

# Comportement des pieux sous actions sismiques

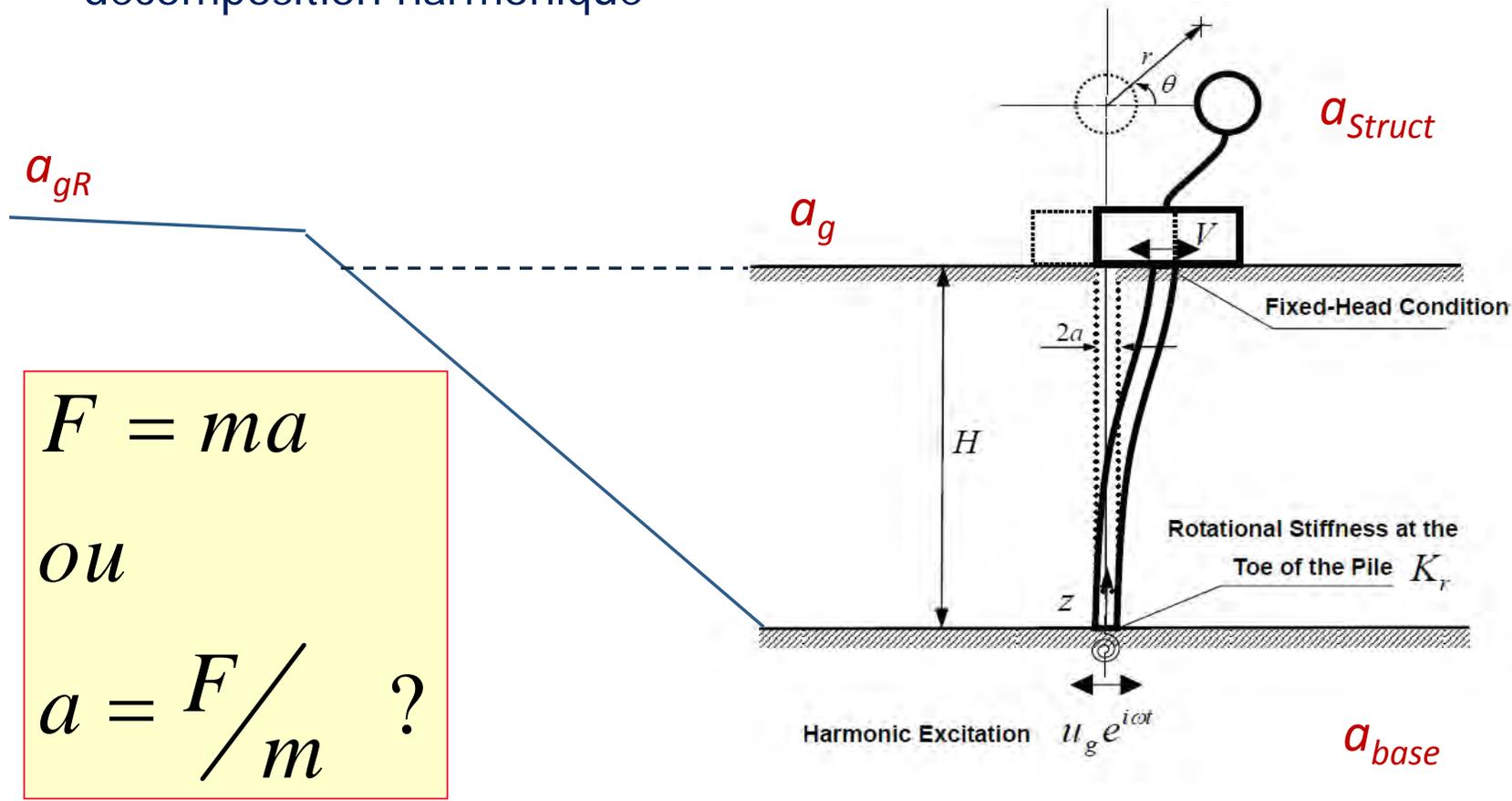
*Alain Holeyman (\*)*

*Université catholique de Louvain*

*(\*) animations dues à M. Jafari*

Hypothèse pour l'étude des actions:

- Le champ de *déformation* (profil de déplacement) se repère relativement à la base qui suit une CL imposée par le TT
- décomposition harmonique



$$F = ma$$

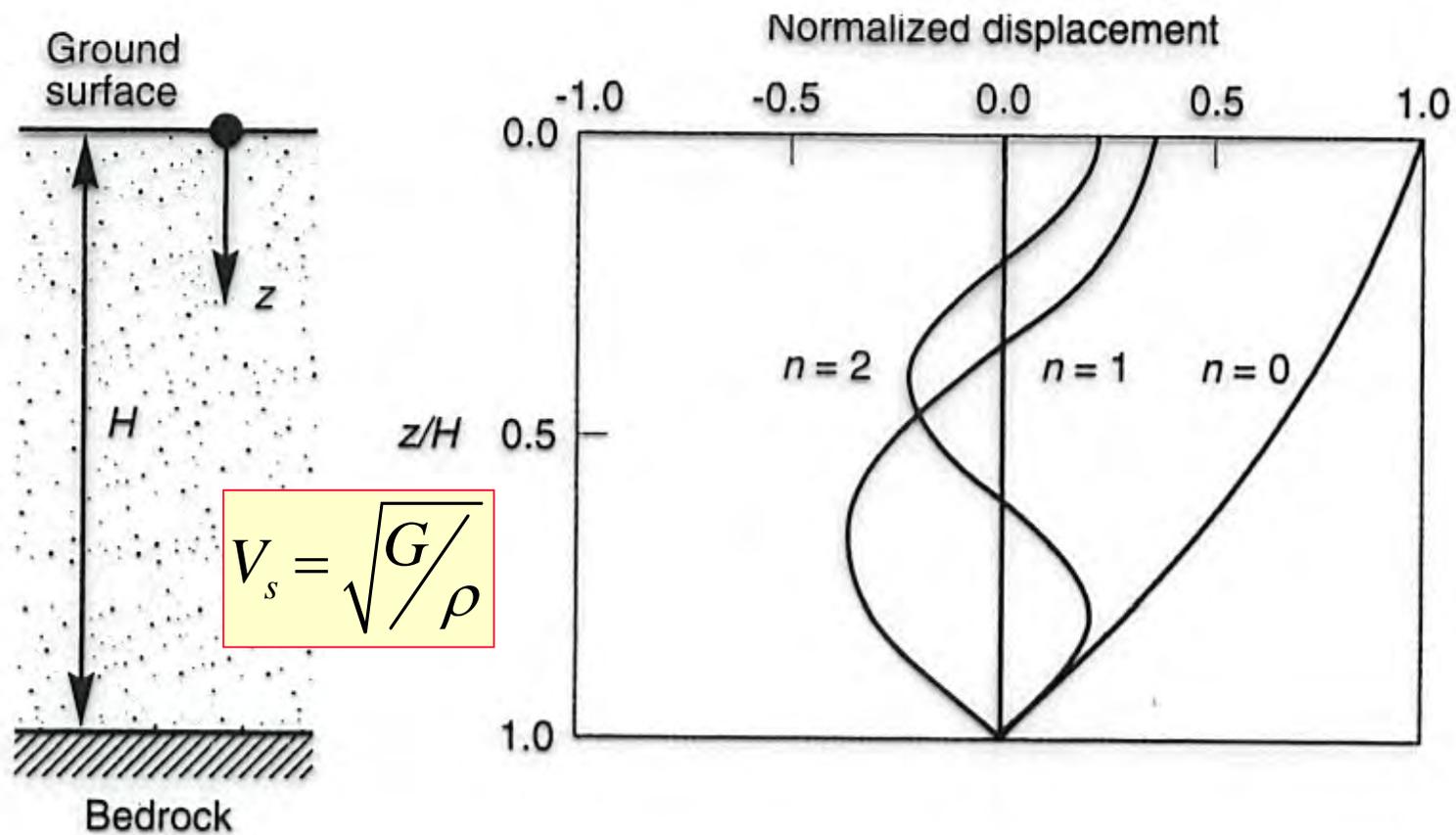
ou

$$a = F/m \quad ?$$

# Contenu

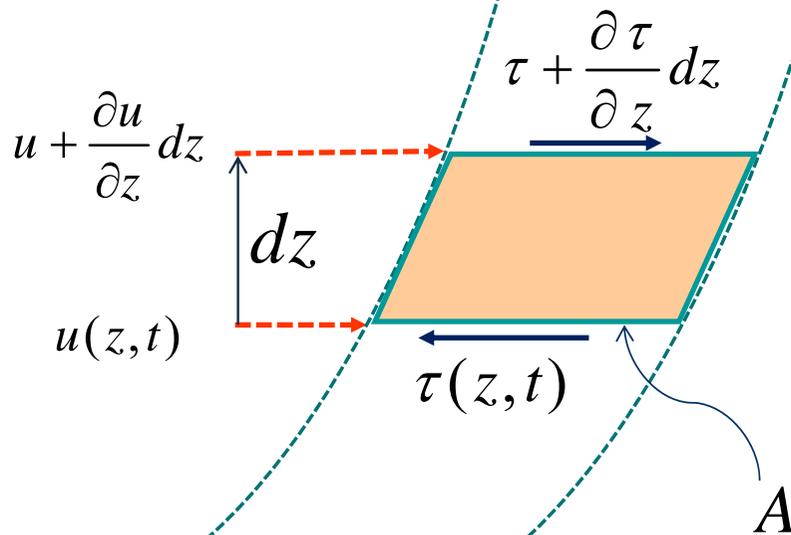
1. Actions sismiques sur les pieux et leurs interactions avec la structure et le sol
2. Comportement du sol sous sollicitations cycliques et amortissement
3. Modèles de calcul – Impédance latérale et axiale des pieux
4. Liquéfaction des sols
5. Conclusions

# Modes fondamentaux et propres de la réponse d'une colonne de sol élastique



## Equation d'onde

$$F = ma$$

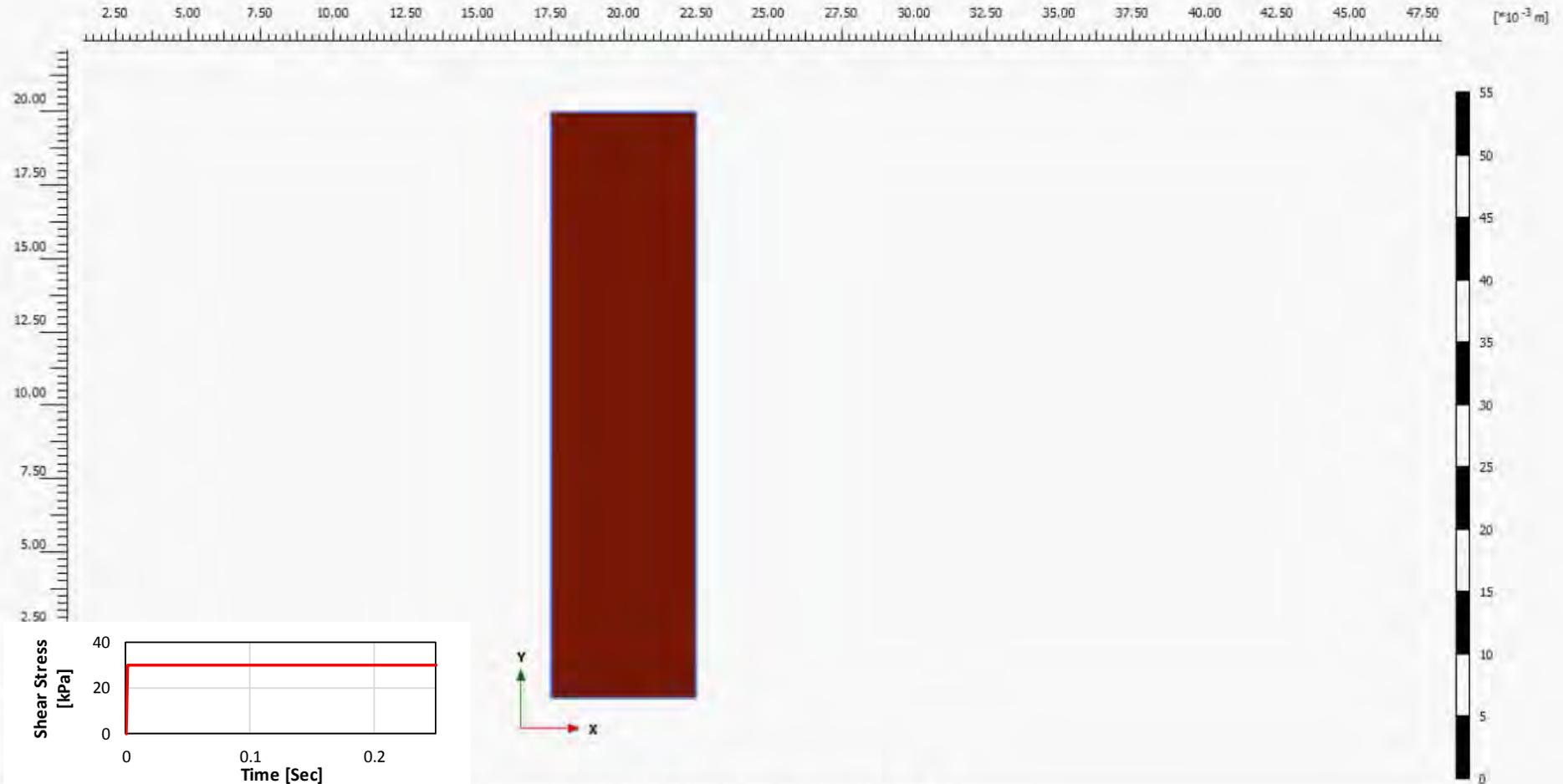


$$dF = dm \cdot a$$

$$A \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz = \rho \cdot A dz \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

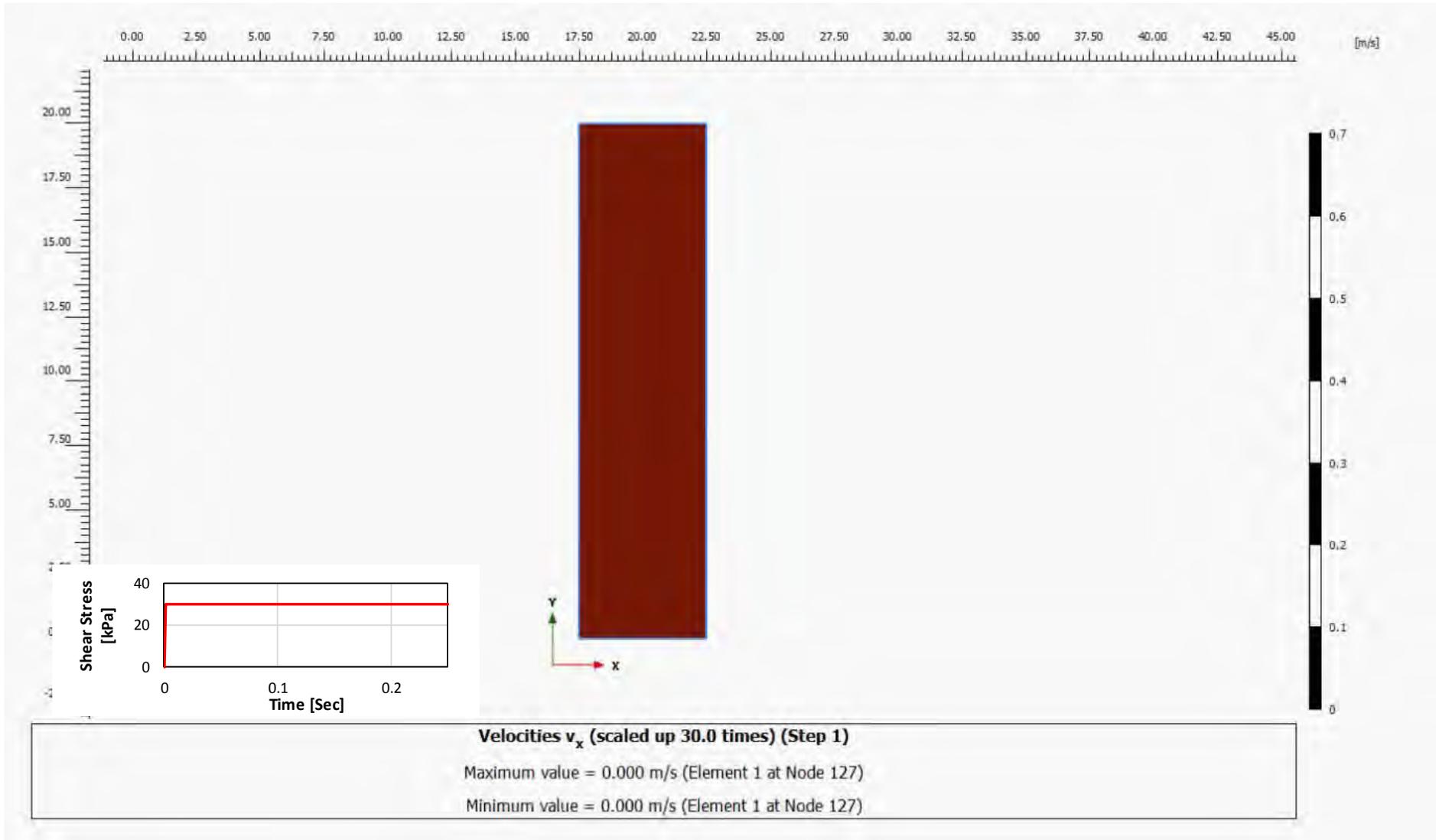
$$G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \tau_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



Deformed mesh  $|u|$  (scaled up 400 times) (Step 1)

Maximum value = 0.000 m (Element 1 at Node 127)

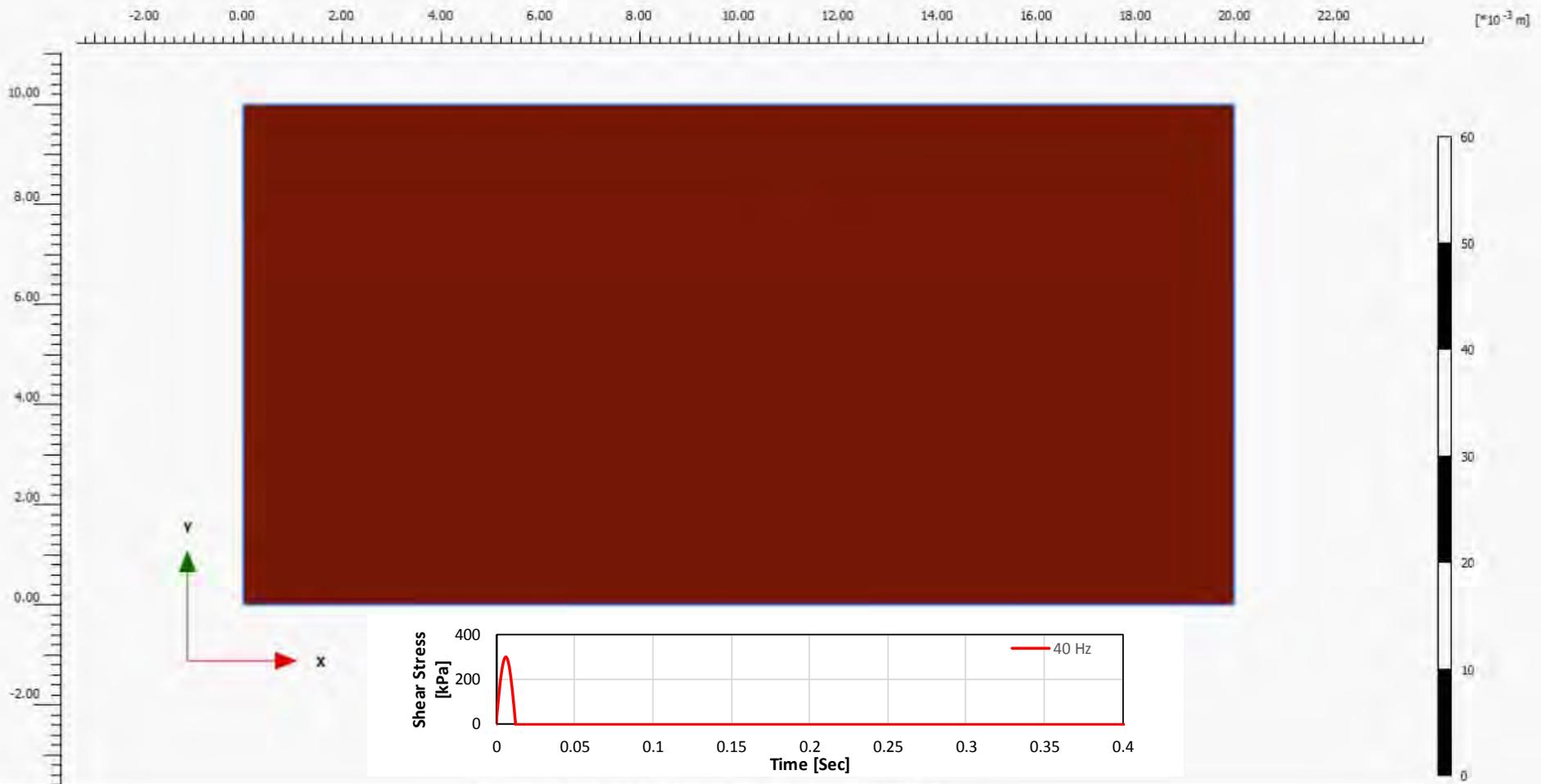


# Interactions cinématiques sol-pieux

- **Sol isolé**: en champ libre, le profil de déplacement relatif du sol –  $g(z)$  – est généralement maximum en surface (extrémité libre d'une poutre de cisaillement sollicitée actuée en base) – **impédance au cisaillement**

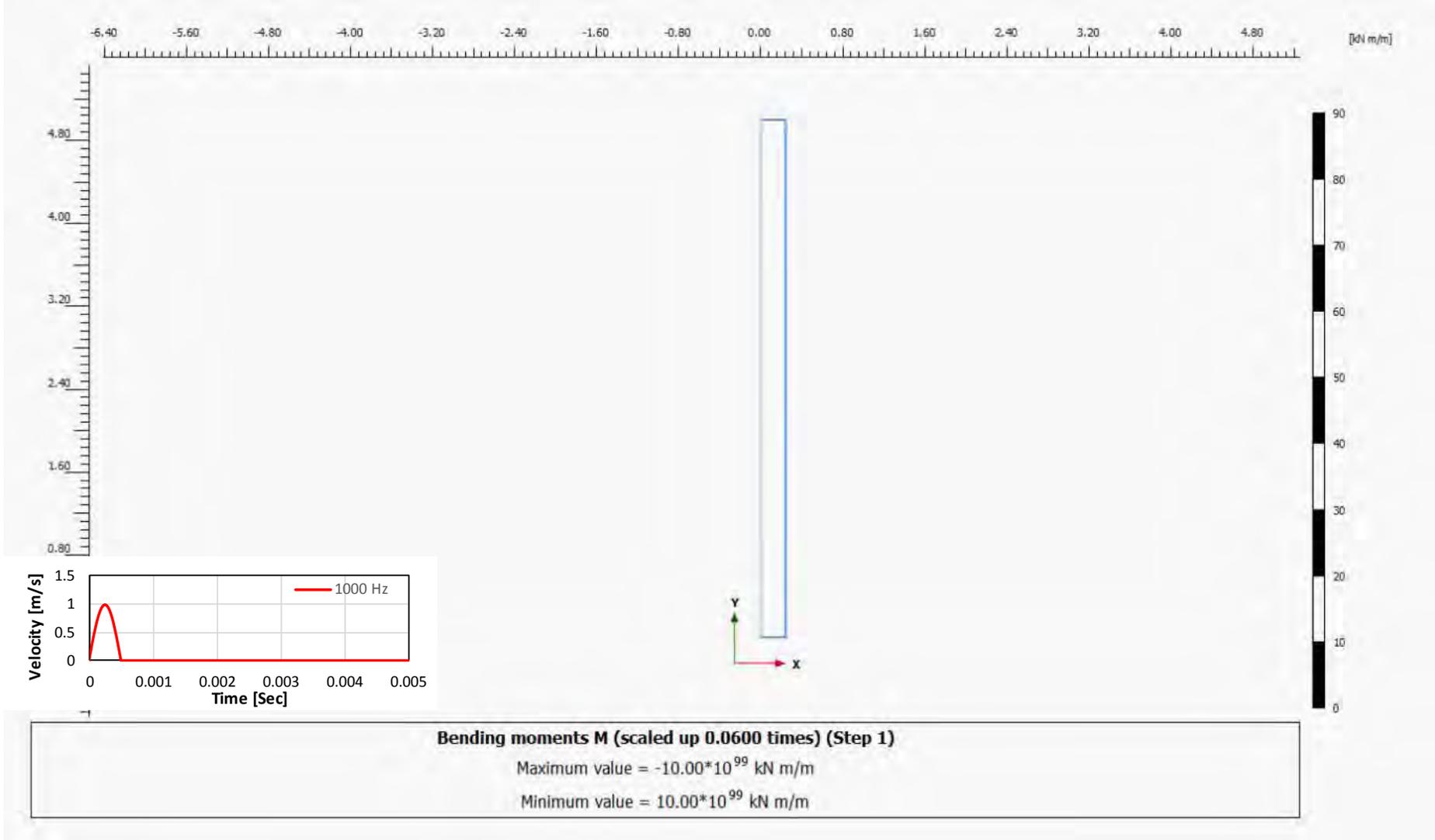
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\tau}{G} = \gamma = \frac{u}{V_s}$$



Deformed mesh |u| (scaled up 200 times) (Step 1)

Maximum value = 0.000 m (Element 1 at Node 5121)



# Interactions cinématiques sol-pieux

- **Sol isolé**: en champ libre, le profil de déplacement relatif du sol –  $g(z)$  – est généralement maximum en surface (extrémité libre d'une poutre de cisaillement sollicitée actuée en base) – **impédance au cisaillement**

$$\frac{\tau}{G} = \gamma = \frac{u}{V_s}$$

- **Sol épinglé de pieux**:

si pieu souple et sans masse: les pieux suivent le mouvement du sol

- Résultat pour des pieux en l'absence de structure: moment et effort tranchant
- Equation d'onde de cisaillement implique que la **courbure** du profil déformé est proportionnelle à l'**accélération**

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{M}{E_p I_p} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{a}{V_s^2}$$

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p = E_p \frac{a \cdot r}{V_s^2}$$

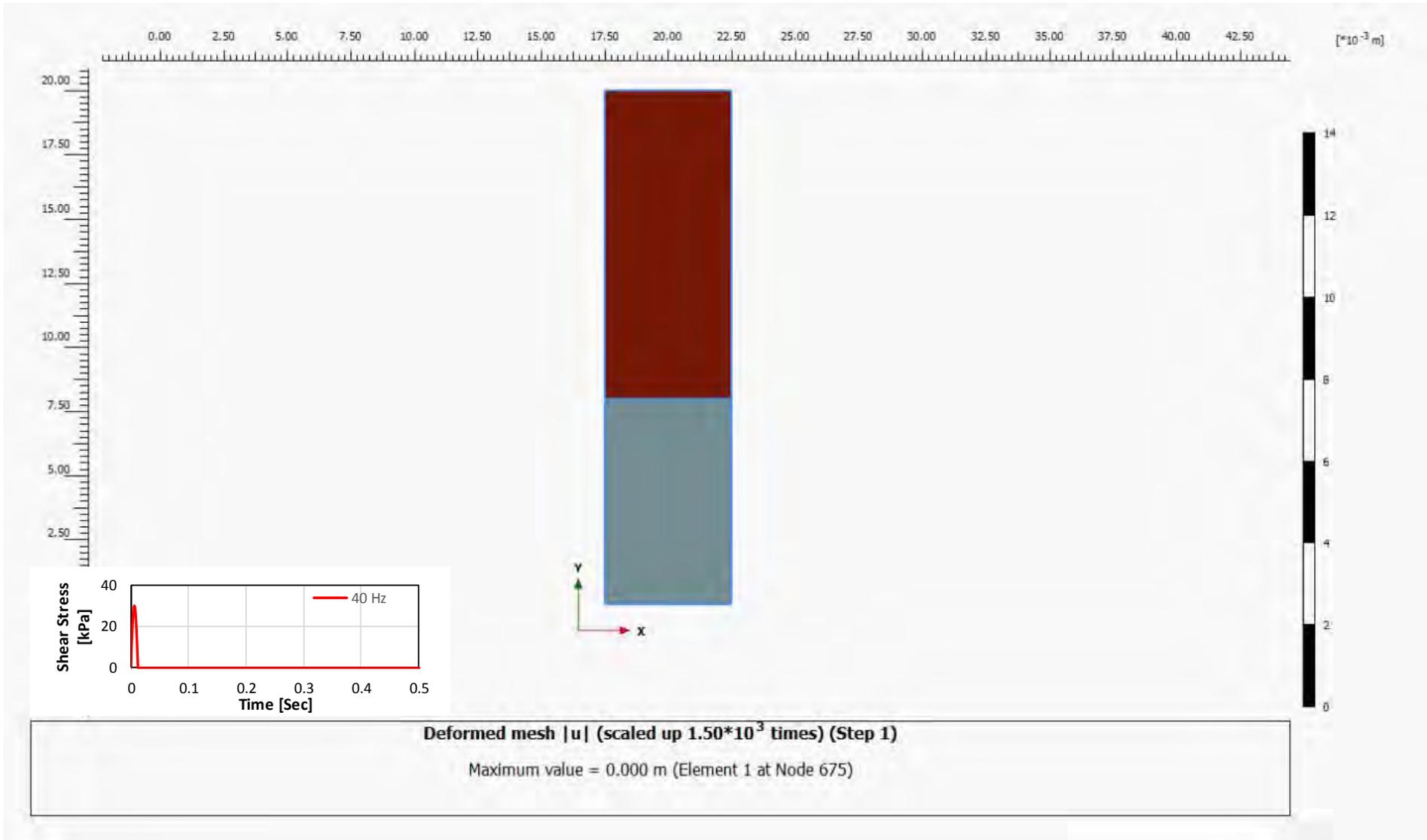
Pour  $\varnothing 0,9 \text{ m}$   
 $V_s = 115 \text{ m/s}$   
 $a = 1,8 \text{ m/s}^2$

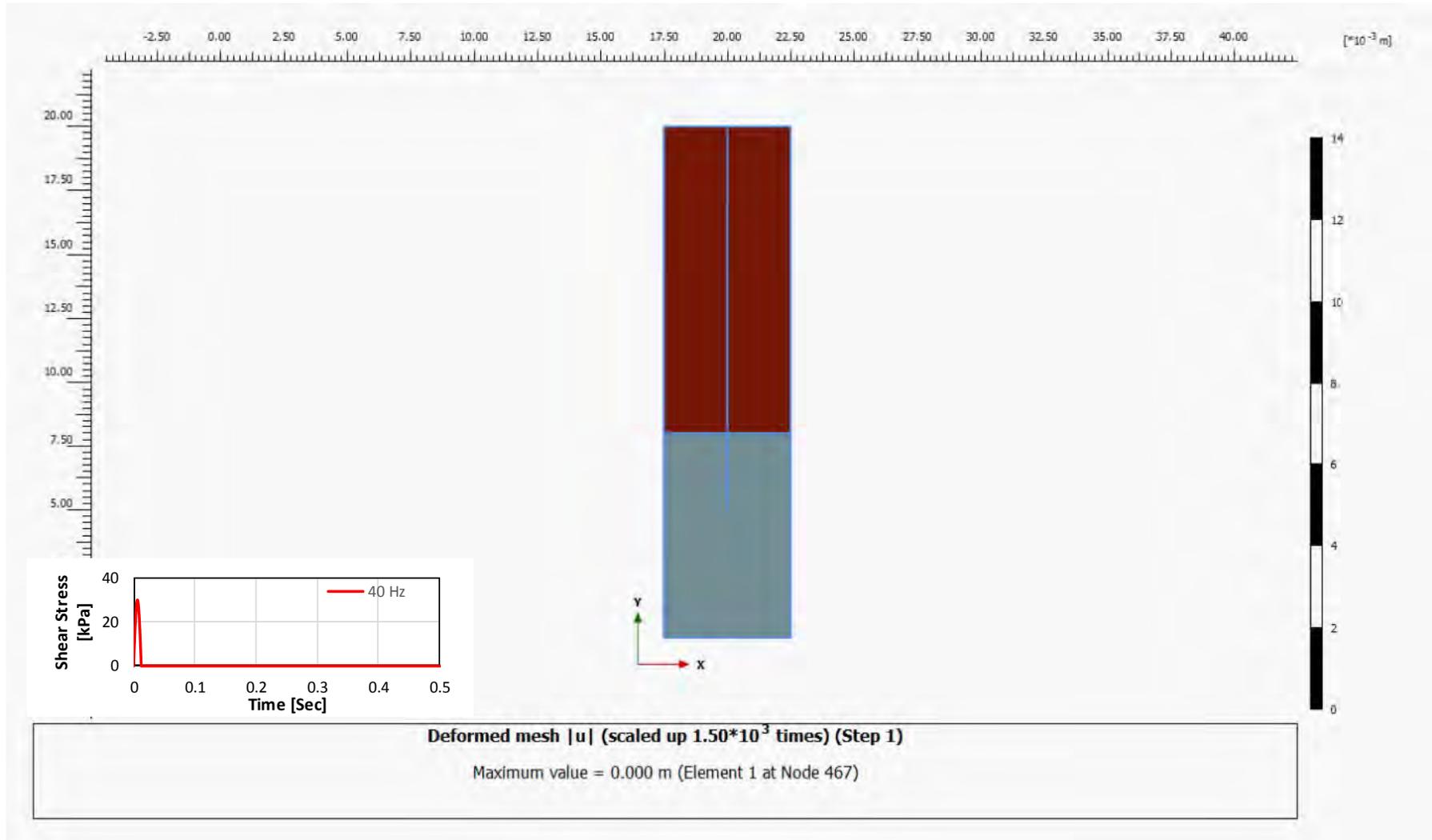
$\sigma_b = 1,9 \text{ MPa}$

si  $E_p = 30 \text{ GPa}$



**pour sol homogène !**





# Interactions cinématiques sol-pieux

- **si pieu raide et sans masse:** sollicitation "passive" des pieux suivant approche P-y en calculant le déplacement relatif latéral équilibrant l'ensemble des efforts latéraux pour un profil de déformation compatible  $g(z)$ -P/y
- Résultats
  - pour des **pieux** en l'absence de structure moment et effort tranchant
  - pour le **sol**: tendance à la diminution et à l'uniformisation du profil de déplacement

## Interactions cinématiques sol-pieux

- L'encastrement en tête est compatible avec la déformée du sol
- Eviter l'encastrement en base
- Eviter les pieux inclinés
- Attention aux contrastes de raideur des couches de sol → amplification possible de 5x par rapport au cas homogène  
→  $\sigma_b \cong 6$  à 10 MPa

$$c = \left( \frac{G_2}{G_1} \right)^{1/4}$$

$$M = 1.86 \left( E_p I_p \right)^{3/4} \cdot (G_1)^{1/4} \cdot \gamma_1 \cdot F$$

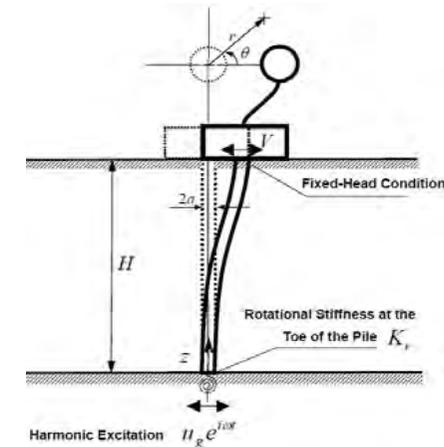
$$\gamma_1 = \frac{r_d \rho_1 H_1 a_{\max,s}}{G_1}$$

$$F = \frac{(1 - c^{-4})(1 + c^3)}{(1 + c)(c^{-1} + 1 + c + c^2)}$$

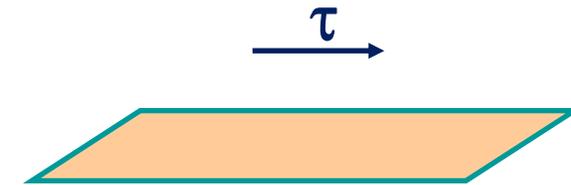
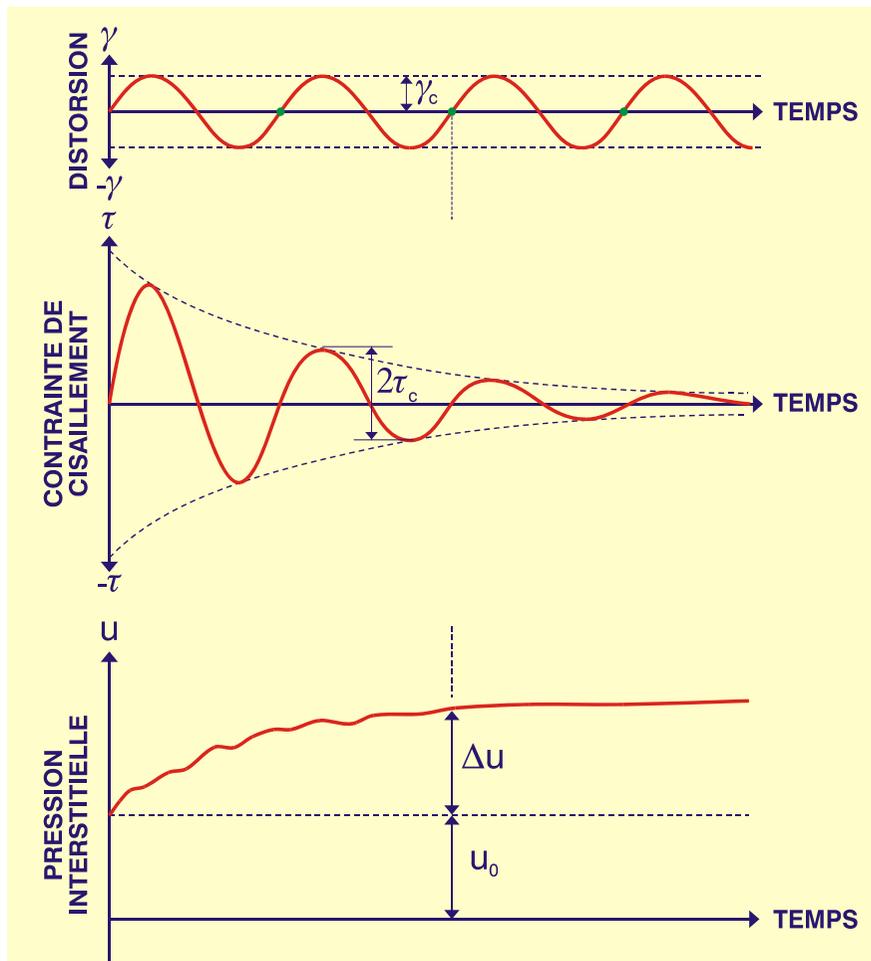
Dobry and O'Rourke (1983)

# Interactions inertielles pieux-structure

- La structure possède une masse qui ne se déplacera que si elle est accélérée par une force  $a = F / m$
- Si masse infinie : point immobile dans un référentiel absolu, mais effort maximum puisque le déplacement de la base reste imposé de manière indépendante
- Les pieux sont le lien infrastructurel de la structure avec le sol qui se déplace. **Résultat pour la structure**: mise en mouvement, éventuellement tempéré par un système d'isolation
- Résultat pour les **pieux**: reprise en tête des efforts d'inertie de la structure, tempérés par une éventuelle plastification de la superstructure → M, N, T (pas de plastification tolérée pour des pieux)
- Résultat pour le **sol**: atténuation locale du profil de déplacement

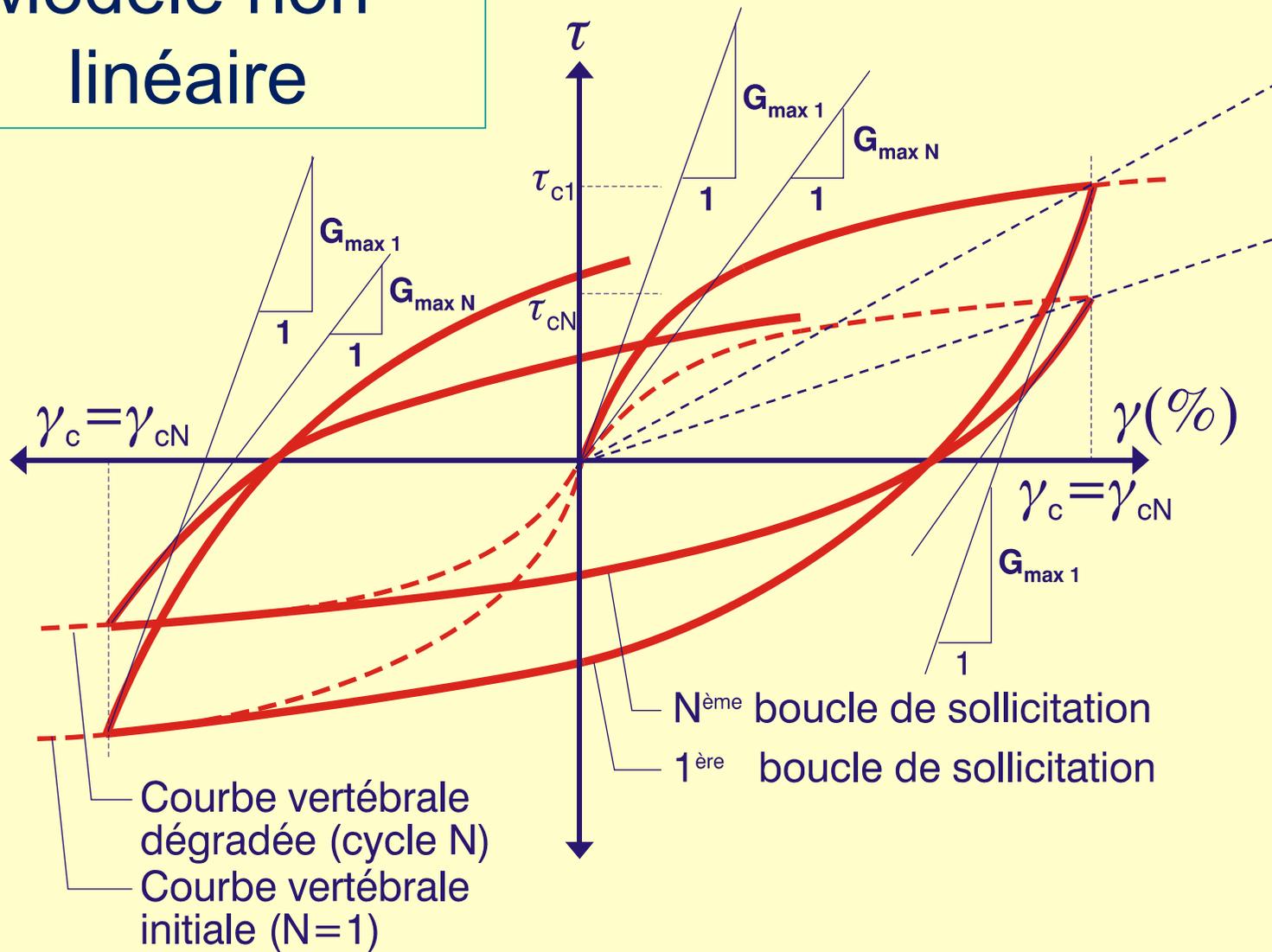


## 2. Comportement du sol sous sollicitations cycliques

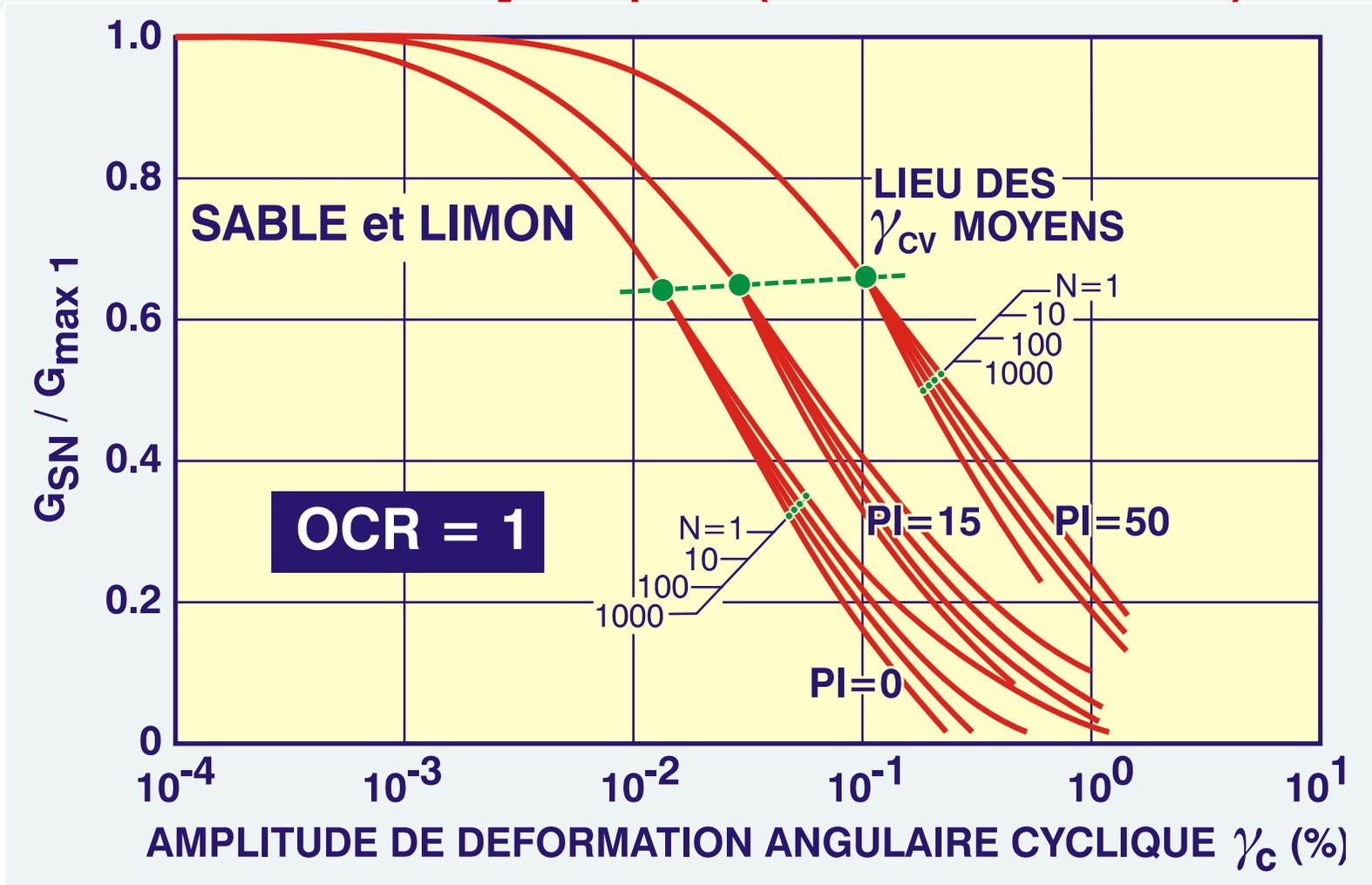


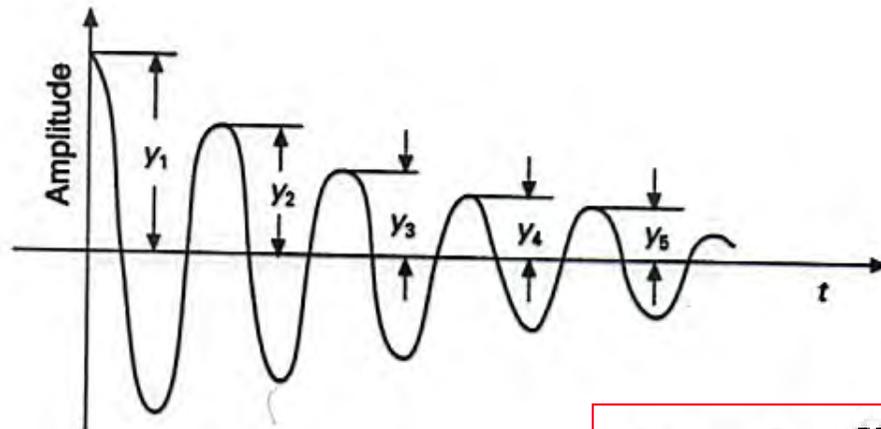
Contrainte de cisaillement mobilisée par une distorsion cyclique imposée

# Modèle non-linéaire



# Dégradation de la raideur suite à une distorsion cyclique (Vucetic, 1993)

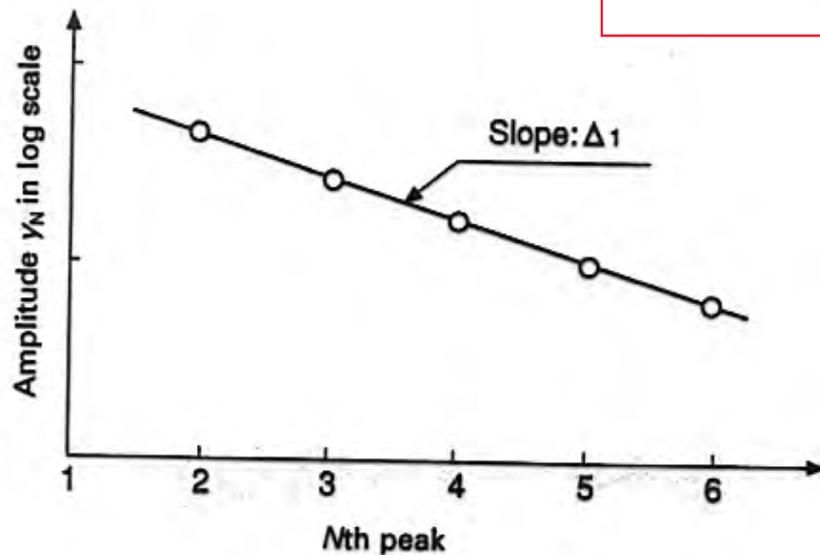




(a) Decay of free vibration

$$D = \frac{1}{2\pi} \Delta_1.$$

$$\Delta_1 = \log \frac{y_1}{y_2} = \log \frac{y_2}{y_3} = \dots = \log \frac{y_{N-1}}{y_N}$$

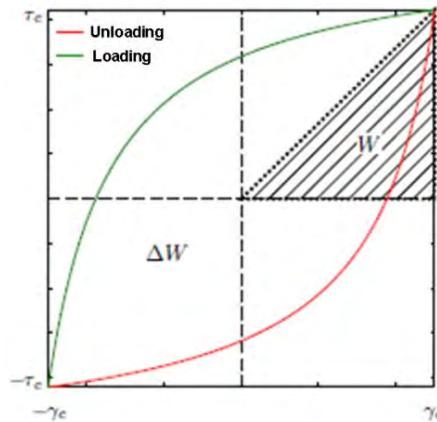


(b) Amplitude versus cycles

Détermination de  
l'**amortissement** en  
vibration libre

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

## Amortissement hystérétique



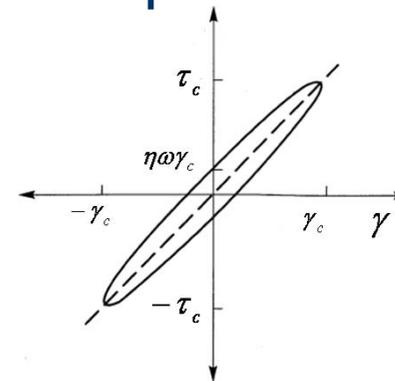
$$W = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} G \gamma_c^2$$

$$\tau = G(1 + 2i\xi)\gamma$$

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

$$\tau = G(1 + 2i\xi)\gamma_c e^{i\omega t} = G^* \gamma_c e^{i\omega t} = \tau_c e^{i\omega t}$$

## Amortissement visqueux équivalent



$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi \omega \eta \gamma_c^2}{\frac{1}{2} G \gamma_c^2} = \frac{\eta \omega}{2G}$$

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} = (G + i\omega \eta)\gamma_c e^{i\omega t} = (G + i\omega \frac{2\xi G}{\omega})\gamma_c e^{i\omega t}$$

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t}$$

$$\gamma = \gamma_c e^{i\omega t}$$

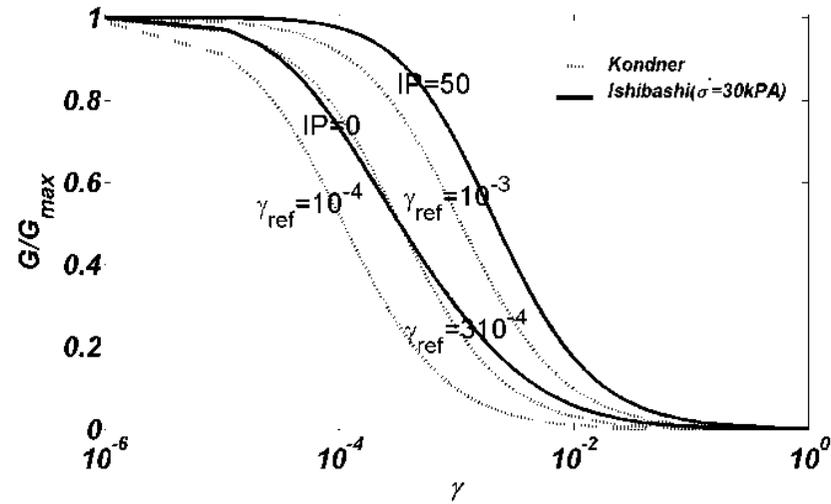
$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = i\omega \gamma_c e^{i\omega t}$$

$$\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \pi \omega \eta \gamma_c^2$$

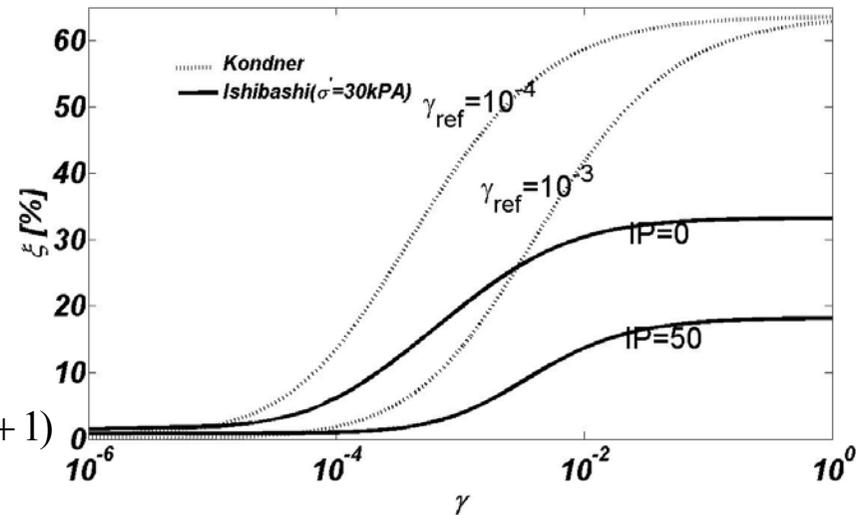
$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi$$

Comparaison des lois constitutives de Kondner (1963) [hyperbolique] et d'Ishibashi and Zhang (1993)

a) Dégradation du module sécant

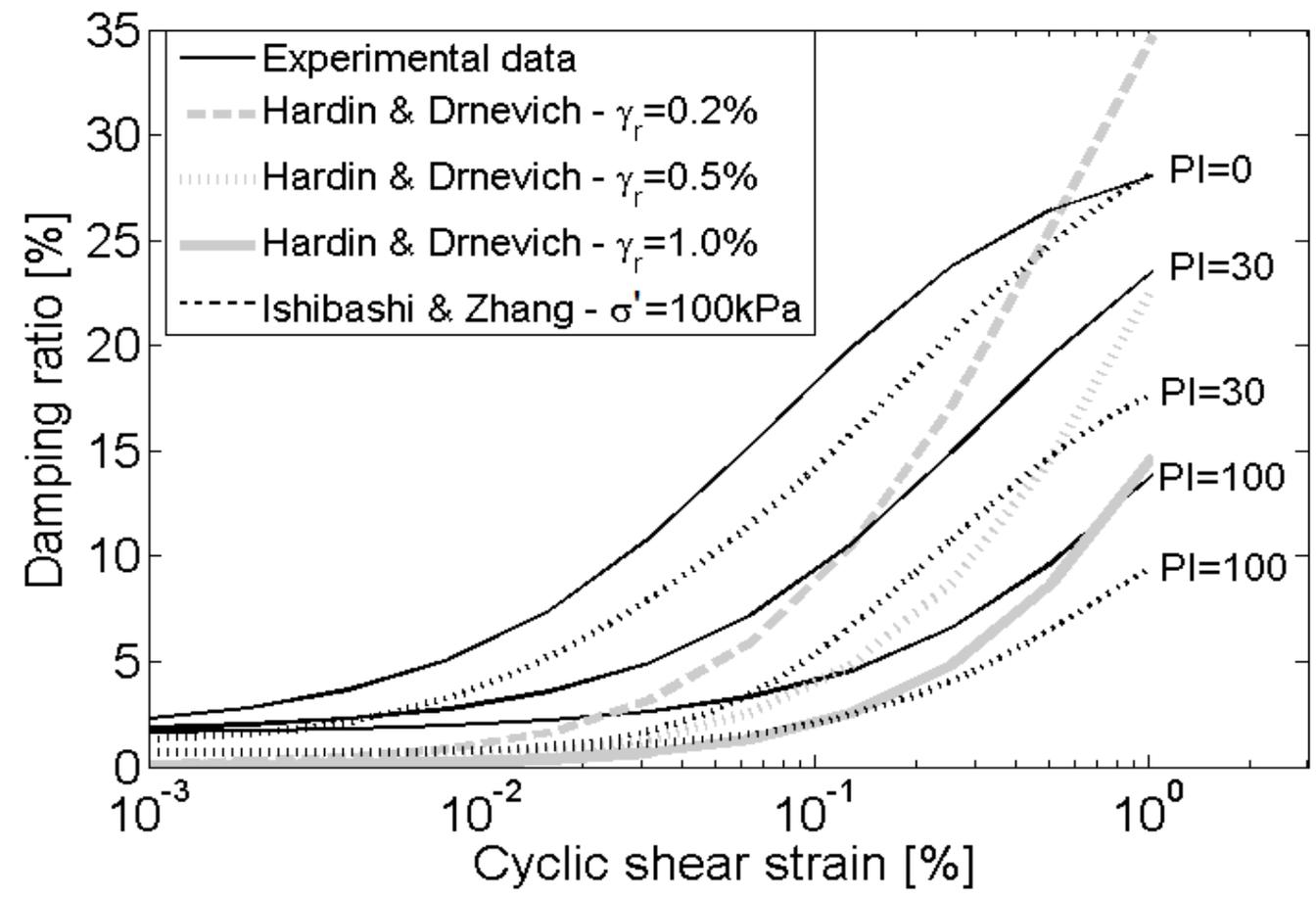


b) Amortissement hystérétique

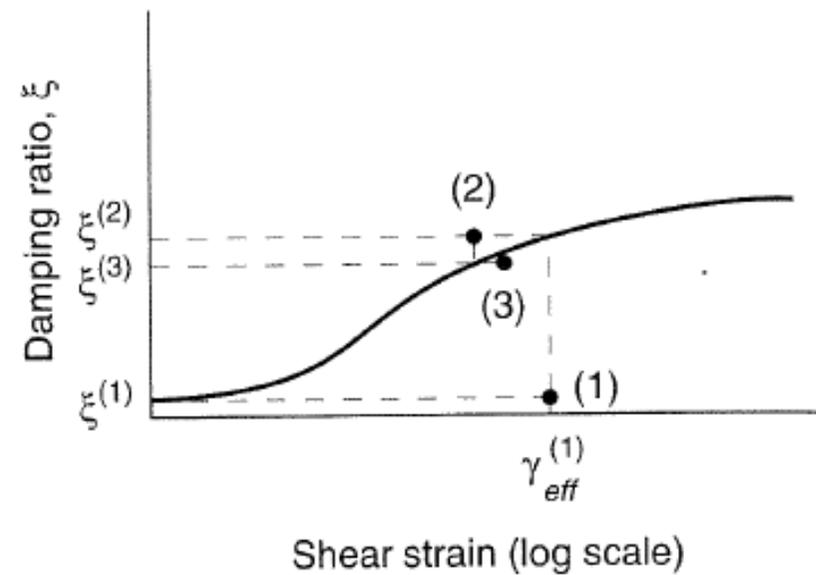
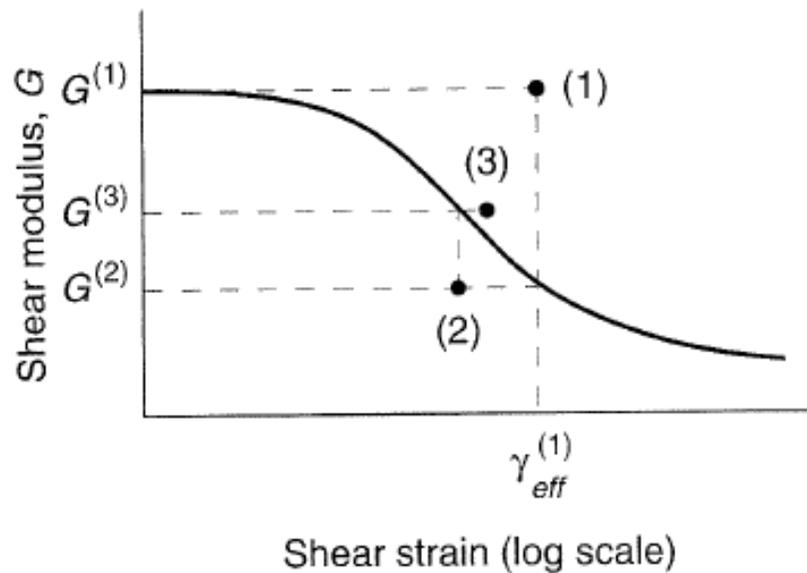


$$\xi = \frac{2}{\pi} \left( 2 \frac{\gamma_{ref}}{\gamma_c^2} (\gamma_c + \gamma_{ref}) \ln \left( \frac{\gamma_{ref}}{\gamma_c + \gamma_{ref}} \right) + 2 \frac{\gamma_{ref}}{\gamma_c^2} + 1 \right)$$

# Lois d'amortissement hystérétique



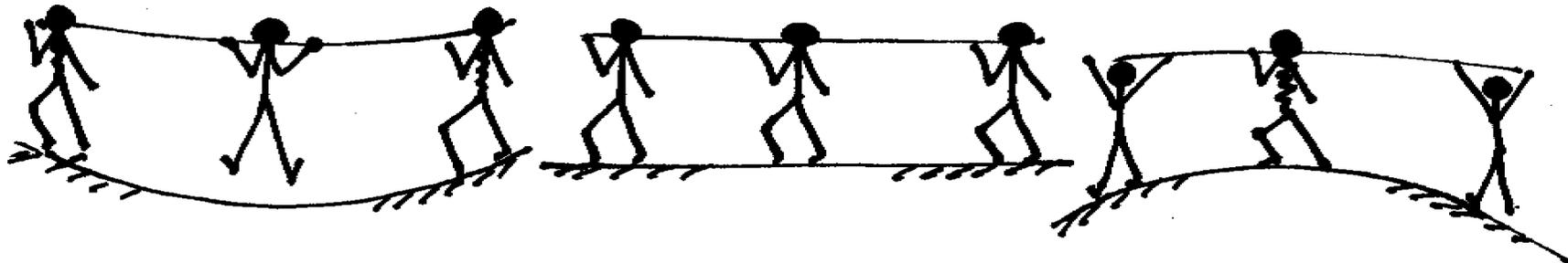
## Itérations pour identifier le module sécant opérationnel et l'amortissement effectif



# PROPRIETES DYNAMIQUES DES SOLS

1. Essais acoustiques de laboratoire
2. Essais in situ
  - a) Géo-sismique
  - b) Cross-hole et SASW
3. Comportement mécanique
  - a) Module de cisaillement initial
  - b) Dégradation
  - c) Amortissement
  - d) Modèles constitutifs

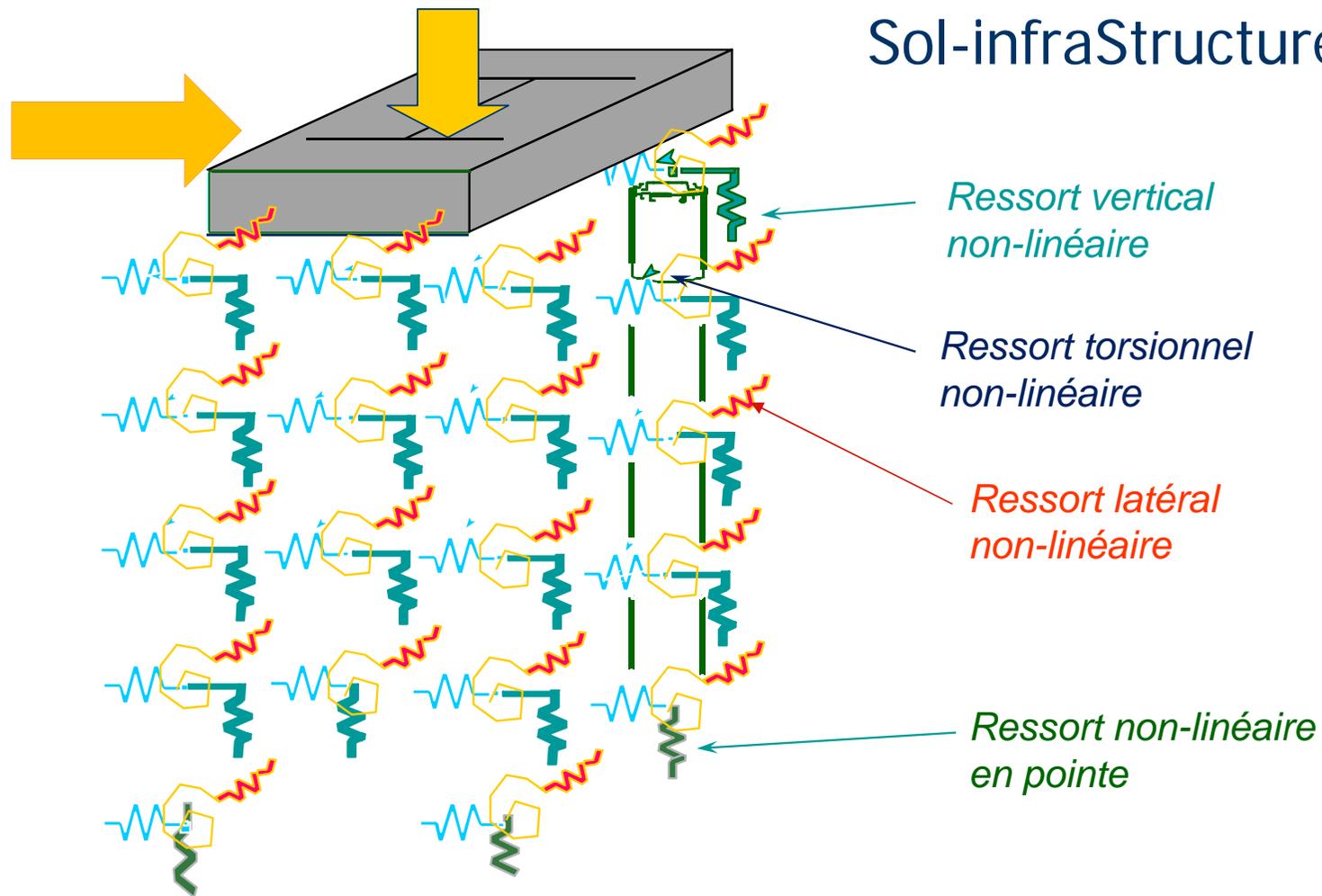
# Interaction sol - structure



### 3. Modèles de calcul

1. Règles de bonne pratique (Codes) – Approche pseudo-statique de type  $F_b = S_e(T) \cdot m \cdot \lambda$   
*+ répartition des actions sur les pieux*
2. Méthodes simplifiées aux
  - ressorts ponctuels équivalents
  - *coefficient de raideur distribués le long des pieux modélisés en sous-sol*
3. Modélisation numérique du milieu continu

## Modélisation des liaisons Sol-infraStructure

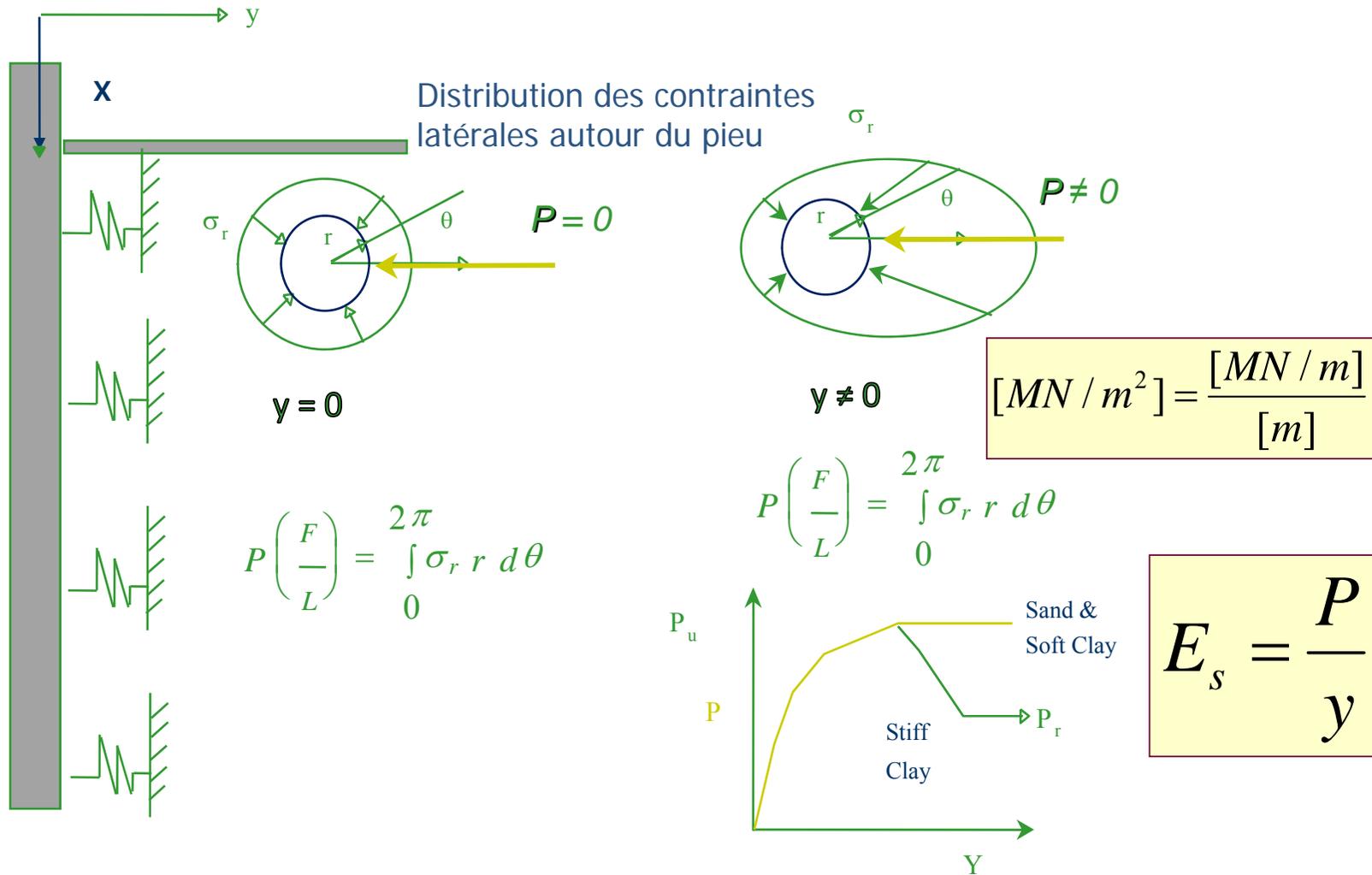


## Modes d'interaction statique

- Axial (vertical): modèles "t-z" & "q-z"
- Transversal (Latéral): modèles P-y
- Torsionnel: modèles "T- $\theta$ "

Ces modes sont généralement considérés *indépendamment* car le **couplage**, c'est à dire l'influence de **P** ou **y** sur la réponse **t-z** reste du domaine de la recherche (Allani, 2014)

# Module de réaction latérale d'un pieu

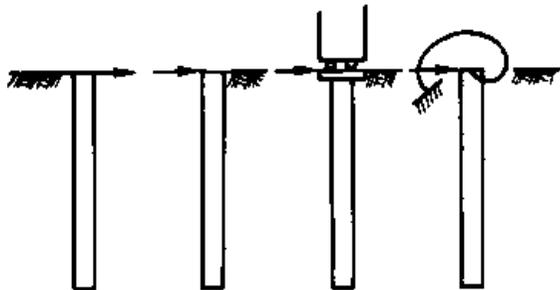


# Equation différentielle de flexion des pieux

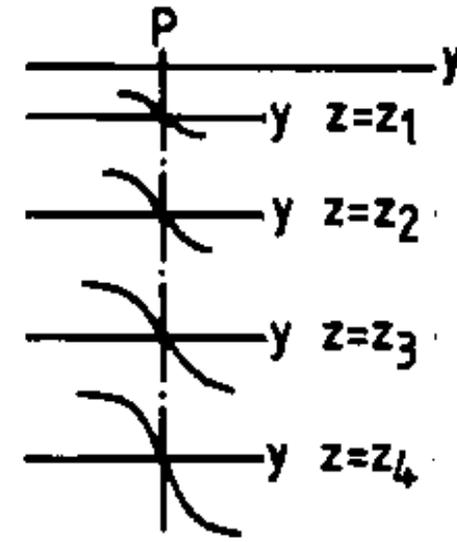
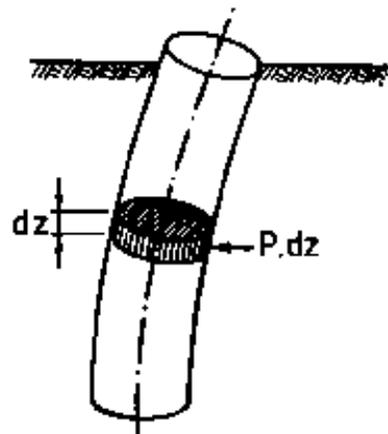
$$M = EI \frac{d^2 y}{dz^2}$$

$$T = \frac{dM}{dz}$$

$$P = -\frac{dT}{dz} = -\frac{d^2 M}{dz^2} = -EI \frac{d^4 y}{dz^4}$$



$$P = E_s y = -EI \frac{d^4 y}{dz^4}$$

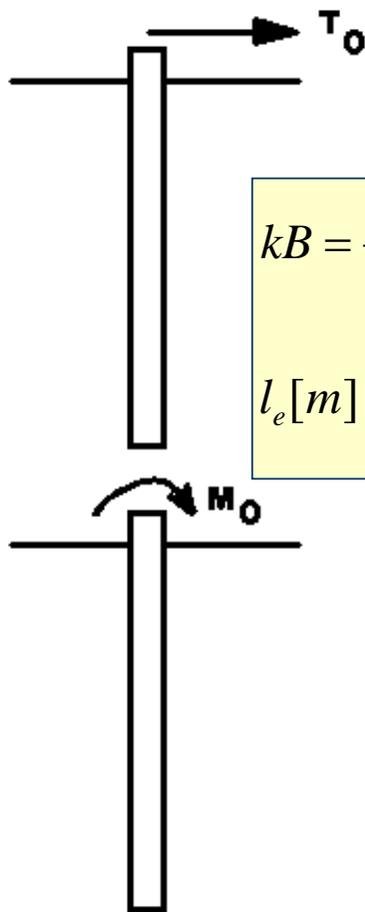


$$kB = \frac{P}{y} = E_s [MN / m^2] = Cte$$

$$l_e [m] = \frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}}$$

# Solutions pour pieu sur appui élastique continu

Effort tranchant ou moment en tête de pieu



$$y(z) = \frac{2 \cdot T_0}{l_e \cdot k \cdot B} \cdot e^{-\lambda \cdot z} \cdot \cos \lambda \cdot z$$

$$kB = \frac{P}{y} = E_s [MN / m^2] = Cte$$

$$l_e [m] = \frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}}$$

$$M(z) = T_0 \cdot l_e \cdot e^{-\lambda \cdot z} \cdot \sin \lambda \cdot z$$

$$M_{max} = T_0 \cdot l_e \cdot e^{-\frac{\pi}{4}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,32 \cdot T_0 \cdot l_e$$

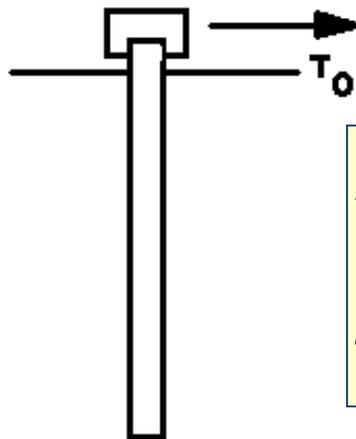
$$y(z) = \frac{2 \cdot M_0}{l_e^2 \cdot k \cdot B} \cdot e^{-k \cdot z} \cdot (\cos \lambda \cdot z - \sin \lambda \cdot z)$$

$$M(z) = M_0 \cdot e^{-k \cdot z} \cdot (\sin \lambda \cdot z + \cos \lambda \cdot z)$$

$$T(z) = -\frac{2 \cdot M_0}{l_e} \cdot e^{-k \cdot z} \cdot \sin \lambda \cdot z$$

# Solutions pour appui élastique

Effort horizontal sur tête **sans rotation**



$$y(z) = \frac{T_0}{l_e \cdot k \cdot B} \cdot e^{-kz} \cdot (\cos \lambda \cdot z + \sin \lambda \cdot z)$$

$$kB = \frac{P}{y} = E_s [MN / m^2] = Cte$$

$$l_e [m] = \frac{1}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}}$$

$$M_{Max} = 0,5T_0 \cdot l_e$$

Force

-

Moment

=

Encastré

$$y_0 = \frac{2 \cdot T_0}{l_e \cdot k \cdot B}$$

$$y_0 = \frac{2 \cdot M_0}{l_e^2 \cdot k \cdot B}$$

$$y_0 = \frac{T_0}{l_e \cdot k \cdot B}$$

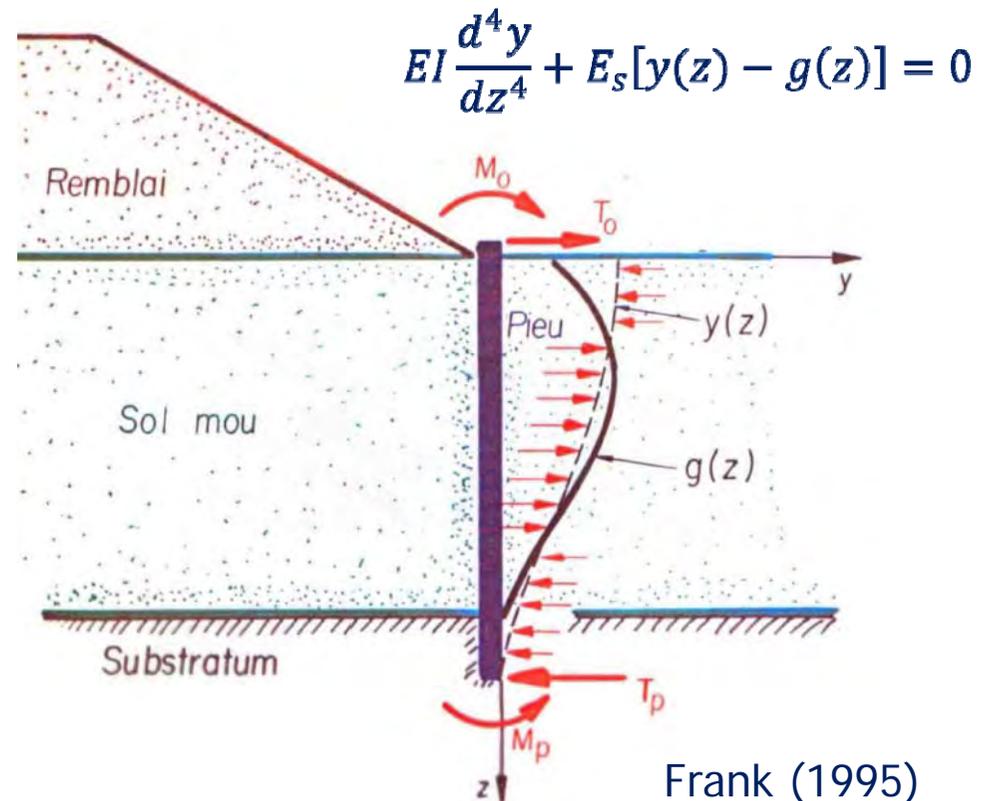
→ Coefficients de raideur en tête ( $K_{VV}$ ,  $K_{HH}$ ,  $K_{MM}$  et  $K_{HM}$ ) en fonction de  $L/d$  et de  $E_p/E_s$

## Pieux statiquement passifs – Méthode “g(z)”

Pieu passif = pieu sollicité par le déplacement  $g(z)$  du sol

La résolution de ce cas implique d'établir l'équilibre des sollicitations suivantes:

- Réaction du sol (lorsque  $y > g$ )
- Entraînement du sol (lorsque  $y < g$ )
- Efforts en tête  $M_0, T_0$
- Efforts en pointe  $M_p, T_p$



# Courbes P-y dans le sable (O'Neill – API 1987 et 2005)

$P_u$  est  
fonction de  
 $\gamma$ ,  $x$ ,  $B$ ,  
et  $\phi$

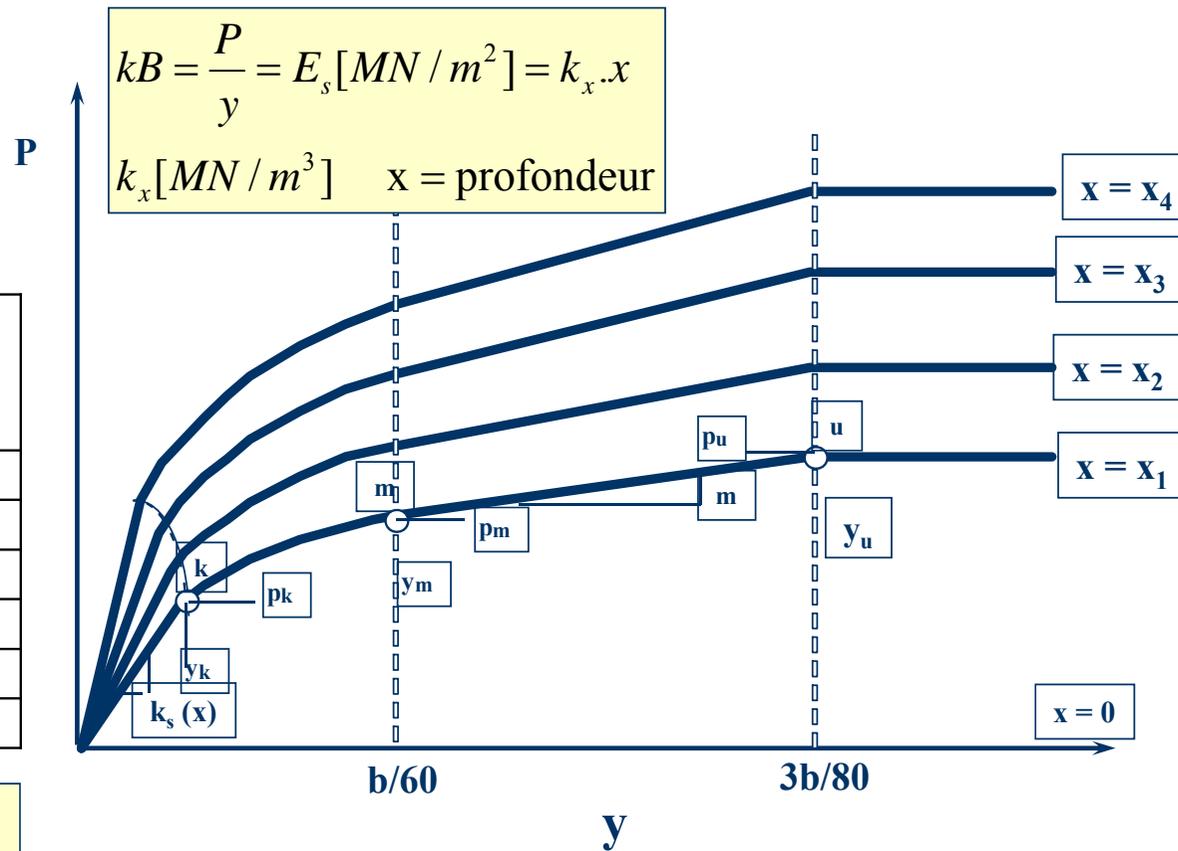
Taux d'augmentation de la raideur  
initiale en fonction de la  
profondeur

API, 2005

Densité relative	$k_x$ [MN/m <sup>3</sup> ]
Très lâche	2.7
Lâche	5.4
Moyen	16.3
Compact	33.8
Très compact	43.4

$$p(y) = A \cdot p_u \cdot \tanh\left(\frac{k_x \cdot x}{A \cdot p_u} \cdot y\right)$$

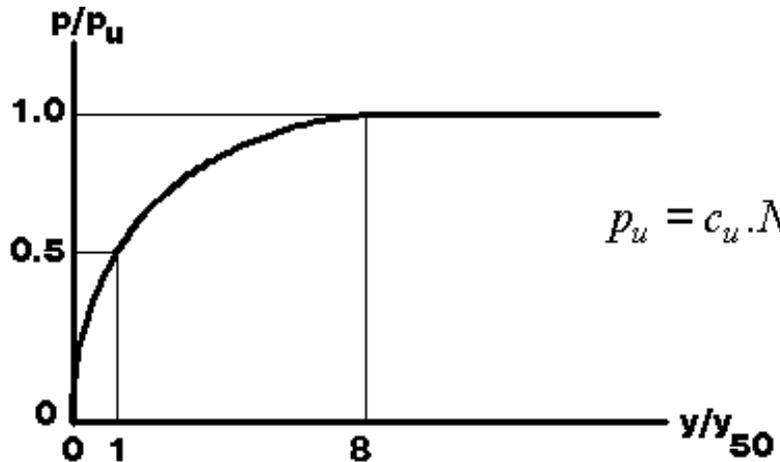
$A = 3 - 0.8x/B$  en statique  
 $A = 0.9$  en cyclique



$y$  intervient en rapport avec  $B$  (diamètre du pieu)

# Courbes de réaction "P-y" pour argiles

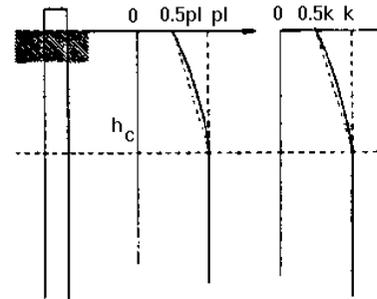
$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3}$$



$$p_u = c_u \cdot N_p$$

$$\frac{y_{50}}{R} = 5 \varepsilon_{50}$$

Matlock-Reese



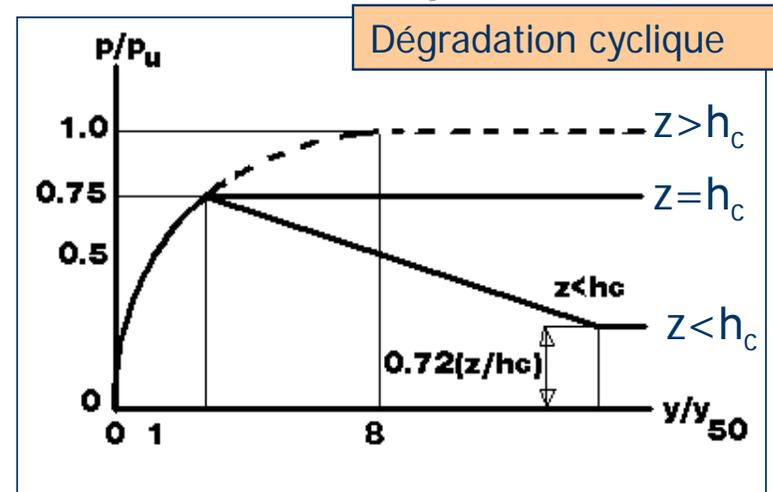
$$N_p = 9$$

$$N_p = 3 + 6 \cdot \frac{z}{h_c}$$

$$h_c = \frac{6 \cdot B}{\frac{\gamma \cdot B}{c_u} + 0,5}$$

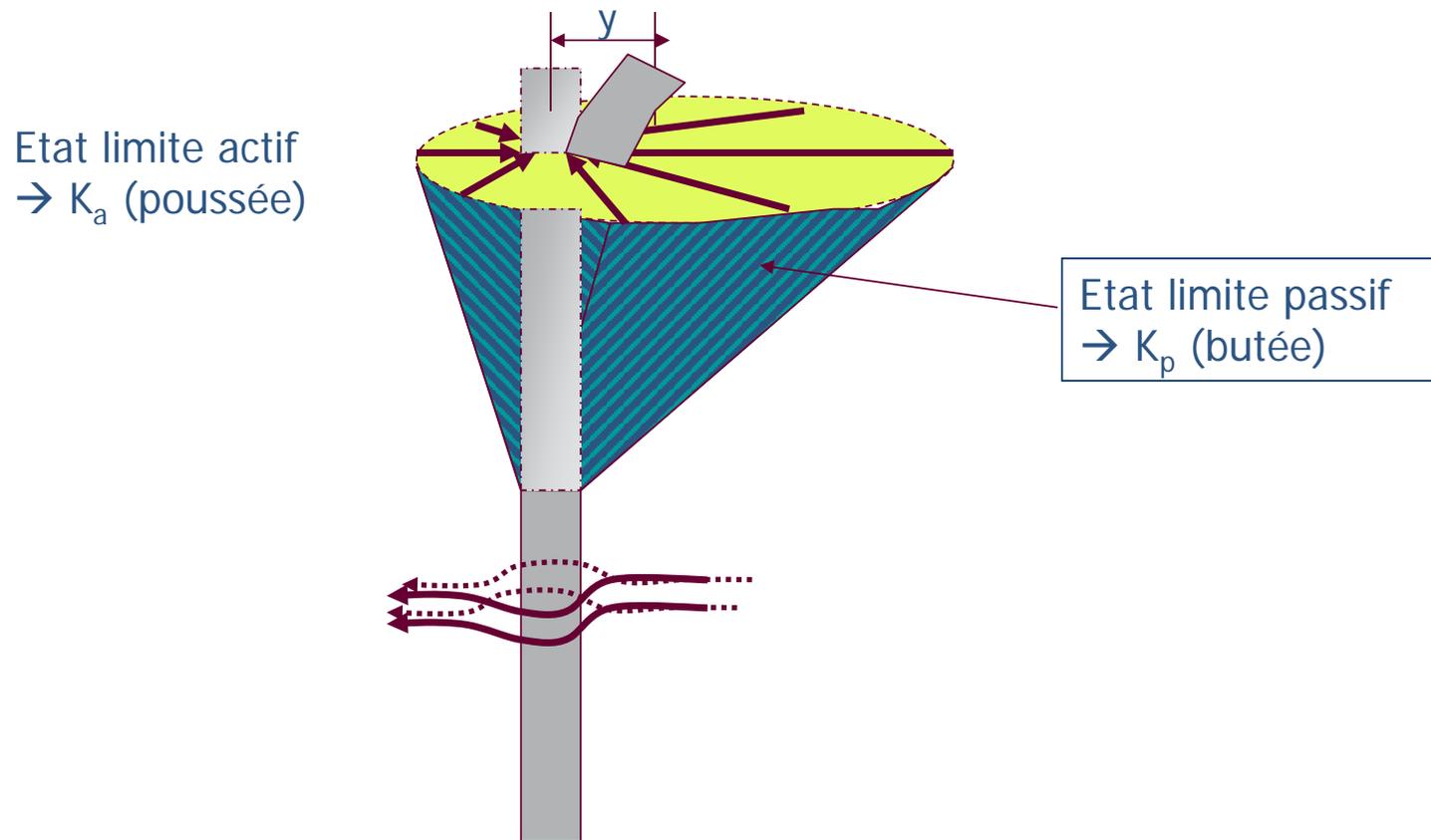
$$z \geq h_c$$

$$0 \leq z \leq h_c$$



Dégradation cyclique

# Interaction latérale plastique Sol-pieu



## Courbes de réaction à partir de l'essai pressiométrique

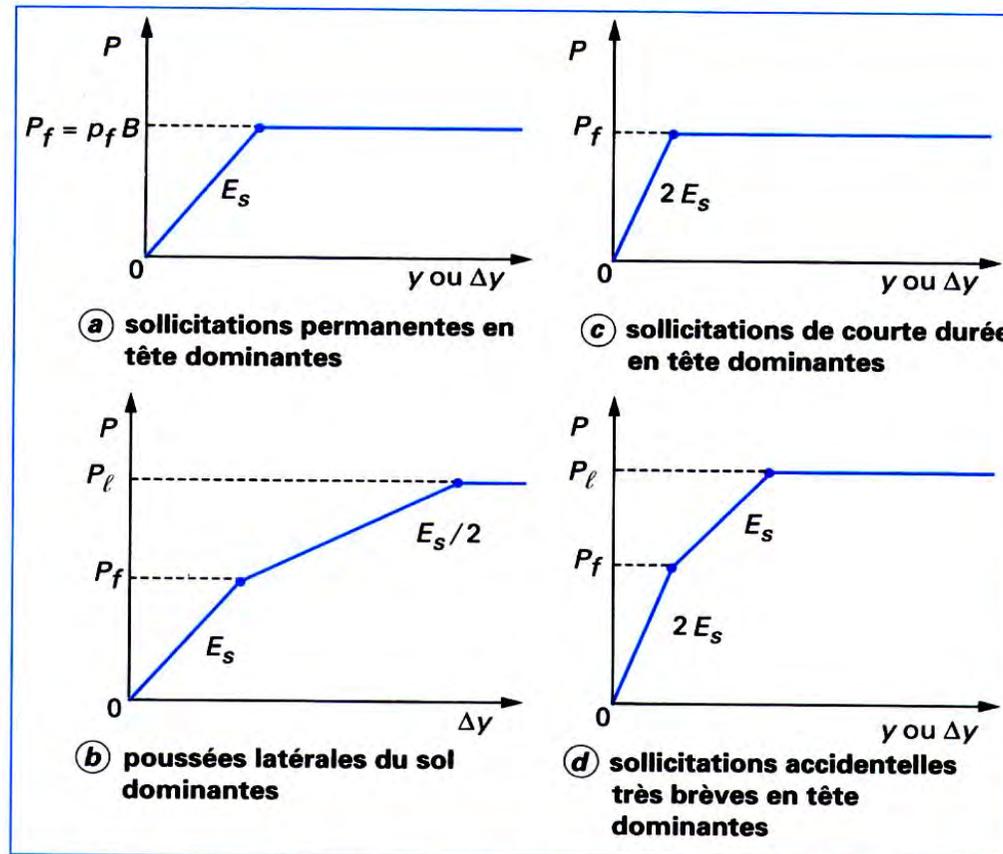


Figure 69 – Courbes de réaction d'un pieu isolé sous charges latérales [1]

Frank (1995)

## Paramètres de sol

- Sable:

- Angle de frottement interne,  $\phi$
- Poids volumique,  $\gamma$
- Module de réaction (latérale),  $k_B = E_s$

$$p_{us} = (C_1 x + C_2 B) \cdot \gamma' \cdot x$$
$$p_{ud} = C_3 \cdot B \cdot \gamma' \cdot x$$

avec  $C_{1,2\&3}(\phi \text{ ou } I_d)$

- Argile et roche:

- Cohésion non drainée,  $c_u$
- Poids volumique,  $\gamma$
- Déformation unitaire à 50% de résistance (FS=2),  $\epsilon_{50}$
- Eventuellement:  $k$  et  $\epsilon_{100}$

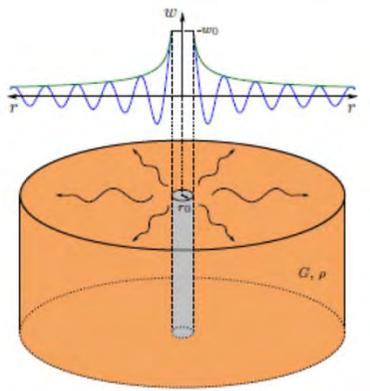
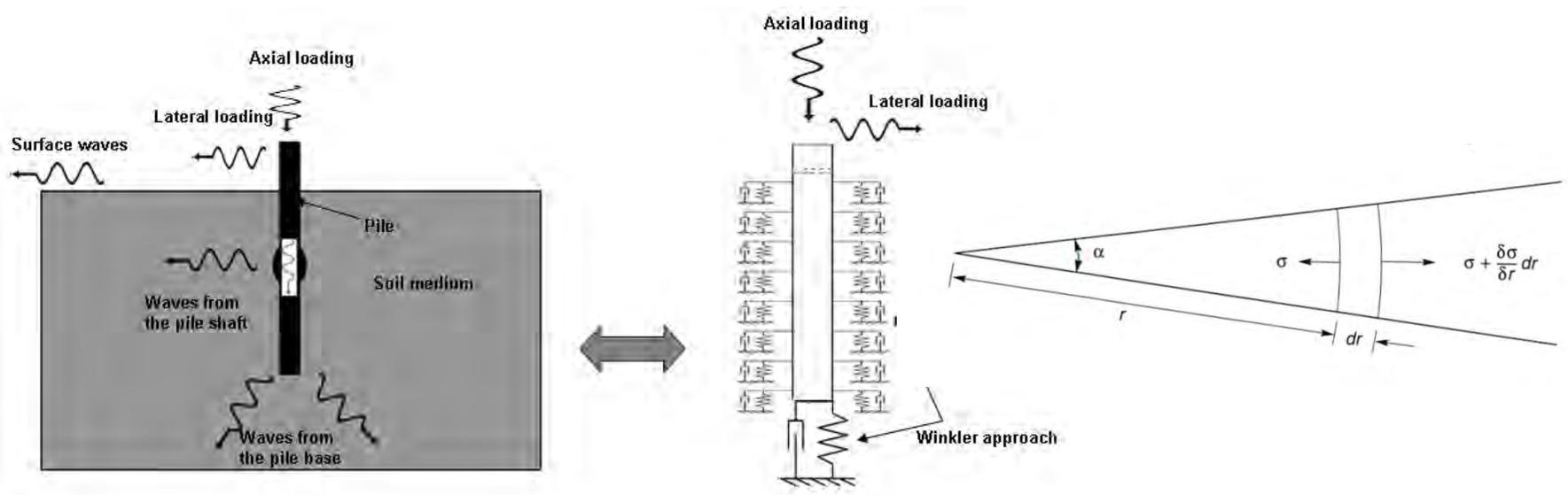
Courbes P-y déduites d'essais *in situ*: PMT, Dilatomètre Marchetti

## Modes d'interaction **dynamique**

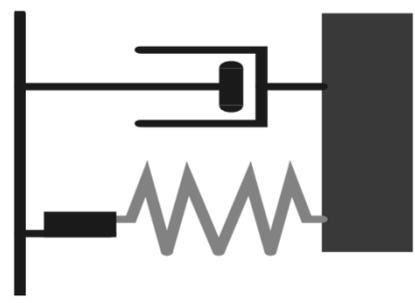
- Axial (vertical): modèles "t-z" & "q-z"
- Transversal (Latéral): modèles **P-y**
- Torsionnel: modèles "T- $\theta$ "

Compte tenu des vitesses de déplacement ( $\dot{z}$  et  $\dot{y}$ ), les modes d'interaction statique doivent être étendus à des lois de type:  $t - z, \dot{z}$   $q - z, \dot{z}$  et  $P - y, \dot{y}$ , moyennant l'introduction de la notion ***d'impédance mécanique***

# Amortissement géométrique ou radiatif

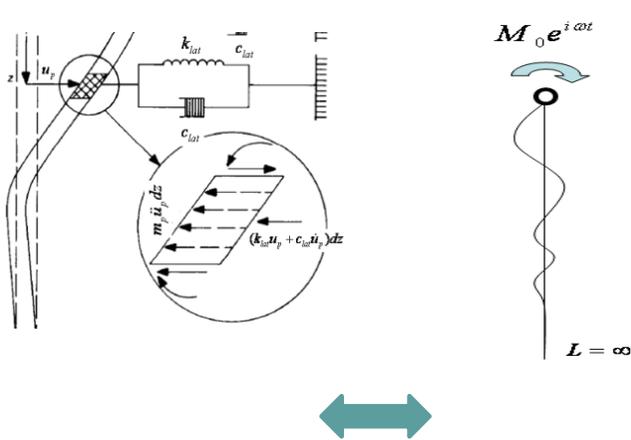


(Bertin, 2009)

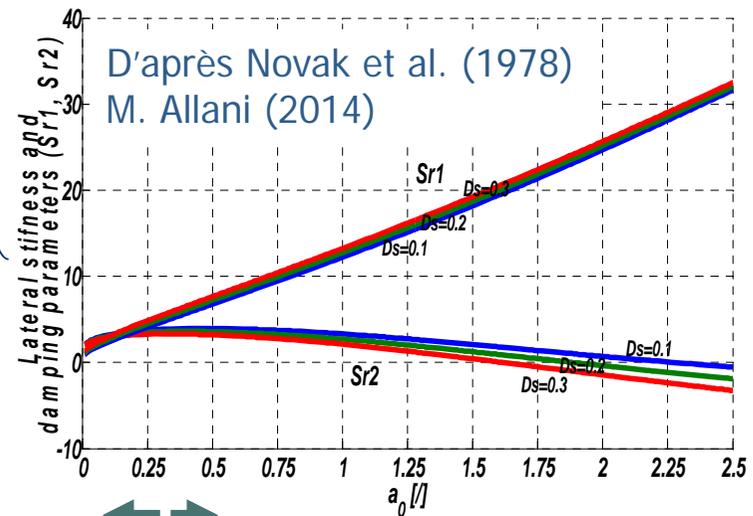


# Impédance latérale d'un pieu

Réaction visco-élastique du sol (Winkler k et c)



$$\frac{\partial^4 u_p}{\partial z^4} + \frac{\partial u_p}{\partial t} \frac{c_h}{E_p I_p} + u_p \frac{k_h}{E_p I_p} = 0$$

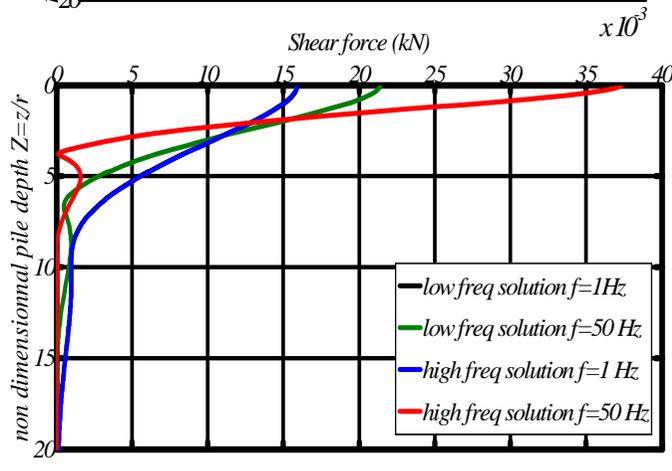
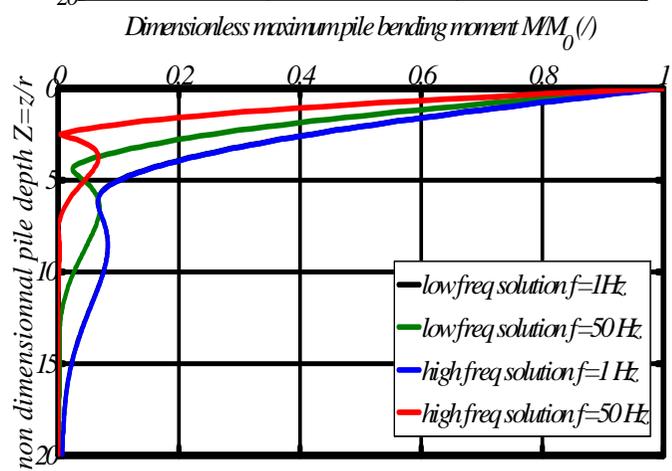
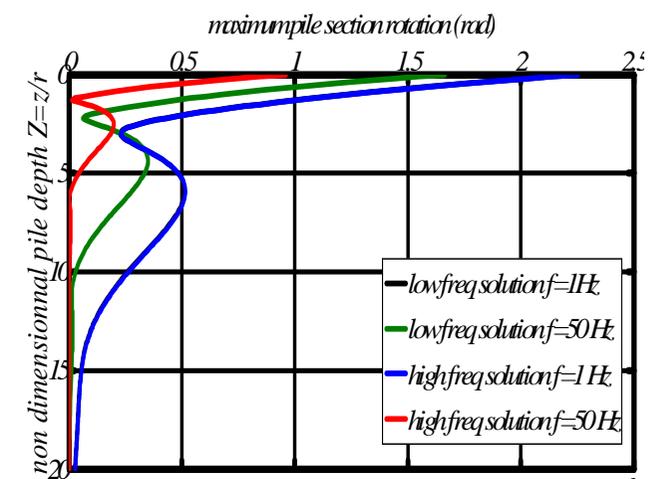
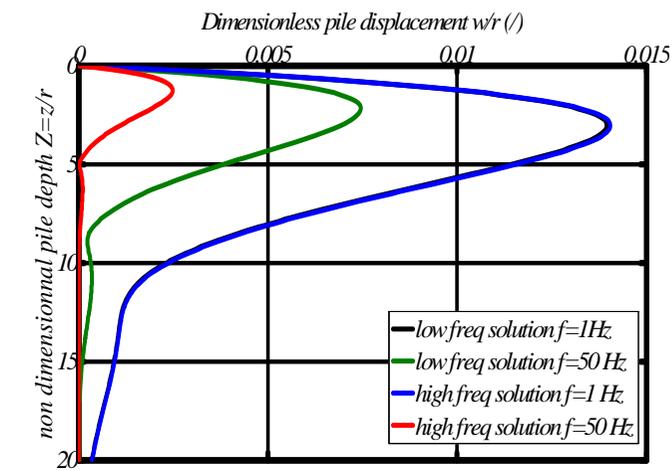


$$a_0 = \frac{\omega r}{V_s} \quad : \text{fréquence adimensionnelle}$$

$$k_{lat\_total} = G[S_{r1}(a_0, \nu, D_s) + iS_{r2}(a_0, \nu, D_s)]$$

- $r$  Rayon du pieu
- $\nu$  Coefficient de Poisson
- $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$  Célérité des ondes de cisaillement
- $D_s$  Amortissement hystérétique

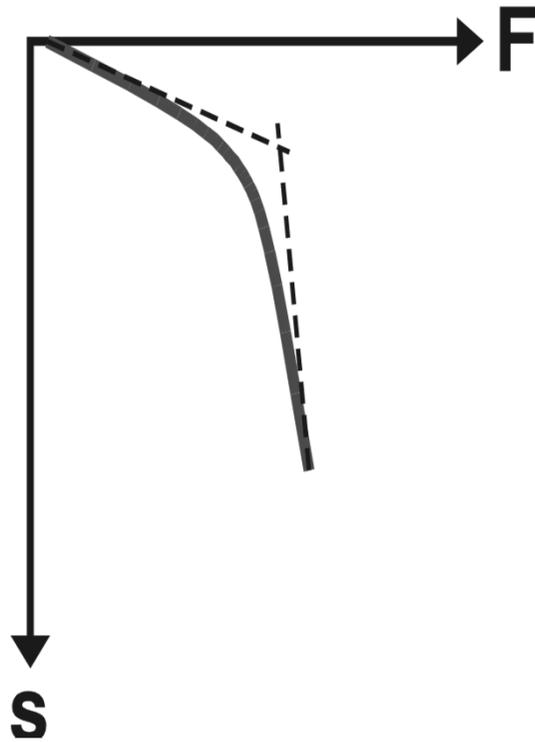
# Fonctions d'influence à différentes fréquences



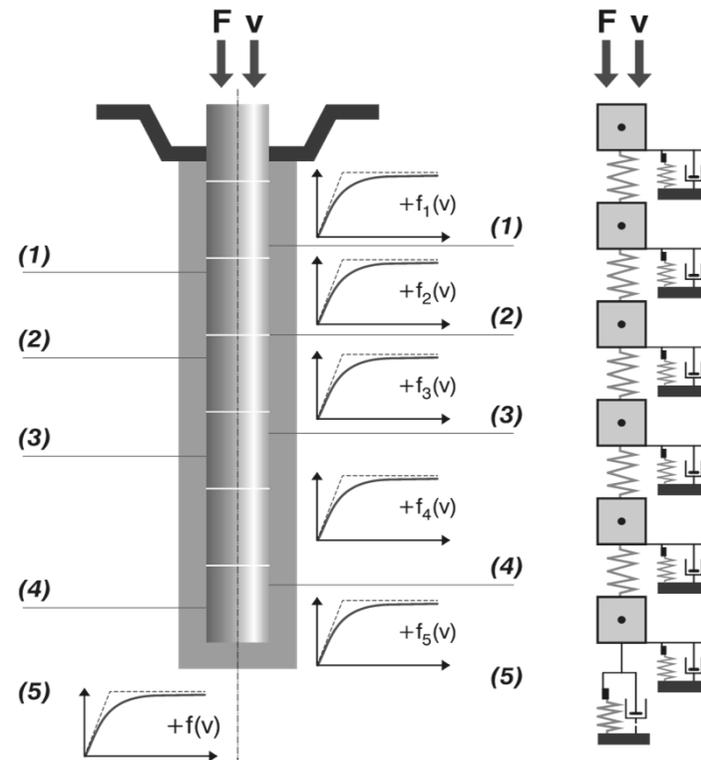
(Allani, 2014)

# Mode d'interaction axial

Réaction globale ponctuelle en mode axial Charge -tassement

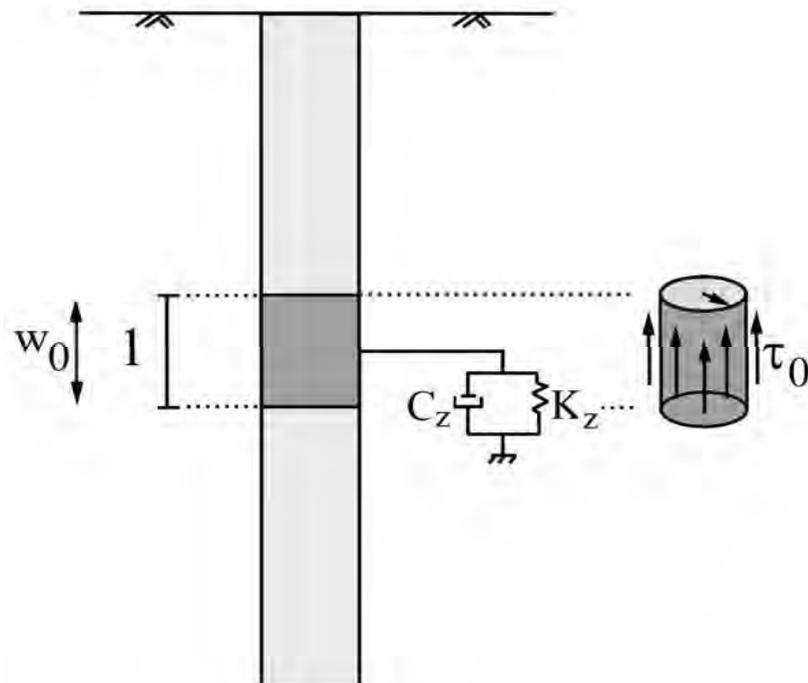


Colonne infrastructurelle continûment supportée par le sol



Coefficients de Winkler (ressort-amortisseur) pour mode axial de vibration harmonique d'un fût de pieu

$$P_z(r, t) = C_z \cdot \dot{w}(r, t) + K_z \cdot w(r, t)$$



$$I_z = \frac{P_{zc}}{w_c} = (C_z \cdot i \cdot \omega + K_z)$$

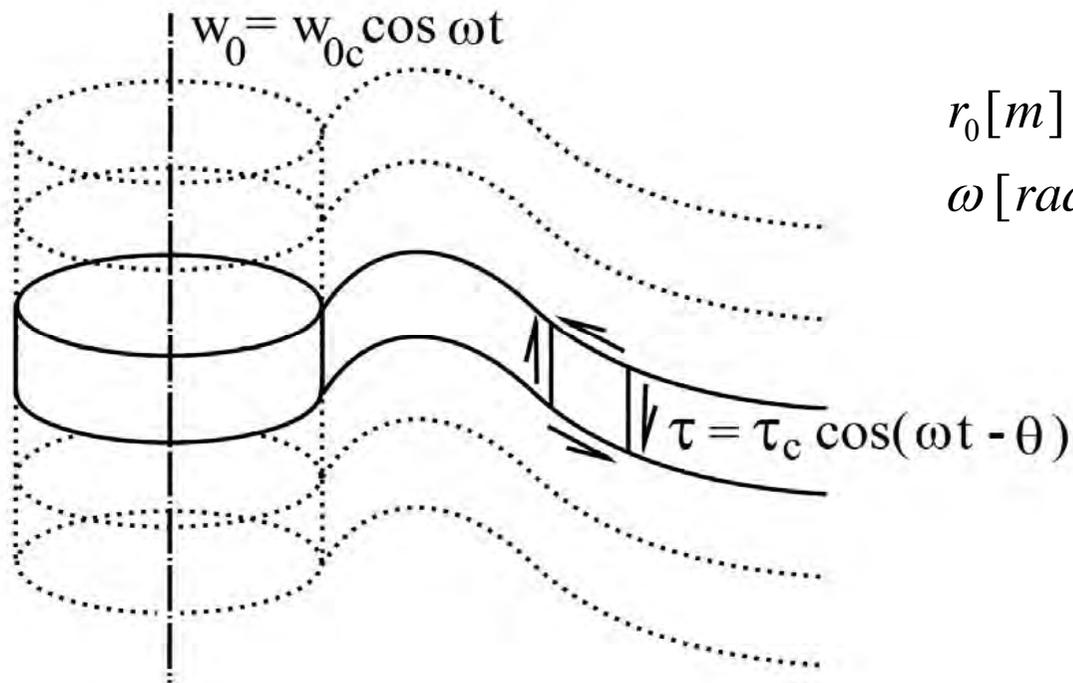
$$= G_{s0} (C_{za} \cdot i + K_{za}) = \frac{2\pi \cdot r_0}{w_c(r_0)} \cdot \tau_c(r_0)$$

$$K_{za} = \Re\{I_z\} / G_{s0}$$

$$C_{za} = \Im\{I_z\} / (\omega \cdot G_{s0})$$

## Couche élémentaire de sol visco-élastique autour d'un fût oscillant verticalement

$$G^* \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \left( \frac{G^*}{r} + \frac{\partial G^*}{\partial r} \right) \frac{\partial w}{\partial r} = \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$



$r_0 [m] = \text{pile shaft radius}$

$\omega [\text{rad} / \text{s}] = \text{circular frequency}$

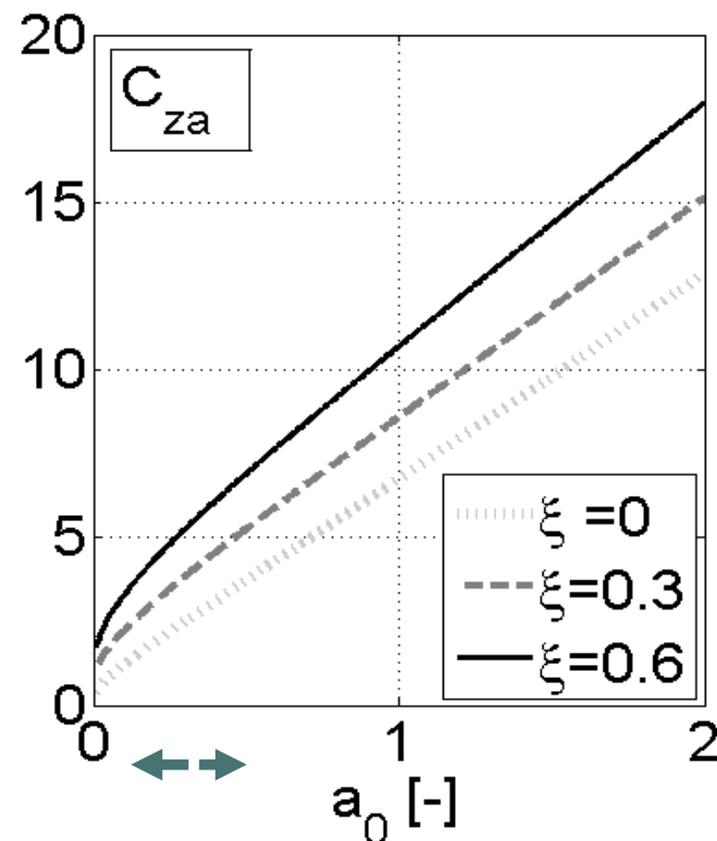
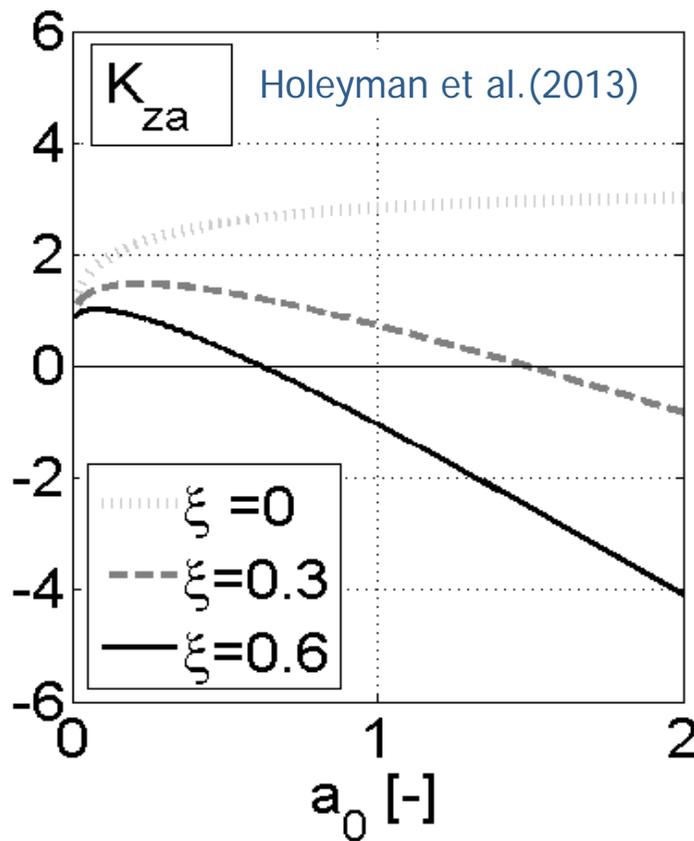
$$w(r \rightarrow \infty, t)$$

$$G^* = G \cdot (1 + 2i\xi)$$

## Impédance verticale du fût d'un pieu cylindrique

$$K_{za} = \Re\{I_z\} / G_{s0}$$

$$C_{za} = \Im\{I_z\} / (\omega \cdot G_{s0})$$





Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

## Soil Dynamics and Earthquake Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/soildyn](http://www.elsevier.com/locate/soildyn)

## Impedance of pile shafts under axial vibratory loads

Alain Holeyman<sup>a,\*</sup>, Renaud Bertin<sup>a,1</sup>, Valérie Whenham<sup>b</sup><sup>a</sup> *Université Catholique de Louvain (UCL), Louvain-La-Neuve, Belgium*<sup>b</sup> *Belgian Building Research Institute (BBRI), Bruxelles, Belgium*

## ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 8 December 2011

Received in revised form

7 September 2012

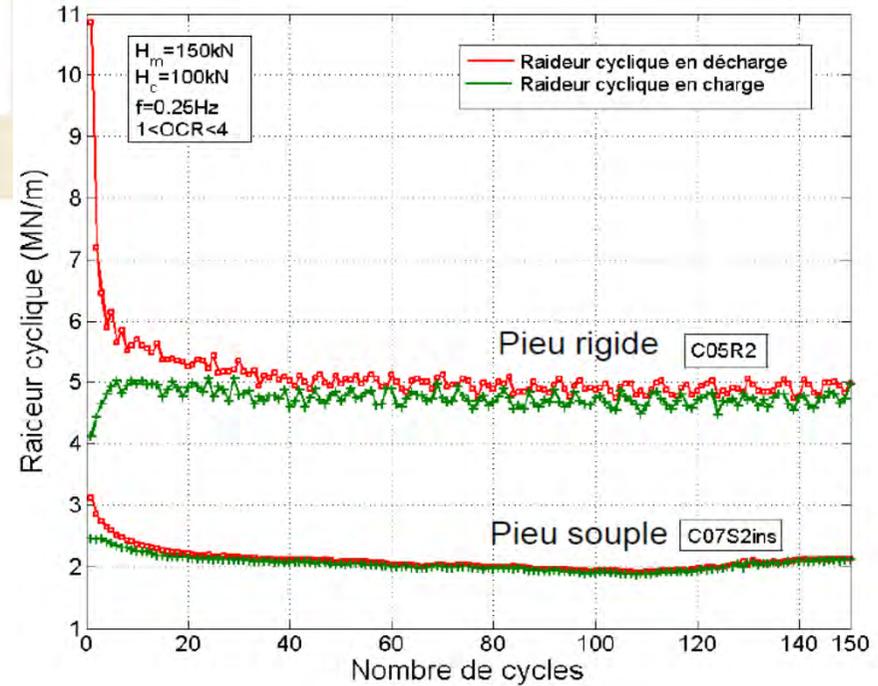
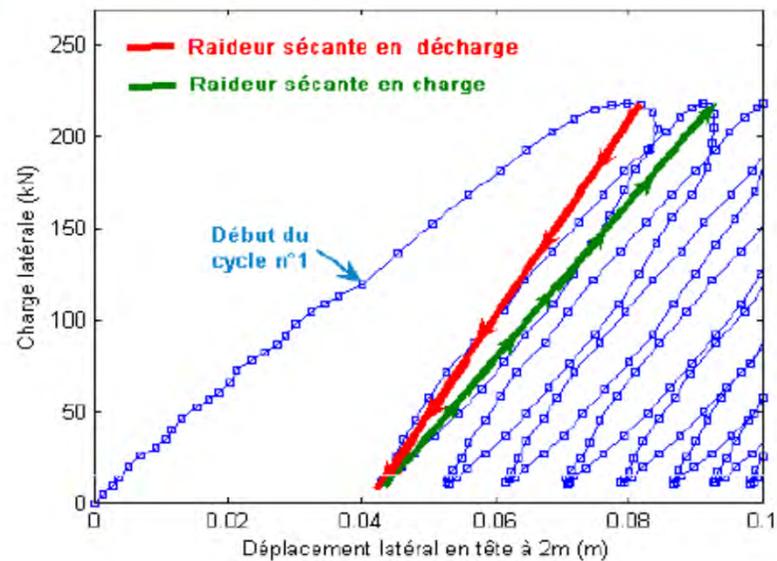
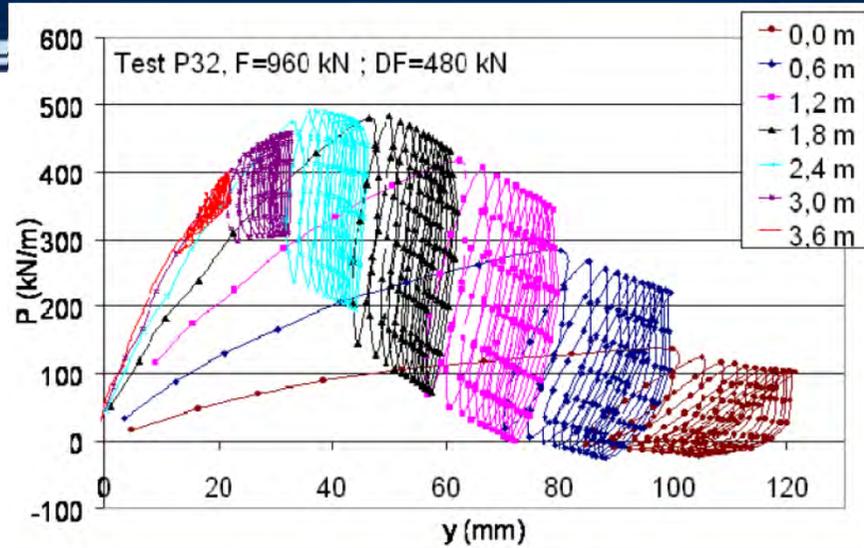
Accepted 9 September 2012

## ABSTRACT

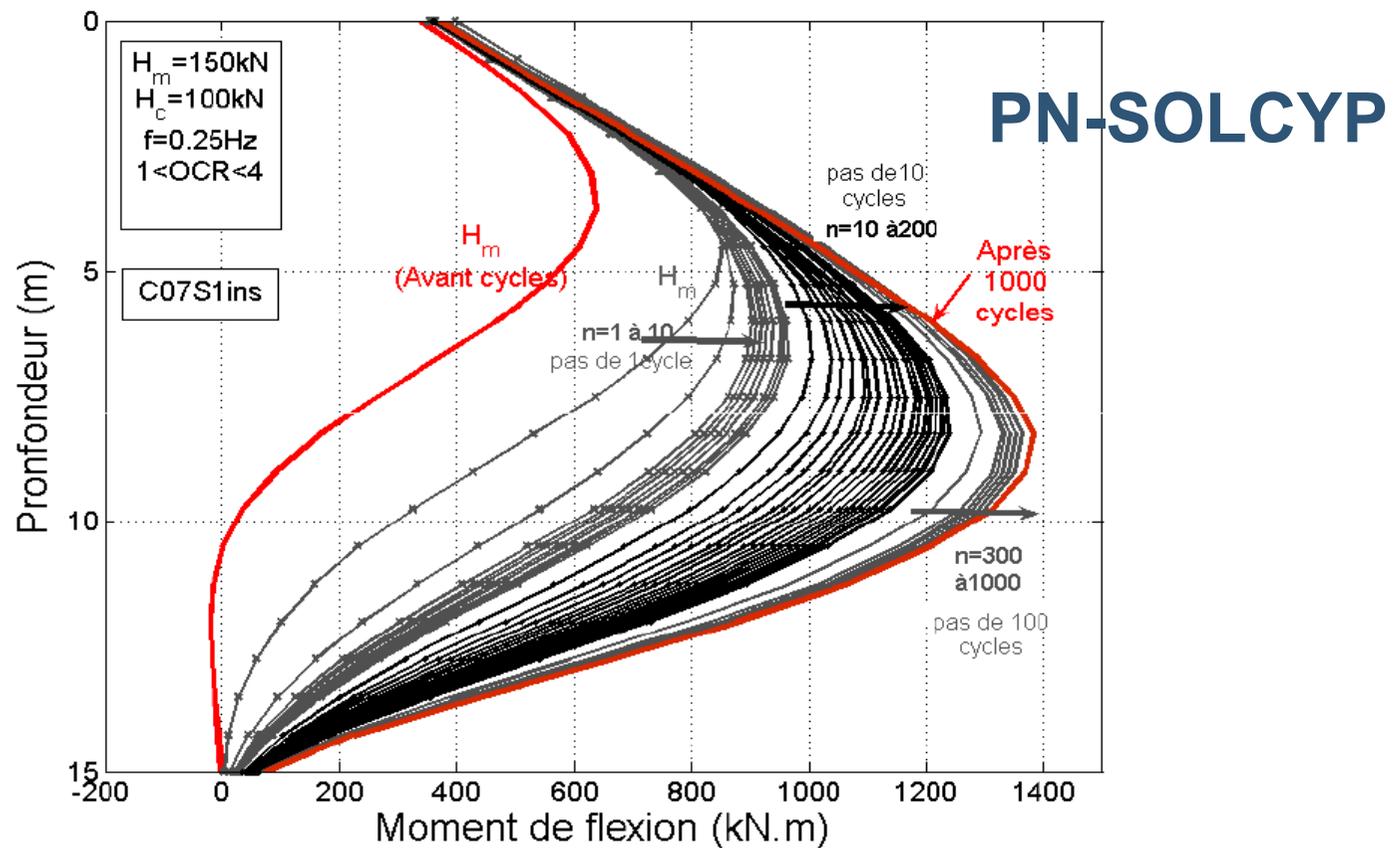
This paper describes analytical solutions for assessing the axial dynamic response of the shaft of a pile subjected to vibratory loads, with particular reference to pile vibratory driving. Radial inhomogeneity arising from shear modulus degradation is accounted for by assuming continuous variations of the medium properties. This approach alleviates wave reflections from the interface between inner (nonlinear) and outer (linear) zones. Novel analytical solutions are presented for two cases describing the radial decrease of the soil modulus according to (a) a linear law and (b) a parabolic law. The results are evaluated over a wide range of parameters and compared with those obtained by a semi-analytical model derived from Michaelides et al. [14,15] and by a radial discrete model simulating the pile and soil movements from integration of the laws of motion (Hypervib-II model) (Holeyman [8]).

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

# PN-SOLCYP



# Evolution du moment en fonction de la profondeur suite aux différents cycles

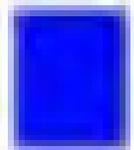


## 4. LIQUEFACTION DU SOL

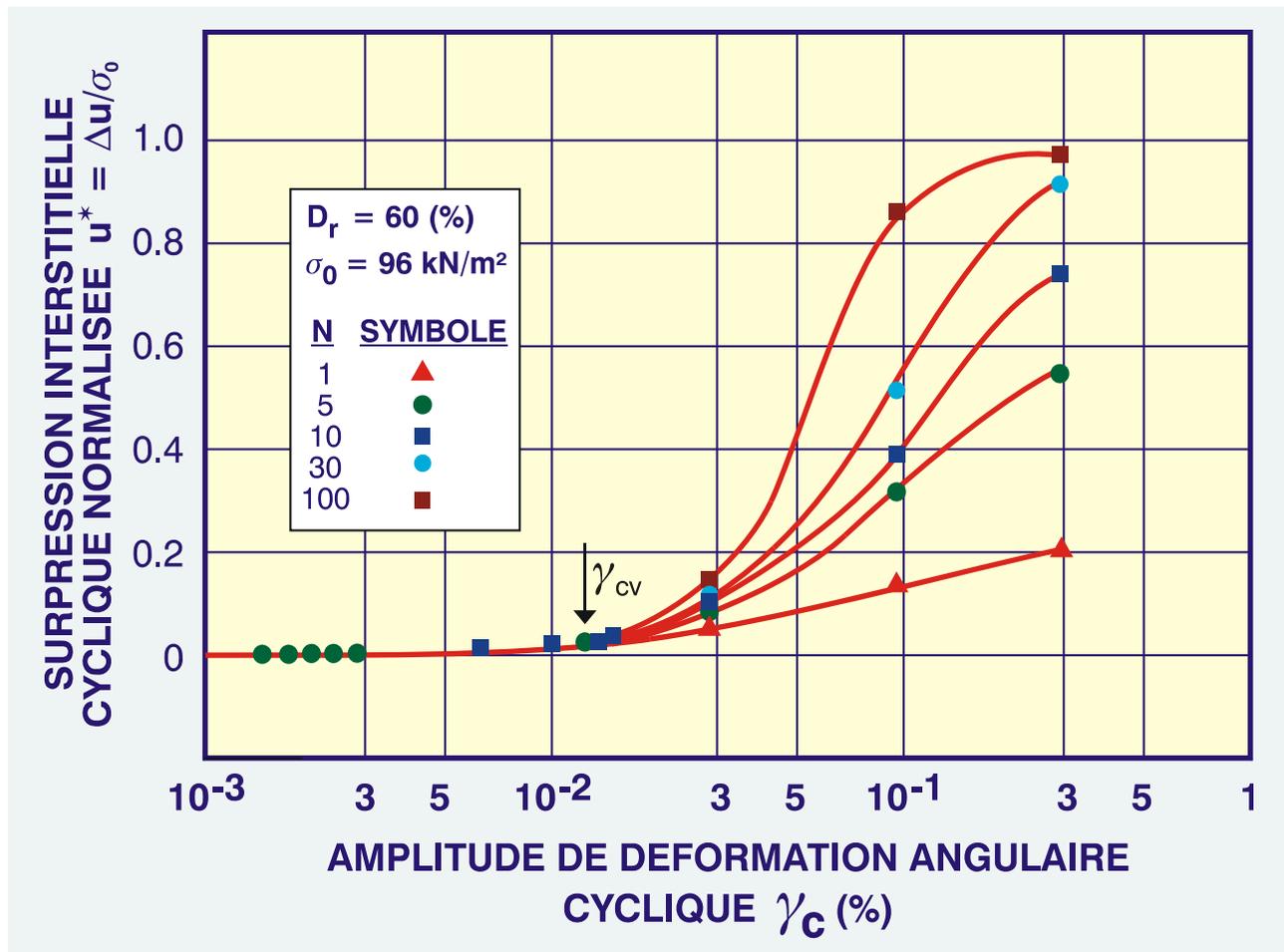


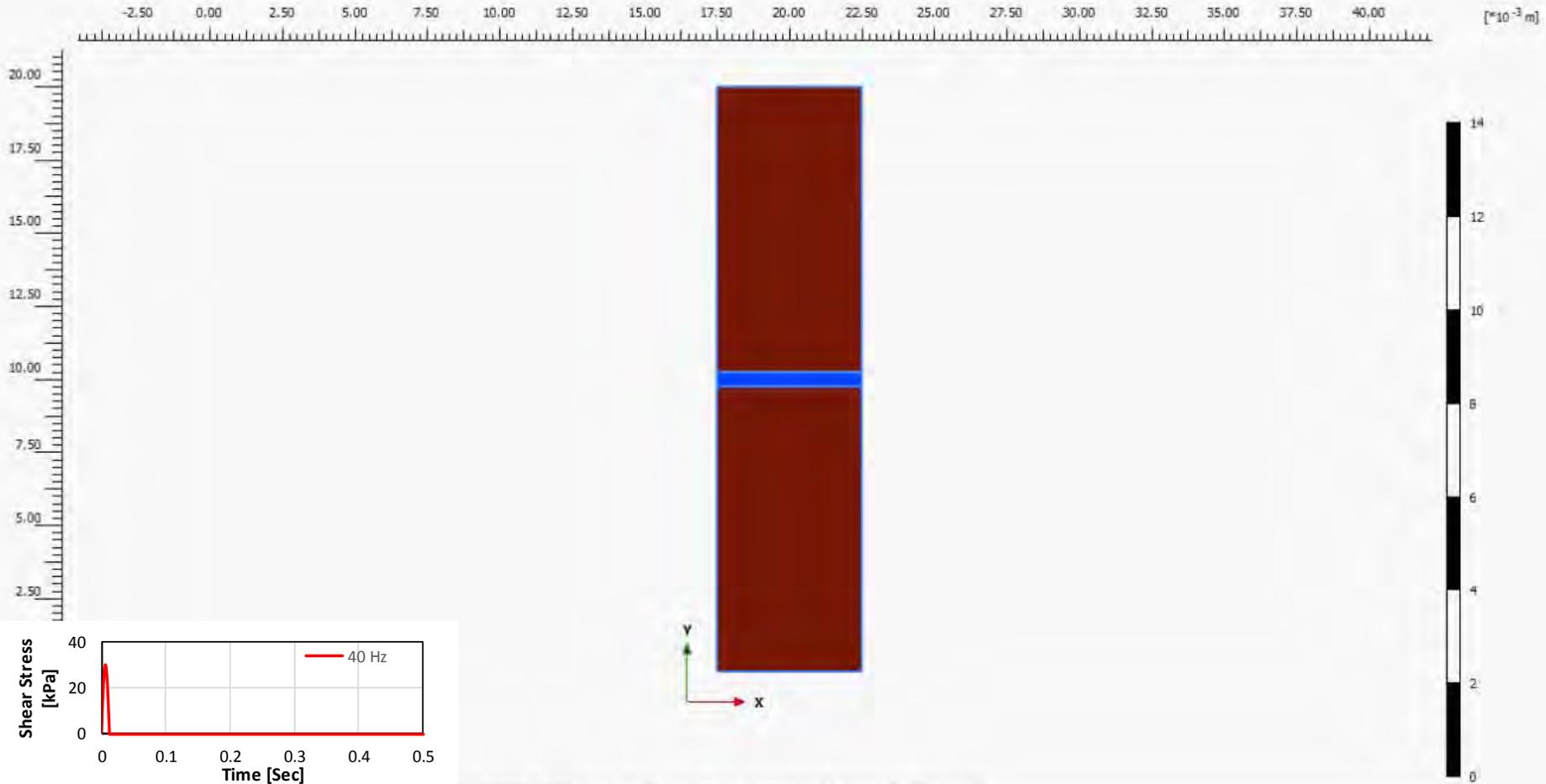


Mécanisme de  
liquéfaction  
sous  
cisaillement  
cyclique



# Génération de pression interstitielle dans les sables (Dobry, 1982)





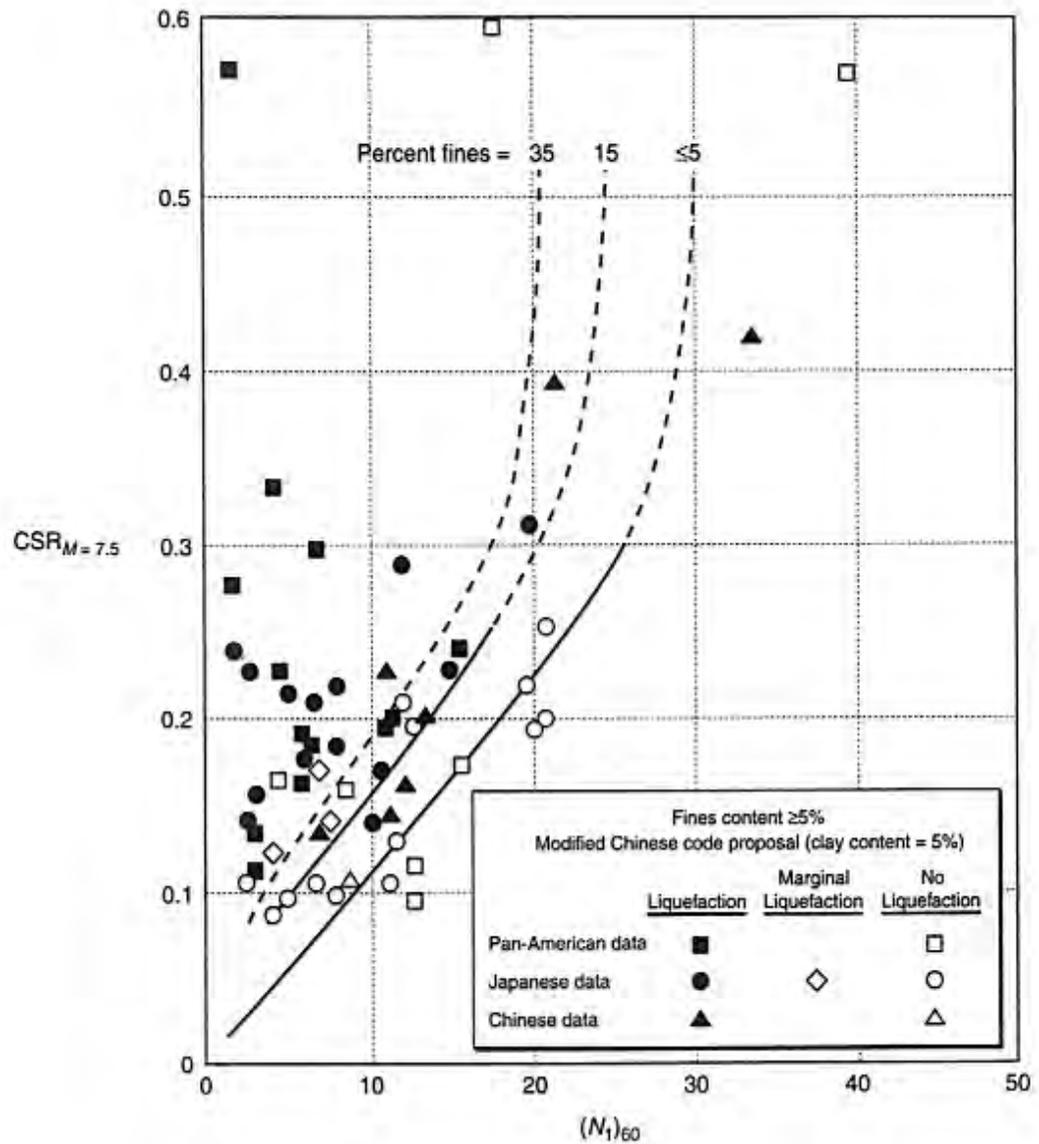
Deformed mesh  $|u|$  (scaled up  $1.50 \cdot 10^{-3}$  times) (Step 1)

Maximum value = 0.000 m (Element 1 at Node 1)

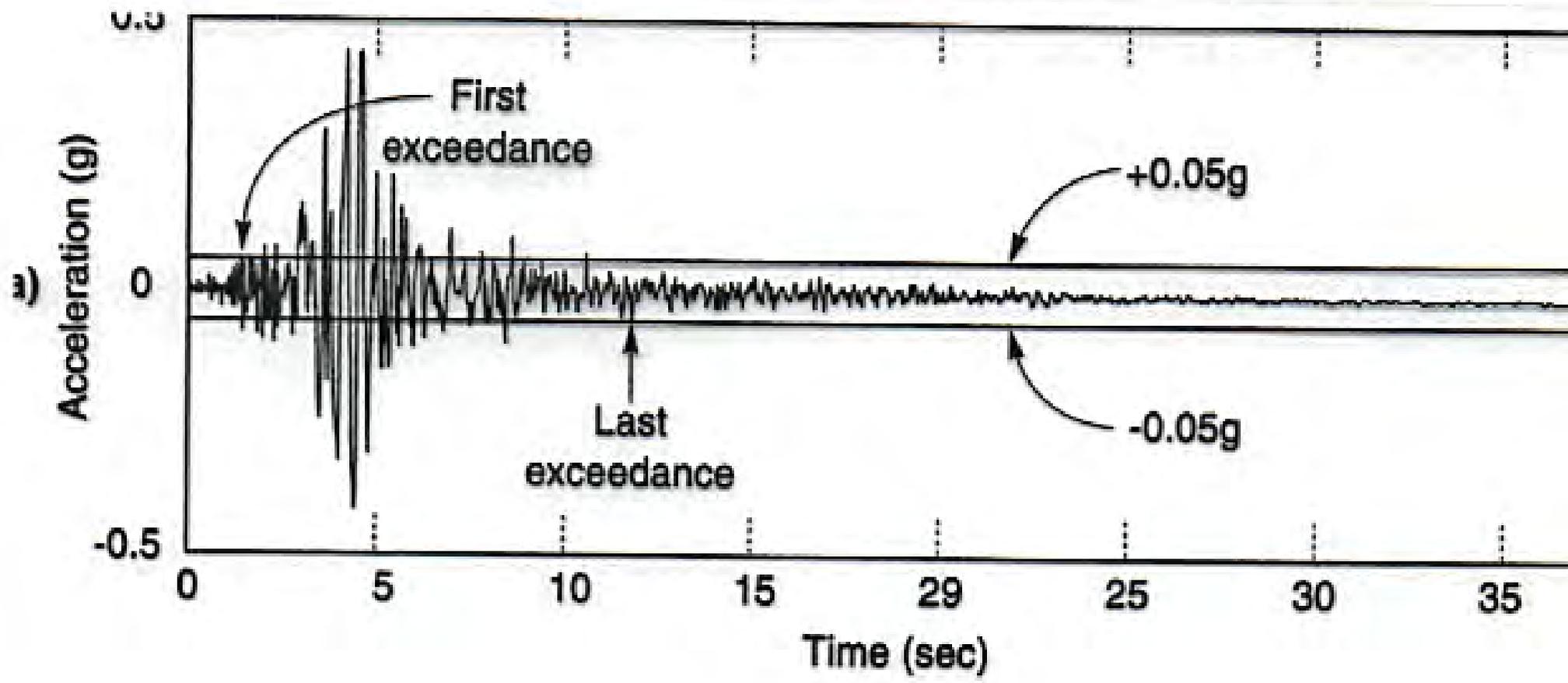
## Evaluation pratique de la liquéfaction

- Estimation de la liquéfaction initiale
  - Sur base d'essais de laboratoire
  - Sur base d'essais in situ (SPT, ...)
- Evaluation des tassements subséquents
- Liquéfaction d'écoulement?

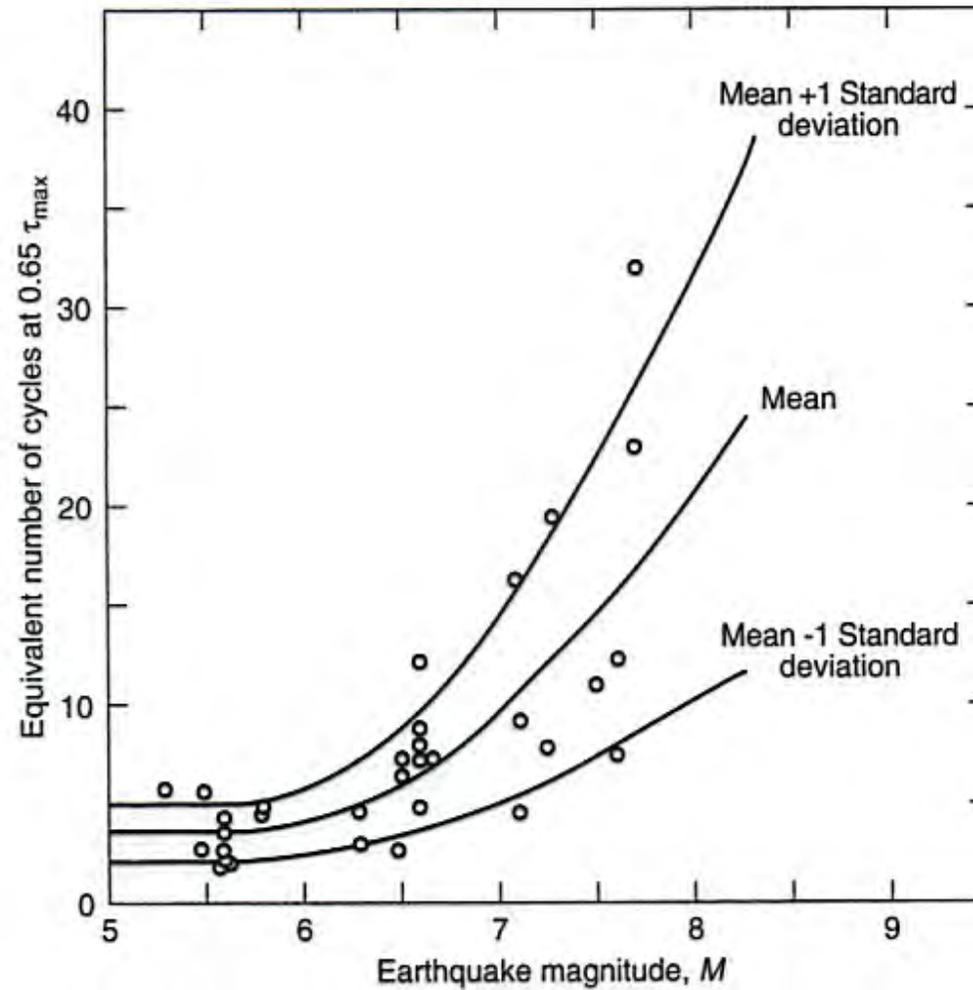
Relation entre  
 rapport de  
 cisaillement  
 cyclique  
 $\tau_{cycl}/\sigma'_{vo}$   
 amenant la  
 liquéfaction des  
 sables  
 limoneux sous  
 Magnitude 7,5  
 l'indice de  
 Pénétration  
 Standard



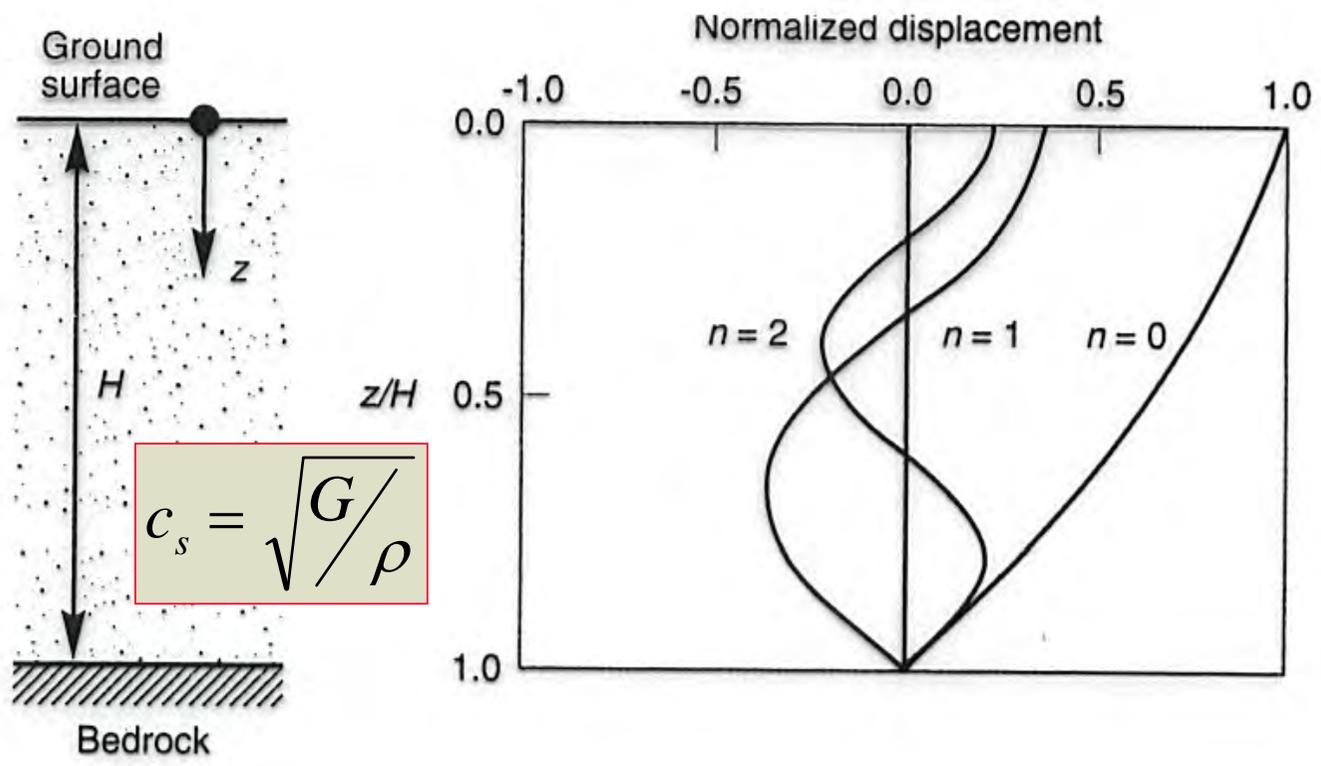
# Accélérogramme



## Equivalence du nombre de cycles



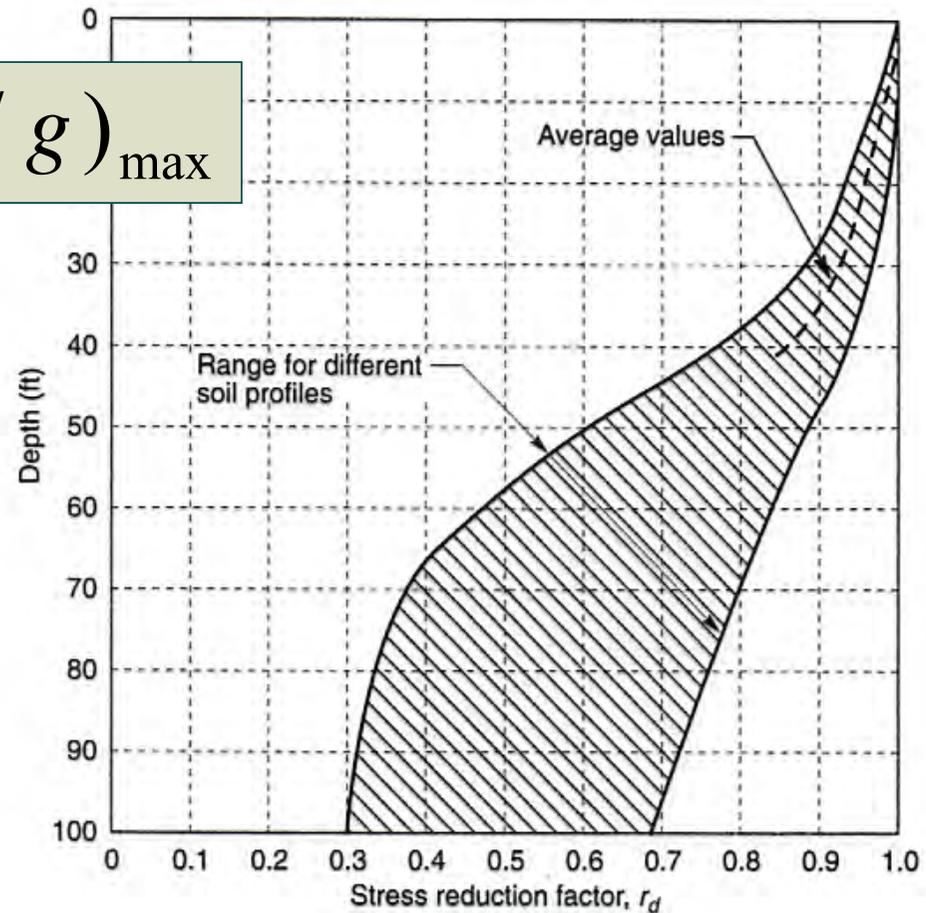
# Réponse sismique d'une colonne de sol



## Réduction de la contrainte cyclique de cisaillement avec la profondeur (Seed & Idriss, 1971)

$$\tau = 0,65 r_d \cdot \gamma_t \cdot z \cdot (a / g)_{\max}$$

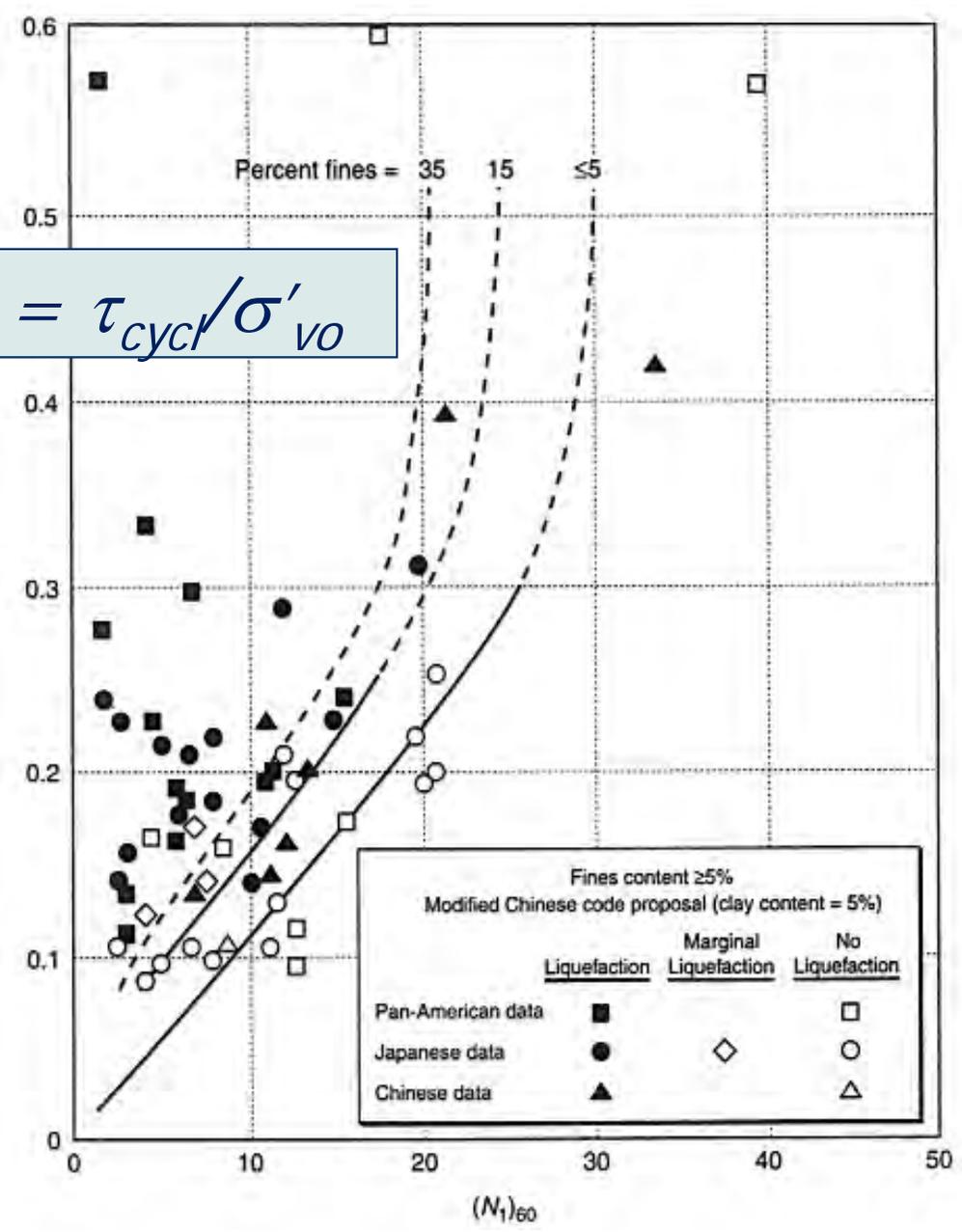
$$CSR = \tau_{cycl} / \sigma'_{vo}$$



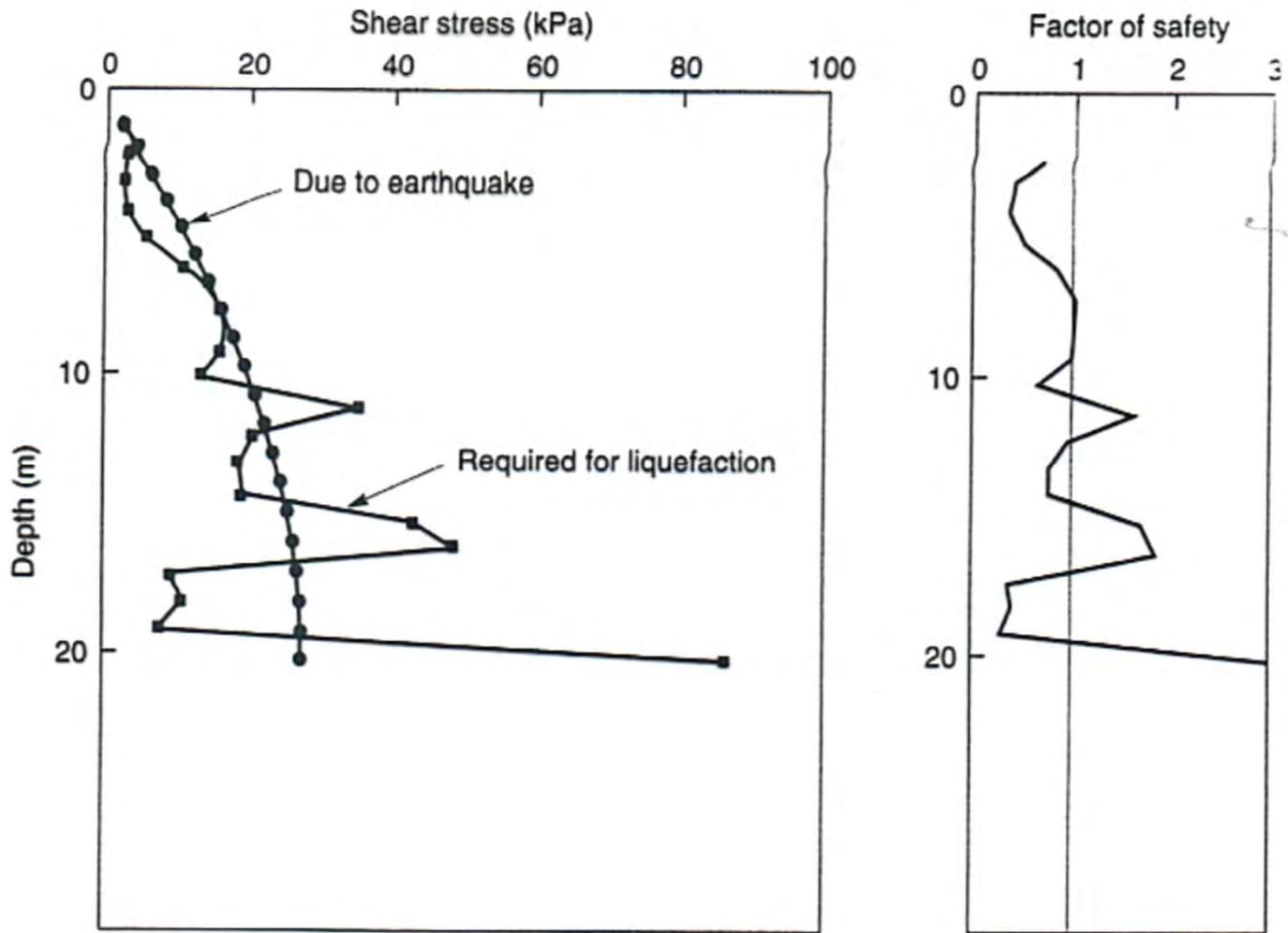
Relation entre  
 le rapport de  
 cisaillement  
 cyclique  
 amenant la  
 liquéfaction  
 des sables  
 limoneux sous  
 Magnitude 7,5  
 et  
 l'indice de  
 Pénétration  
 Standard

$$CSR = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0}$$

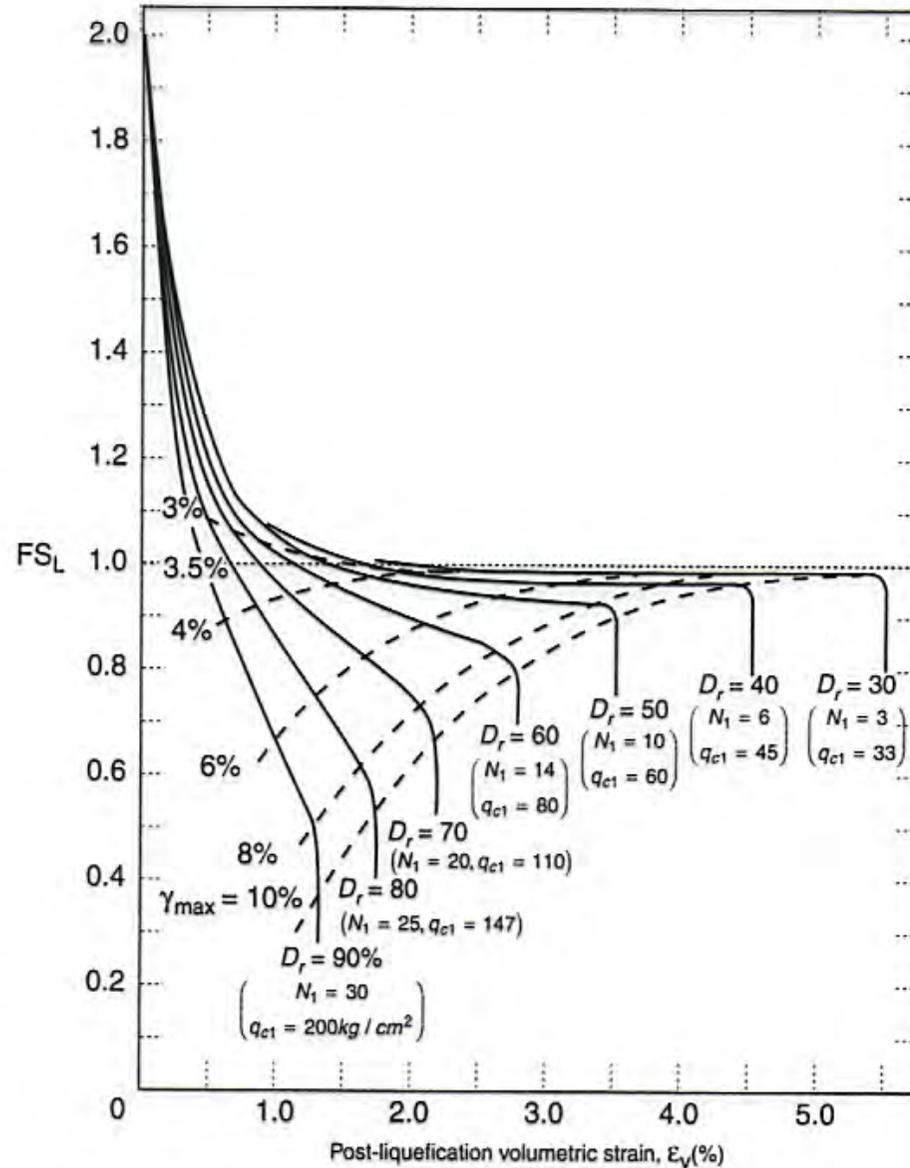
$CSR_{M=7.5}$



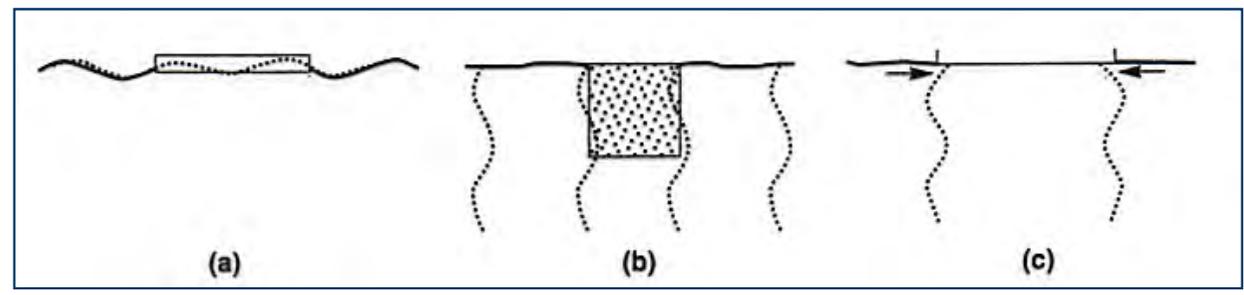
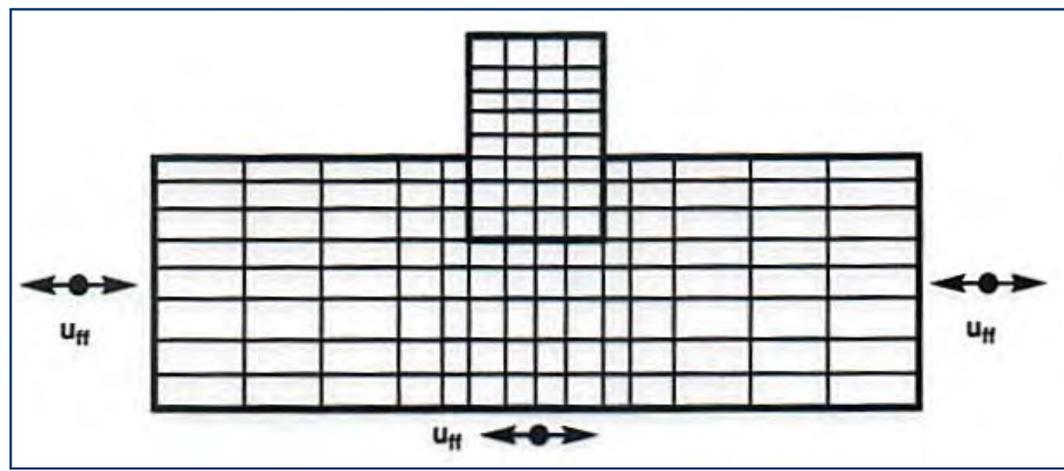
# Sécurité vis-à-vis de la liquéfaction



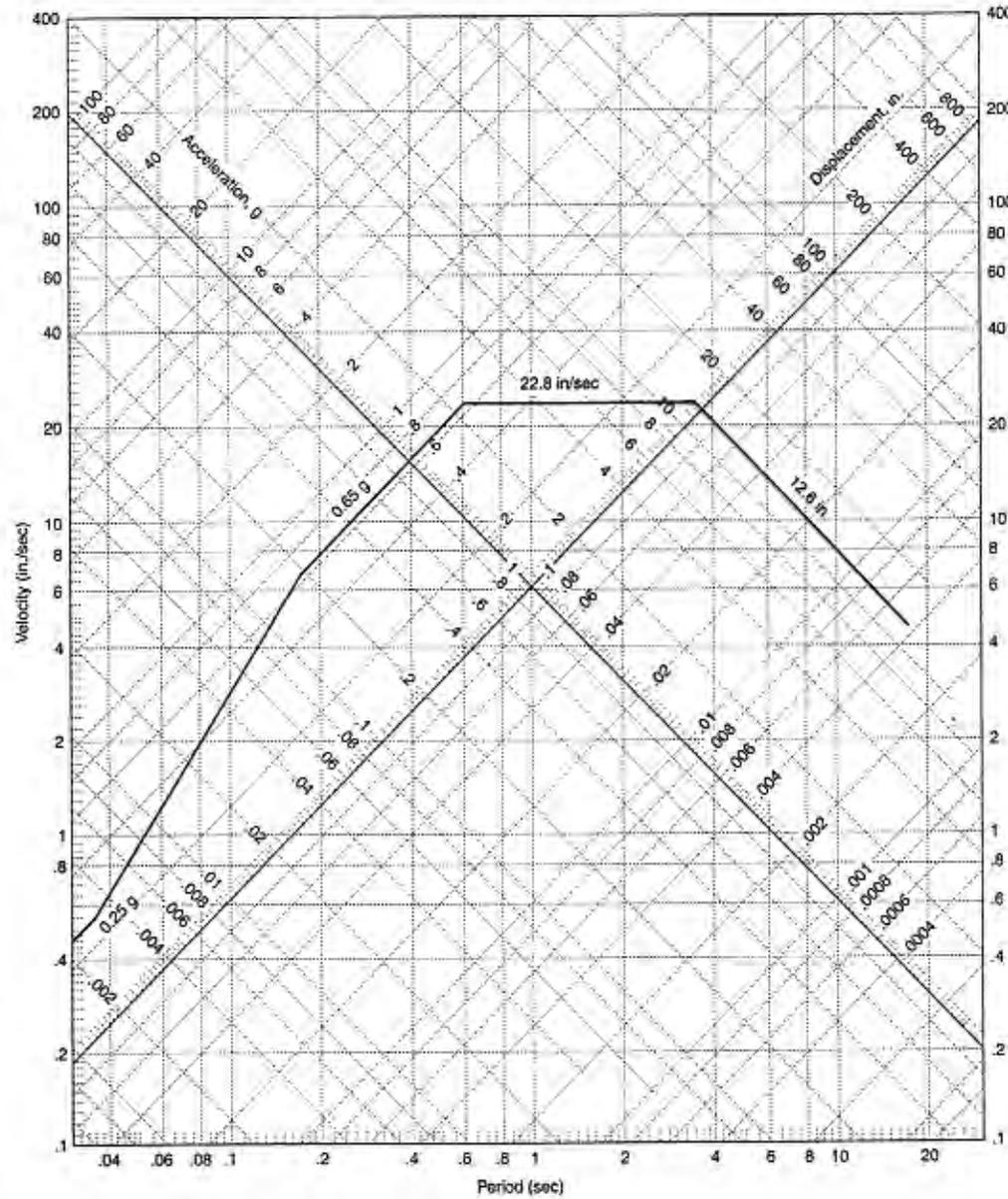
Compression volumique en fonction du coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction des sables propres (Ishihara, 1992)



# Cumul des effets cinématiques et inertiels



# Spectre de dimensionnement



## 5. Conclusions

- L'interaction cinématique sol-pieux devient significative dans sols mous et sous accélération modérée
- L'interaction inertielle sollicite les composantes de réaction latérale et axiale des pieux en phase avec (a) le déplacement (b) la vitesse
- Dégradation du module et augmentation de l'amortissement intrinsèque du sol sous distorsions cycliques croissantes
- Plusieurs degrés de modélisation des systèmes sol-pieux-superstructure
- Impédances horizontales et verticales des pieux disponibles
- Combinaison des effets