

Recherches croisées entre interfaces sol-structure et pieux modèles en chambre d'étalonnage

*Journée CFMS « Sols et fondations sous sollicitations statiques,
cycliques et dynamiques »*

En Hommage à notre ami et collègue, le Professeur Pierre FORAY

Paris, 27 janvier 2015

Marc Boulon *Laboratoire 3SR, Université Grenoble-Alpes*



Des essais sur modèles réduits, oui, mais pour quoi faire?

*Qualitatifs ou quantitatifs ? On les souhaite de plus
en plus quantitatifs comme outil de conception...*

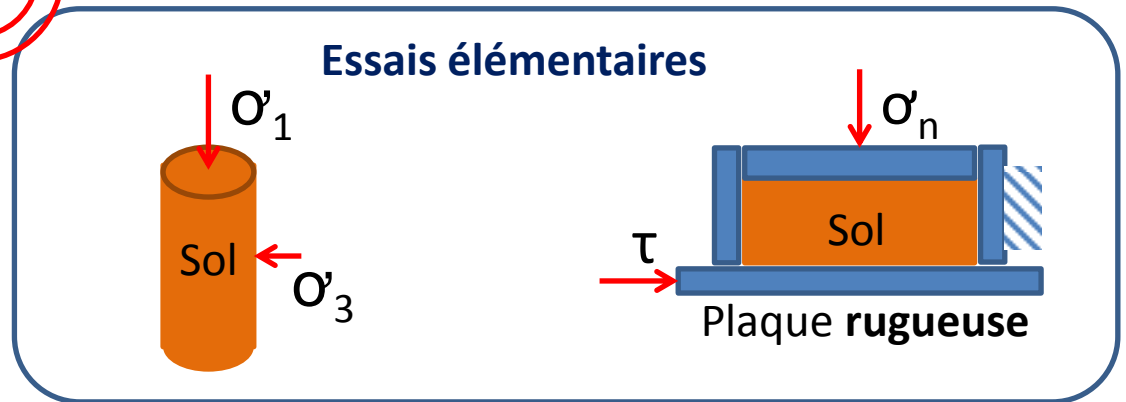
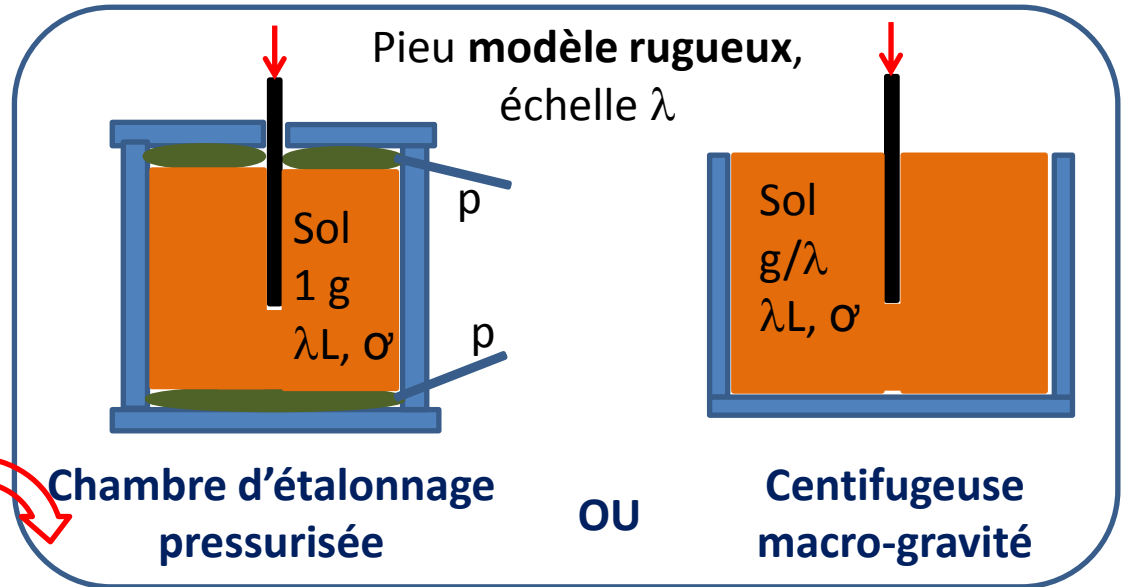
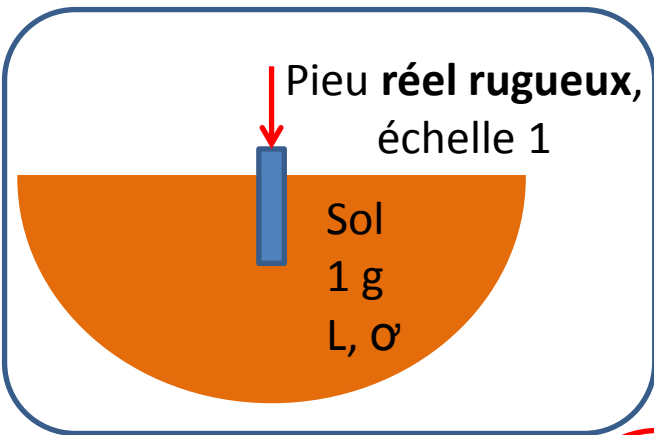
*Analyser de plus en plus finement les essais sur
modèles pour dégager les biais à la similitude*

*Eclairer les essais sur modèles par les essais
élémentaires pertinents*

Points abordés

1. Essais sur modèles, essais élémentaires, similitude
2. Frottement latéral des pieux & cisaillement direct sol-structure
3. L'essai de cisaillement direct sol-structure
4. Application au frottement latéral des pieux
5. Questions relatives aux essais sur pieux modèles
6. Conclusions

1. Essais sur modèles, essais élémentaires, similitude



En première analyse, pour prototype (réel) et modèle

- sol pulvérulent sec conservé
- contraintes **globalement** conservées
- Caractéristiques géométriques, et massiques à l' **échelle λ**
- Propriétés de frottement sol-pieu (rugosité) à l' **échelle 1**

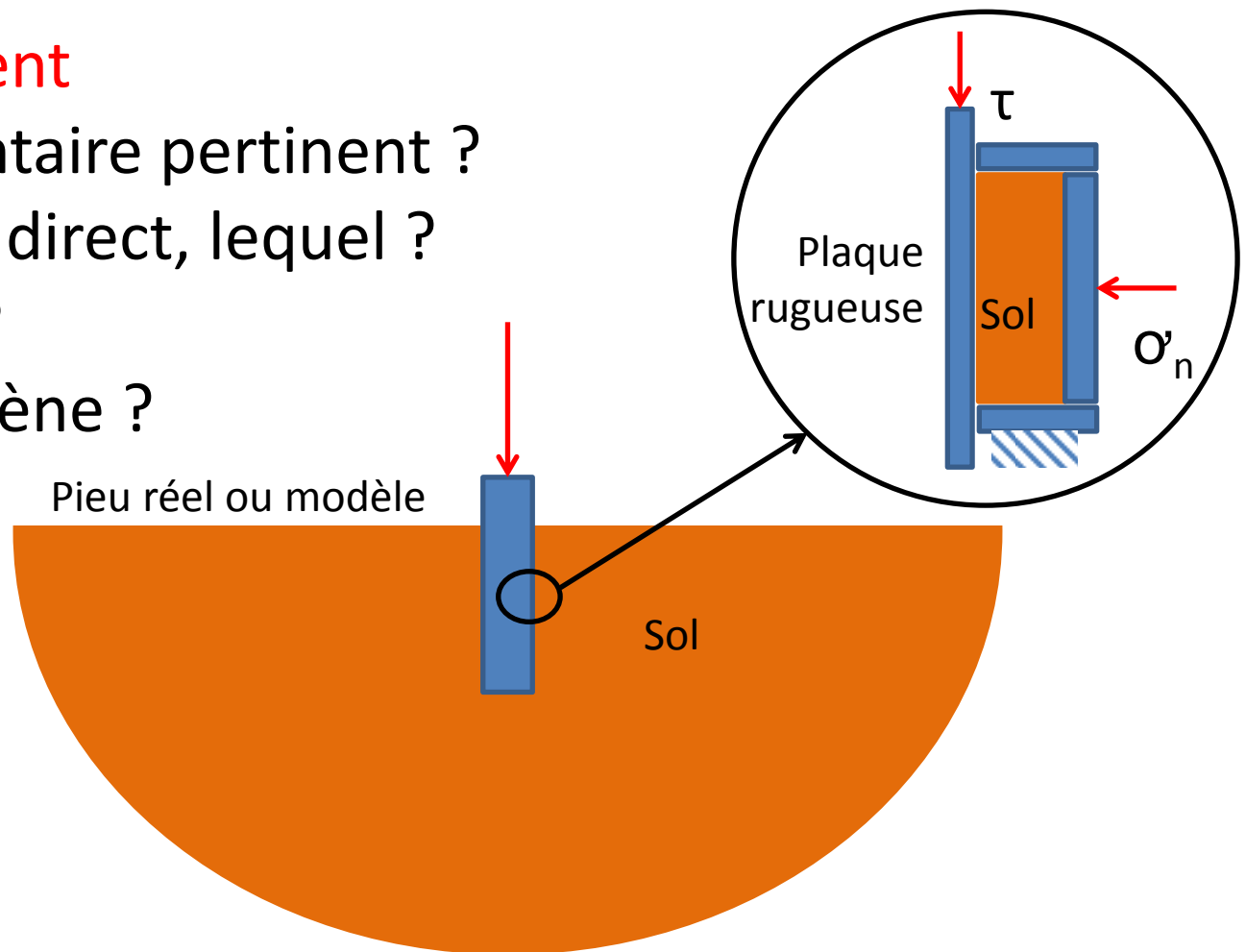
Sources possibles de biais, d'entorse à la similitude ?

- Dimensions du conteneur ?
- Propriétés mécaniques locales ?
- Etat initial (installation du pieu) ?
- ... ?

**Identifier les biais ? Les réduire ?
Evaluer leur incidence ?**

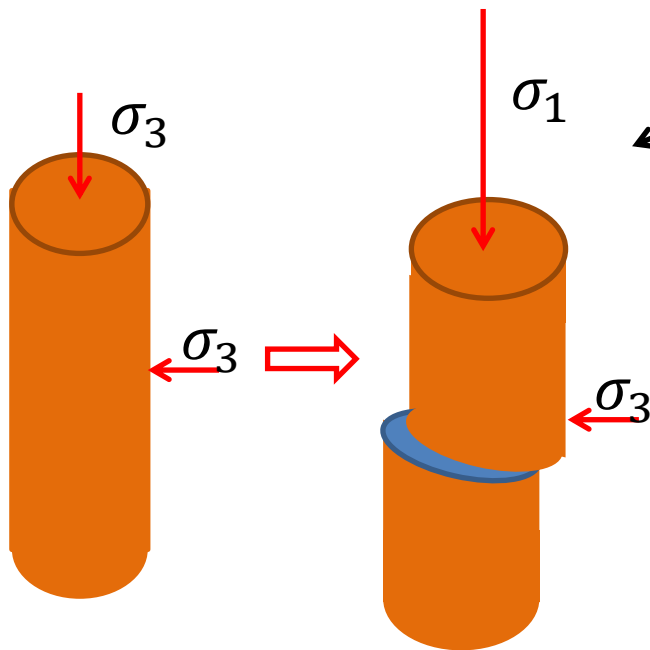
2. Frottement latéral des pieux & cisaillement direct sol-structure

- Sol pulvérulent
- Essai élémentaire pertinent ?
- Cisaillement direct, lequel ?
- Essai fiable ?
- Essai homogène ?

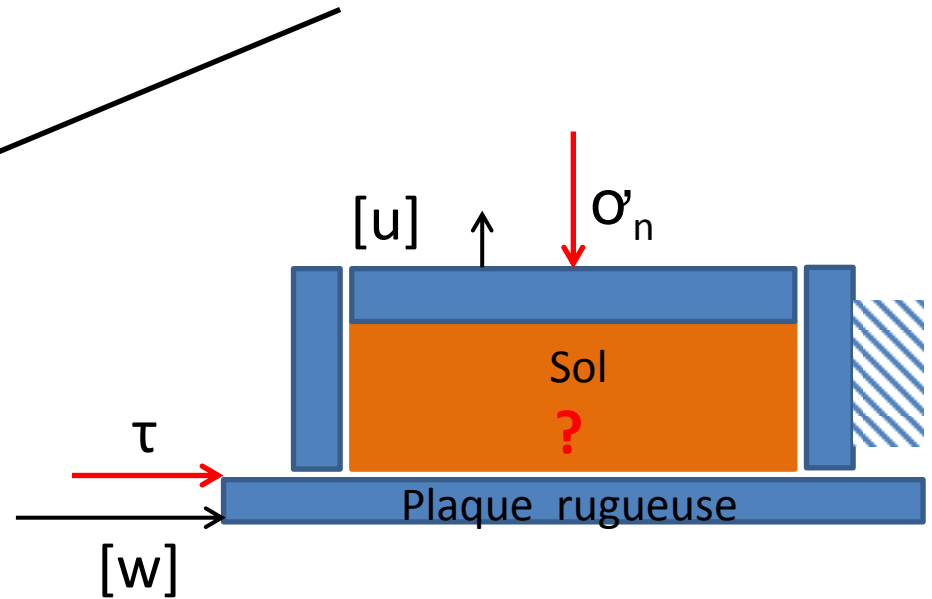


3. L'essai de cisaillement direct sol-structure

L'essai de cisaillement direct a généralement très mauvaise presse, bien moins fiable que l'essai triaxial, et pourtant très souvent...

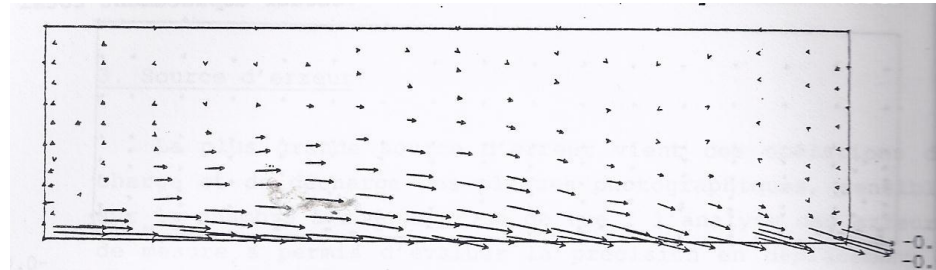
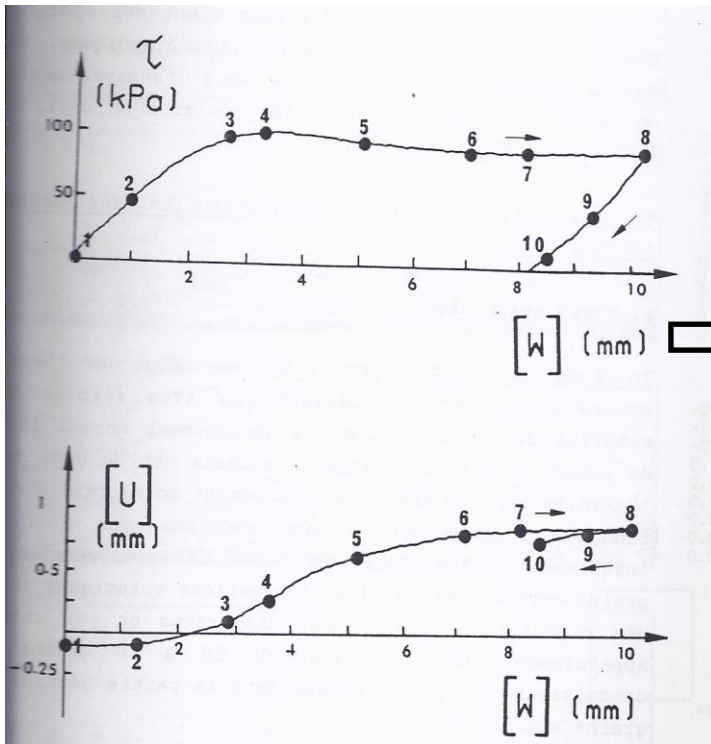


Biais = rupture localisée, en principe non souhaitée

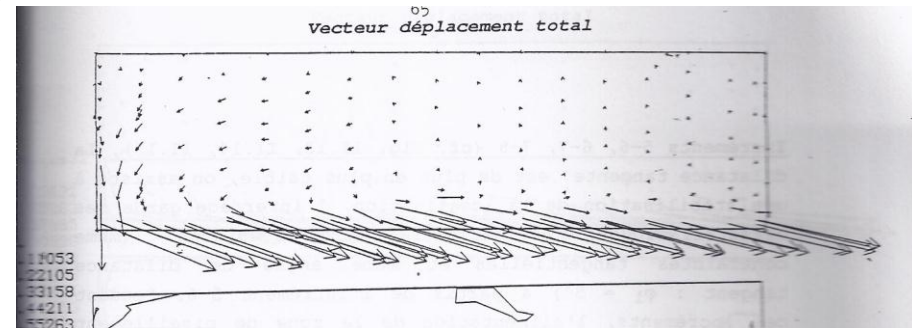


Mode de déformation du sol dans la boîte de cisaillement ?

Homogénéité du cisaillement direct sol-structure?



Vecteurs déplacements incrémentaux 2-3



Vecteurs déplacements incrémentaux 4-5

Essai de cisaillement direct CNC sable Hostun-plaque rugueuse, **visualisation latérale** par stéréophotogrammétrie

Epaisseur d'interface 4 à 12 d_{50} selon rugosité

N. Hoteit (1990), Contribution à l'étude du comportement d'interface sable-inclusion et application au frottement apparent, thèse de doctorat, INP Grenoble

L'essai de cisaillement direct n'est pas homogène en volume, mais l'est \approx en surface. Acceptons le comme essai élémentaire d'interface (de surface) sol structure ...

Quel cisaillement direct sol-structure?



Variables 2-D mesurées

Vecteur déplacement relatif:

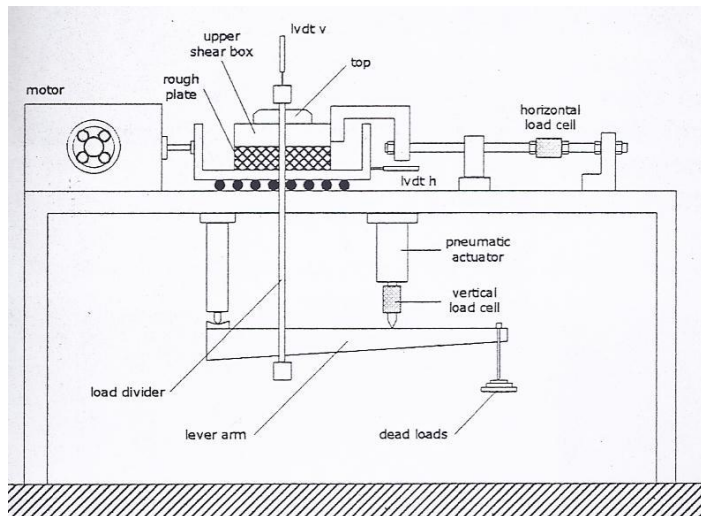
$[w]$ tangentiel

$[u]$ normal

Vecteur contrainte:

τ de cisaillement

σ'_n normale



Chemins de cisaillement

- contrainte normale constante (CNC,

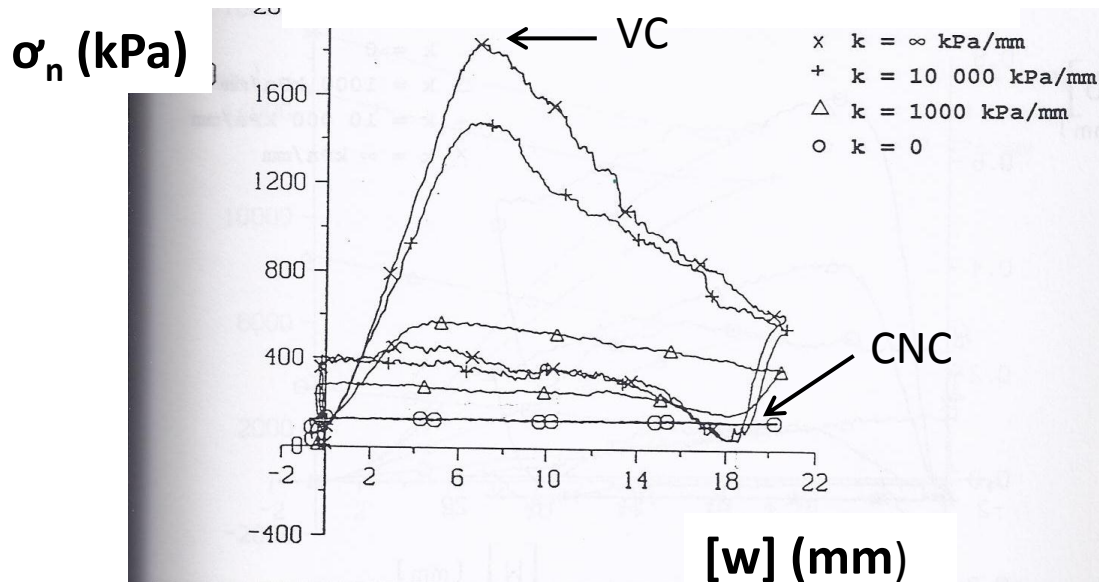
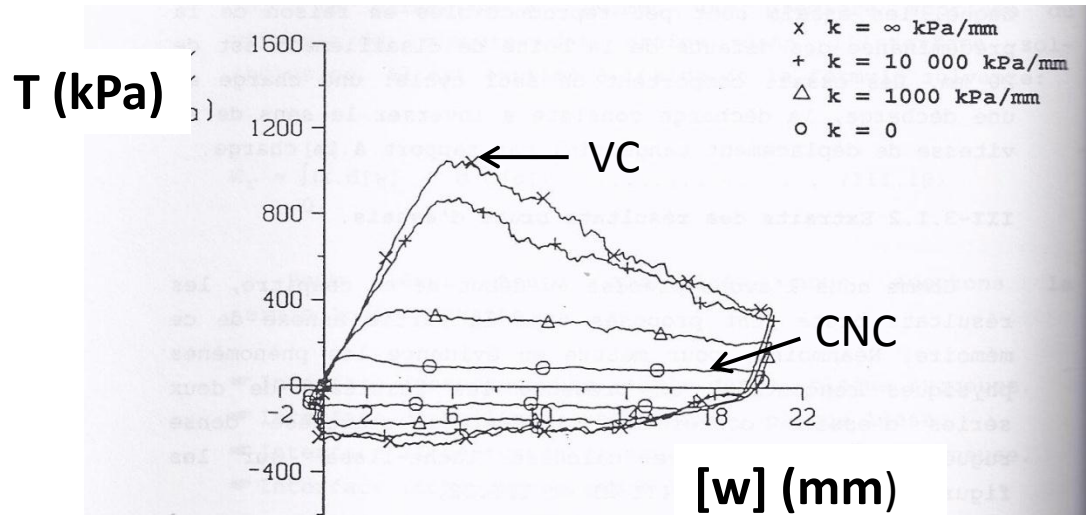
$\sigma'_n = Cte$)

- Volume constant (VC, $[u] = Cte$)

- Intermédiaire, à rigidité normale k ,

imposée (CNS, $k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta[u]}$)

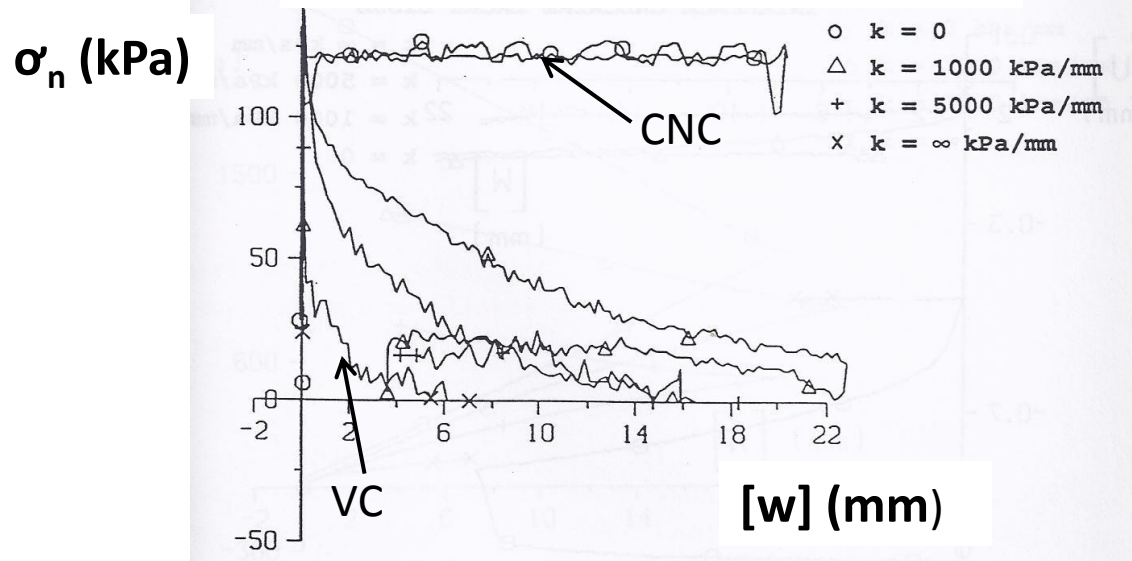
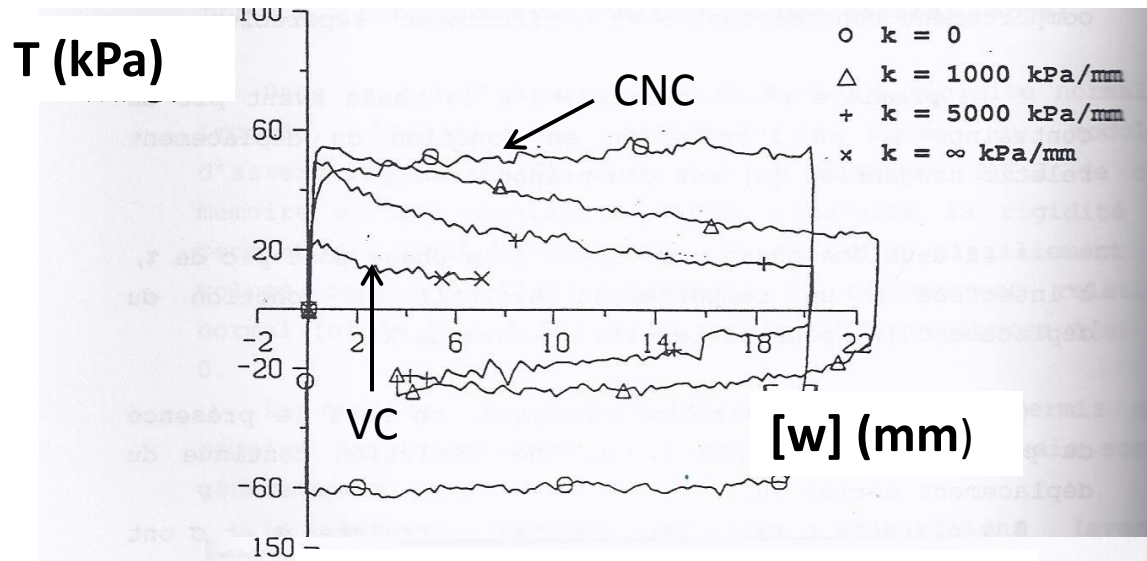
Cisaillement(s) direct(s) CNS, sable siliceux dense



Plaque rugueuse
 $\sigma_{n0} = 124$ kPa
 Hostun $d_{50} = 1$ mm
 $I_D = 90$ %

De $k = 0$ (CNC)
 à $k \rightarrow \infty$ (VC)

Cisaillement(s) direct(s) CNS, sable carbonaté



Plaque lisse
 $\sigma_{n0} = 124 \text{ kPa}$
 Hostun $d_{50} = 1 \text{ mm}$

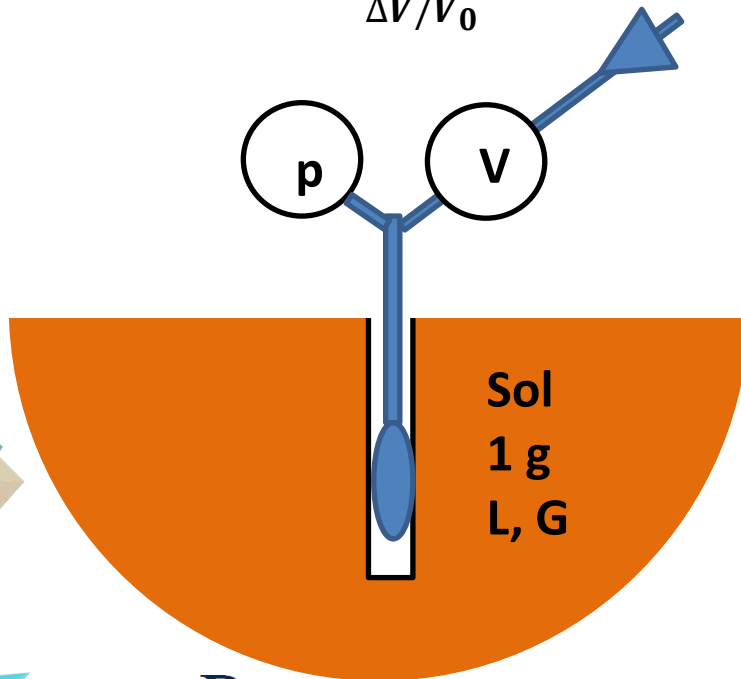
$$I_D = 90 \%$$

De $k = 0$ (CNC)
 à $k \rightarrow \infty$ (VC)

4. Application au frottement latéral des pieux

- Système {pieu + interface sol-pieu} contraint par le reste du sol.
- Analogie entre le système {pieu + interface sol-pieu}, et le **pressiomètre**, concernant équilibre radial et déformation radiale

Pressiomètre: $\frac{\Delta p}{\Delta V/V_0} = G$

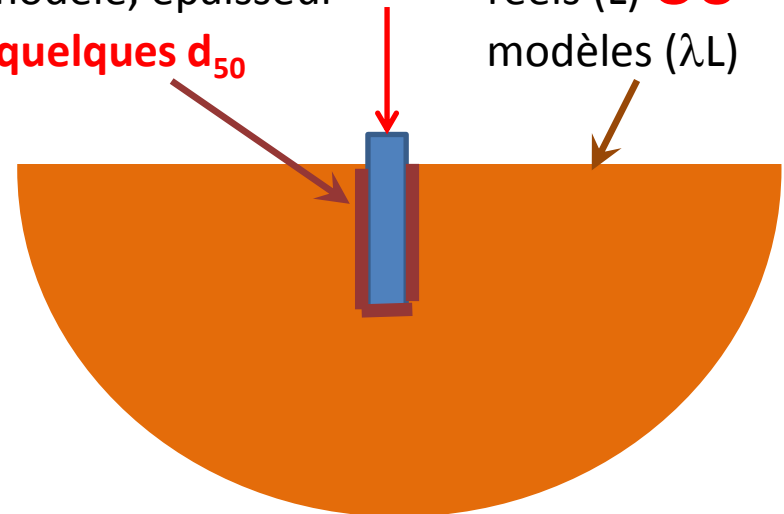


Système {Pieu + Interface sol-pieu}: ?

Interface sol-pieu réelle

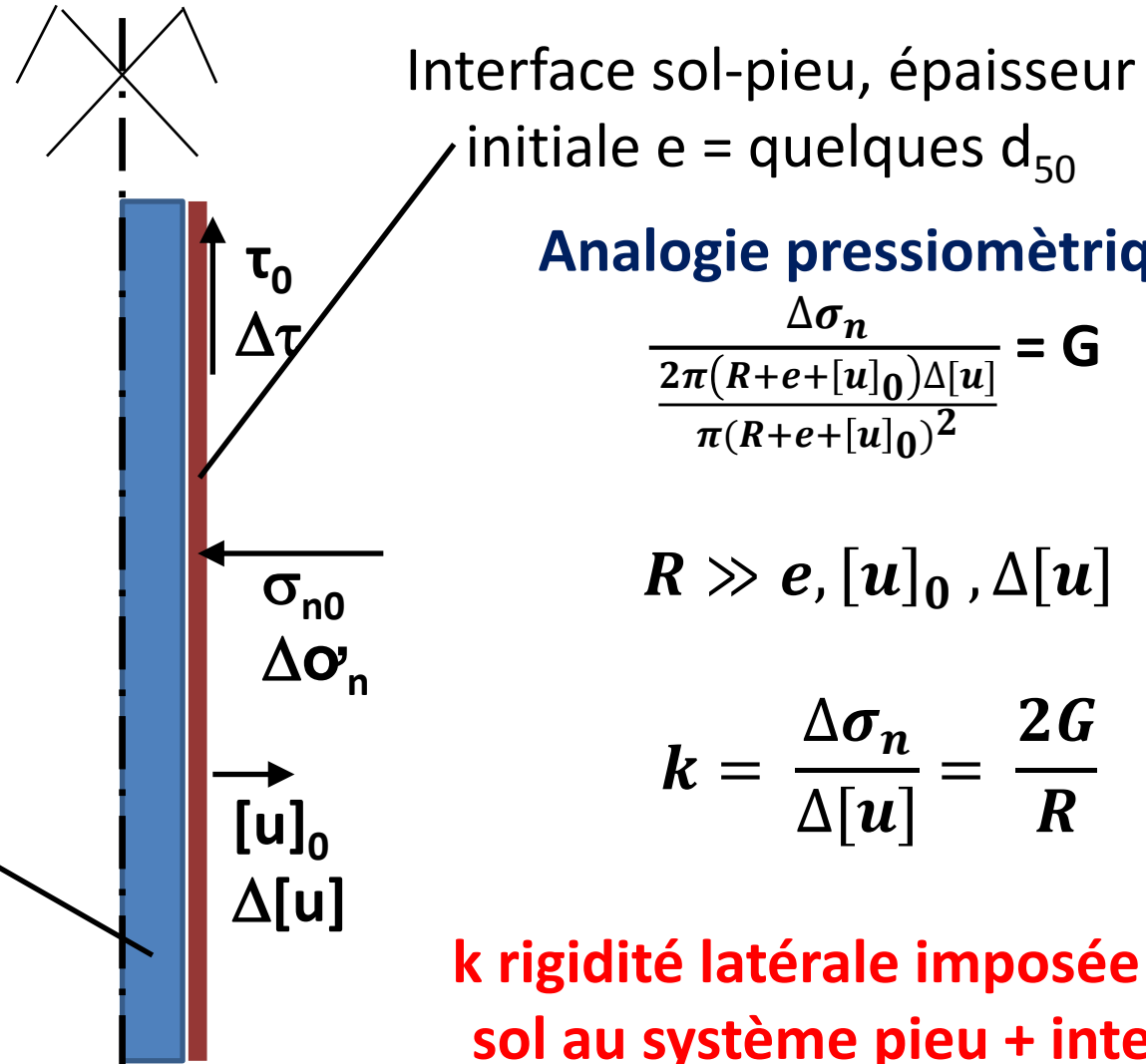
ET modèle, épaisseur
quelques d_{50}

Pieu et sol
réels (L) **OU**
modèles (λL)



Modèle simplifié 1D axisymétrique de frottement latéral des pieux

M. BOULON (1988),
 Contribution à la mécanique
 des interfaces sols-structures,
 application au frottement
 latéral des pieux. Mémoire
 d'habilitation à diriger des
 recherches, UJF Grenoble



Analogie pressiométrique

$$\frac{\Delta\sigma_n}{2\pi(R+e+[u]_0)\Delta[u]} = G$$

$$\frac{\Delta\sigma_n}{\pi(R+e+[u]_0)^2}$$

$$R \gg e, [u]_0, \Delta[u]$$

$$k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta[u]} = \frac{2G}{R}$$

k rigidité latérale imposée par le sol au système pieu + interface

Première conclusion sur la relation frottement latéral / cisaillement direct

Selon le modèle simplifié 1D précédent, l'essai de cisaillement direct sol-structure CNS (à rigidité normale imposée, k) est apte à décrire le frottement latéral le long des pieux

Limitation: pieu long, modèle en échec en tête et en pointe du pieu

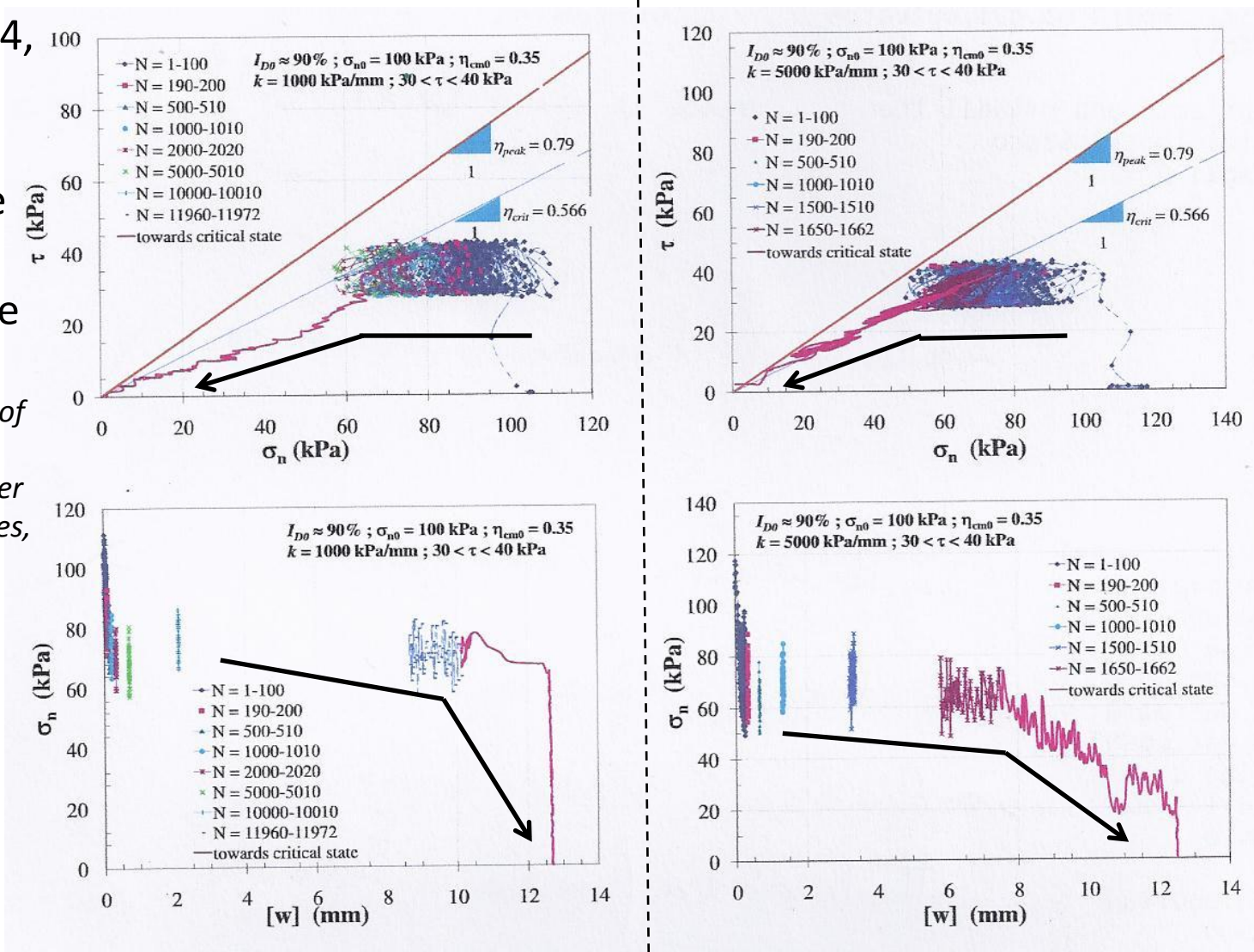
Principaux paramètres de l'essai CNS représentatif pertinent:

- σ_{n0} dépendant du mode d'installation
 - I_D indice de densité
 - G en très petites déformations, et à σ_{n0}
 - R rayon du pieu
- Si sollicitation cyclique, seuils de cisaillement et « G cyclique »...

Cisaillement direct sol-structure CNS cyclique

Fontainebleau NE34,
 $d_{50} = 0,23$ mm.
 Dégradation du frottement progressive de contrainte normale

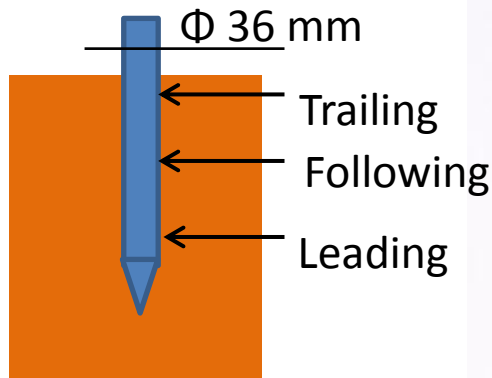
S. Pra-aj, 2013, *Behaviour of soil-structure interfaces subjected to a large number of cycles. Application to piles, Thèse, INPG, Grenoble*



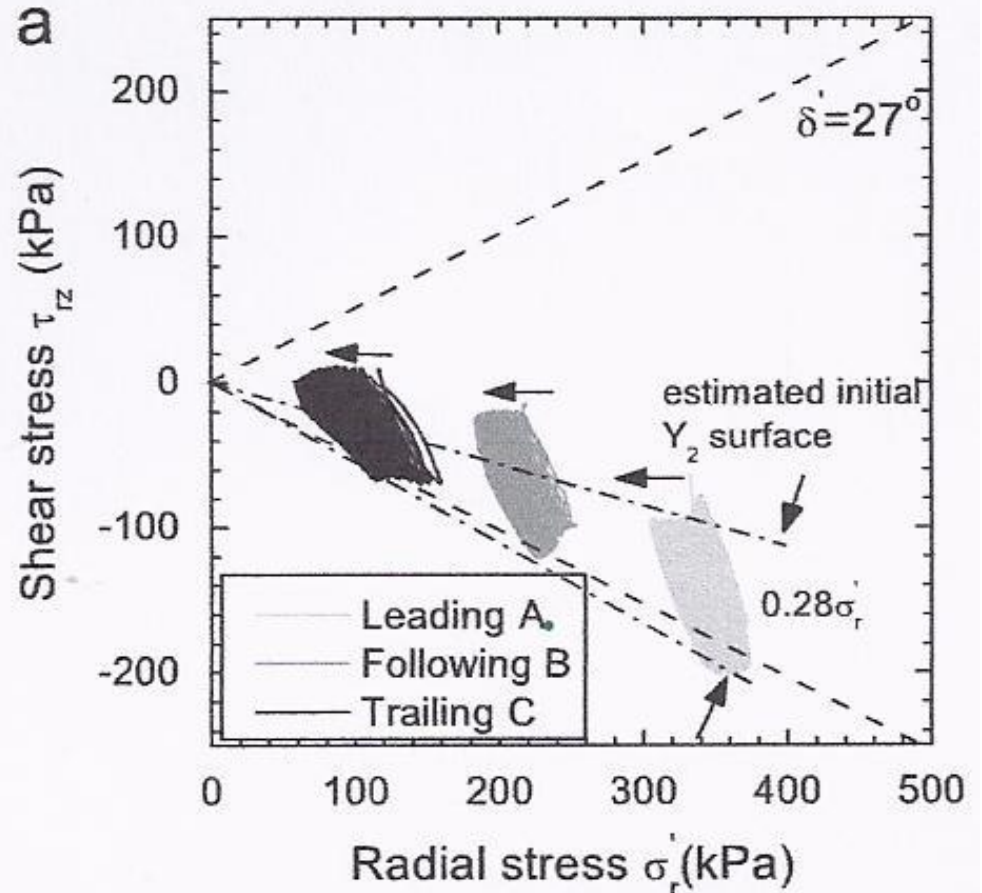
A comparer avec...

Chemins de contraintes

mesurés au contact sol-pieu
modèle, compression cyclique
(mini-ICP), à 3 profondeurs
dans la chambre d'étalonnage



C.H.C. Tsuha, P.Y. Foray, R. J. Jardine, Z. X. Yang, M. Silva, S. Rimoy (2012),
Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading, *Soils & Foundations*, 52 (3), pp. 393-410



Autres conclusions sur la relation entre frottement latéral (pieux réel et modèle) et cisaillement direct

1) $k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta[u]} = \frac{2G}{R}$ implique un **effet d'échelle parasite** entre pieux réel et modèle, car l'épaisseur d'interface est la même

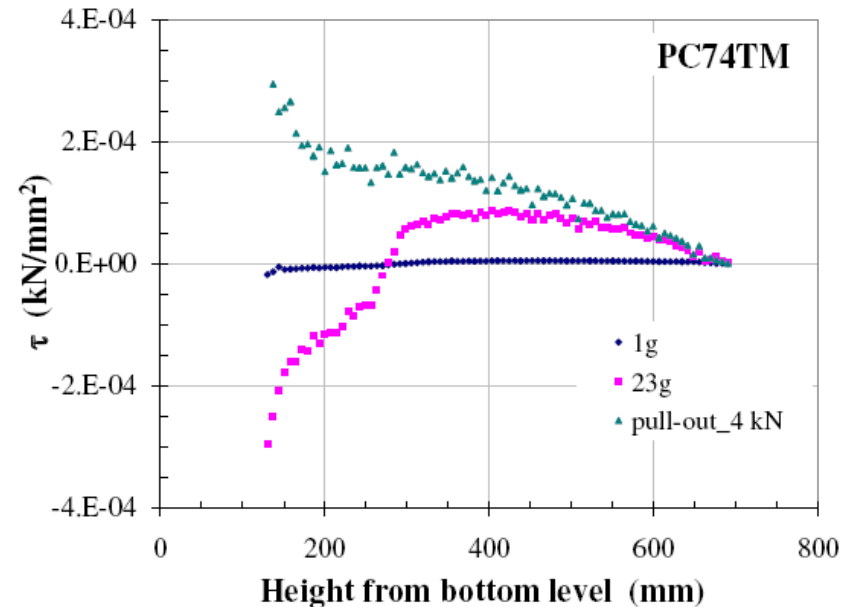
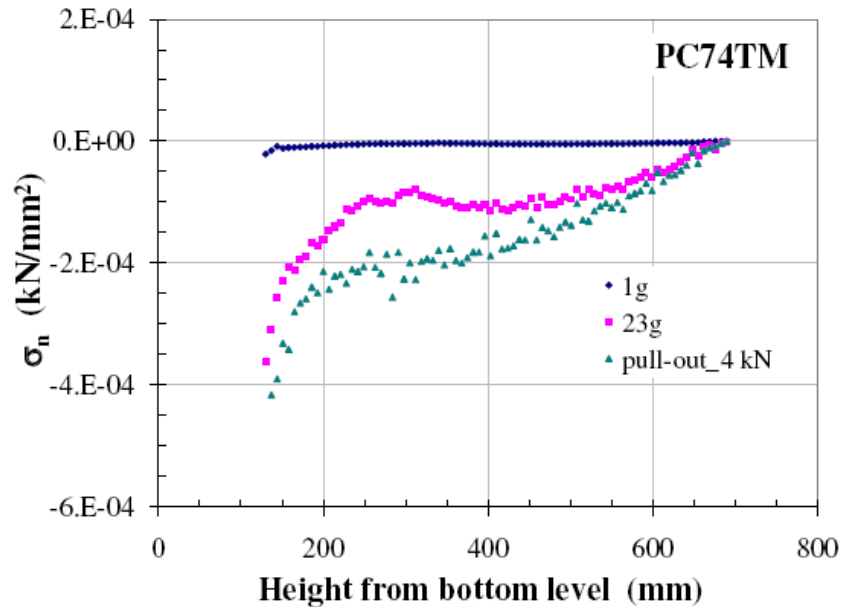
2) Coefficients de similitude

Pour le **pieu et le sol**, contraintes $\lambda_\sigma = 1$, et géométrie $\lambda_g = \lambda$

Pour l'**interface sol-pieu**, contraintes $\lambda_\sigma = 1$, et géométrie $\lambda_i = 1$

3) En chambre d'étalonnage, et/ou en centrifugeuse, même si le niveau de contraintes est \approx conservé, similitude stricte violée dès lors que l'interface sol-pieu est sollicitée en cisaillement. *Exemple: mise en place du sable autour du pieu modèle par pluviation*

Mise en place du sable par pluviation autour d'un pieu modèle centrifugé (modélisation E.F.)



La pluviation sous 1g autour du pieu modèle ne mobilise \approx pas l'interface.
La centrifugation sous 23g du modèle crée du frottement négatif
Le chargement du pieu modèle en tension rétablit une distribution attendue du frottement latéral

5. Questions relatives aux essais sur pieux modèles

Extrait de discussions à bâtons rompus avec Pierre Foray, éclairées par des essais probants, à propos de pieux modèles en chambre d'étalonnage

Conditions aux limites sur le massif de sol ?

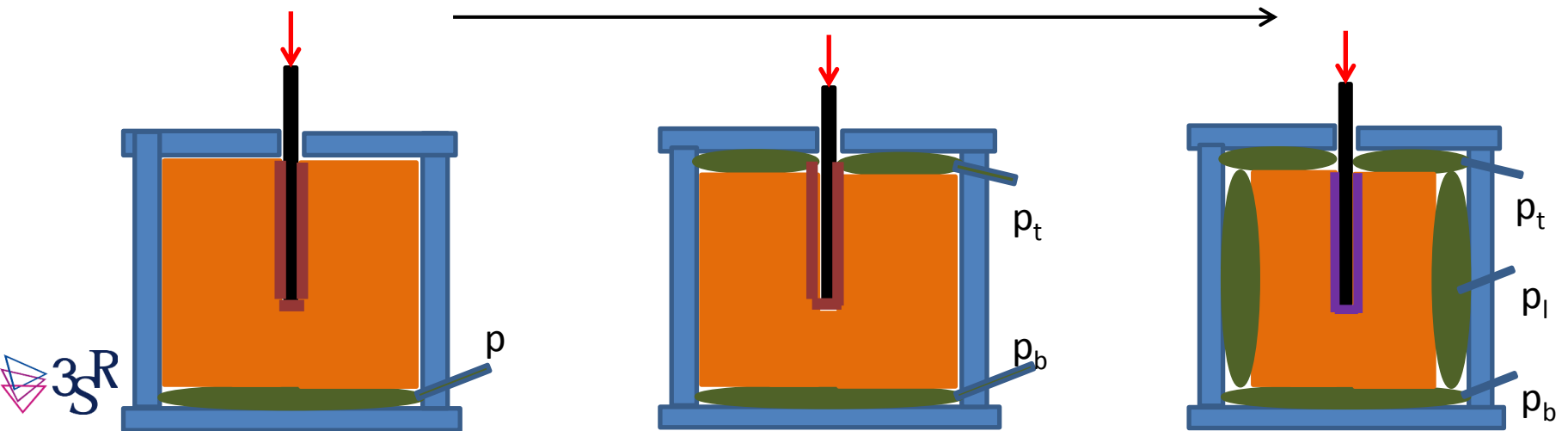
- On doit considérer le massif de sol **ET** les membranes, latérales, supérieure, et inférieure
- Les membranes pressurisées transmettent une pression au sol, mais elles ont **aussi** une rigidité intervenant sur la distribution de la réaction au chargement du pieu
- Intérêt à considérer l'équilibre vertical et radial de l'ensemble {pieu modèle + sol + membranes}



Quelques pistes

1) Equilibre radial du massif de sol

Massif de sol de mieux en mieux « environné », conditions aux limites approchant de plus en plus la situation du pieu réel

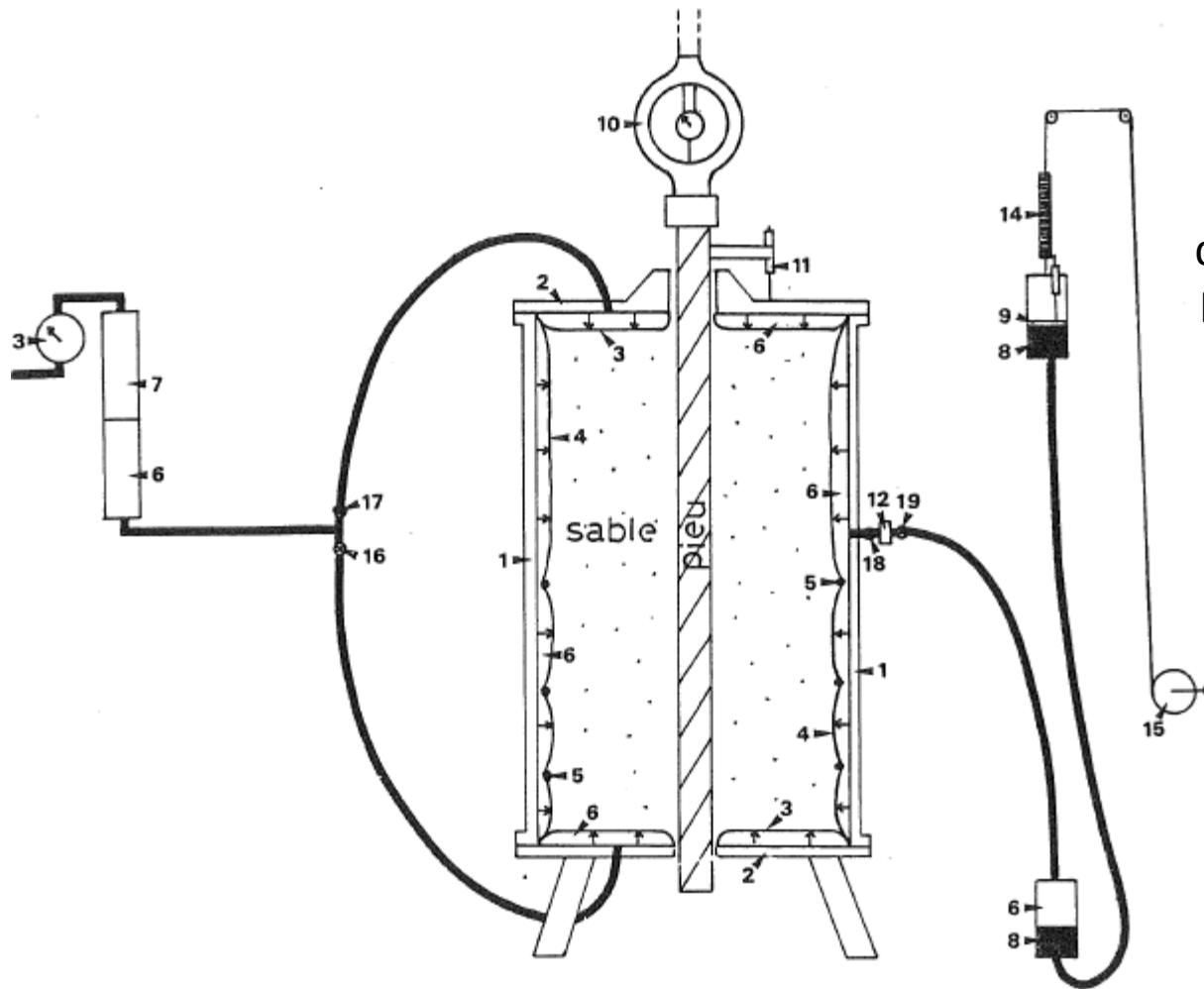


(1) Oedomètre
basique

(2) Oedomètre
amélioré

(3) Pressiomètre
amélioré + Analogie
pressiométrique

L'analogie pressiométrique pour le massif de sol

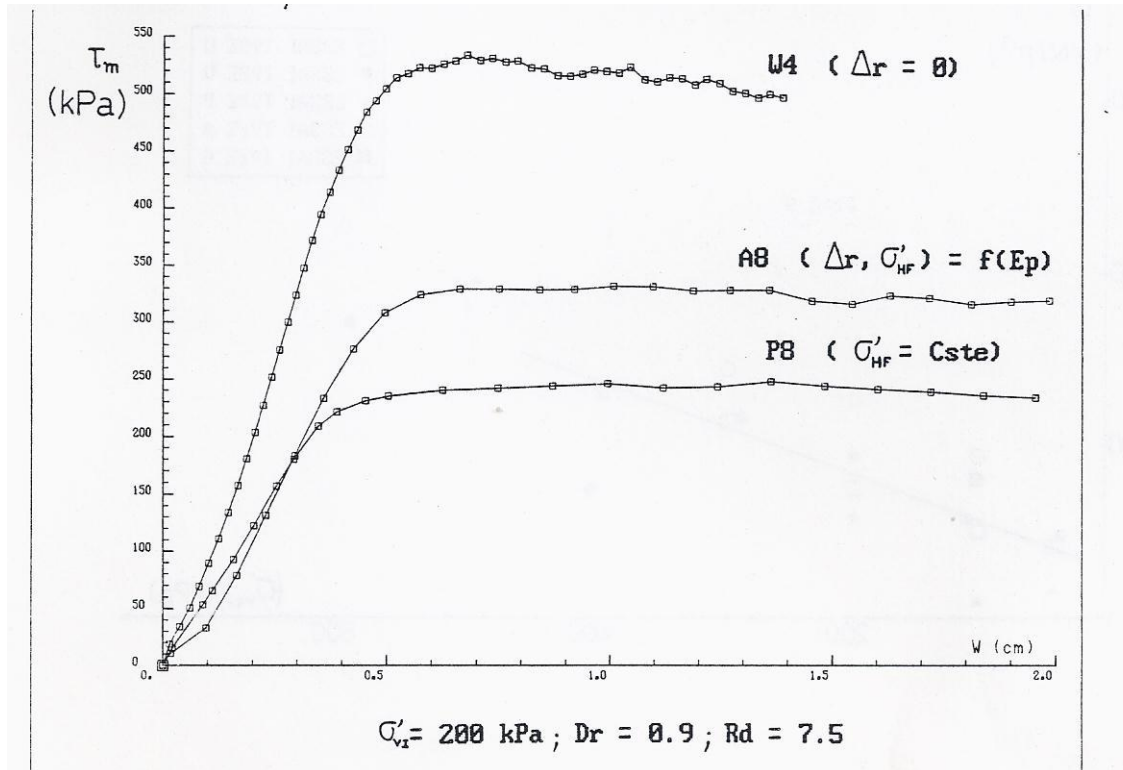


Petite chambre d'étalonnage ($\phi = 30$ cm, $H = 60$ cm), pieu modèle traversant ($\phi = 35$ mm), 3 niveaux indépendants de membranes latérales en latex peu rigides, épaisseur 0,7 mm

M. Eissautier (1986), Frottement latéral des pieux en milieu pulvérulent, Thèse de doctorat, UJF INPG, Grenoble



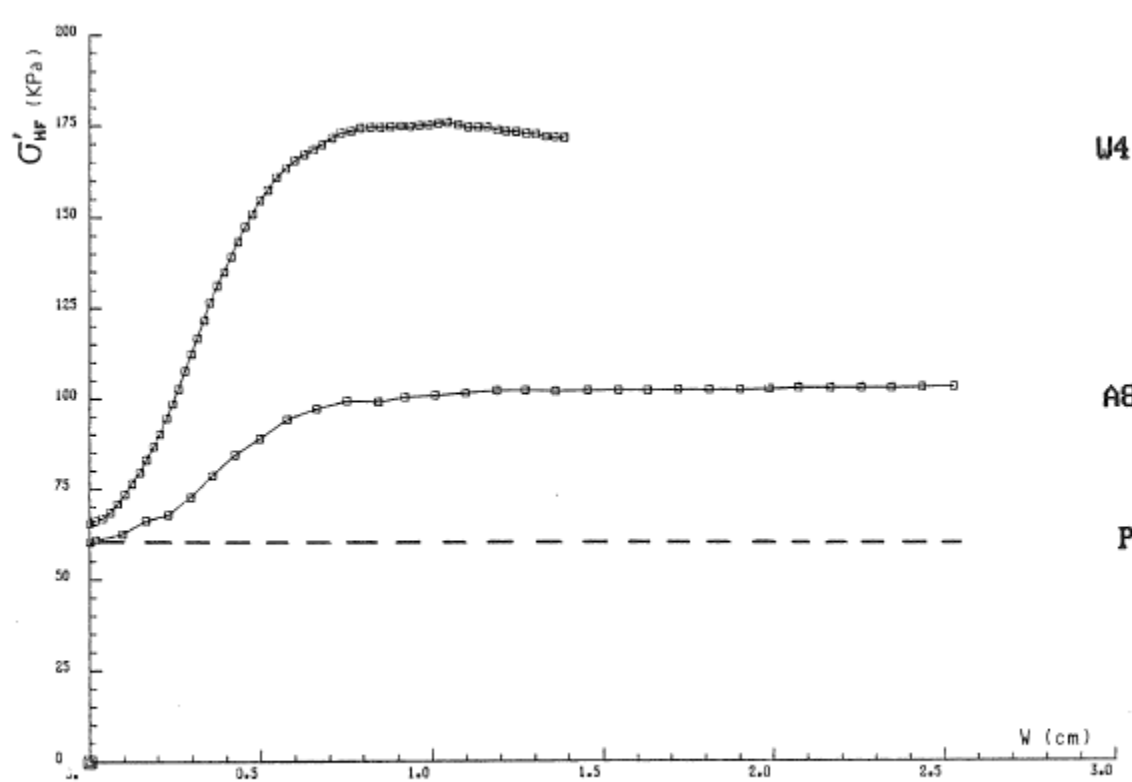
Influence des conditions aux limites latérales 1/2



*M. Eissautier (1986), et
 Pierre Foray (1991),
 Approche expérimentale
 du comportement des
 fondations profondes,
 Mémoire HDR, INPG,
 Grenoble*

Membrane latérale à pression-volume asservis ($\Delta r, \sigma'_{HF} = f(E_p)$)
 Frottement latéral unitaire moyen / déplacement en tête
 Hostun $d_{50} = 1 \text{ mm}$, pieu modèle rugueux

Influence des conditions aux limites latérales 2/2



$\sigma'_{vt} = 200 \text{ kPa} ; D_r = 0.9$

$$(\Delta r, \sigma'_{HF}) = f(E_p)$$

Membrane latérale à pression-volume asservis

Variation de pression dans la membrane latérale / déplacement en tête

Hostun $d_{50} = 1 \text{ mm}$, pieu modèle rugueux



Quelques pistes (suite)

2) Equilibre vertical du massif de sol

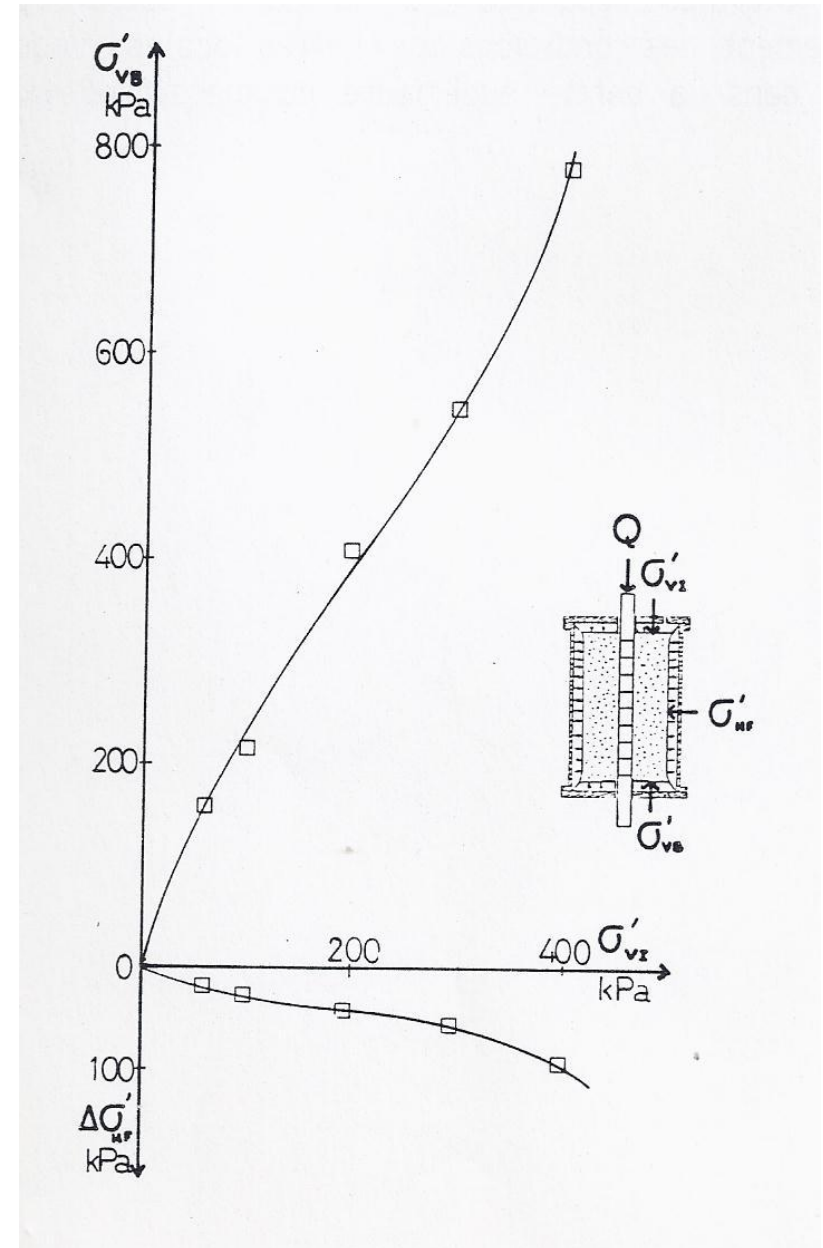
Série d'essais de type A
 Hostun $d_{50} = 1 \text{ mm}$, $I_D = 90 \%$

- Membrane supérieure à pression Cte, σ_{Vi}
- Membrane inférieure à volume constant
- Membrane latérale à pression-volume asservis : $(\Delta \sigma_r, \sigma'_{HF}) = f(E_p)$

3SR A la rupture (frottement sol-pieu saturé)

- Augmentation significative de pression σ_{VB} dans la membrane inférieure
- Diminution de pression σ_{HF}

➔ La réaction au chargement du pieu est principalement supportée par la membrane inférieure, souple



6. Conclusions

- Importance du concept de comportement d'interface pour analyser le frottement latéral des pieux
- Les essais de cisaillement direct sol-structure CNS sont pertinents pour caractériser le frottement latéral des pieux, en monotone comme en cyclique
- La similitude stricte est impossible pour des essais sur pieux modèles, compte tenu de l'interface sol-pieu
- En chambre d'étalonnage, les caractéristiques des membranes d'application du niveau de contraintes in-situ ont un rôle non négligeable
- Voilà un (des) champ(s) très intéressant(s) à explorer par nos successeurs

A toi, Pierrot, en souvenirs des fêtes rue des Lilas, de Paco Ibañez, des escalades, et de la folle équipe MASTEC qui, dans les années 70, pensait révolutionner la mécanique des sols...





**Merci de votre attention, et de votre
marque d'amitié pour Pierre**

