

Comportement des pieux sous actions sismiques

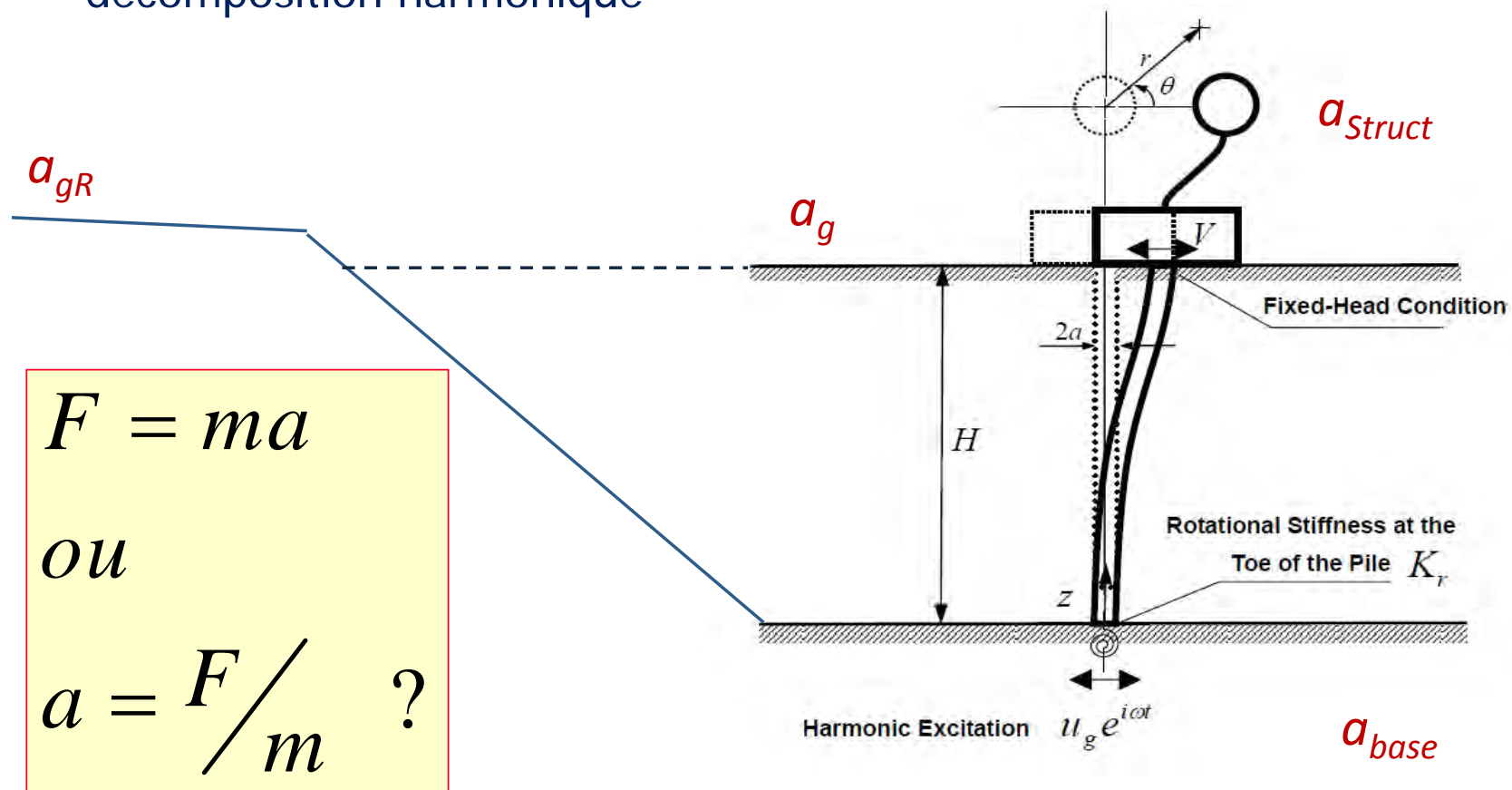
Alain Holeyman ()*

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



$$F = ma$$

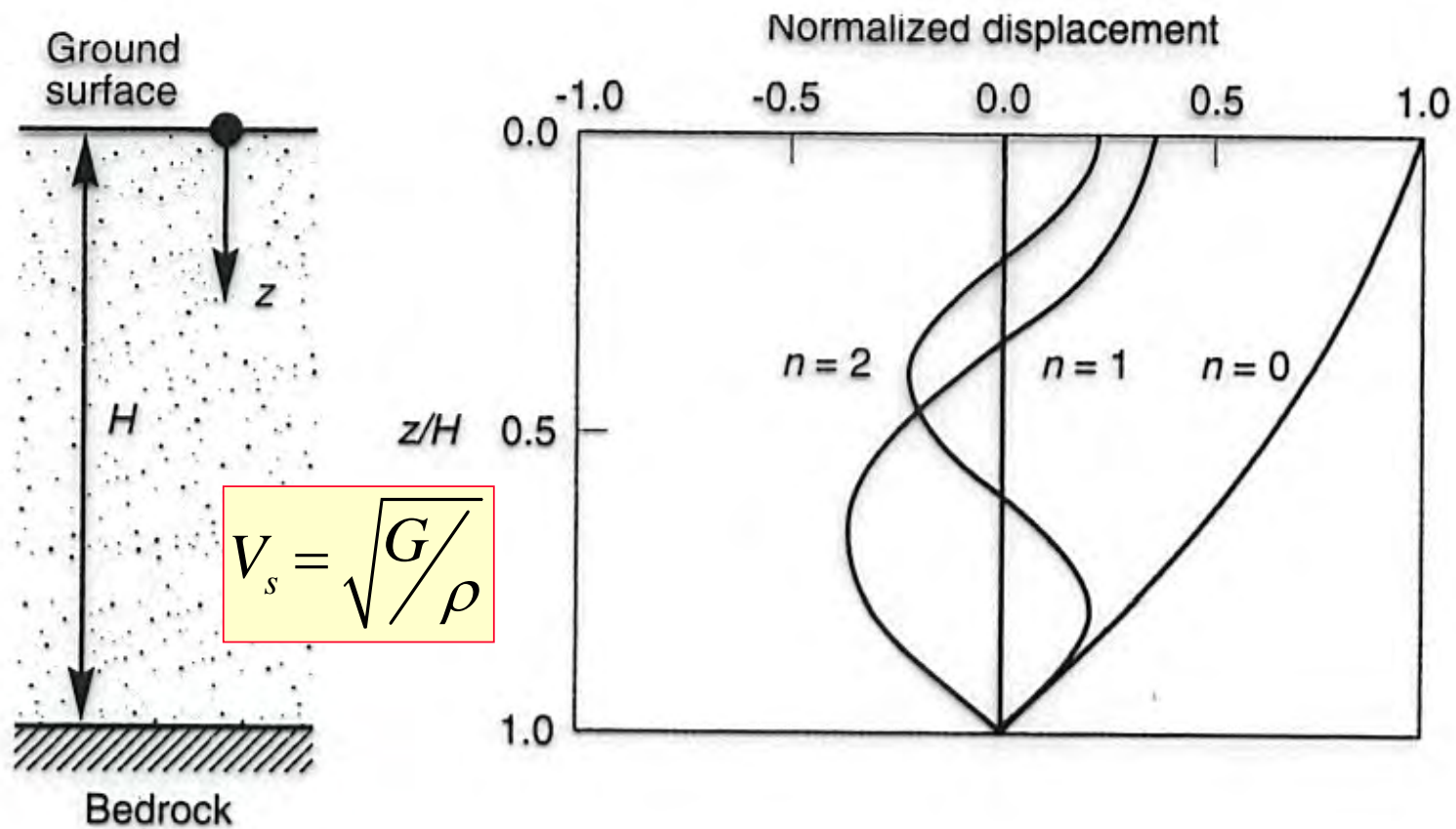
ou

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

Contenu

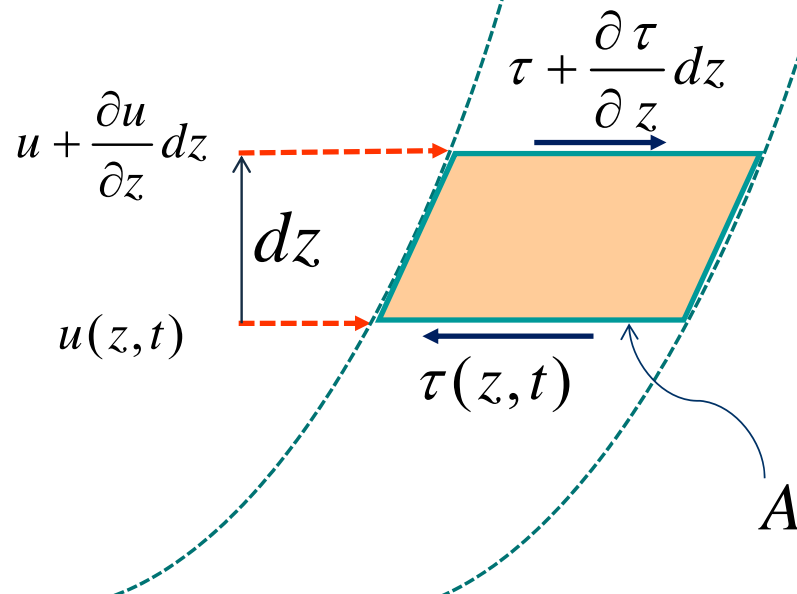
1. Actions sismiques sur les pieux et leurs interactions avec la structure et le sol
2. Comportement du sol sous sollicitations cycliques et amortissement
3. Modèles de calcul – Impédance latérale et axiale des pieux
4. Liquéfaction des sols
5. Conclusions

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



Equation d'onde

$$F = ma$$

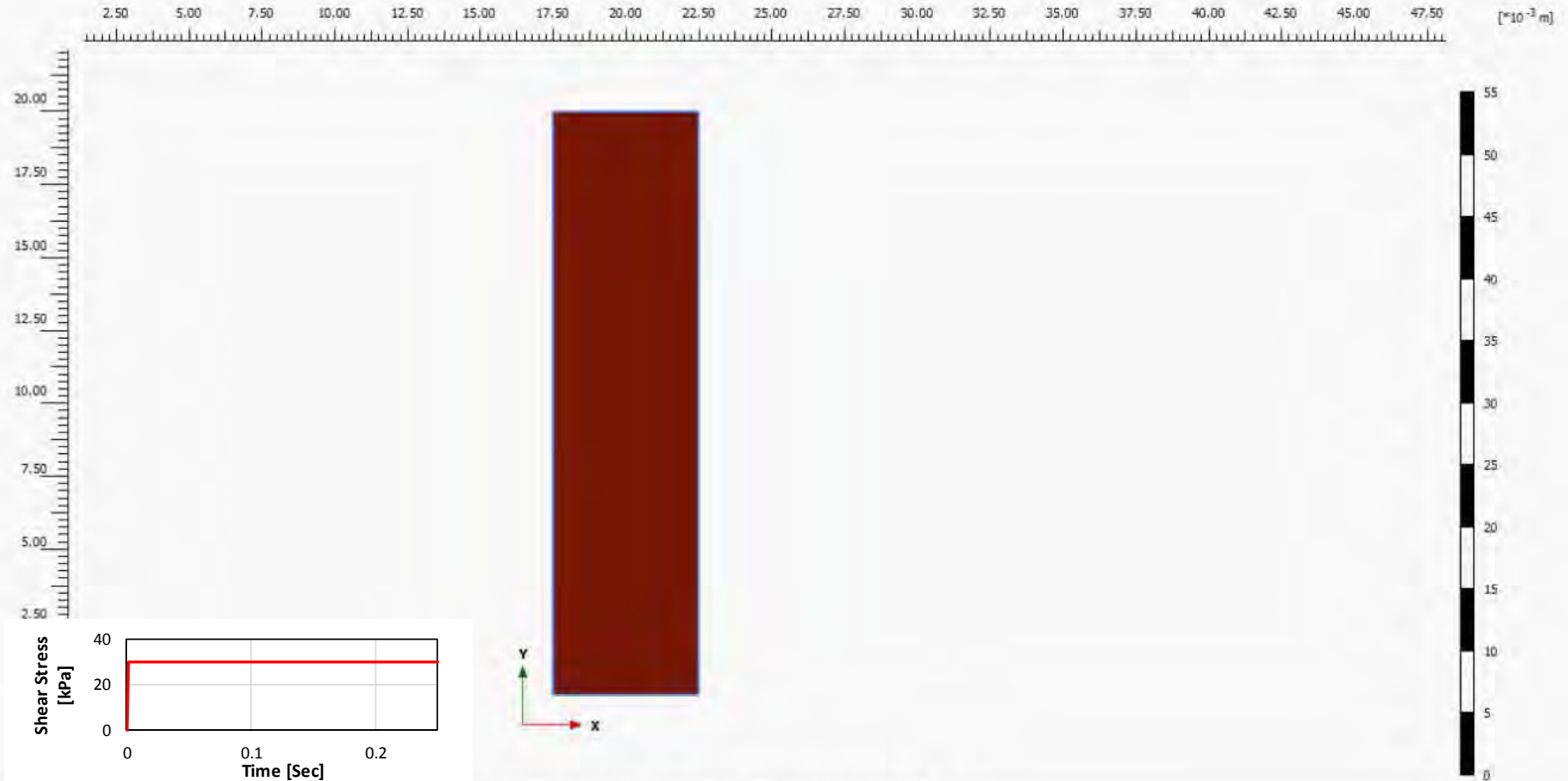


$$dF = dm \cdot a$$

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

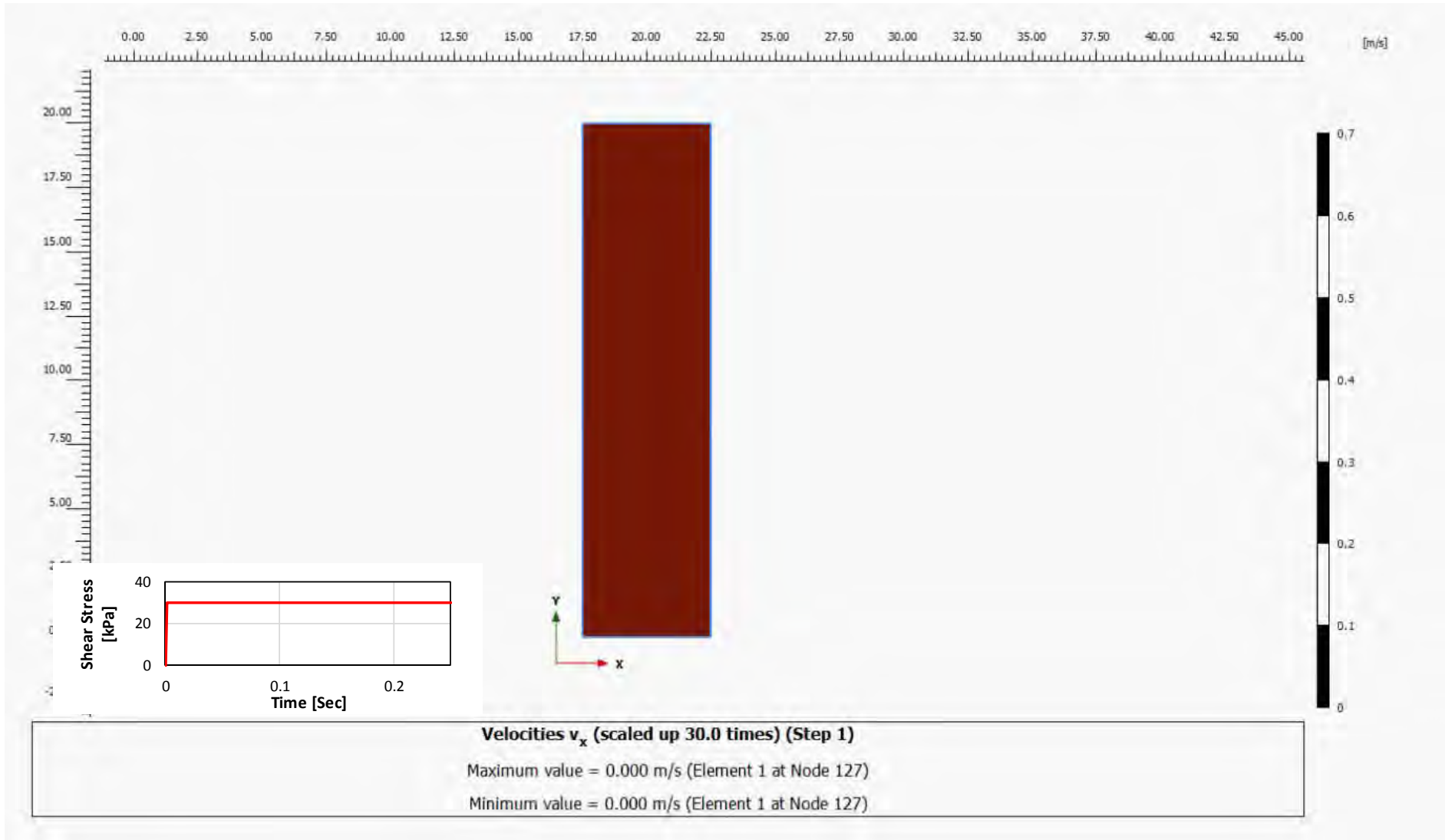
$$G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \tau_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

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



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

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

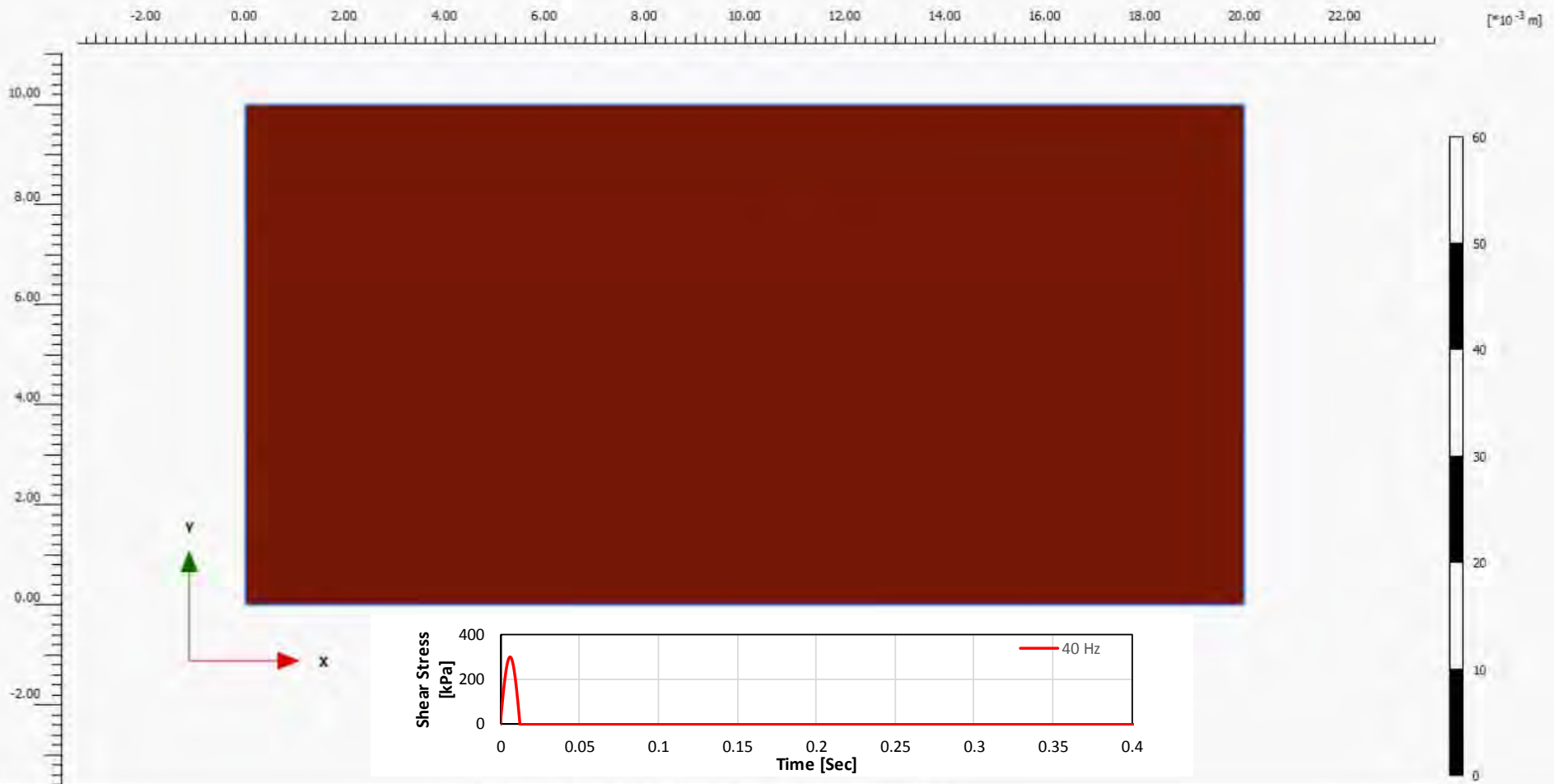


Interactions cinématiques sol-pieux

- **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**

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

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

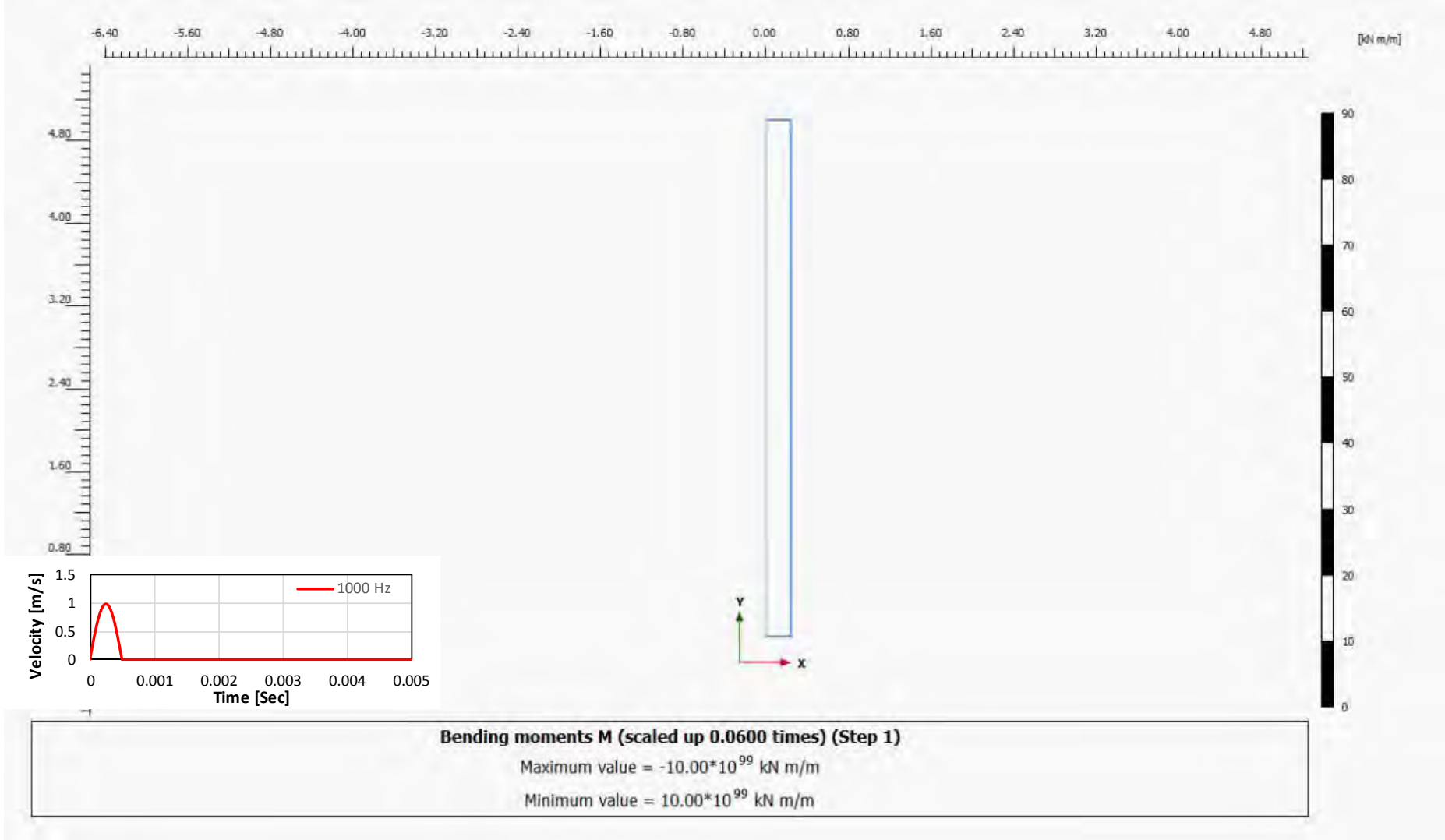
$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p = E_p \frac{a \cdot r}{V_s^2}$$

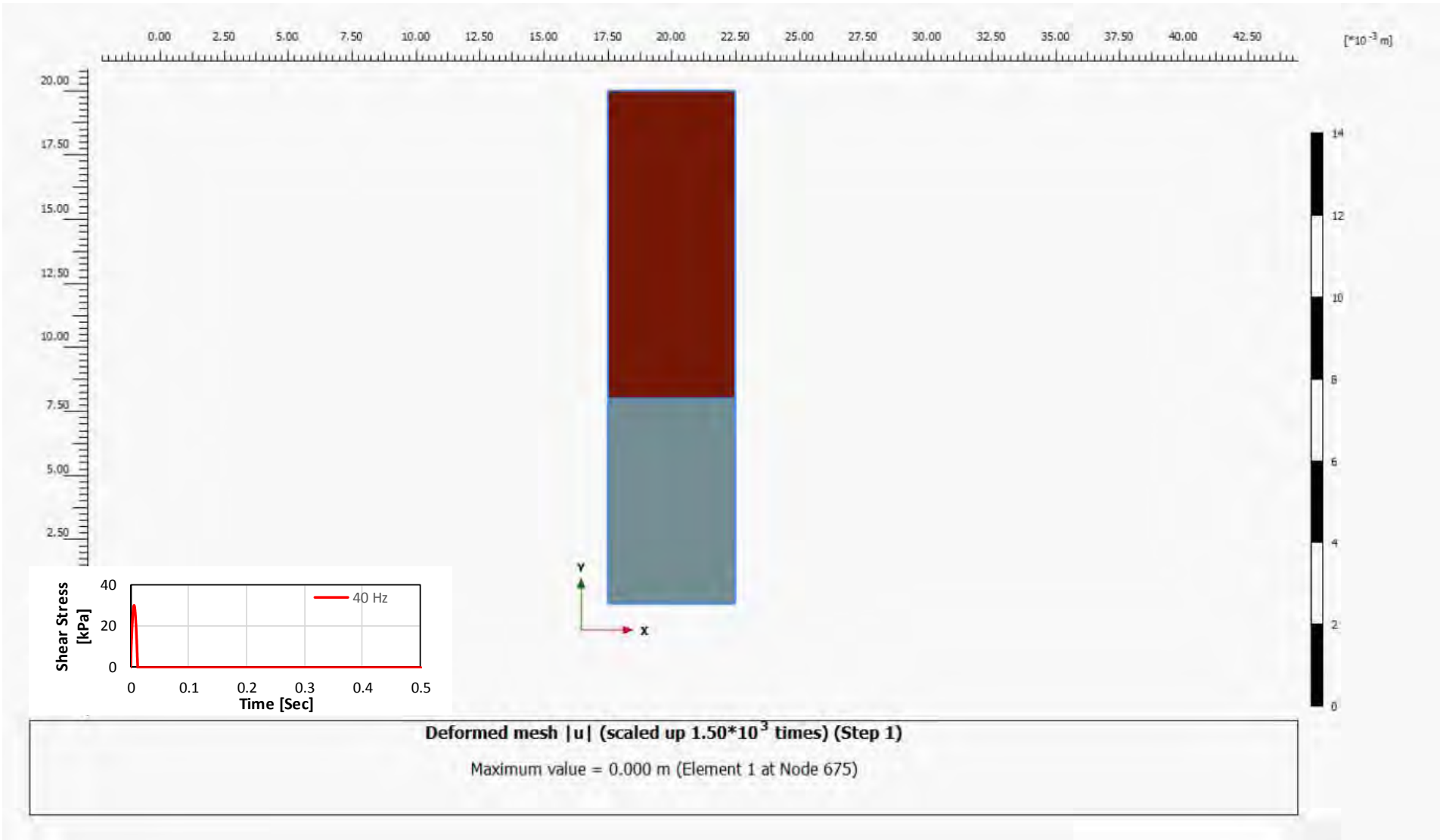
Pour $\varnothing 0,9 \text{ m}$
 $V_s = 115 \text{ m/s}$
 $a = 1,8 \text{ m/s}^2$

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

si $E_p = 30 \text{ GPa}$

pour sol homogène !



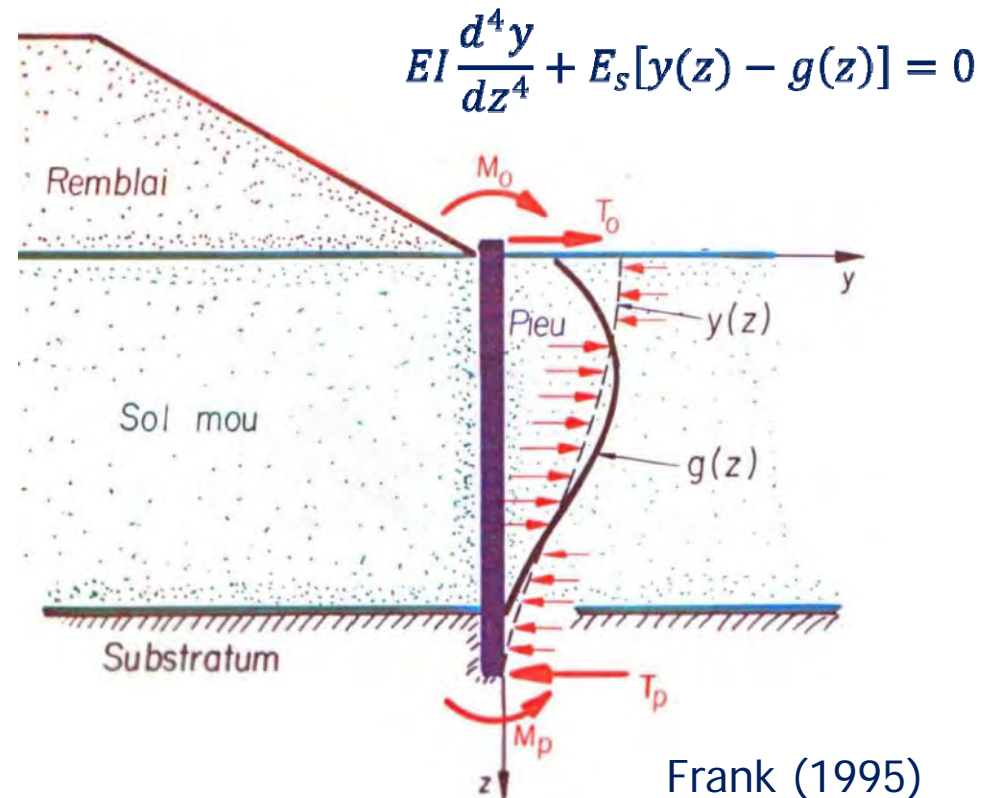


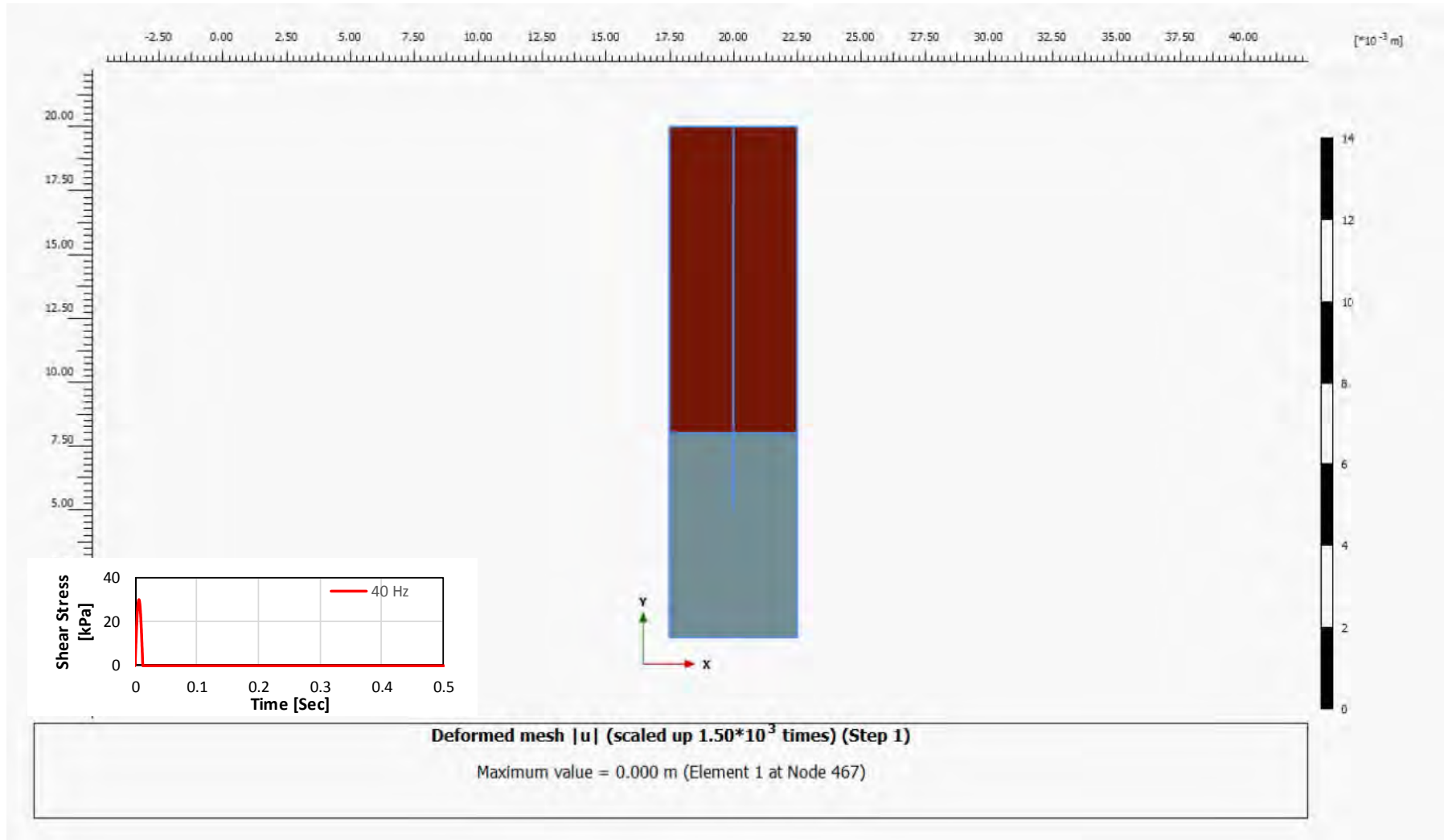
Pieux statiquement passifs – Méthode “g(z)”

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





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

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

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

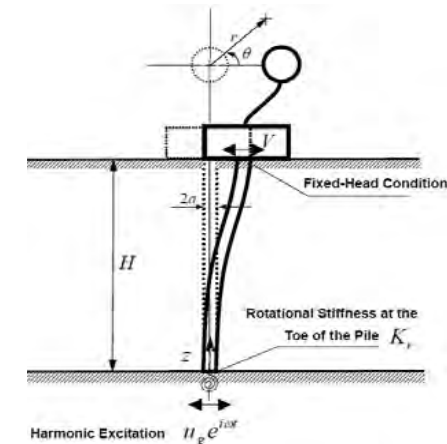
$$\gamma_1 = \frac{r_d \rho_1 H_1 a_{\max,s}}{G_1}$$

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

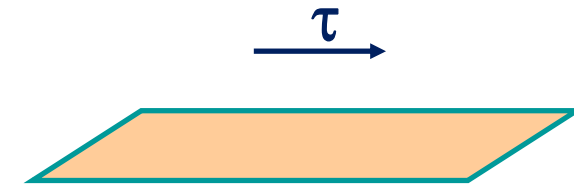
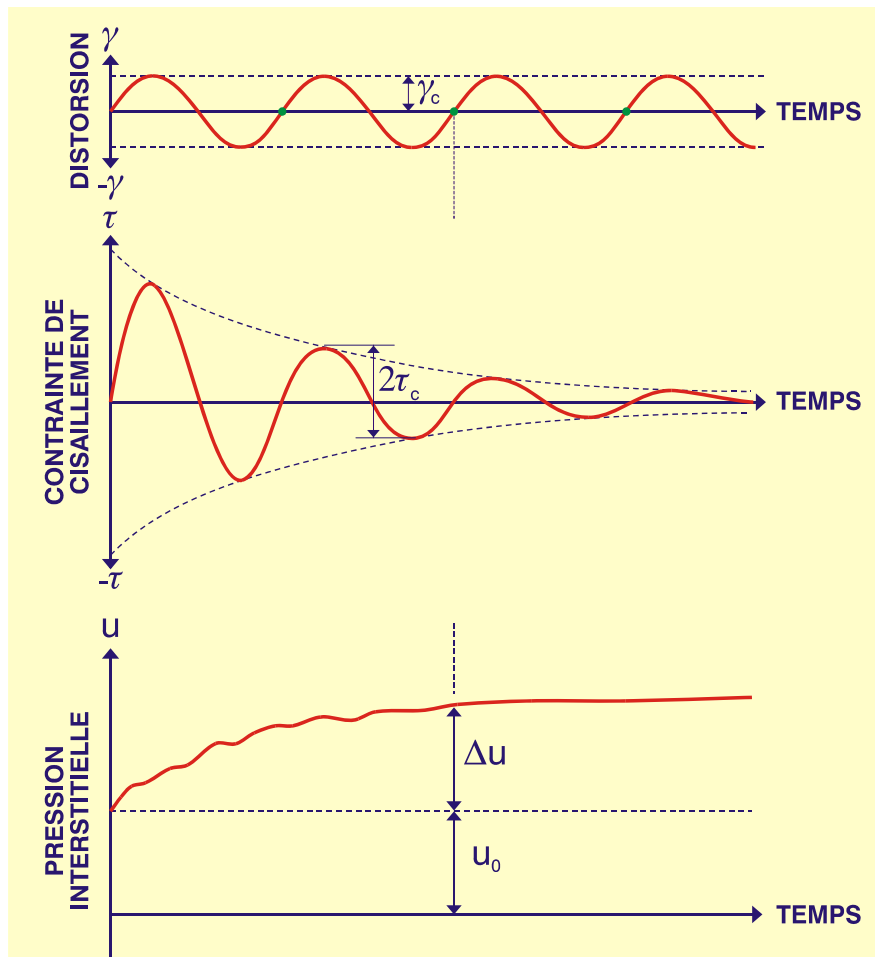
Dobry and O'Rourke (1983)

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

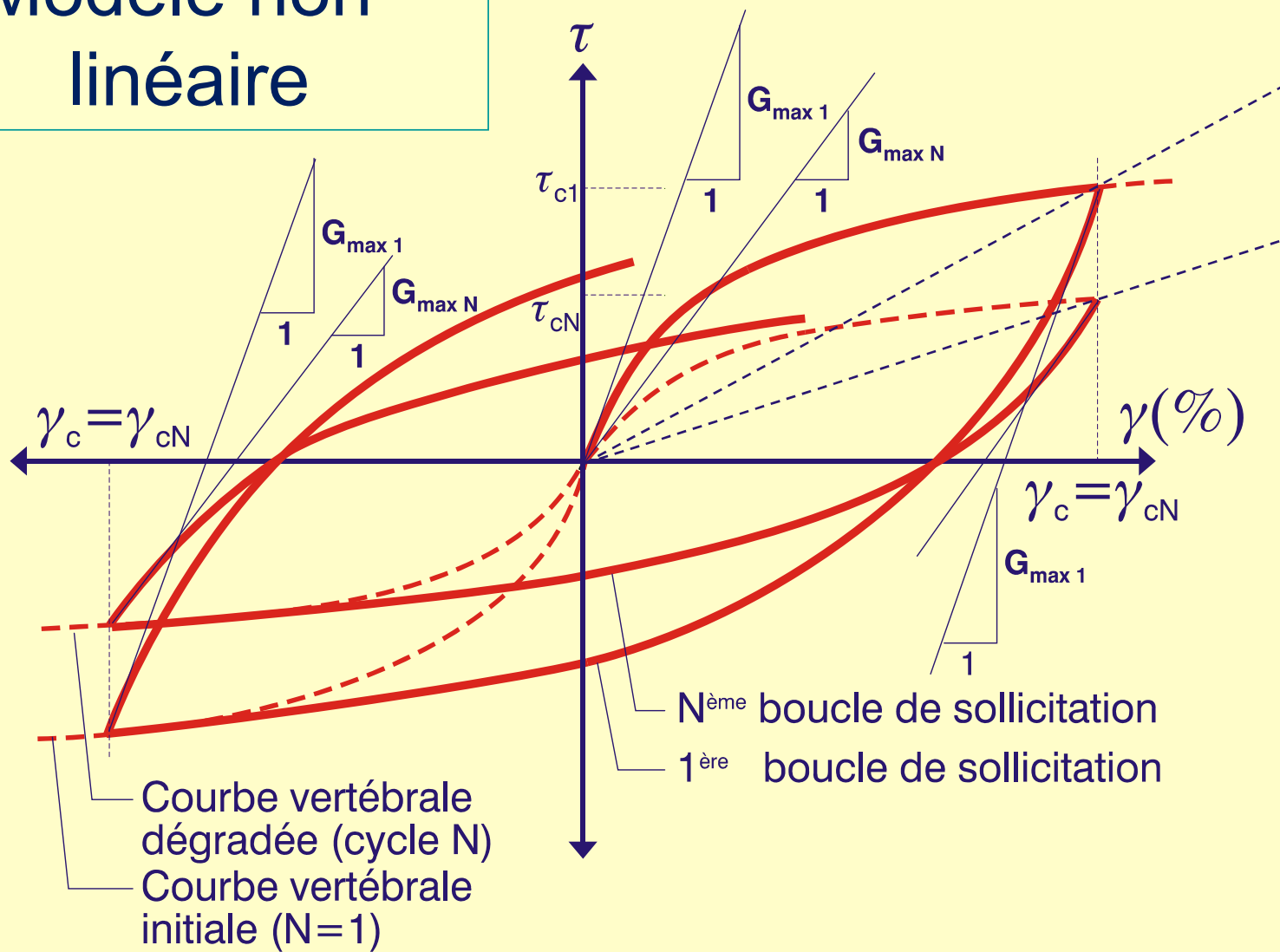


2. Comportement du sol sous sollicitations cycliques

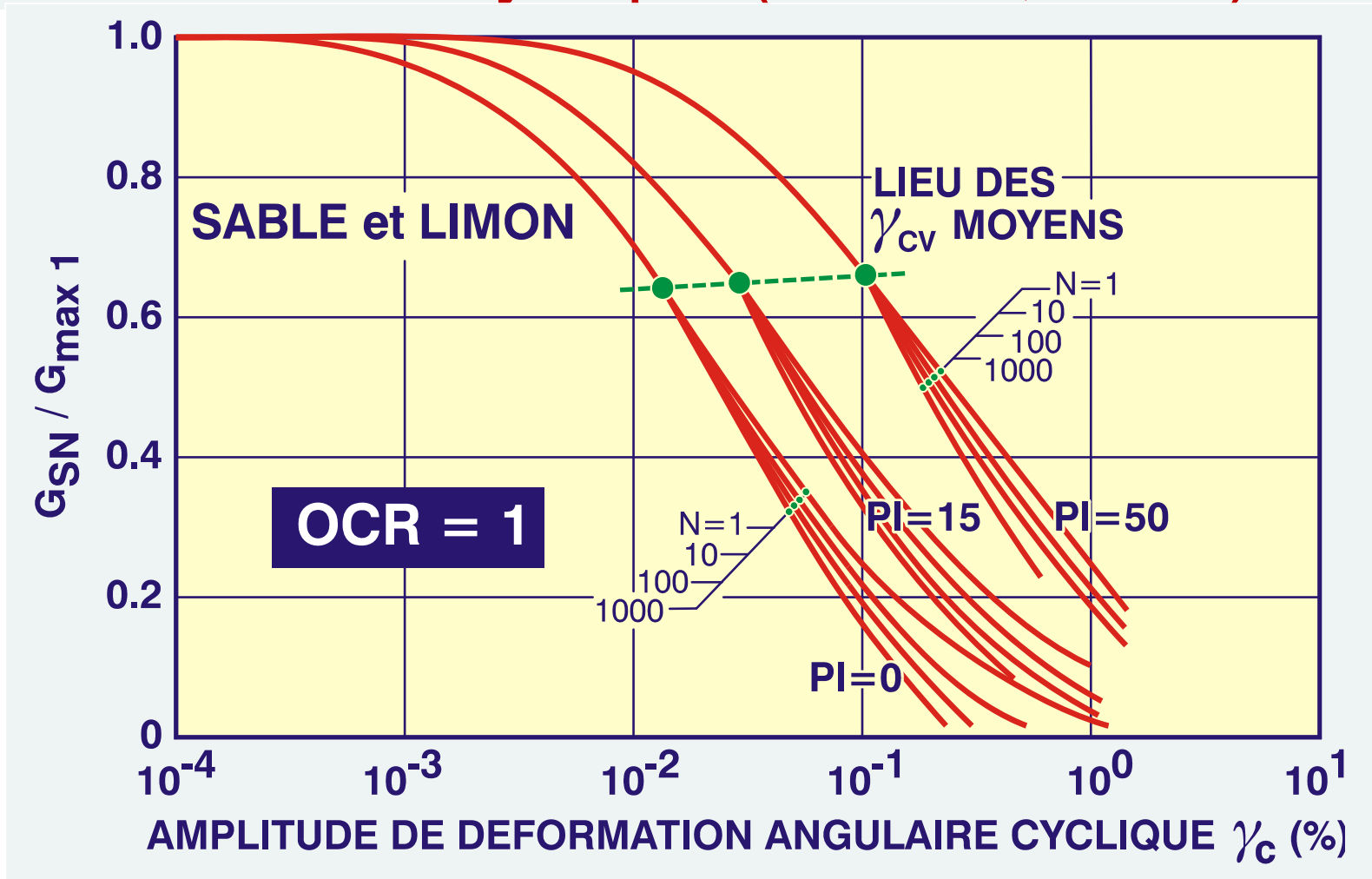


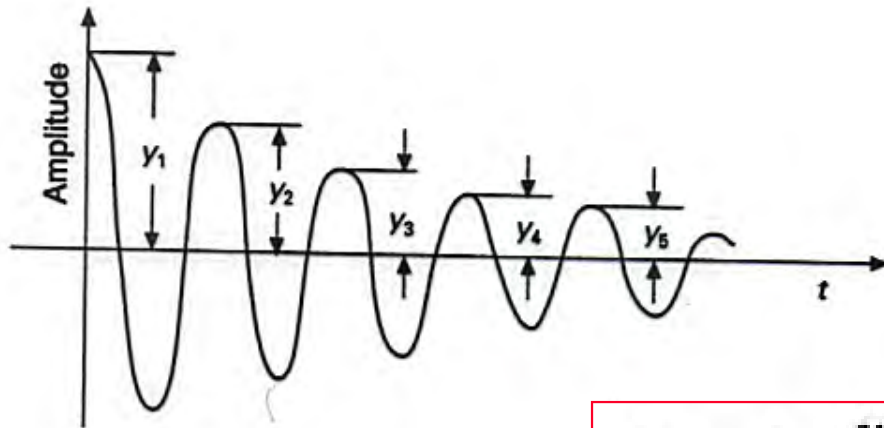
Contrainte de cisaillement mobilisée par une distorsion cyclique imposée

Modèle non-linéaire



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

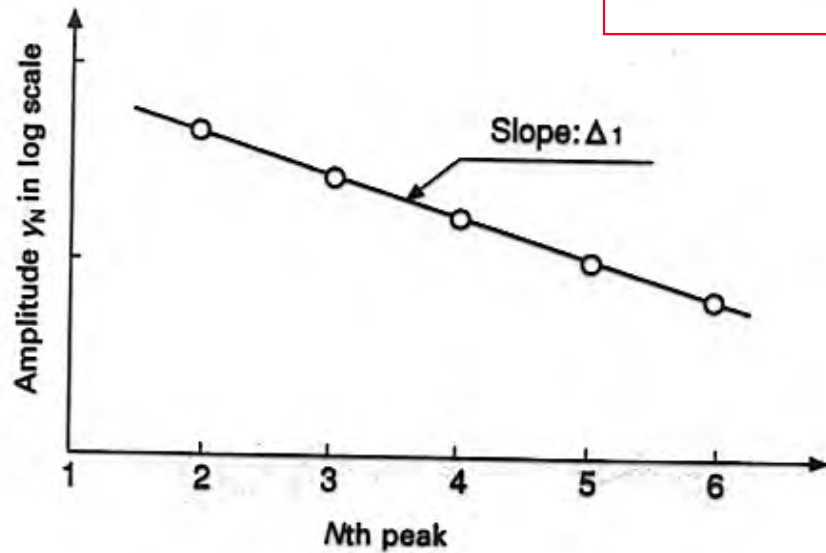




(a) Decay of free vibration

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

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

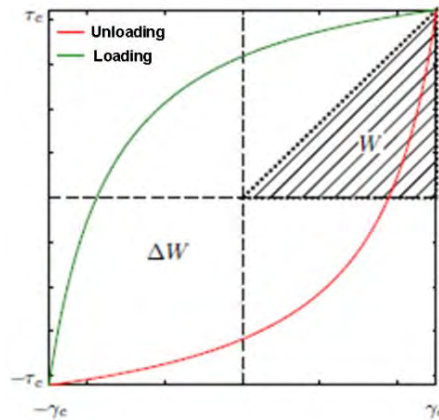


(b) Amplitude versus cycles

Détermination de l'amortissement en vibration libre

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

Amortissement hystérétique



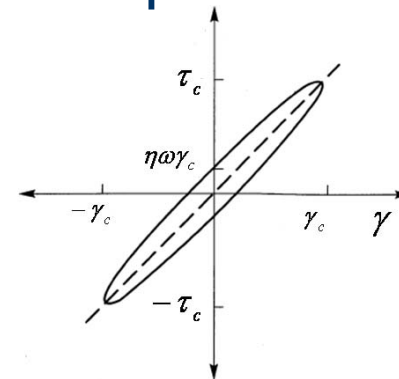
$$W = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} G \gamma_c^2$$

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

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

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

Amortissement visqueux équivalent



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

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

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

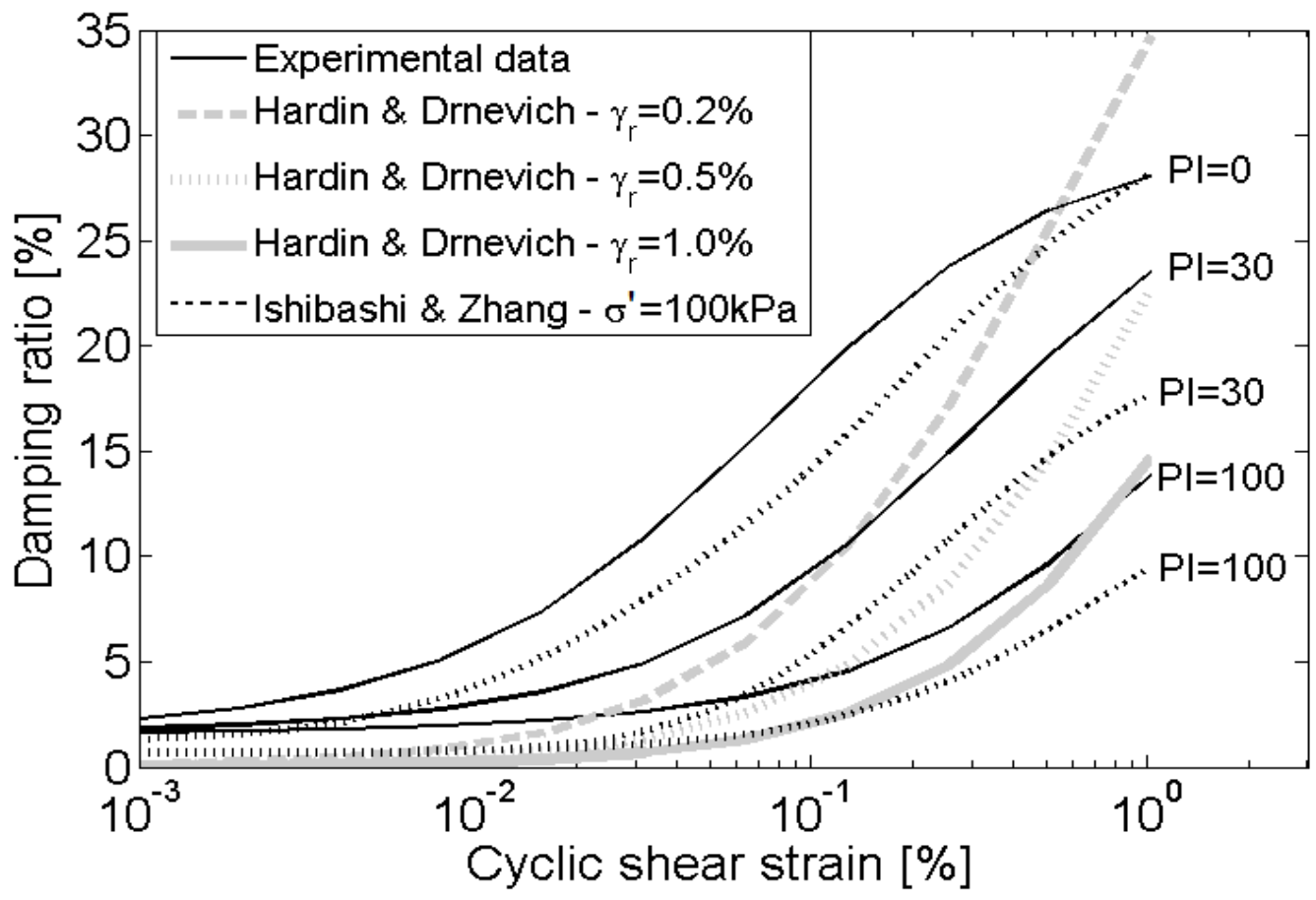
$$\gamma = \gamma_c e^{i\omega t}$$

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

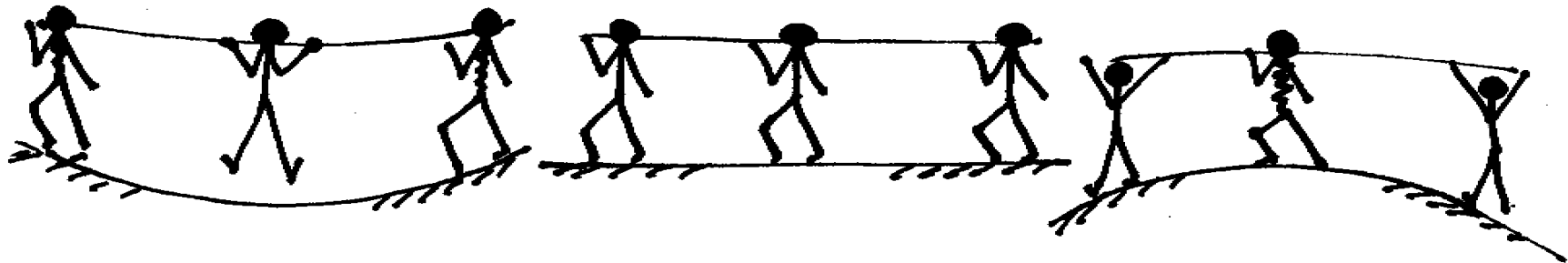
$$\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \pi \omega \eta \gamma_c^2$$

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

Lois d'amortissement hystérétique



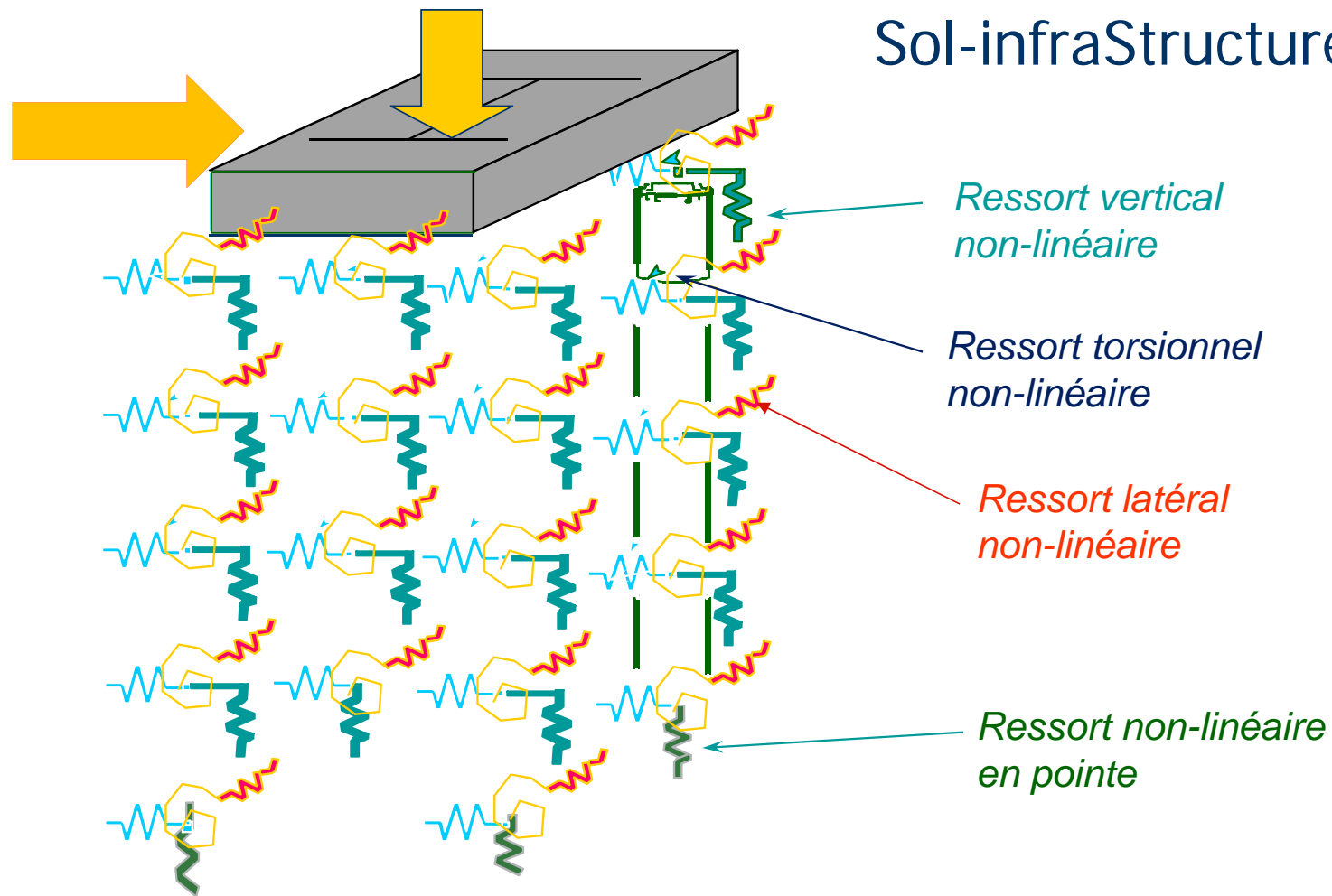
Interaction sol - structure



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

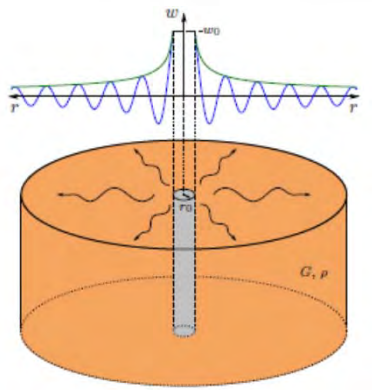
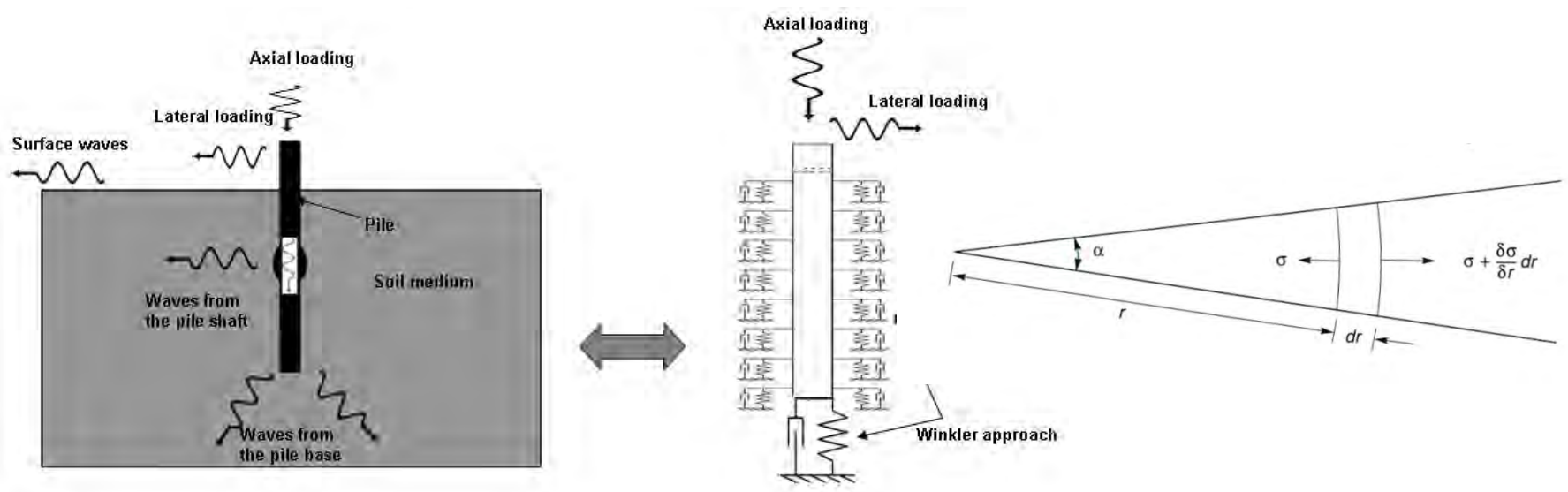


Modes d'interaction **dynamique**

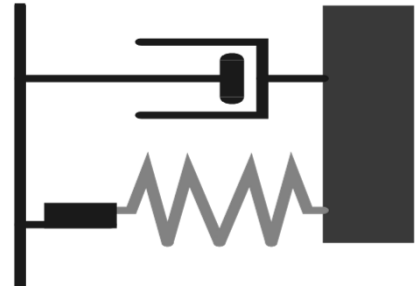
- Axial (vertical): modèles "t-z" & "q-z"
- Transversal (Latéral): modèles **P-y**
- Torsionnel: modèles "T- θ "

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

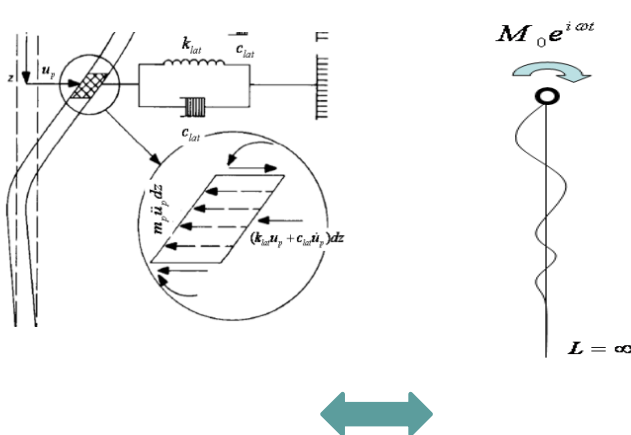


(Bertin, 2009)



Impédance latérale d'un pieu

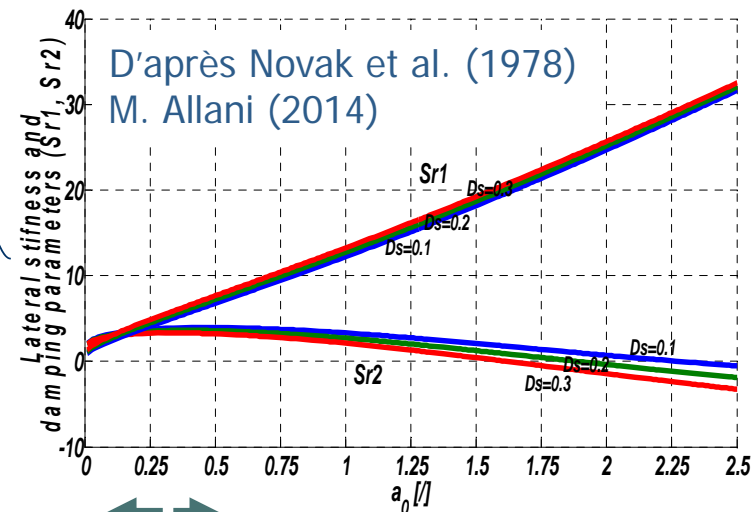
Réaction visco-élastique du sol (Winkler k et c)



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

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

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

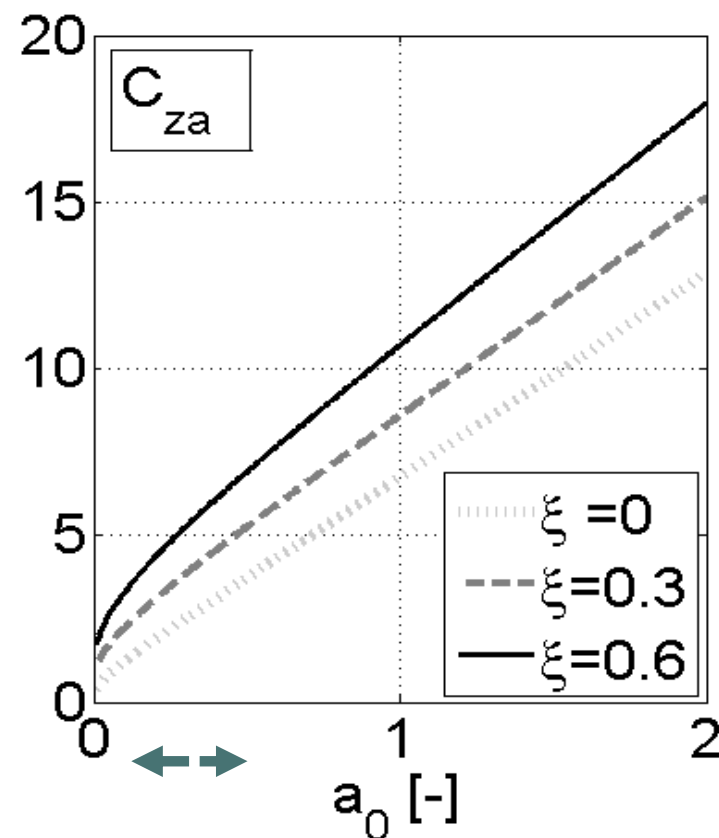
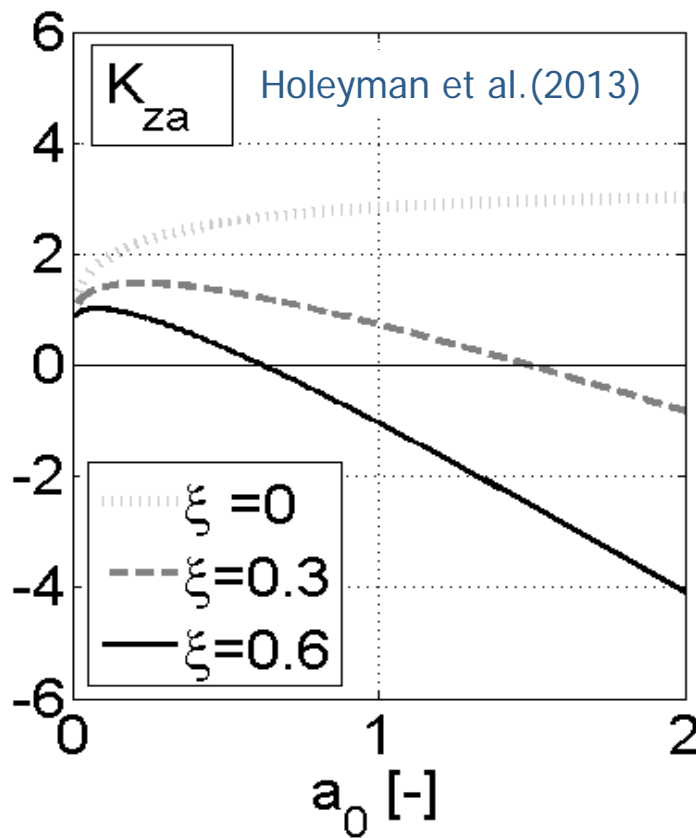


$$a_0 = \frac{\omega r}{V_s} \quad : \text{fréquence adimensionnelle}$$

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

Impedance of pile shafts under axial vibratory loads

Alain Holeyman^{a,*}, Renaud Bertin^{a,1}, Valérie Whenham^b^a *Université Catholique de Louvain (UCL), Louvain-La-Neuve, Belgium*^b *Belgian Building Research Institute (BBRI), Bruxelles, Belgium*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 December 2011

Received in revised form

7 September 2012

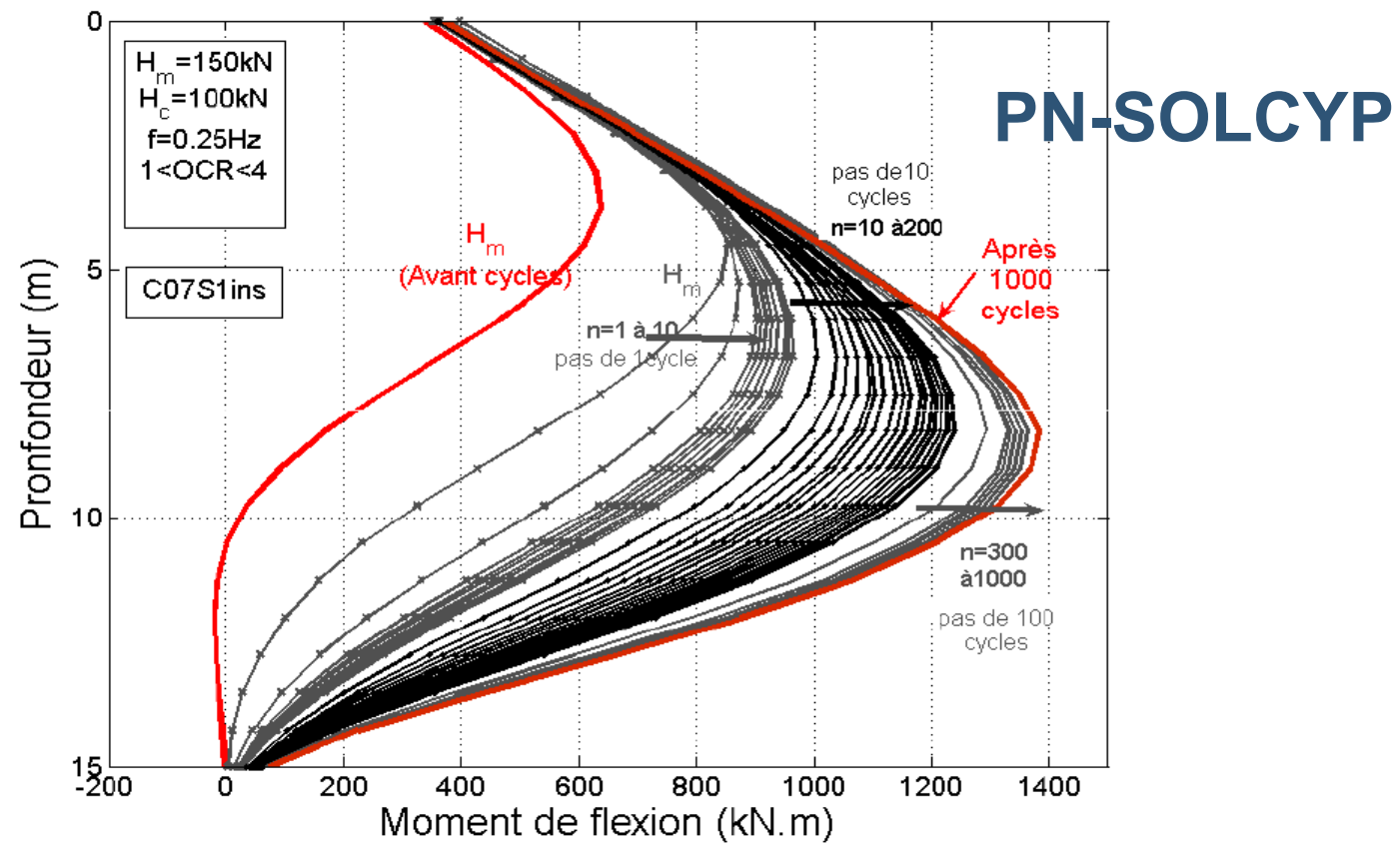
Accepted 9 September 2012

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.

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

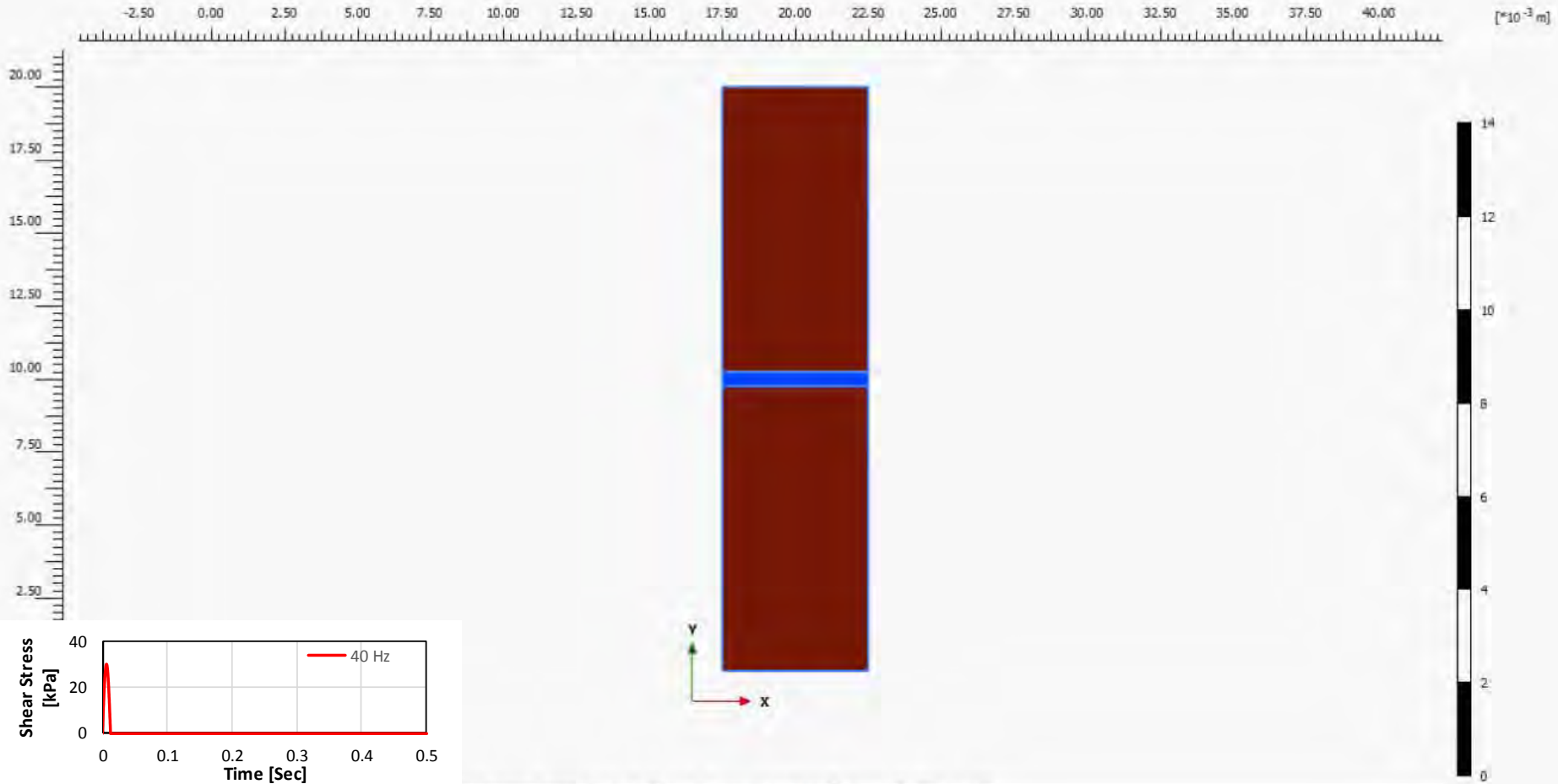


4. LIQUEFACTION DU SOL

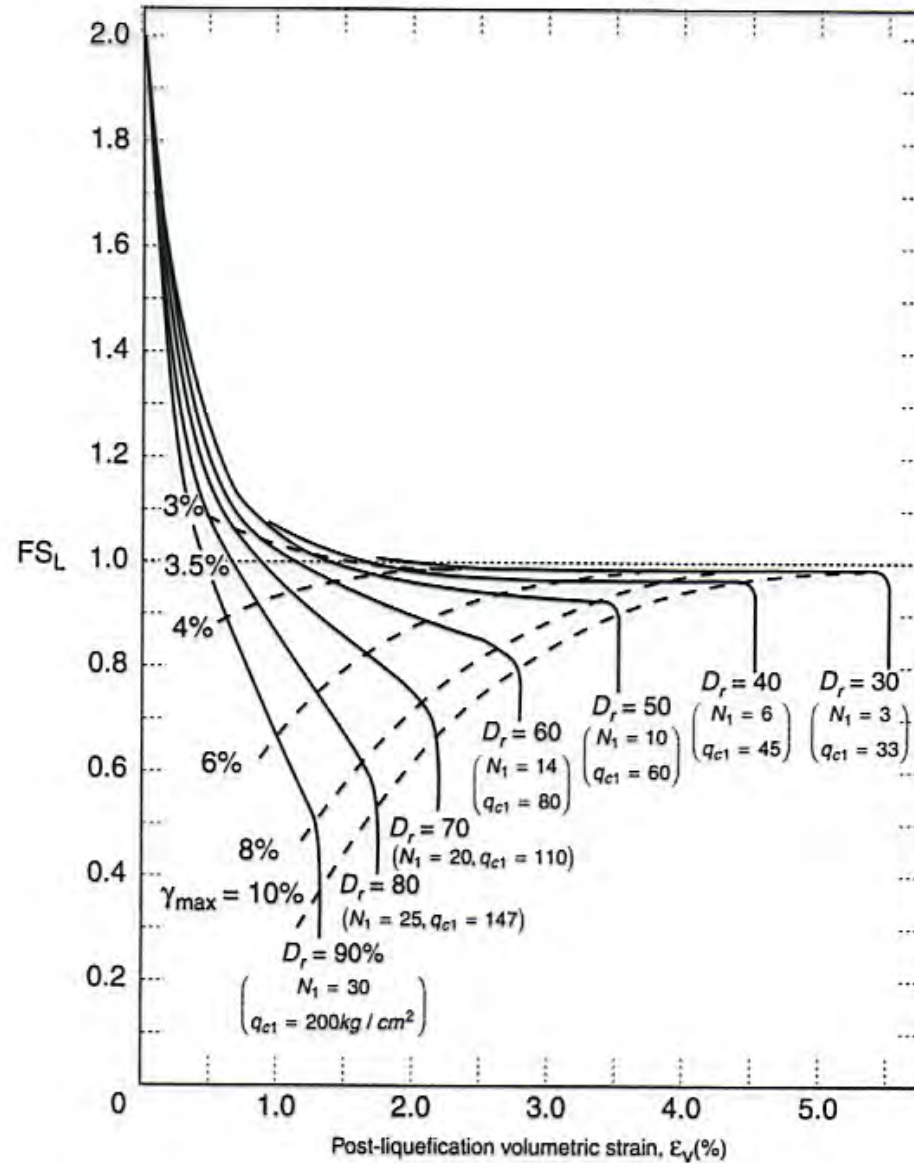


Mécanisme de
liquéfaction
sous
cisaillement
cyclique





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



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