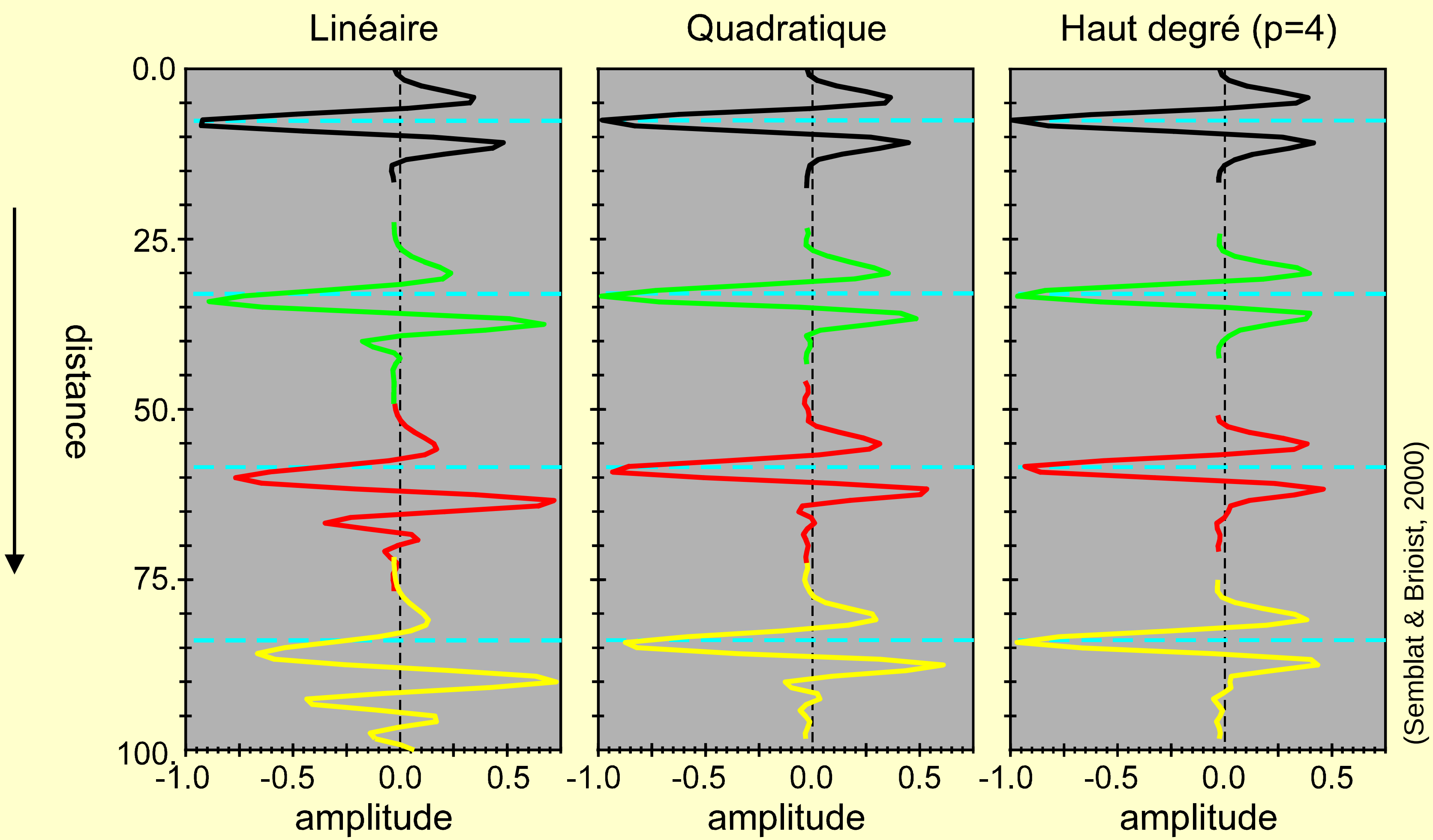
- **Faibles hétérog.**
- **Comportem[t] linéaire**
- **Pas d'erreur cumulative**
- **Milieux infinis**

FEM/SEM : dispersion numérique

milieu
élastique
linéaire



Élts finis de différents degrés

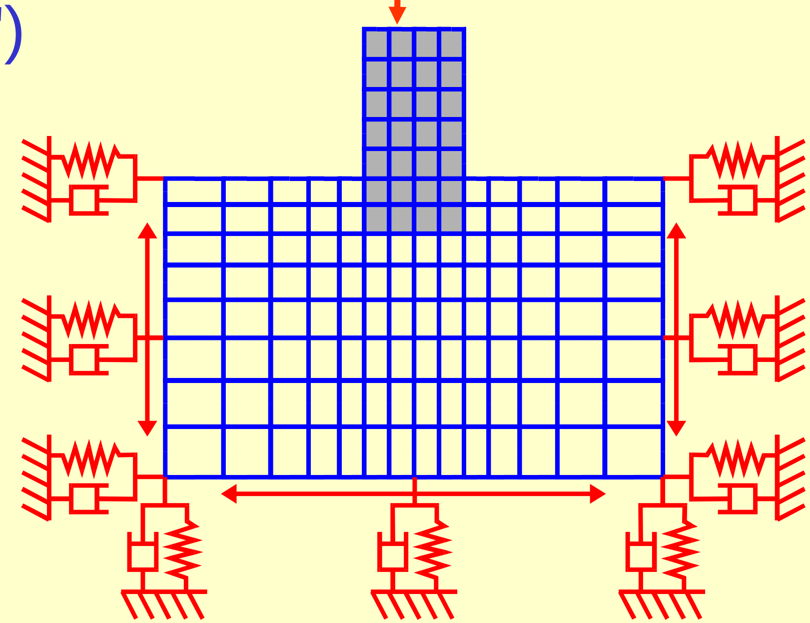


II/ Modéliser la propagation d'ondes

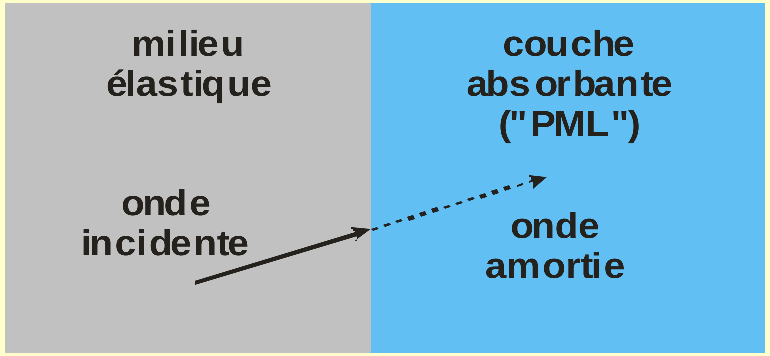
2/ Propagation en milieu infini

Couches absorbantes ("PML")

- Frontières absorbantes classiques
- Éléments infinis
- Couches absorbantes ("PML")

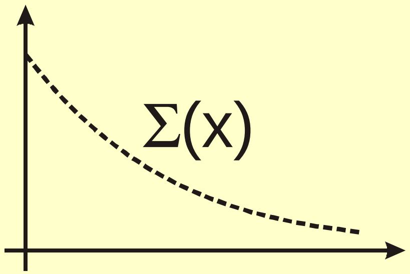


Principe des PMLs

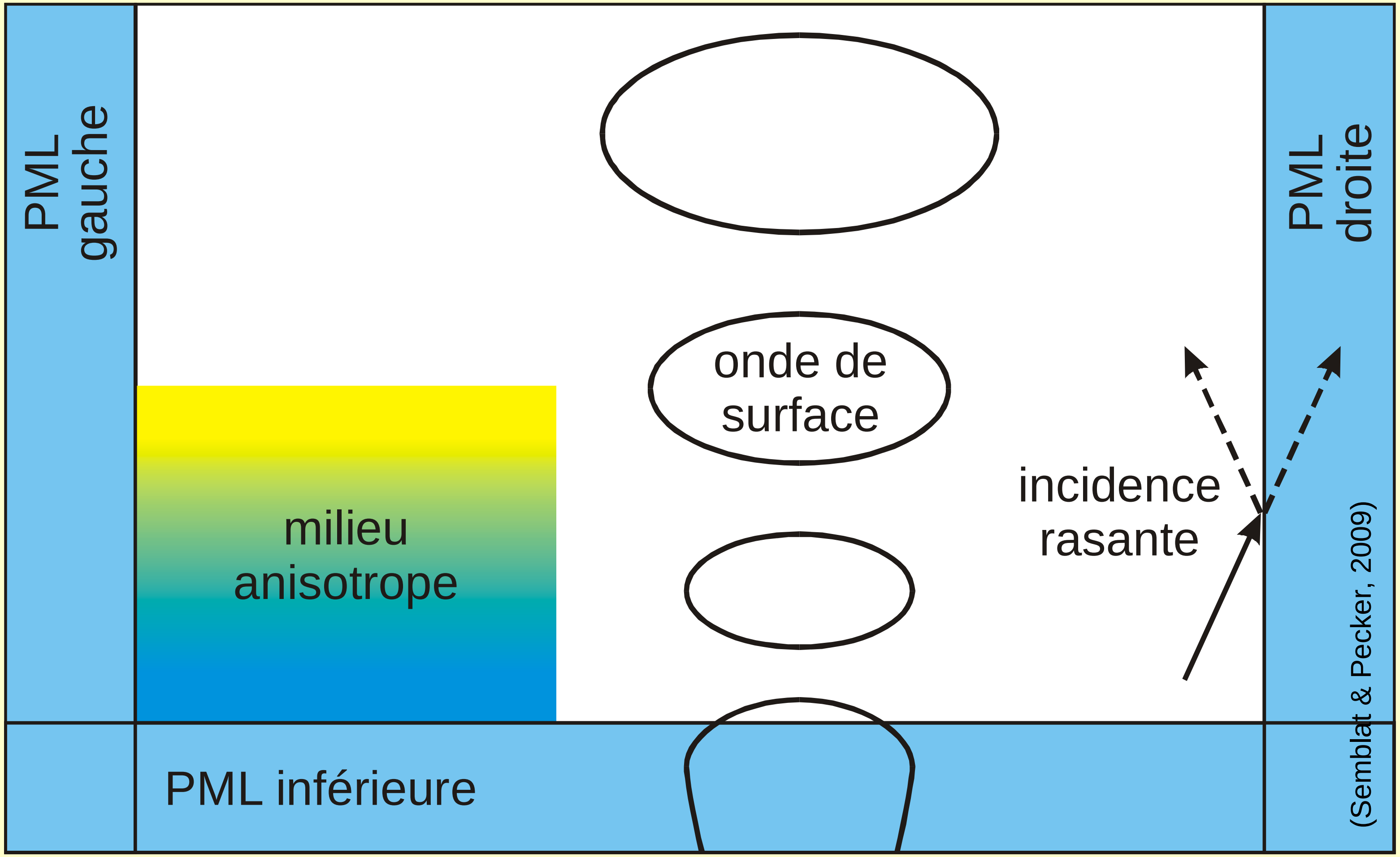


Changem[t] coord.

$$\tilde{x} = x + \frac{\Sigma(x)}{i\omega}$$

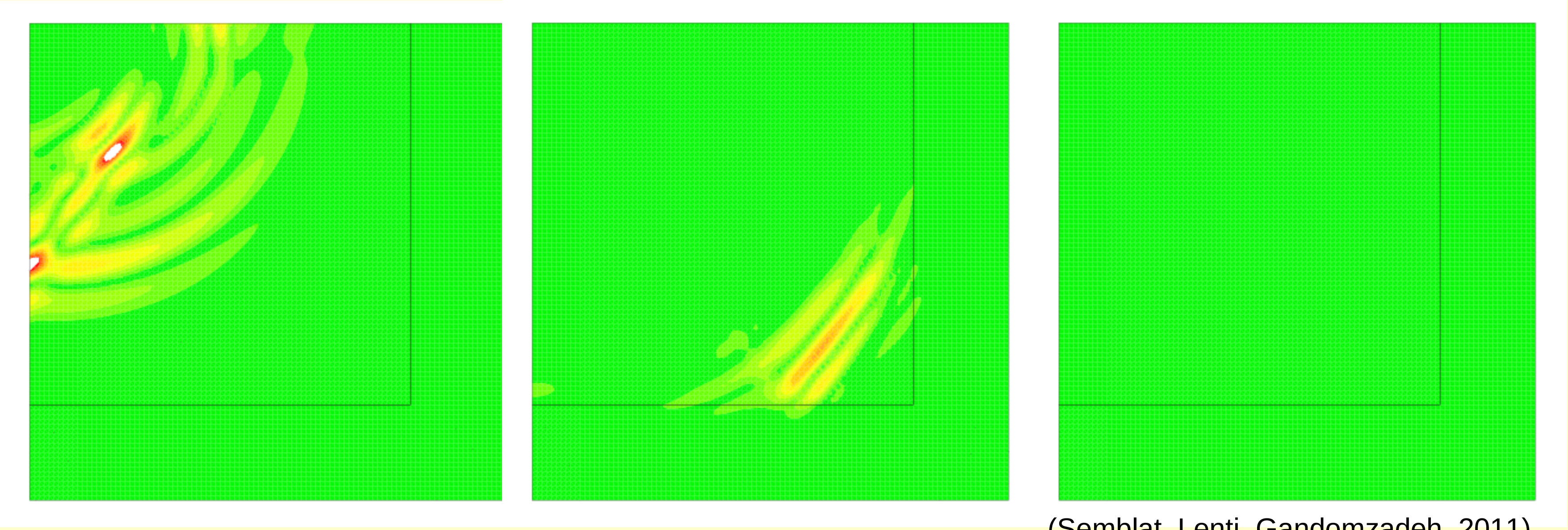


Couches absorb.: instabilités



Couches absorbantes

- Sol = milieu « infini » : pb pour FEM
- Couches absorbantes « simples » :
  - Couches avec amortissement de Rayleigh,
  - Amortissement homogène ou variable (« CALM »)



(Semblat, Lenti, Gandomzadeh, 2011)

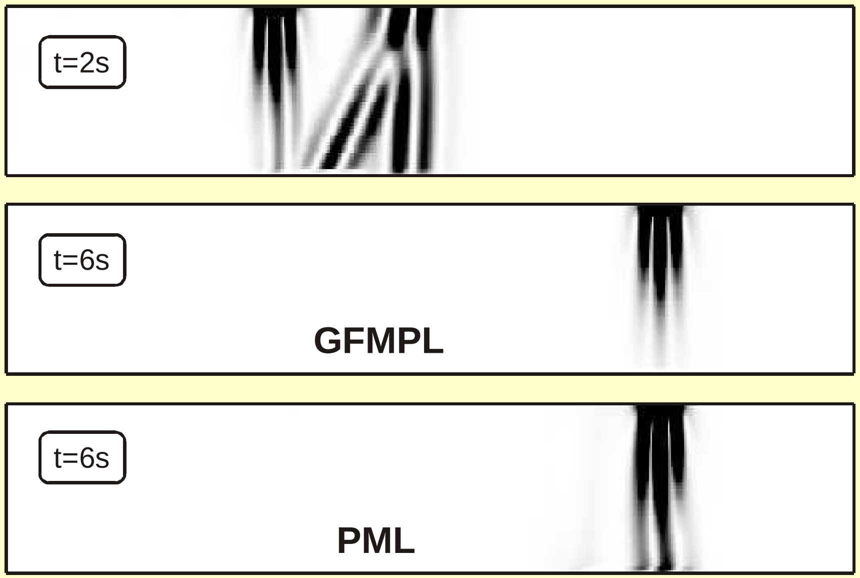
PMLs "filtrantes"

- Ondes surface dans modèles peu profonds peuvent être amplifiées par PMLs classiques
- Festa et al. (2005) ont proposé une PML "filtrante" pour remédier à ce problème

Décalage fréquence :

$$\tilde{x} = x + \frac{\Sigma(x)}{i\omega + \omega_c}$$

Pas d' amplification artificielle des ondes de surface



(Festa et al., 2005)

PMLs "multidirectionnelles"

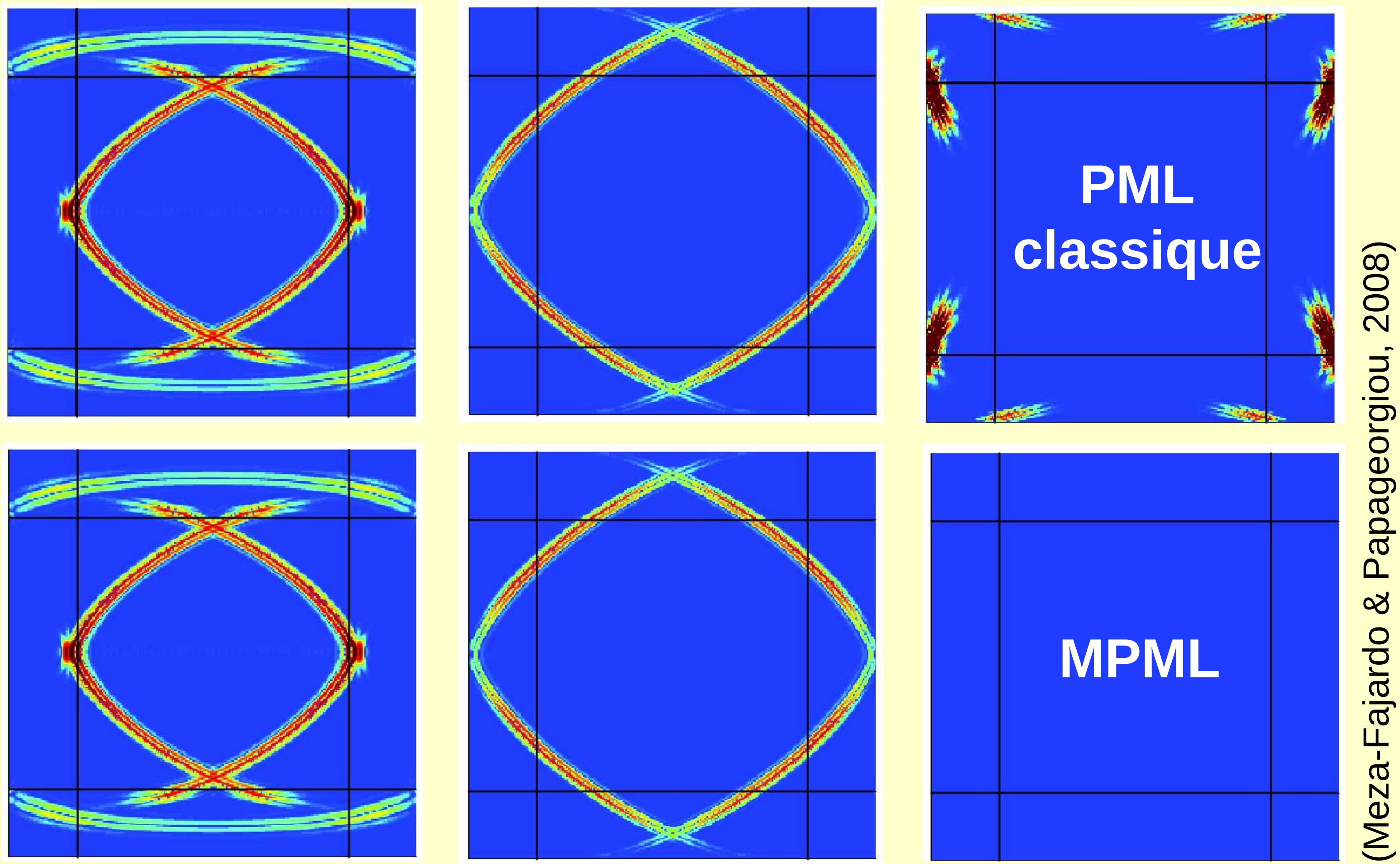
- Pour des incidences rasantes ou des milieux anisotropes, les PMLs classiques peuvent s'avérer instables
- Meza-Fajardo et Papageorgiou (2008) ont proposé une formulation de PMLs "multidirectionnelles"

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

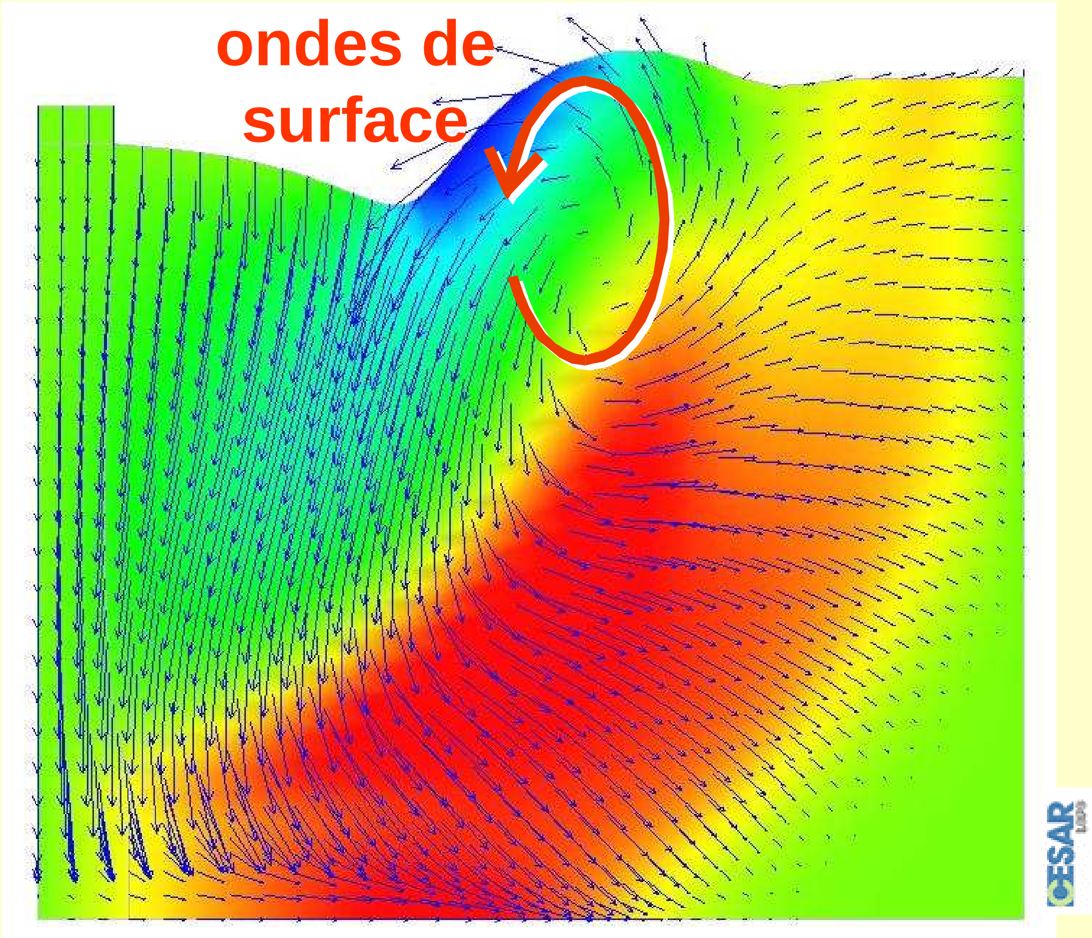
alors que : $\alpha_y^{(x)} = \alpha_z^{(x)} = 0$ pour la formulation classique

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

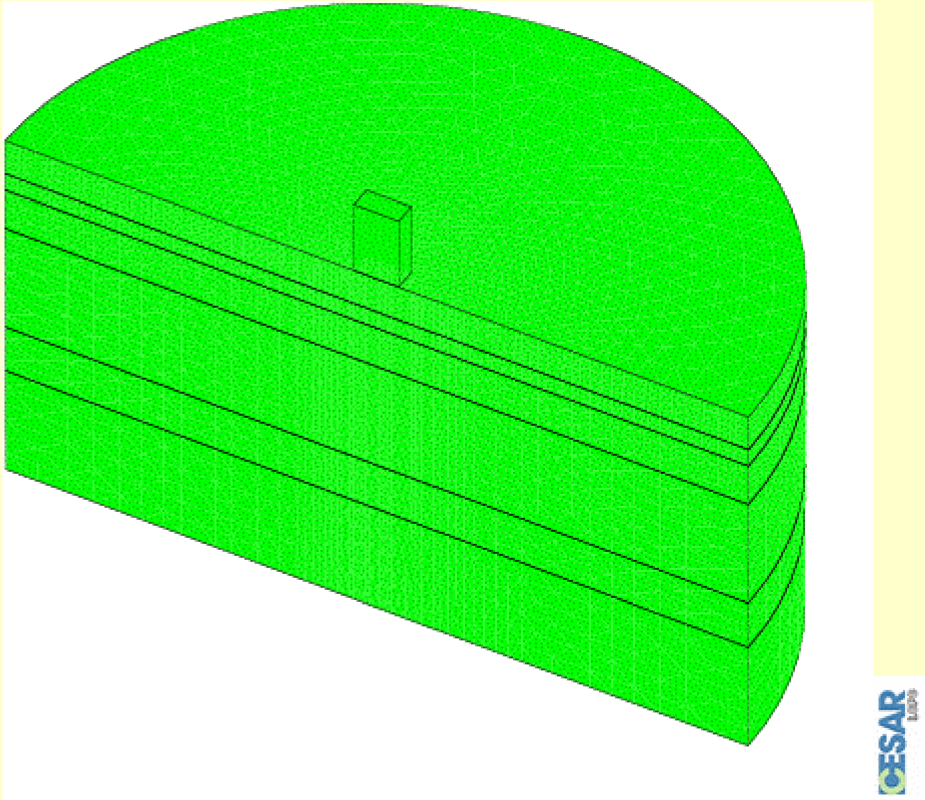
Efficacités des "MPML"



Ex.1 : Fondation circulaire



Ex.2 : Interaction sol-structure

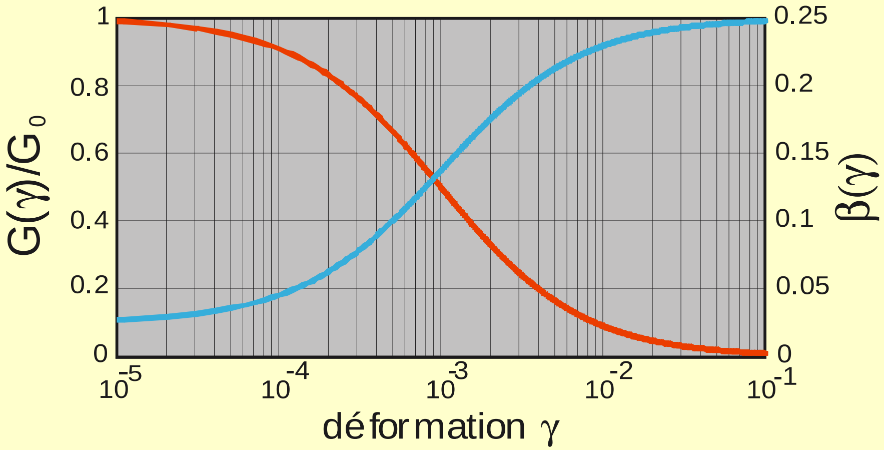


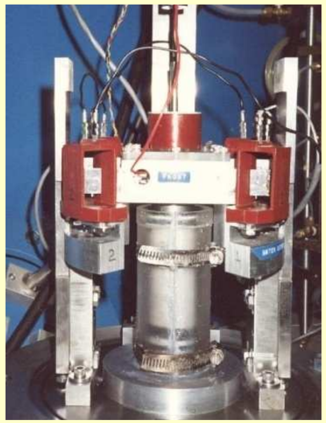
III/ Comportement non linéaire

1/ Point de vue expérimental

Cas des séismes forts

- **Séisme faible** 1D→2D-3D → augmentation de l'amplification des ondes de surface (piégées dans les bassins sédimentaires)
- **Séisme fort** (comportem[t] cyclique non linéaire des sols) → réduction du module de cisaillement et augmentation de la dissipation énergétique





III/ Comportement non linéaire

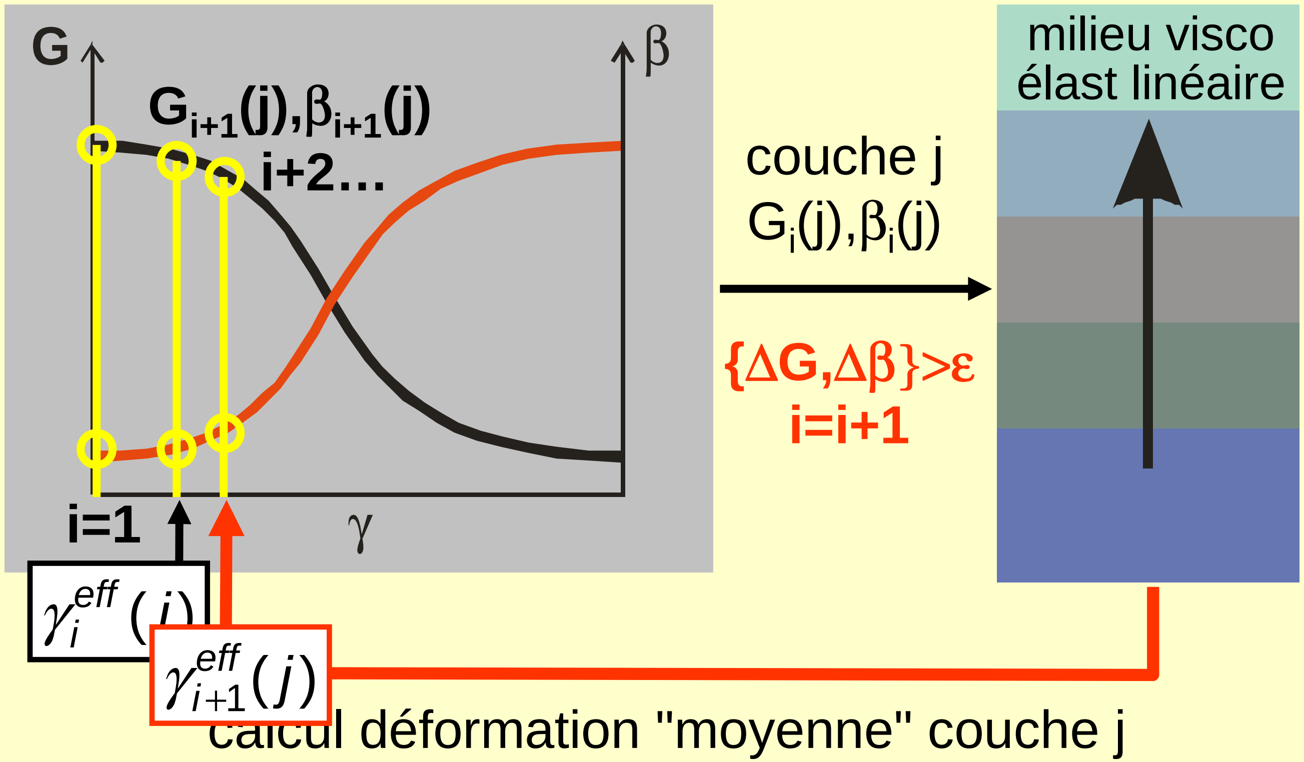
2/ Modèles simples et complexes

Différents modèles NL

- Modèle linéaire équivalent (itératif, faible base physique, réponse «moyenne»/couche)
- Modèle dép. fréquence (Kausel, Assimaki) : base empirique, complexité intermédiaire
- Modèle « X-NCQ » (viscoélast. non linéaire) : base physique, complexité intermédiaire
- Modèles élastoplastiques cycliques : modèles fins mais parfois complexes (nbreux param.)
- Modèles « couplés » (pression interstitielle) : complexes mais utiles pour liquéfaction, lien avec labo et mesures in situ adaptées

Modèle linéaire équivalent

- *Principe* : réaliser une analyse linéaire (fréq.) en ajustant paramètres comportem[t] à amplitude déform.



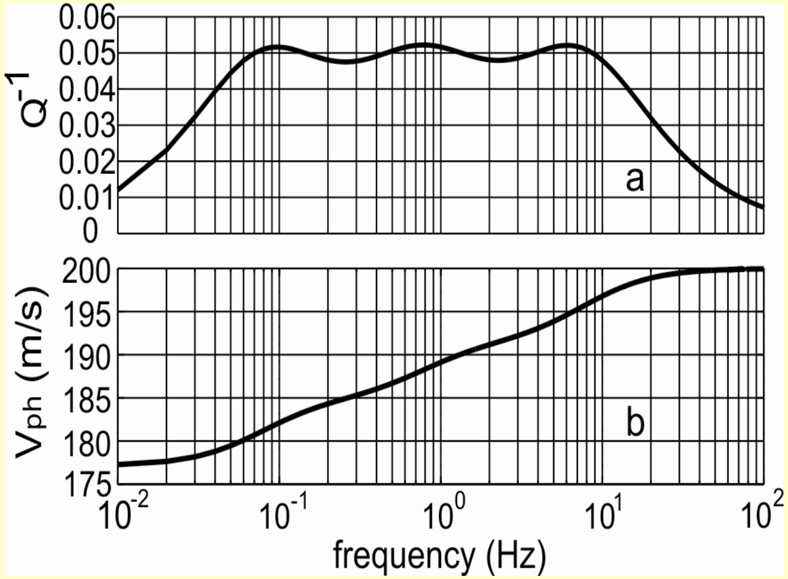
III/ Comportement non linéaire

3/ Modèle non linéaire « X-NCQ »

Modèle *"Q-Quasi Cst"* (NCQ)

- Amortissement varie général[t] peu avec la fréquence
  $\rightarrow$ modèle Maxwell généralisé (Emmerich & Korn, 1987)
- Loi de comportement en temps : $$s_{ij}(t) = 2M_U\left[e_{ij}(t) - \sum_{l=1}^{n}\zeta_l(t)\right]$$
- Paramètres de relaxation ζ tels que : $$\dot{\zeta}_l(t) + \omega_l\zeta_l(t) = \omega_l \frac{y_l}{1+\sum_{l=1}^{n} y_l} e_{ij}(t)$$

avec $$\sum_{l=1}^{n} y_l = \frac{\delta M}{M_R}$$



(a) Facteur qualité quasi-constant $$Q^{-1}(\omega) \approx \sum_{j=l}^{n} y_l \frac{\omega/\omega_l}{1+(\omega/\omega_l)^2}$$

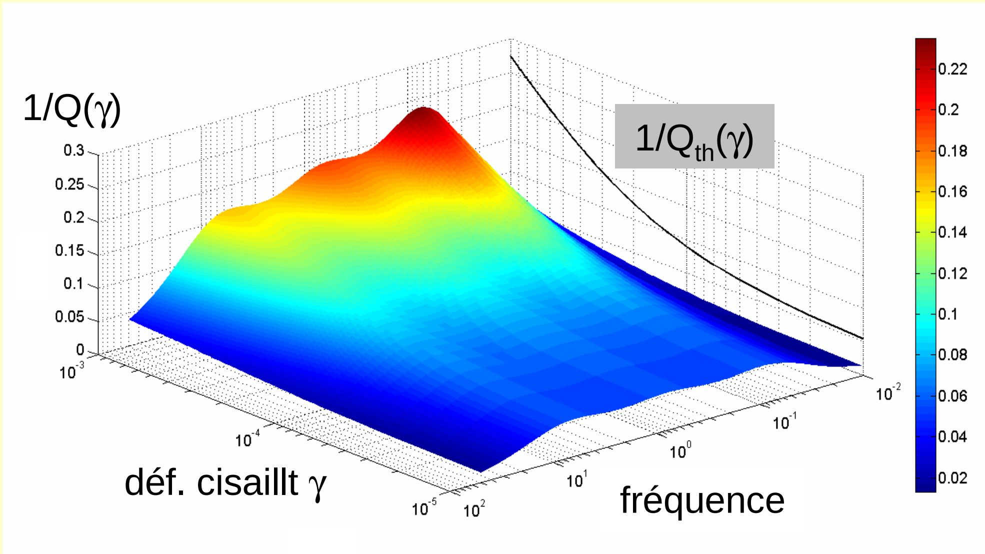
(b) Vitesse de phase à faible sollicitation

Modèle *"NCQ étendu"* *(X-NCQ)*

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

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

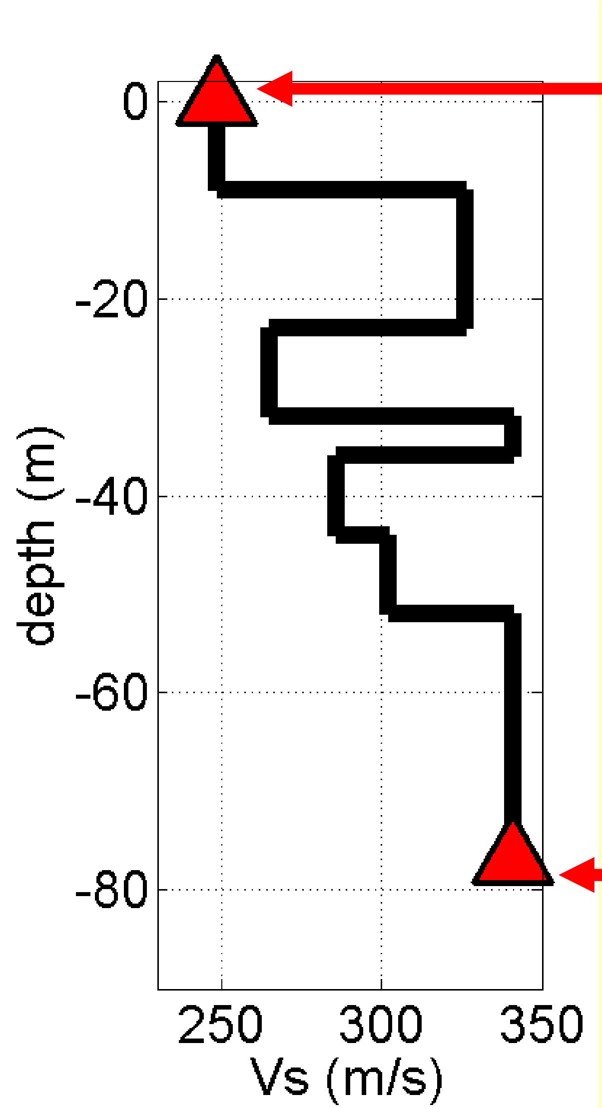
Variations Q^{-1} vs fréq. et déformation

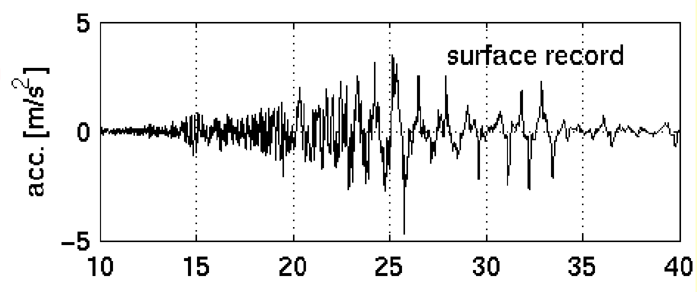


(Delépine et al., J. Eng. Mech. (ASCE), 135(11), 2009)

- Intérêt : un seul paramètre NL, propriétés $G(\gamma)$ et $\beta(\gamma)$

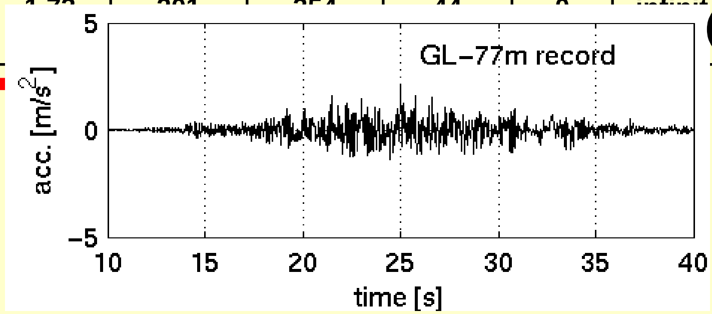
Ex.3 : Kushiro-Oki (M7.1)



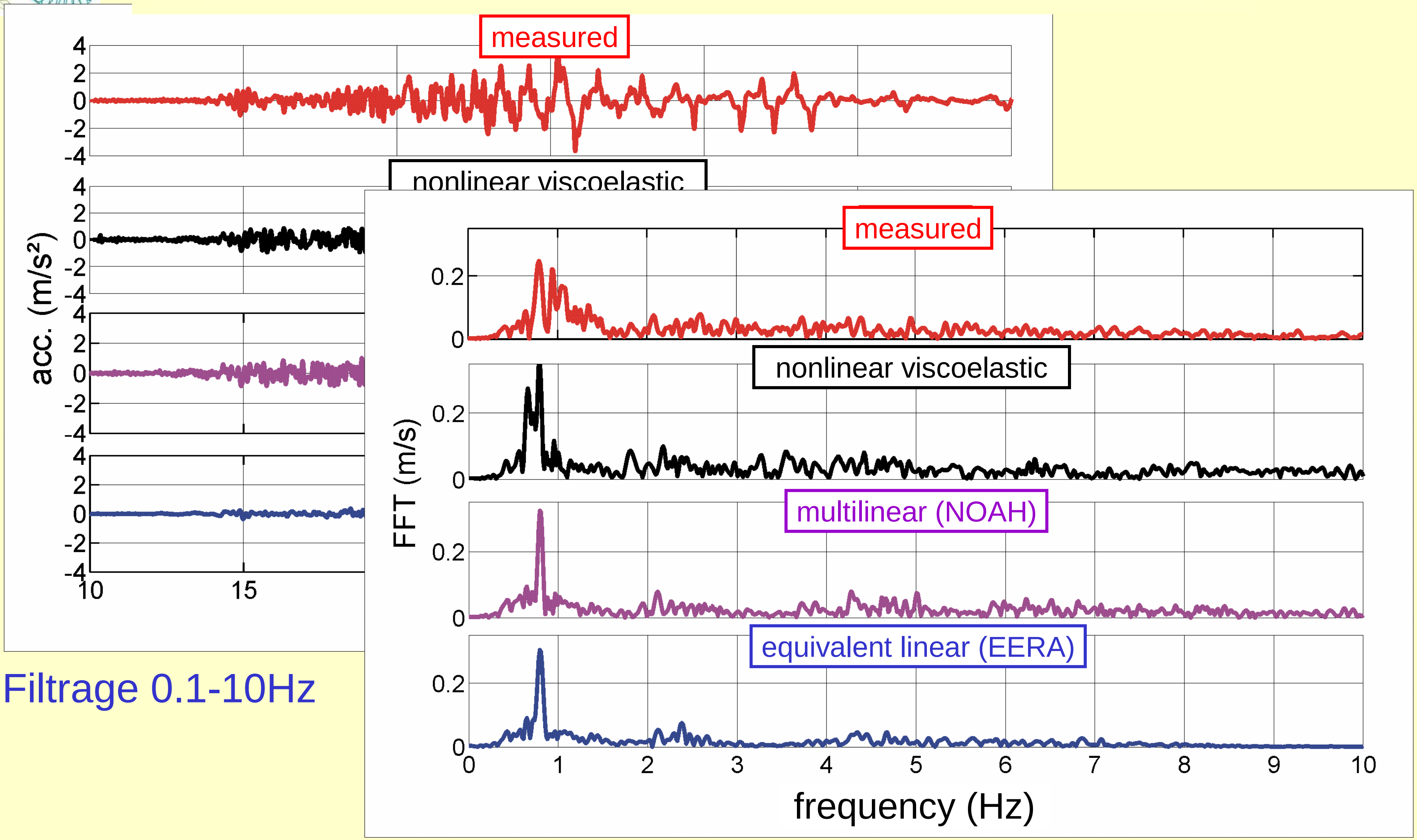


Epaisseur (m)	*ρ (t/m³)*	*G (MPa)*	*σ_m (KPa)*	*ϕ_f (deg)*	*α_{NL}*	*Q_{min}*	*β_{min}*	*β_{max}*
9	**1.72**	**106**	**37**	**40**	**2500**	**25**	**0.020**	**0.3**
14	**1.98**	**210**	**98**	**48**	**1750**	**33**	**0.015**	**0.3**
9	**1.73**	**121**	**164**	**37**	**981**	**30**	**0.017**	**0.3**
4	**1.76**	**205**	**195**	**44**	**1000**	**34**	**0.014**	**0.3**
8	**1.70**	**139**	**224**	**44**	**656**	**29**	**0.017**	**0.3**
8	**2.00**	**182**	**269**	**45**	**703**	**30**	**0.017**	**0.3**
25	**1.73**	**201**	**354**	**44**	**595**	**34**	**0.014**	**0.3**
infinity	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	**0**	**0**

(Iai et al. 1995)

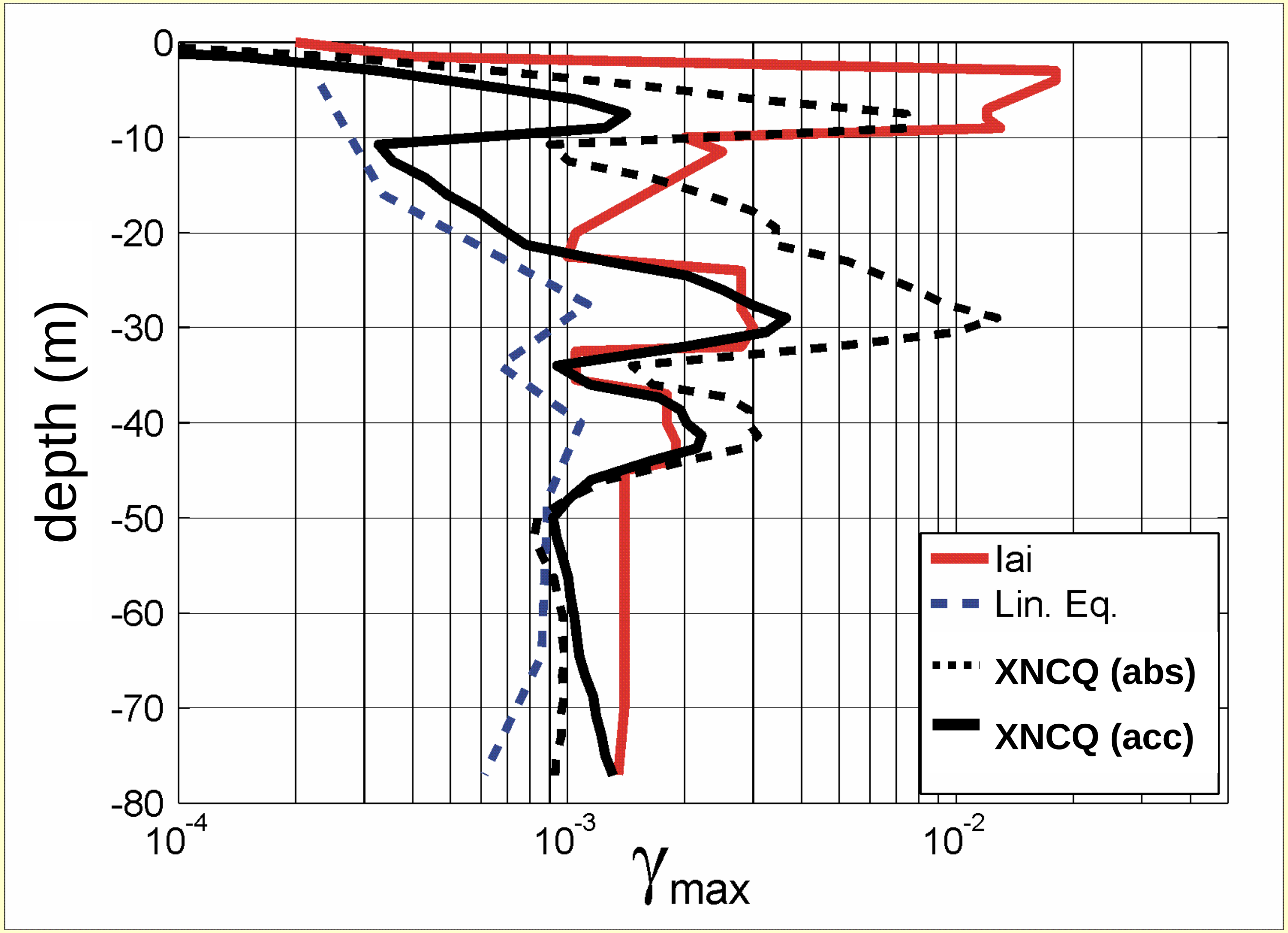


Ex.3 : Résultats et comparaisons



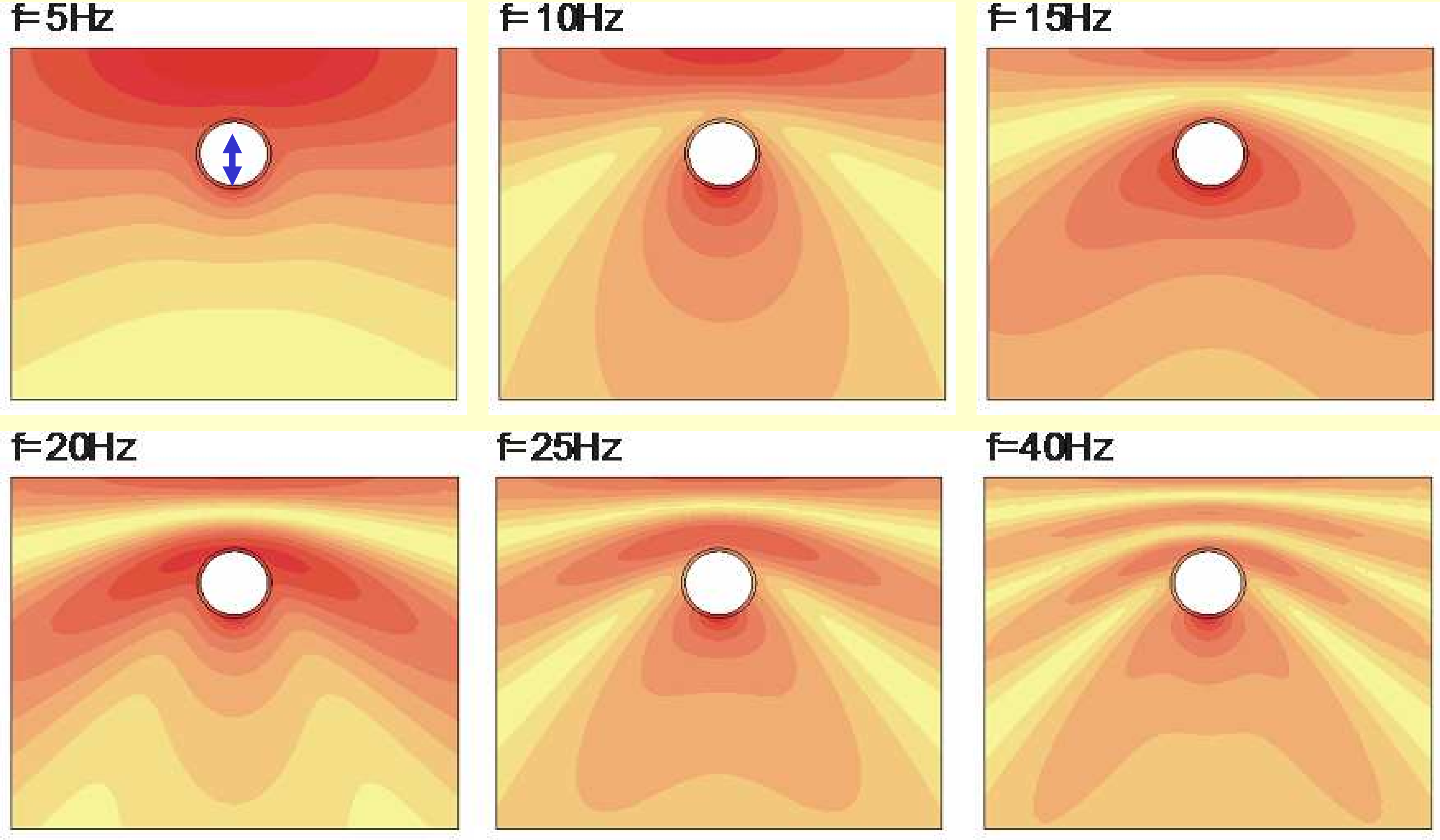
Filtrage 0.1-10Hz

Ex.3 : γ_{max} fctn de la profondeur



IV/ Intérêt de la méthode des éléments de frontière

Ex.4 : Vibration tunnel



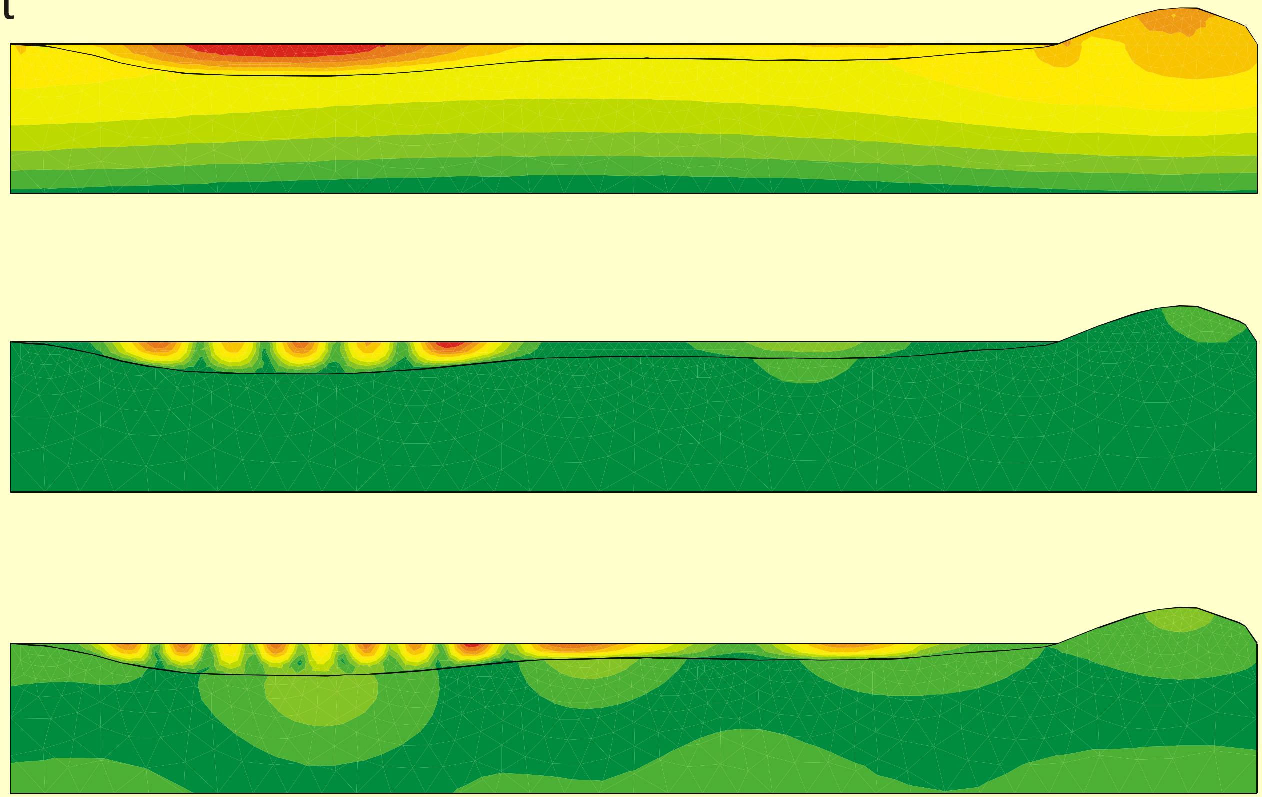
Ex.5 : Amplification (Nice)

Ouest Est

F_0=0,4 Hz
A_0=1,2

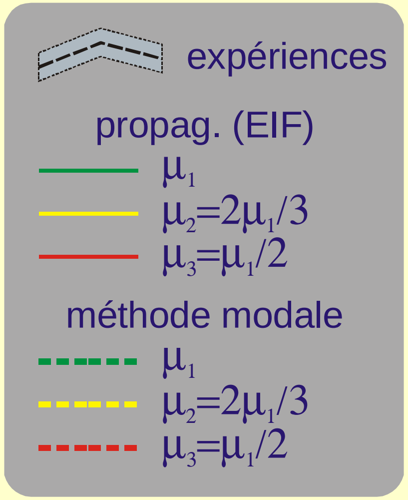
F_0=1,6 Hz
A_0=15,0

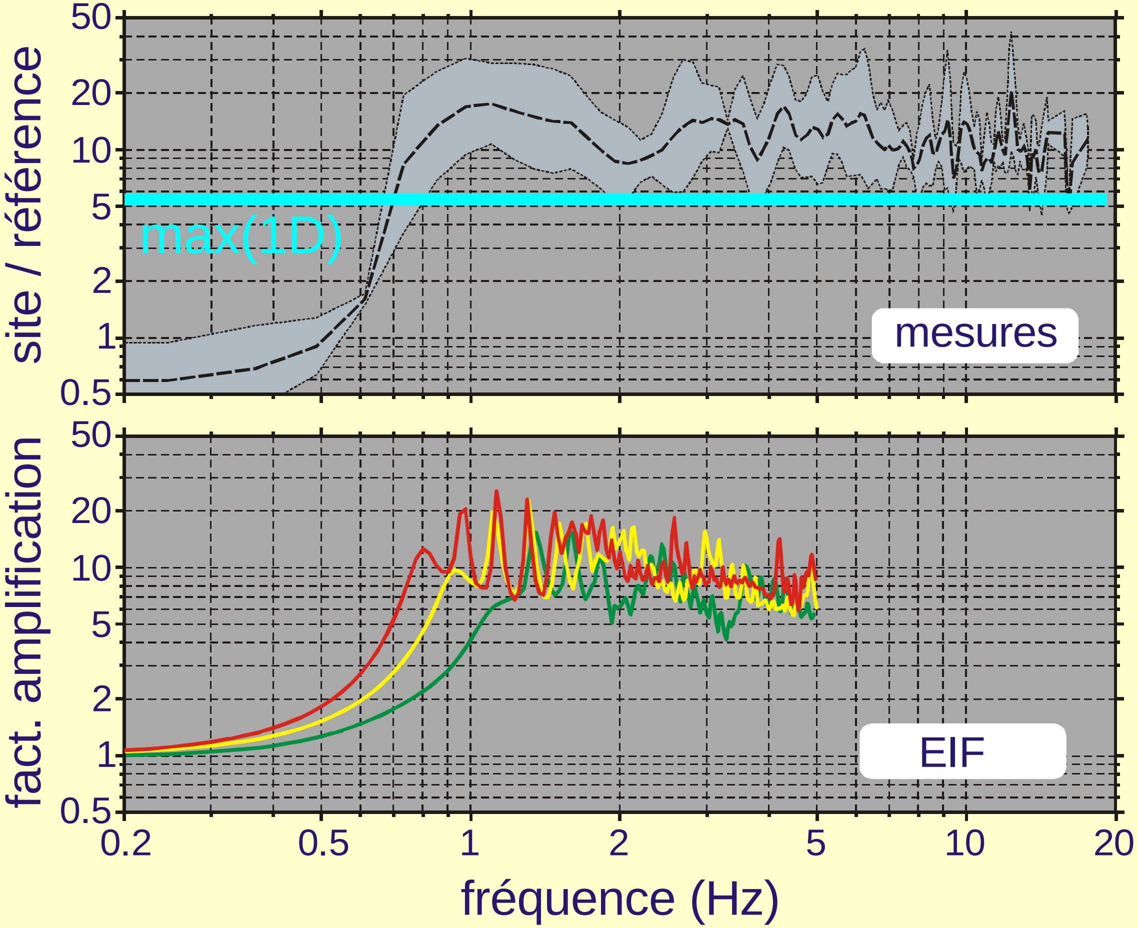
F_0=2,0 Hz
A_0=6,0



Ex.5 : Comparaison mesures

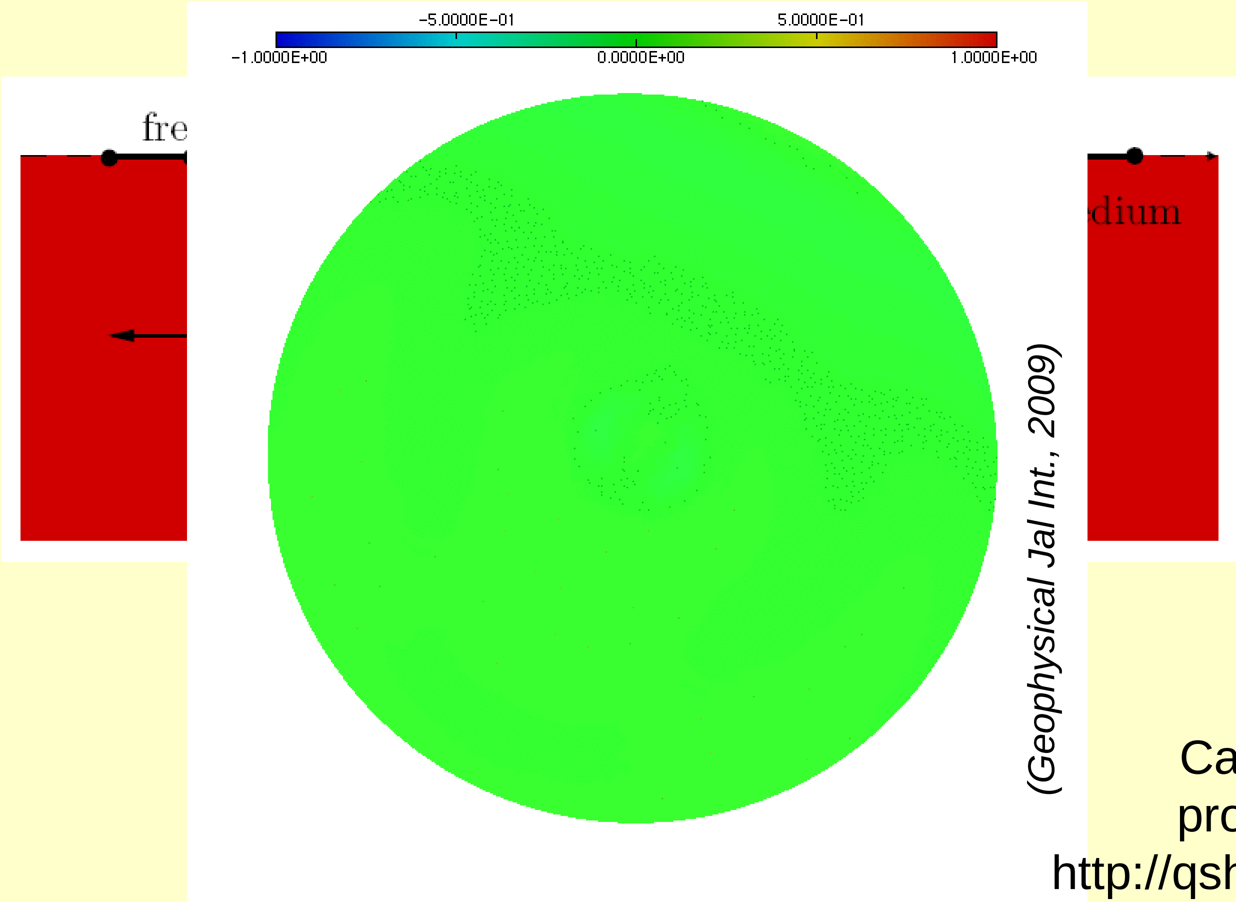
ondes SH





Ex.6 : Bassin tridimensionnel (FMM)

- Réf.: Mossessian & Dravinski, EESD 1990

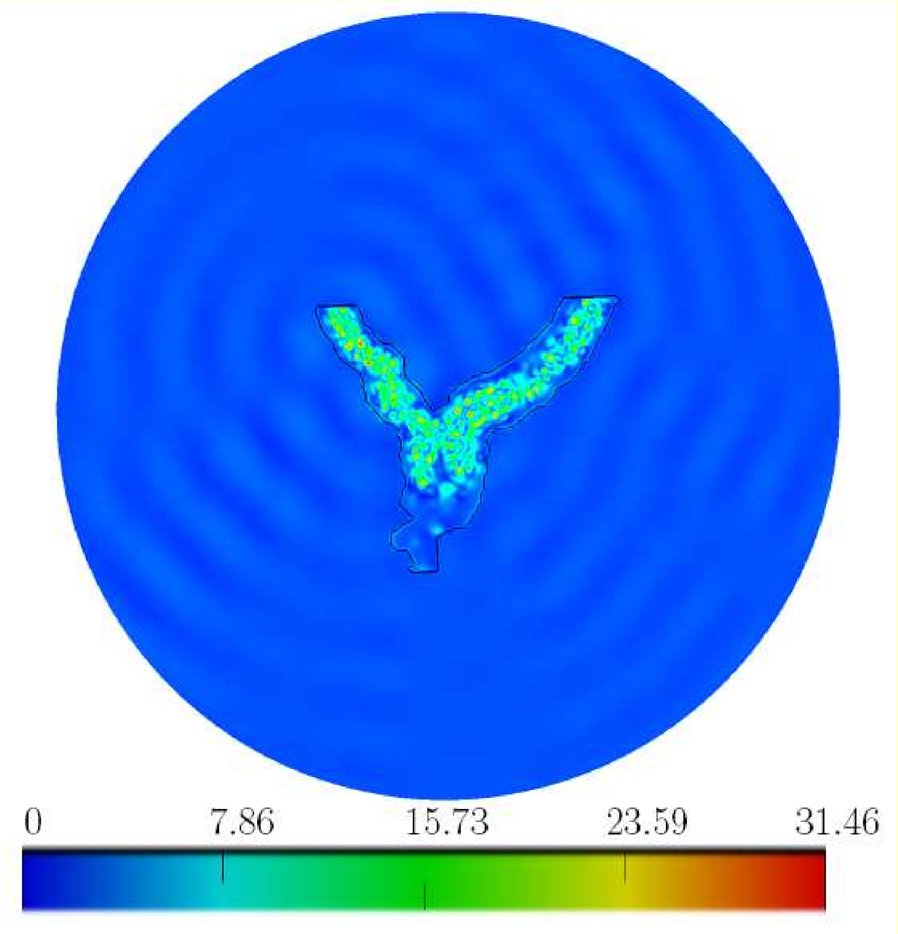


(Geophysical Jal Int., 2009)

Cas tests du
projet QSHA
http://qsha.unice.fr

Ex.6 : Bassin Grenoble (FMM)

- Maillage 3D
- Onde plane
- Module du déplact vertical à f=0.6Hz
- Calcul : N=141288 747 itérat. avec précondition. (75h sur PC !)



(S. Chaillat, J-F Semblat, M. Bonnet, CiCP, 2010)

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., Vilotte 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.