

Des interfaces sol-structure au comportement des inclusions dans le sol

Jubilé de François Schlosser

Ecole des Ponts ParisTech

11 octobre 2016

Marc Boulon
Professeur retraité
Université Grenoble Alpes
Laboratoire 3SR

Mouvement général de la communauté géotechnicienne à partir des années 70 pour mieux comprendre et quantifier le frottement sol-inclusion

Feda, 6th ECSMFE, Vienne 1976

Ostermayer & Sheele, ICSMFE, Tokyo, 1977

Wernick, ISSRST, Sydney, 1978

Schlosser & Elias, Terre armée, 1978

Plumelle, thèse DI, 1979

Schlosser & Guilloux, RFG, 1981

Coyle & Castello, ASCE, 1981

Boulon & Foray, 3th ICNMOP, Nantes, 1986

Et bien d'autres...

Points de repère

- Dilatance contractance
- Les inclusions en sol pulvérulent
- Chemins de contraintes mesurés
- Les conditions aux limites lors d'essais d'inclusion en labo
- Modèle simple de frottement latéral sol-inclusion. Effet d'échelle
- Quel(s) essai(s) élémentaire(s) pertinent(s)?
- Et lors de sollicitations cycliques ?

Dilatance contractance 1

- Dilatancy: Reynolds, Proc. Roy. Inst., 1886

Property of change of volume in the process of change of shape or distortional strain

- Dilatance libre

$\varepsilon_V \uparrow$

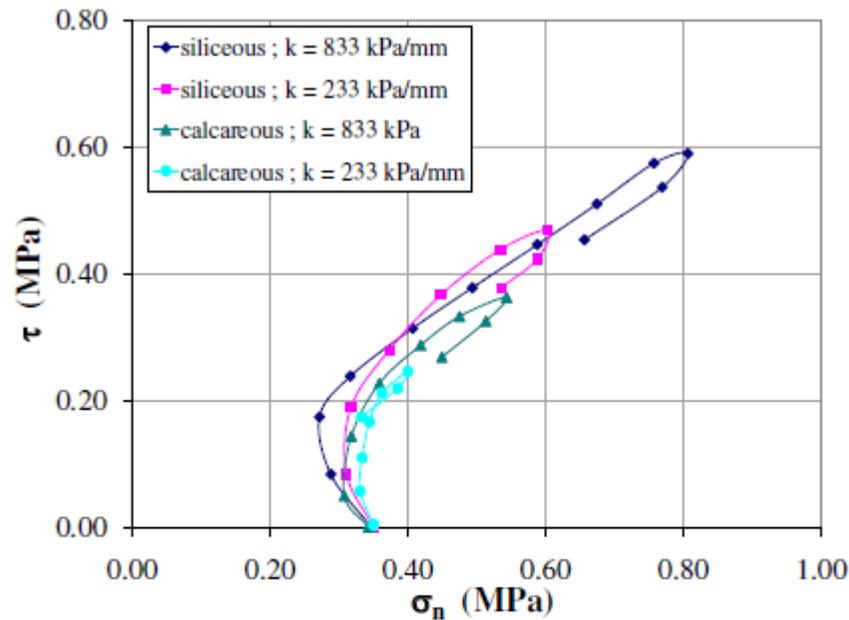
dilatance empêchée

$\sigma_i \uparrow$

- Facteurs d'influence (matériaux pulvérulents):

Frottement grain sur grain et rugosité de la structure, densité, résistance des grains, contrainte moyenne ou normale, amplitude de distorsion, ...

Dilatance contractance 2



(a) Dilatance partiellement empêchée (b)

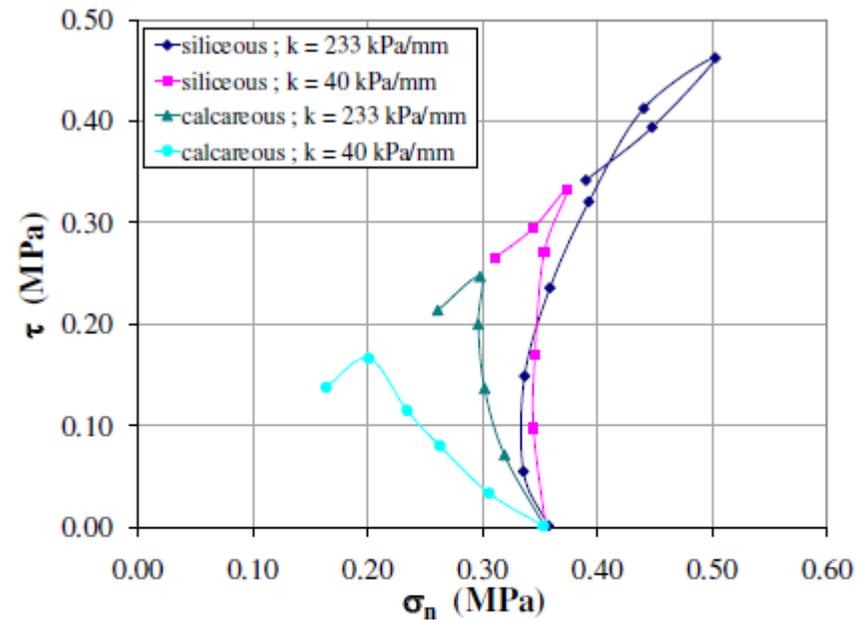
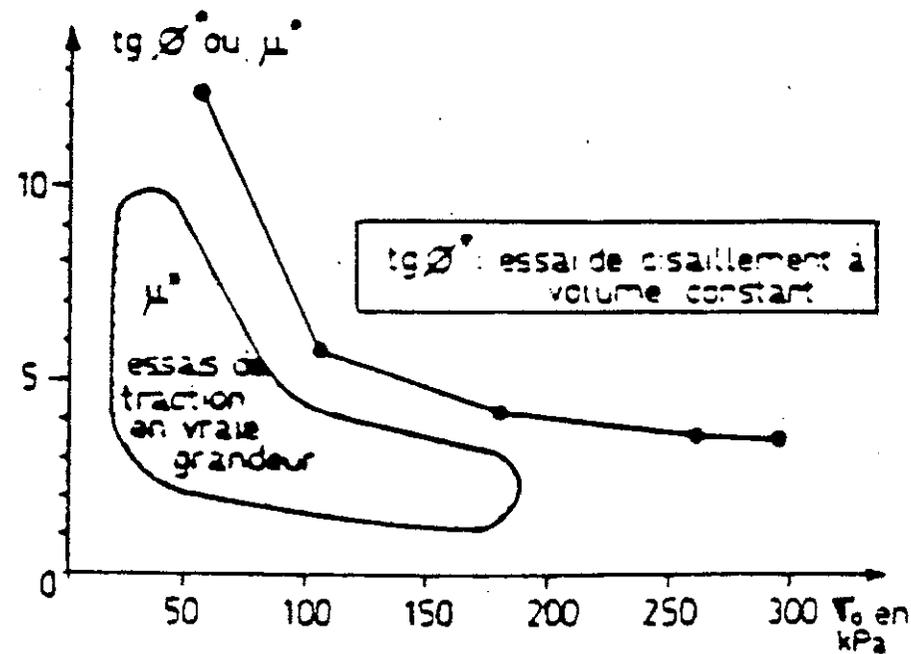


Figure 1.19: Sand-structure interface direct shear tests with imposed stiffness on siliceous and calcareous sand; (a) dense samples; (b) loose samples, with $\sigma_{n0} = 354$ kPa, Boulon & Foray *3th ICNMOP, Nantes, 1986*

Les inclusions en sol pulvérulent 1



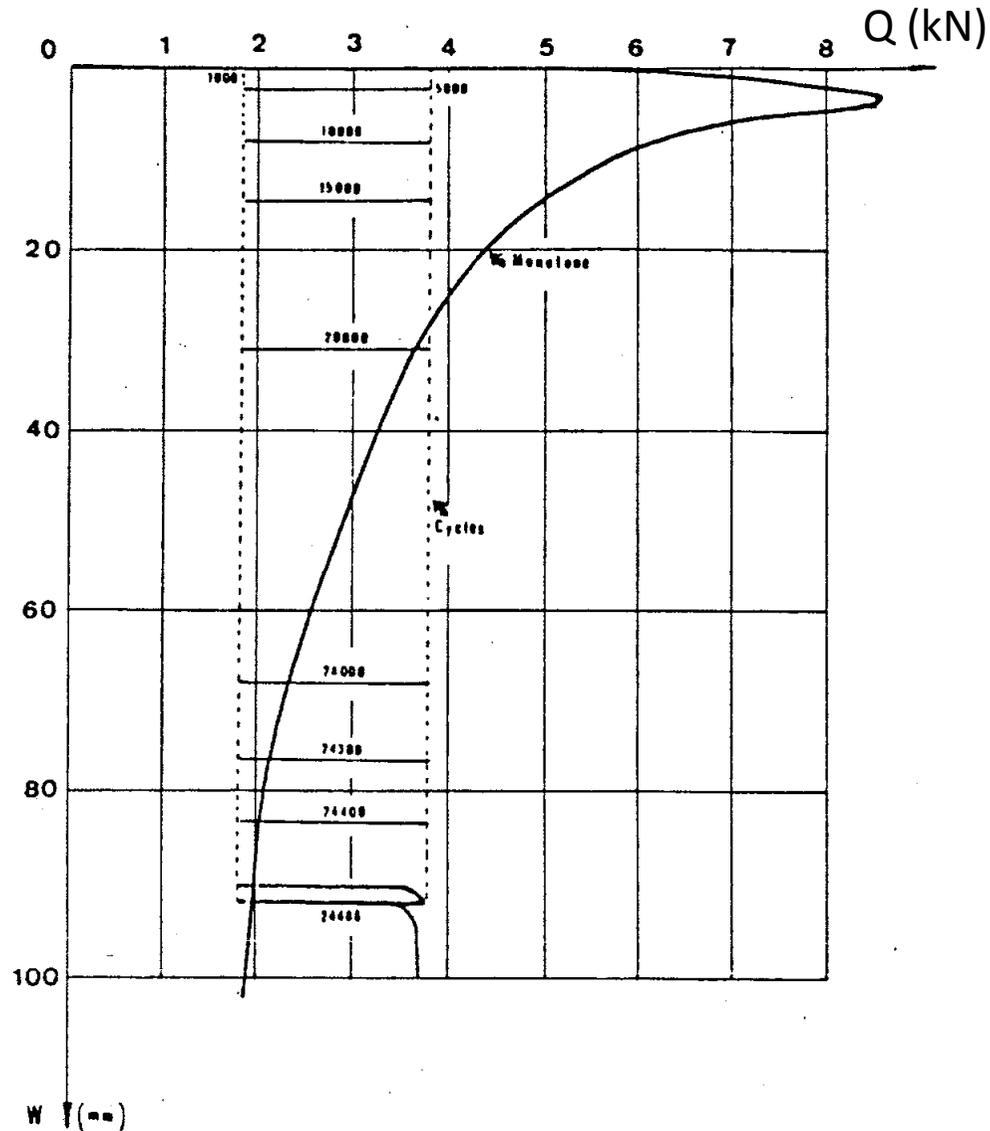
$$\mu^* = \frac{\tau_{lim}}{\sigma_0}$$

τ_{lim} cisaillement maximum mobilisé

σ_0 contrainte normale initiale au contact sol inclusion

figure 4. The apparent friction coefficient μ^* along inclusions embedded in granular soils, after Schlosser and Guilloux RFG, 1981

Les inclusions en sol pulvérulent 2



Essai d'arrachement de pieu modèle en chambre d'étalonnage, sable d'Hostun dense, sans surcharge

- Cas monotone, $Q_{\max} = 8.7$ kN, $K_{\max} = 3.8$
- Cas cyclique, rupture après 24700 cycles entre 1.8 et 3.7 kN

Boulon & Foray, RHB, 1986

Les inclusions en sol pulvérulent 3

- Recommandations CLOUTERRE 1991
- Recommandations FOREVER 2004
- A venir, recommandations SOLCYP 2017

Tous types de sols

Chemins de contraintes mesurés 1

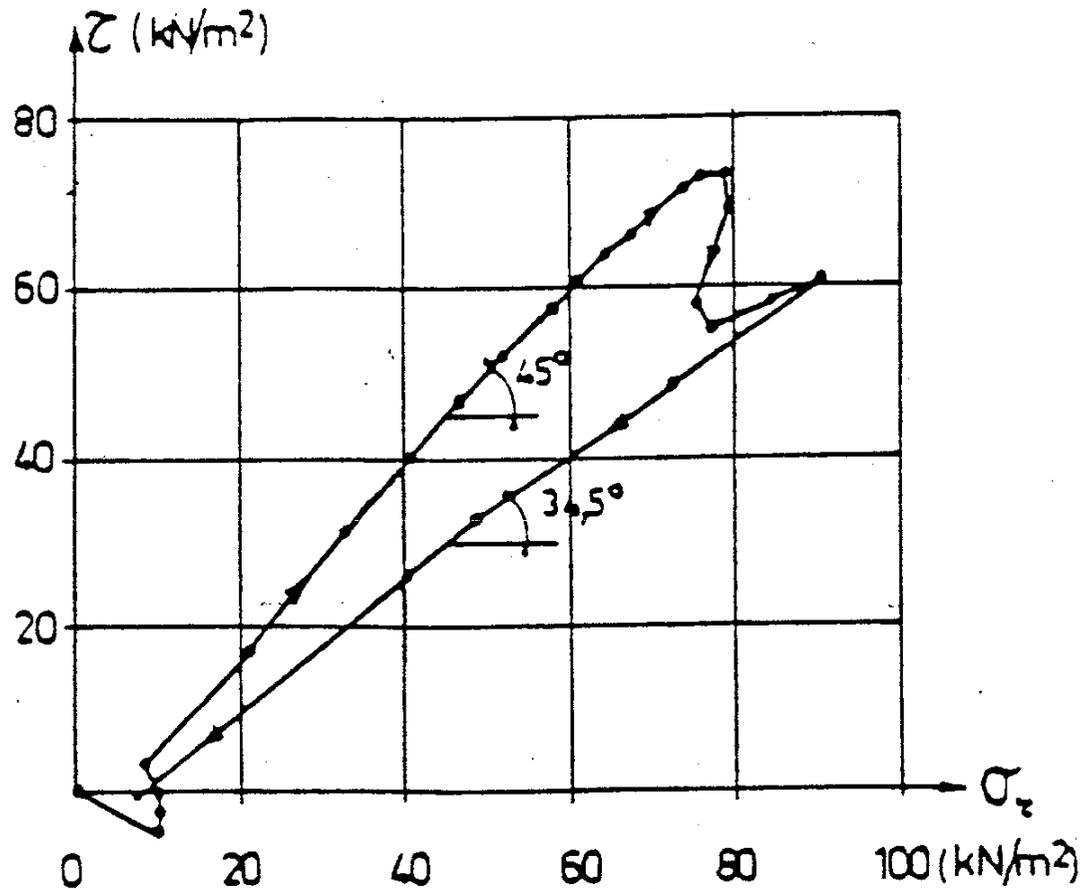
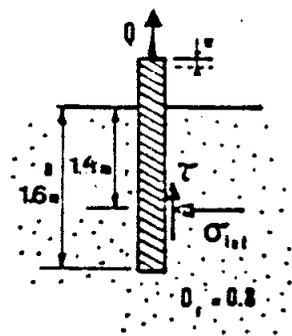
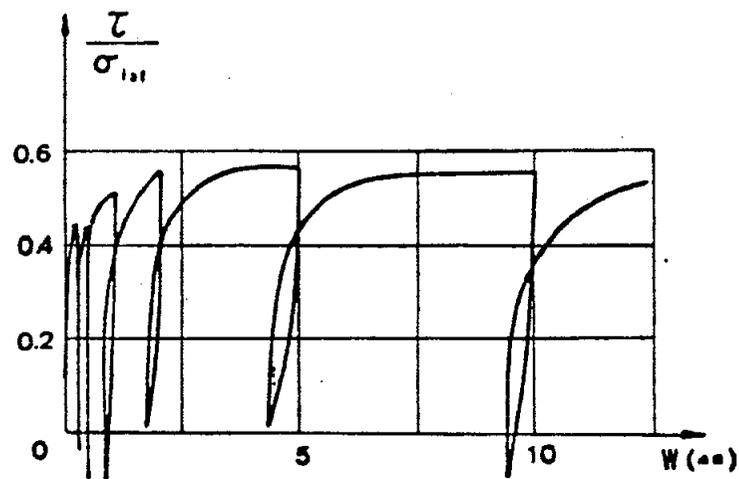
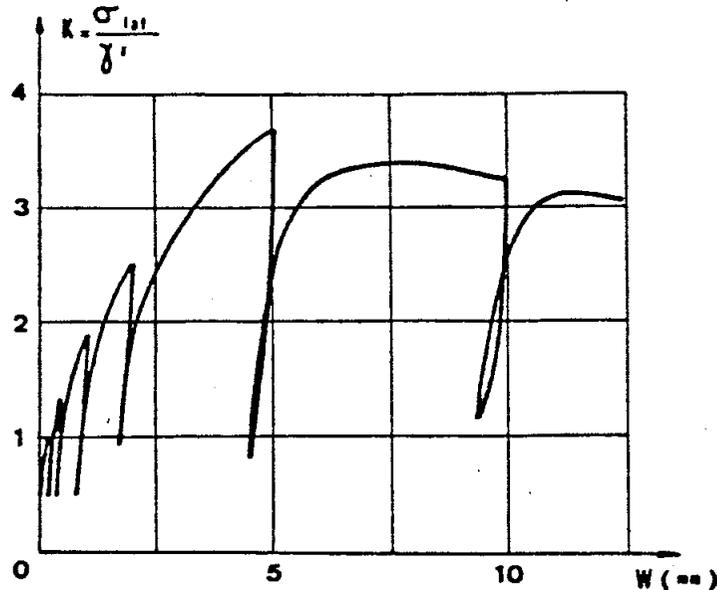


figure 3. Change in the stress vector acting on the shaft of a tension model pile, after Wernick ISSRST, Sydney, 1978

Chemins de contraintes mesurés 2



Essai d'arrachement de pieu modèle en chambre d'étalonnage, sable d'Hostun, sans surcharge, petit nombre de cycles

- Evolution du coefficient de pression des terres
- Evolution du frottement mobilisé

Puech et al, 7th ECSMFE, Brighton, 1979

Les conditions aux limites lors d'essais d'inclusions en labo 1

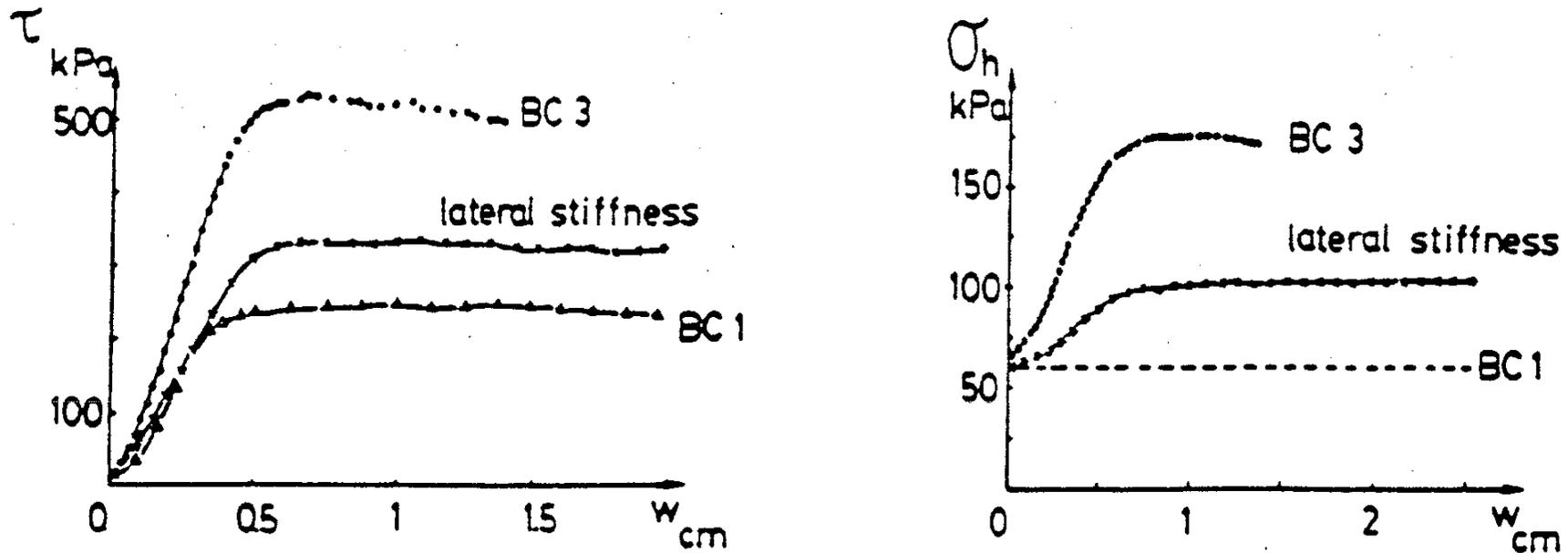
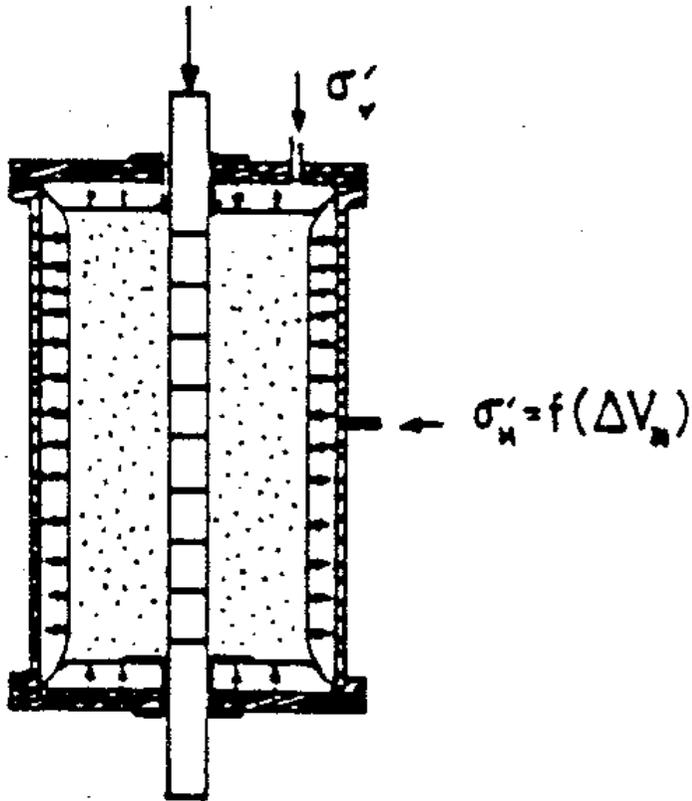


figure 8. Influence of the boundary conditions on lateral friction and on lateral normal stress along a model pile in a small calibration chamber, after Foray , ICCCT, Clarkson, 1991

Les conditions aux limites lors d'essais d'inclusion en labo 2



BC1: $\sigma'_H = Cte$

BC2: pressuremetric lateral stiffness

BC3: $\Delta V_H = 0$

Eissautier, thèse, Grenoble, 1986

Modèle simple de frottement latéral sol-inclusion 1

Nombreuses observations concernant le contact sol-inclusion en milieu pulvérulent

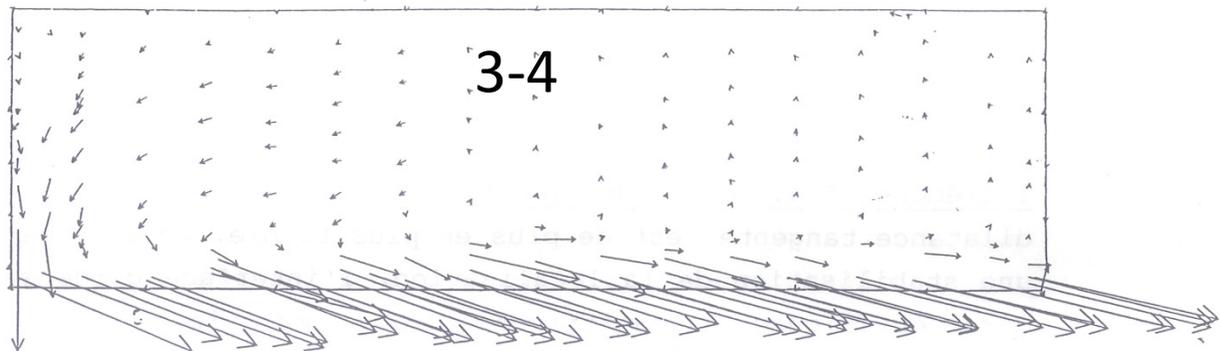
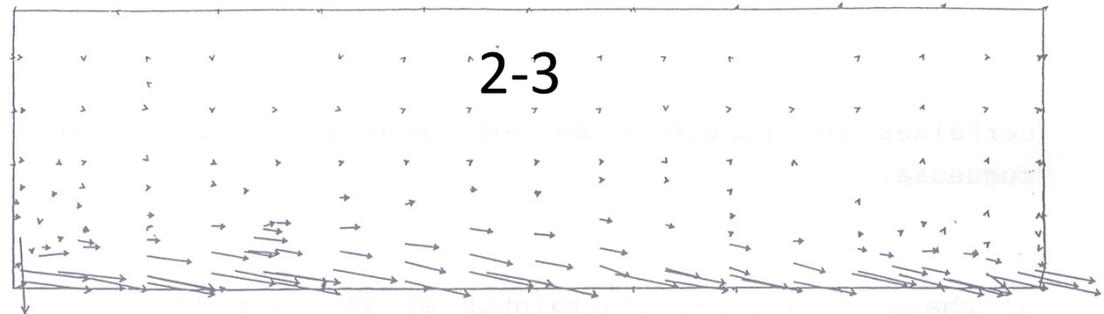
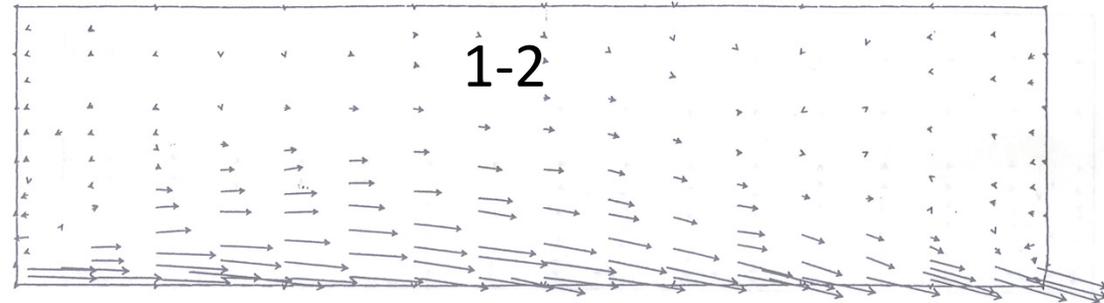
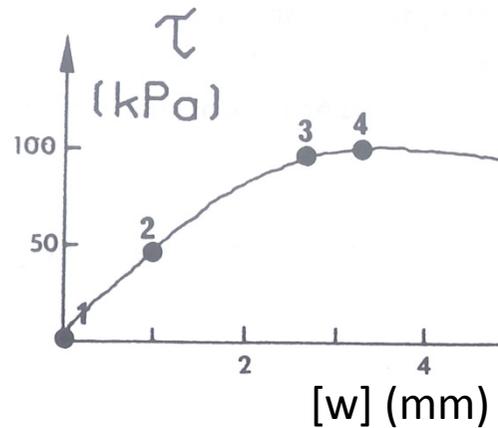
- Il existe une zone fortement cisailée de très faible épaisseur (selon la rugosité de structure, la densité, le niveau de contrainte,...) ≈ 5 à $12 d_{50}$
- Cette zone ne préexiste pas, apparaît au cours du cisaillement (analogie avec la couche limite en mécanique des fluides)

Modèle simple de frottement latéral sol-inclusion 2

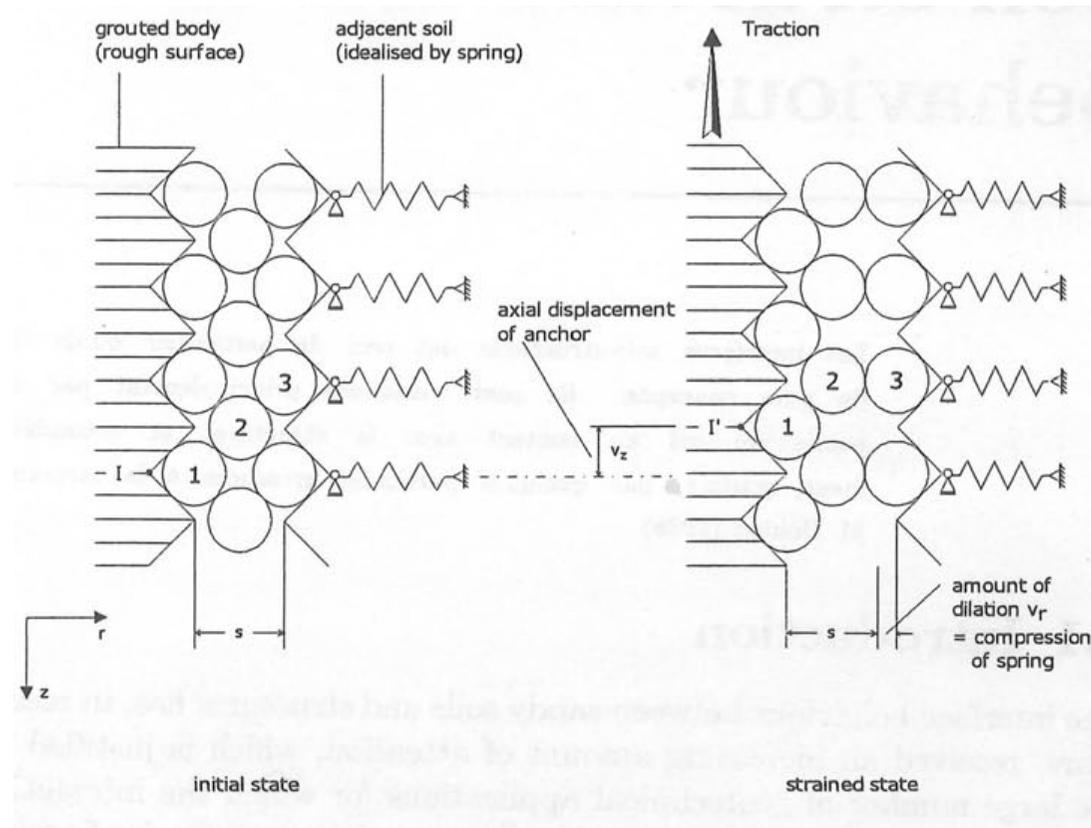
Cisaillement direct sol
structure, chemin CNL,
visualisation
stéréophotogrammétrique.

Vecteurs déplacement
relatif grains/boîte

Hoteit, thèse, Grenoble, 1990

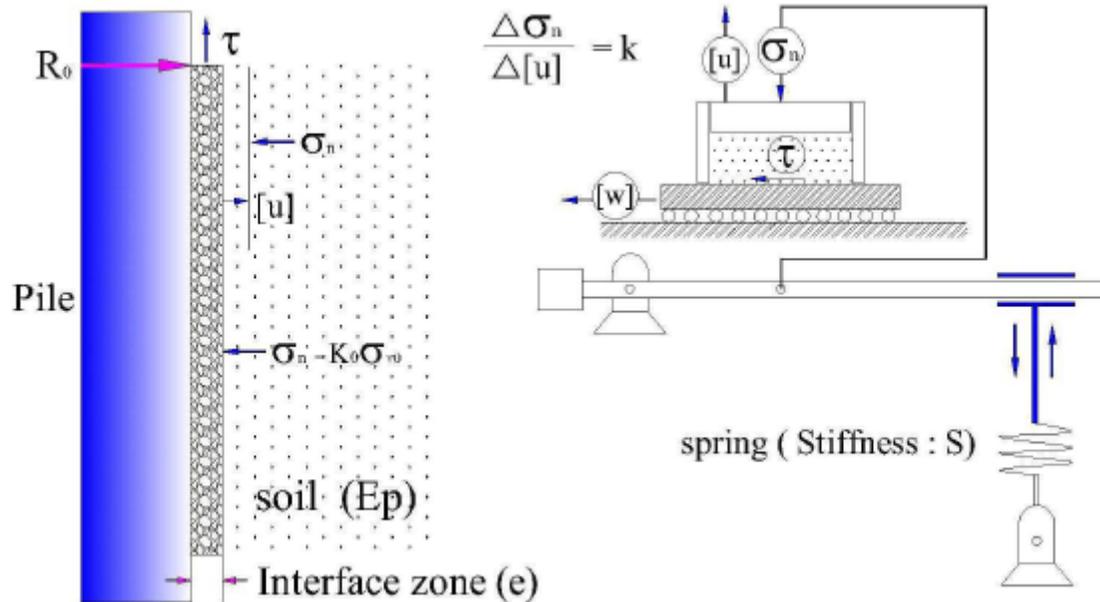


Modèle simple de frottement latéral sol-inclusion 3



Wernick, ISSRST, Sydney, 1978

Modèle simple de frottement latéral sol-inclusion et effet d'échelle 4



Approximation utilisant une analogie pressiométrique, pieu de longueur infinie

k rigidité normale appliquée par le massif de sol sur {pieu + interface}, après installation du pieu

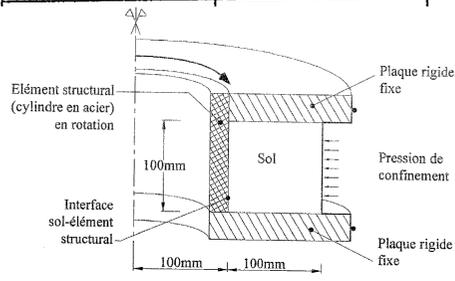
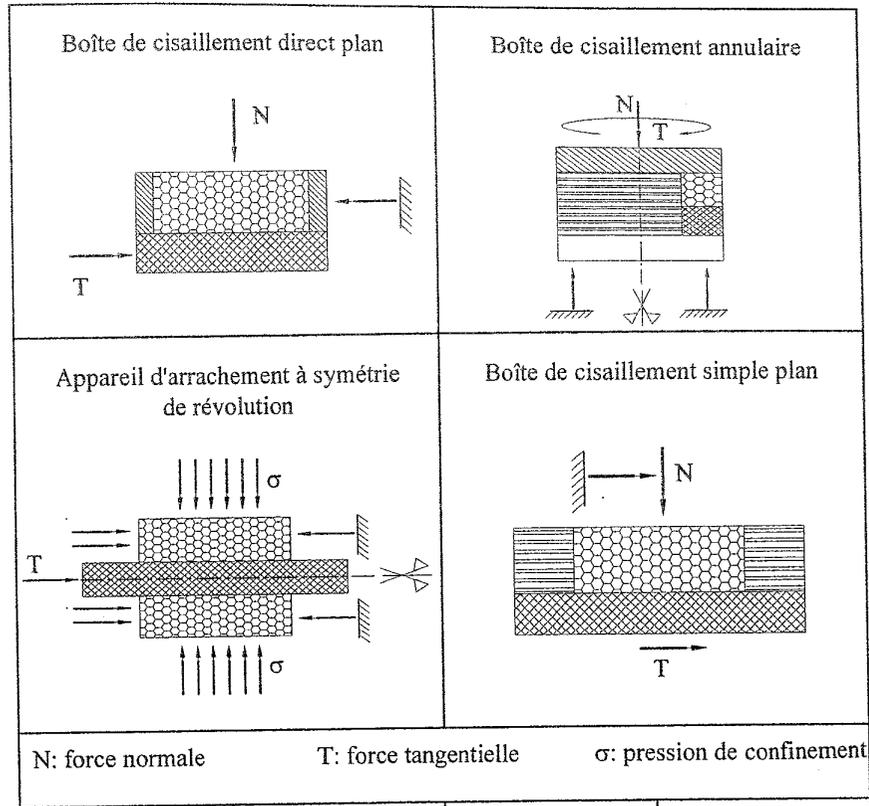
- Effet d'échelle dû à R_0
- Question: quel E_p ?

$$E_p = \frac{\Delta\sigma}{-2\Delta V/V_0} \cong \frac{\Delta\sigma}{-2\Delta[u]}(R_0 + e) \cong \frac{\Delta\sigma}{-2\Delta[u]}(R_0)$$

$$\frac{\Delta\sigma}{-\Delta[u]} = \frac{2E_p}{R_0} = k$$

Boulon & Foray, 3th ICNMOP, Nantes, 1986

Quel(s) essai(s) élémentaire(s) pertinent(s)? 1

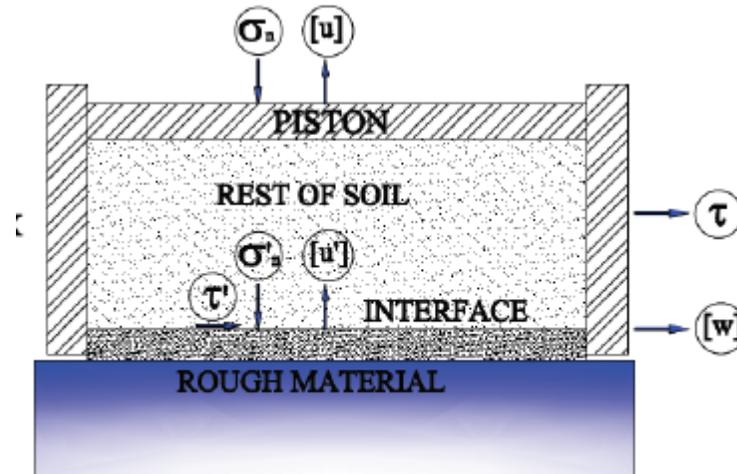


Cisaillement simple annulaire (ACSA)

Outre le dispositif de cisaillement,

- Impossible d'isoler l'interface, les essais testent l'interface sol-structure et une masse de sol « complémentaire »
- L'essai optimum correspondrait à la masse minimum de sol « complémentaire » ? Épaisseur d'échantillon ?
- Et quel chemin de cisaillement?

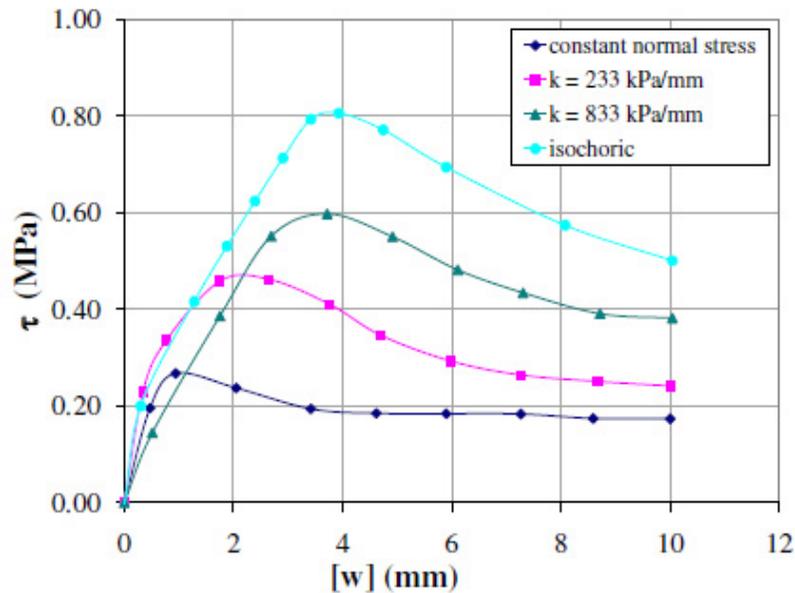
Quel(s) essai(s) élémentaire(s) pertinent(s)? 2



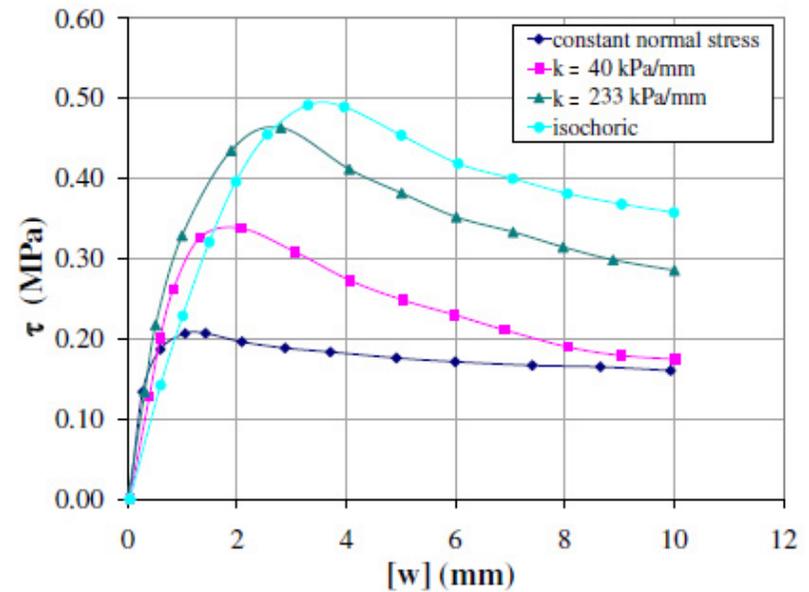
- L'essai de cisaillement direct sol-structure à **rigidité normale imposée** (CNS = constant normal stiffness)
- Un asservissement crée la rigidité normale

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

Quel(s) essai(s) élémentaire(s) pertinent(s)? 3



(a)



(b)

Figure 1.18: Hostun (silica)sand-structure interface direct shear tests with three different boundary conditions; (a) dense samples; (b) loose samples, with $\sigma_{n0} = 354$ kPa, Boulon & Foray | 3th ICNMOP, Nantes, 1986

Et lors de sollicitations cycliques ?

Cadre ANR et Programme national SOLCYP, *cf recommandations à paraître, 2017*

- Lors des cycles de cisaillement, réarrangement et usure/rupture des grains, phénomènes d'accumulation
- → tendance contractante
- → Sur chemins CNS, chute progressive de contrainte normale
- Chute modélisée fonction des paramètres (contrainte normale, cisaillement moyen, amplitude de cisaillement, densité, **rigidité normale** (*Pra-ai, thèse Grenoble, 2013; Pra-ai & Boulon, Acta Geotechnica, 2016; Pittos, Master ENPC, 2014*))
- Calculs de pieux sous sollicitation axiale cyclique selon méthode t-z (*Abchir, thèse, ENPC, 2016 et JNGG 2016*) et éléments finis (*Pra-ai, thèse, Grenoble, 2013, et JNGG 2016*)

En souvenir d'une arrivée
mouvementée en avion à Athènes,
le Parthénon ... sous la neige

*décembre 1996, Contrat Européen « Monuments
under seismic action »...*