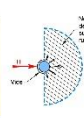
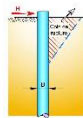
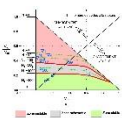


## Effet des cycles sur le comportement des sols & interfaces sol-structure

*Marc BOULON\* & contributions de  
Christophe DANO\* et Jean CANOU\*\**

*\* UGA-Lab 3SR Grenoble    \*\* Inst. Navier-CERMES*

- ▶ Objectifs
- ▶ Les argiles (essais Triaxiaux cycliques CU)
- ▶ Les sables (essais Triaxiaux cycliques CU et DSS VC)
- ▶ Les interfaces sol-structure (essais CNS sol-structure)
- ▶ Conclusion / cycles sols et interfaces



## Comportement des pieux sous solicitations cycliques



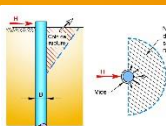
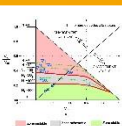
### DEGRADATION CYCLIQUE...

Signification ?

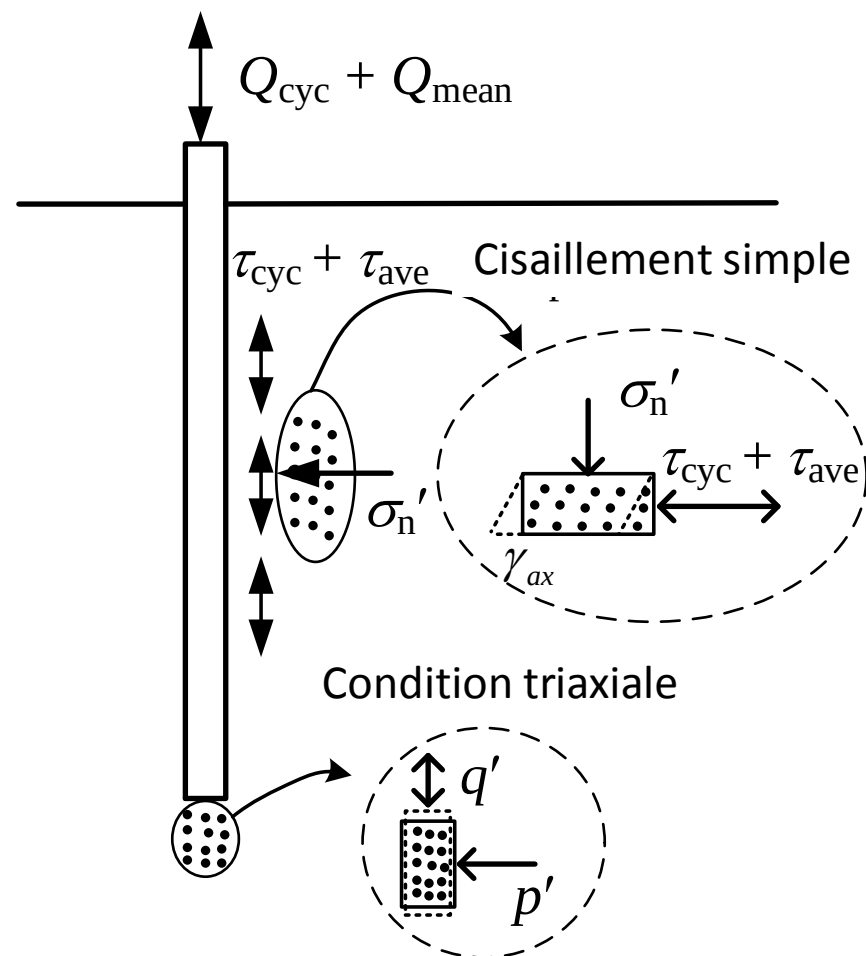
Evaluation de  
la sécurité ?



- Quel(s) essai(s) de sol ?
- Avec quelles conditions aux limites ?
- Mesure de l'accumulation responsable ?
- Prise en compte dans les calculs ?



- La définition des essais à réaliser implique que l'on pré-suppose le mécanisme de fonctionnement des parties de l'ouvrage
- Essais triaxiaux non drainés
- Essais de cisaillement simple (DSS) volume constant ou autre
- Essais de cisaillement direct sol-structure à rigidité normale imposée (CNS)

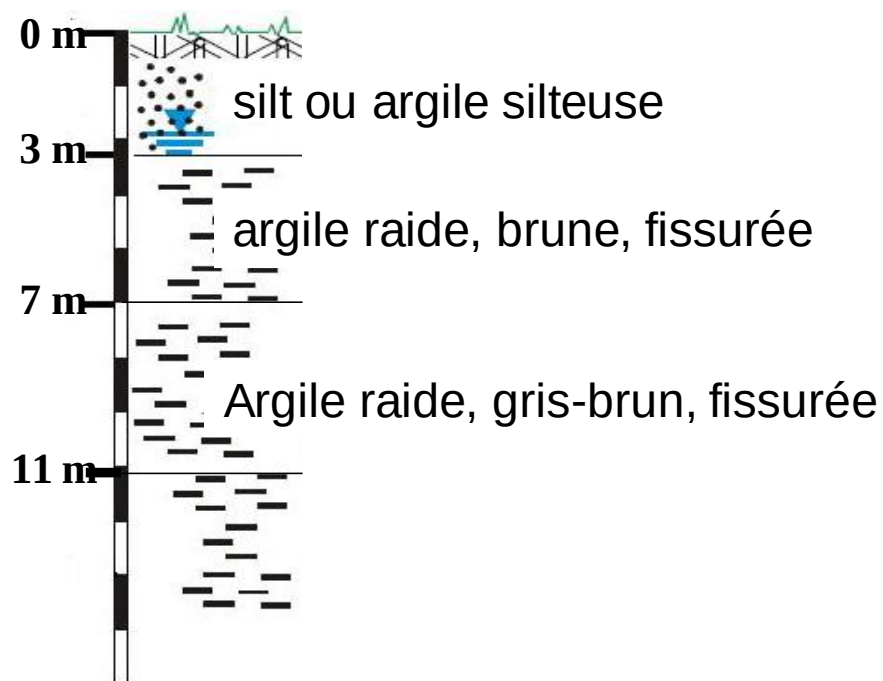


*D'après Wu, Dano et al*



## ► L'argile de Merville

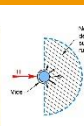
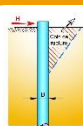
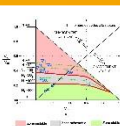
(C. Dano & thèse de J. Han)



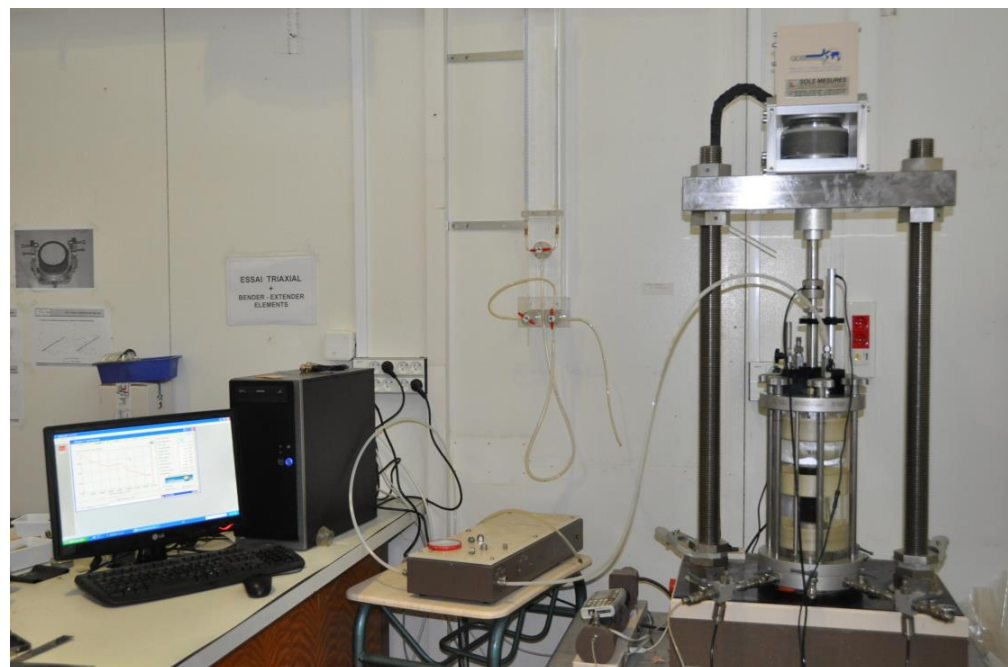
### Pressions de reconsolidation

Argile de Londres:  $\geq 3000$  kPa;  
 Argile des Flandres:  $\approx 3400$  kPa;  
 Argile de Merville: **2750 kPa**

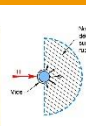
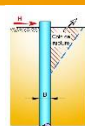
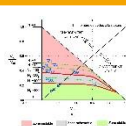
|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| Teneur en eau ( $w$ )          | 29.0~35.6%         |
| Limite de liquidité ( $w_L$ )  | 89~101%            |
| Indice de plasticité ( $I_p$ ) | 46~61%             |
| Teneur en argile (CF)          | $\approx 26\%$     |
| Degré de saturation ( $S_r$ )  | 100%               |
| Angle de frottement de pic     | $\approx 24^\circ$ |



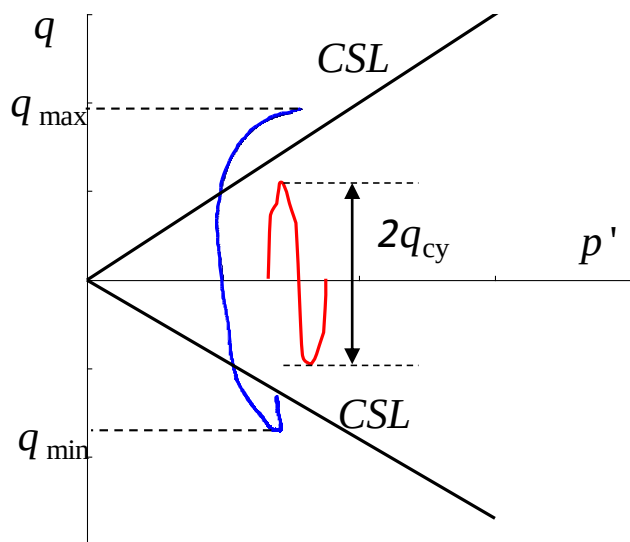
## Dispositif triaxial cyclique



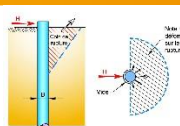
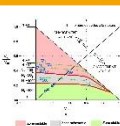
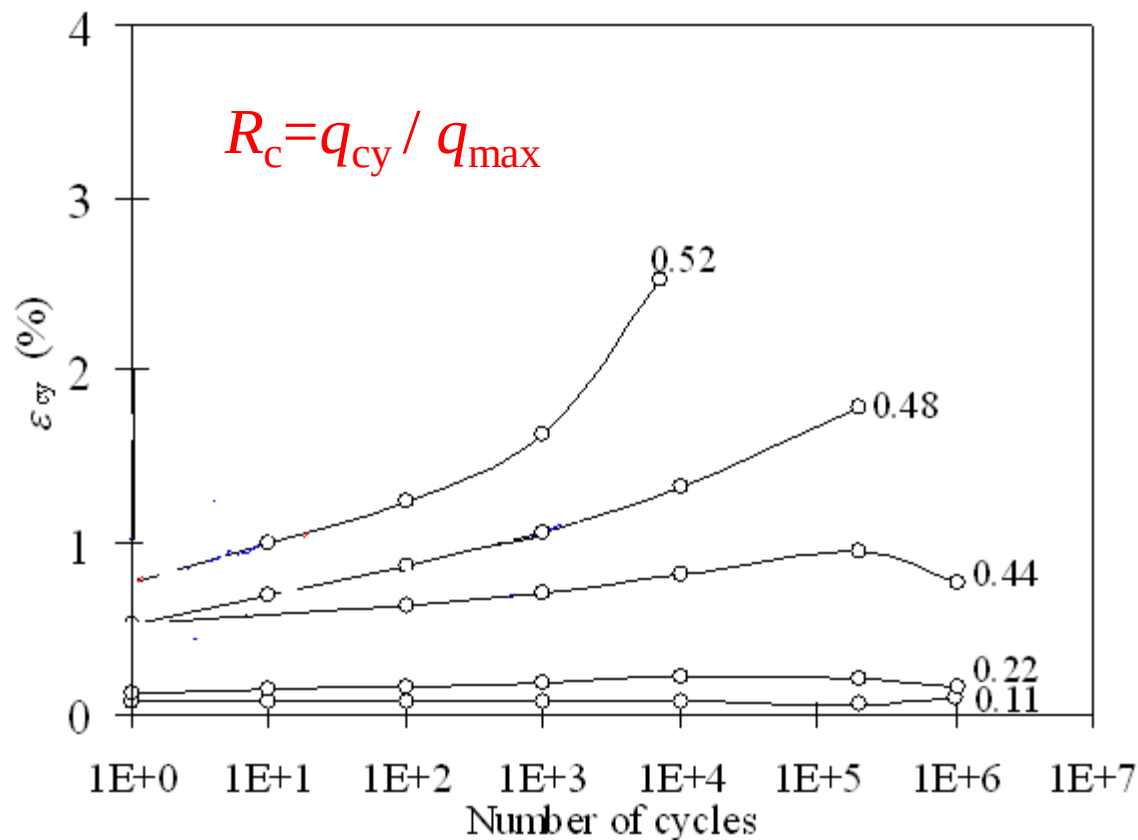
La **distribution aléatoire** des fissures dans les échantillons prélevés, donnant lieu à des réponses très variables a conduit à réaliser des essais triaxiaux cycliques non drainés symétriques sur l'**argile reconstituée**, à **très grand nombre de cycles** ( $> 10^6$  cycles),  $f = 1$  Hz, reconsolidation à 400 kPa, contrainte effective initiale 100 kPa (**OCR = 4**).



## Amplitude de déformation déviatoire en fonction du nombre de cycles pour diverses amplitudes cycliques symétriques ( $R_c$ )



Pour l'argile de Merville, le seuil de grandes déformations cycliques se situe vers  $R_c = 0,45$ , manifestant un comportement pratiquement rigide plastique, également constaté sur les pieux d'essais





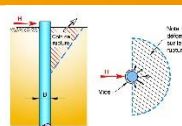
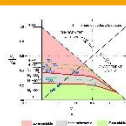
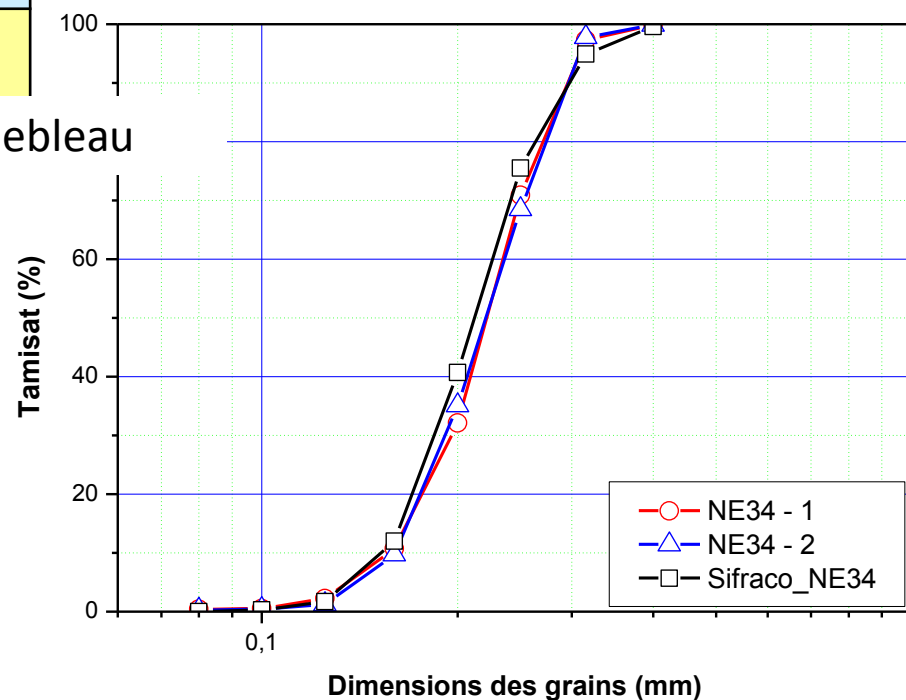
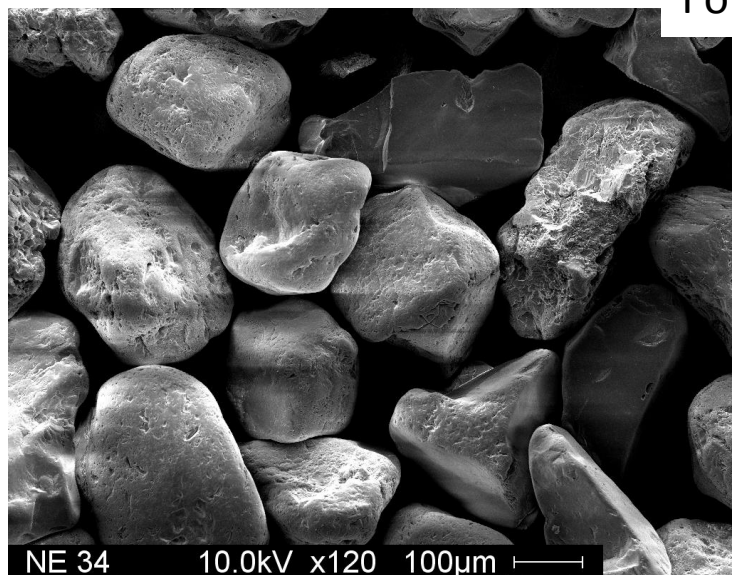
## ► Sables de Fontainebleau NE34 (≈ Dunkerque) et de Loon-Plage

(J. Canou, J.-C. Dupla, thèses I. Andria Ntoanina et R. Muhammed)

Fontainebleau, purement siliceux; Loon-Plage principalement siliceux, traces de coquilles (8%), granulométries voisines

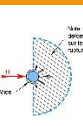
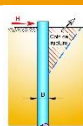
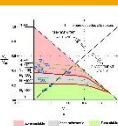
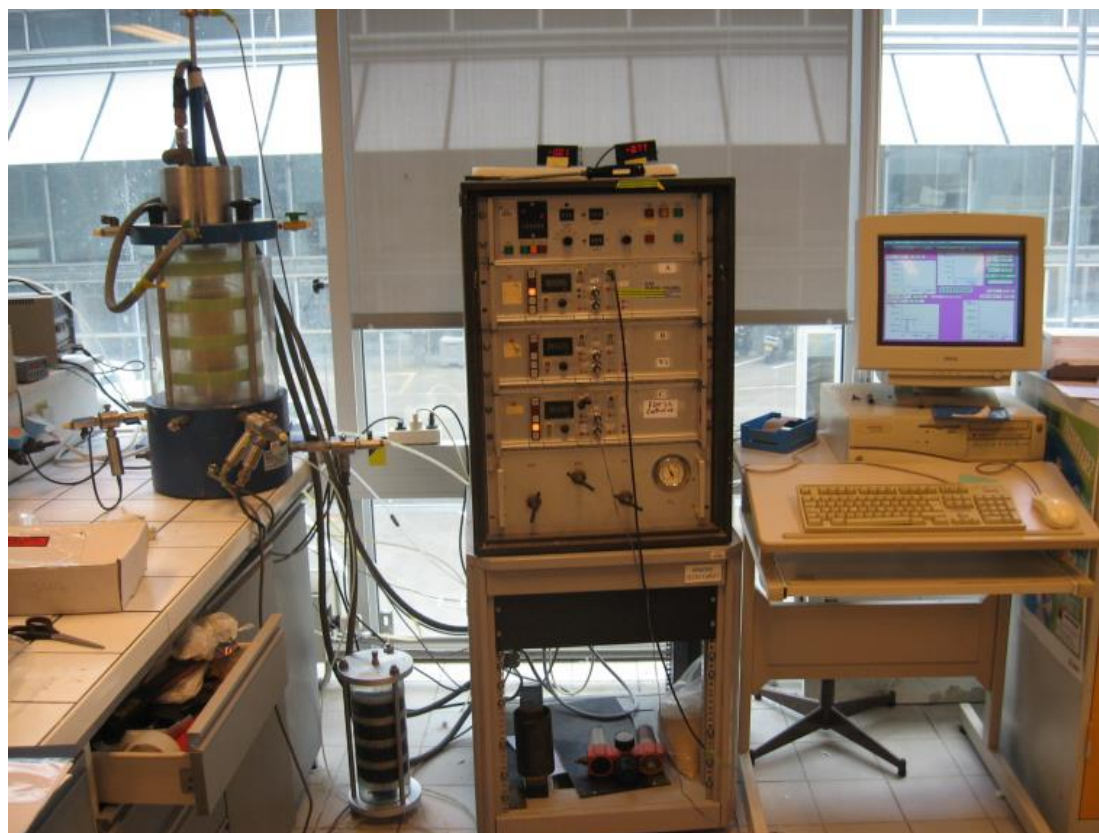
| $d_{50}$ (mm) | $C_U$ | $G_S$ | $e_{min}$ | $e_{max}$ | Forme des grains |
|---------------|-------|-------|-----------|-----------|------------------|
| 0,206         | 1,49  | 2,65  | 0,510     | 0,882     | sub-arrondie     |

Fontainebleau

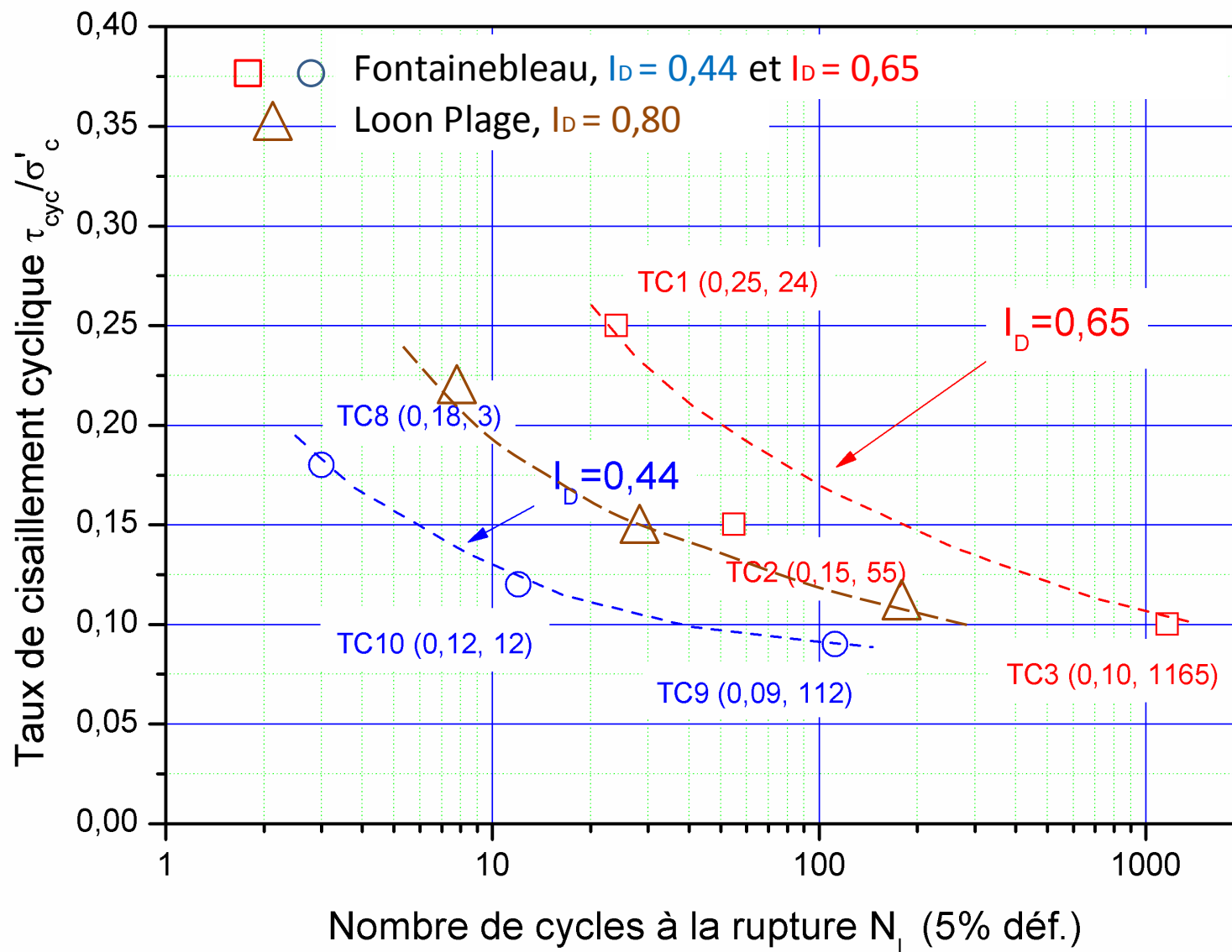




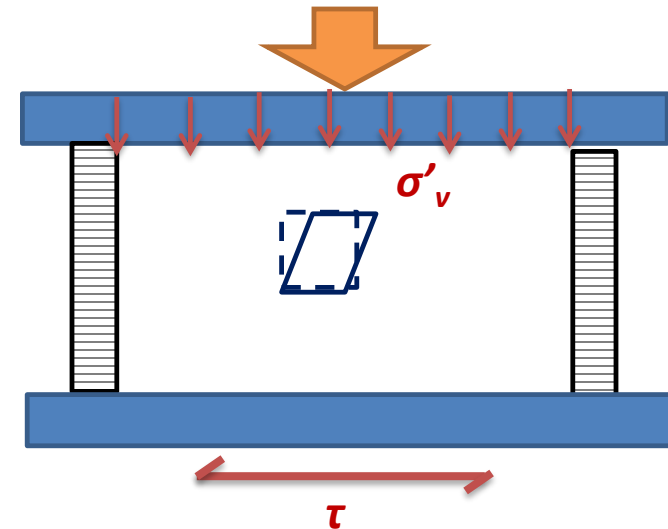
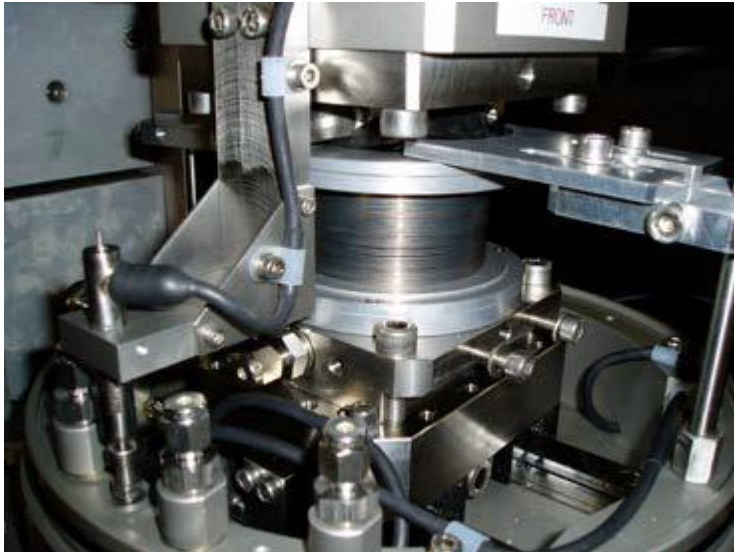
## DISPOSITIF EXPERIMENTAL, *cisaillement triaxial cyclique non drainé* ( $\Phi 70$ mm)



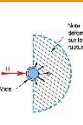
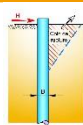
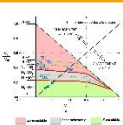
## Courbes de résistance cyclique sur chemin triaxial non drainé



## ► Cisaillement simple (DSS) sable de Fontainebleau à volume constant (C. Dano et thèses Wu et Yin)

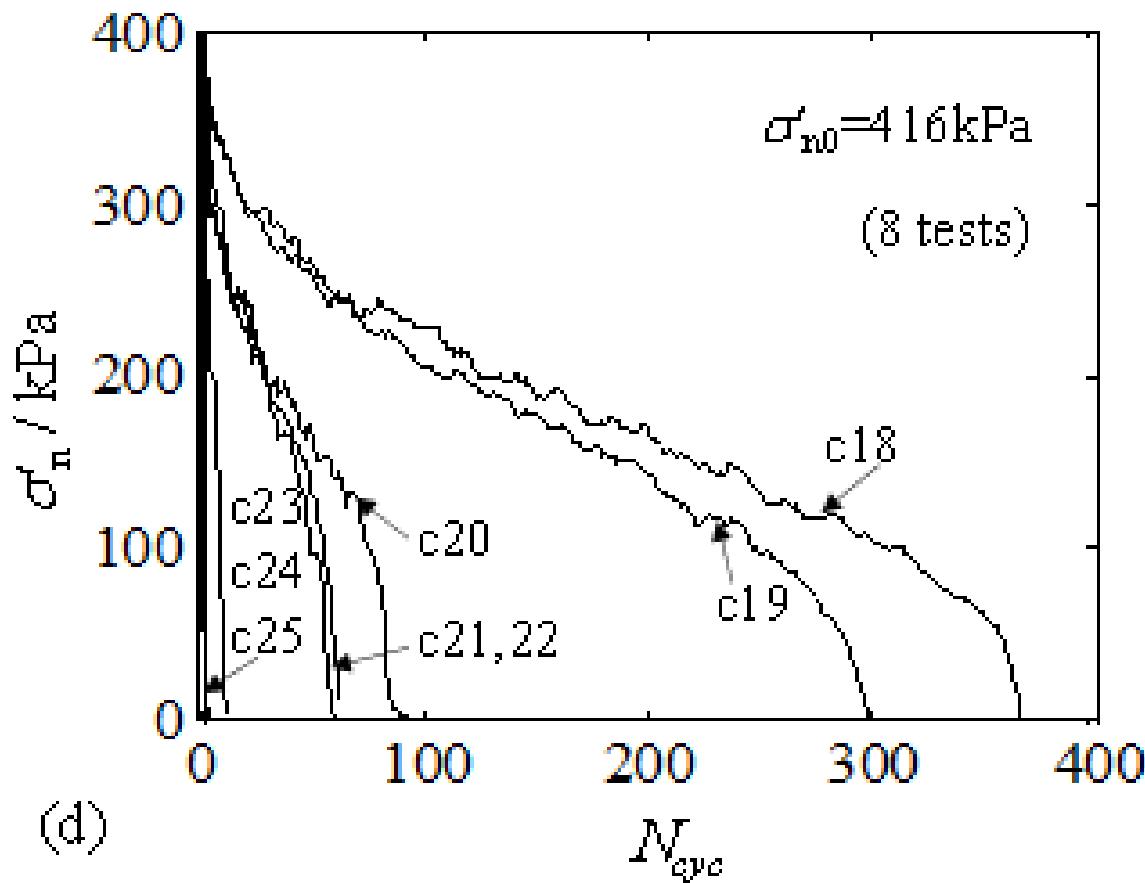


**Dispositif expérimental** - Diamètre échantillon 70 mm, hauteur 25 mm. Anneaux d'épaisseur 1 mm revêtus de téflon

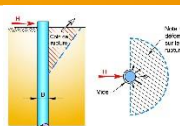
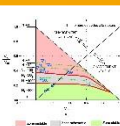


Chute de contrainte normale observée lors du cisaillement simple symétrique à volume constant. Contrainte normale initiale 416 kPa.  $I_D \approx 0,65$ . Diverses amplitudes cycliques.

**Chute (dégradation) de contrainte normale très rapide!**

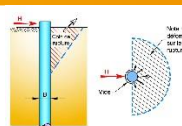
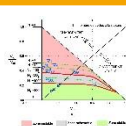
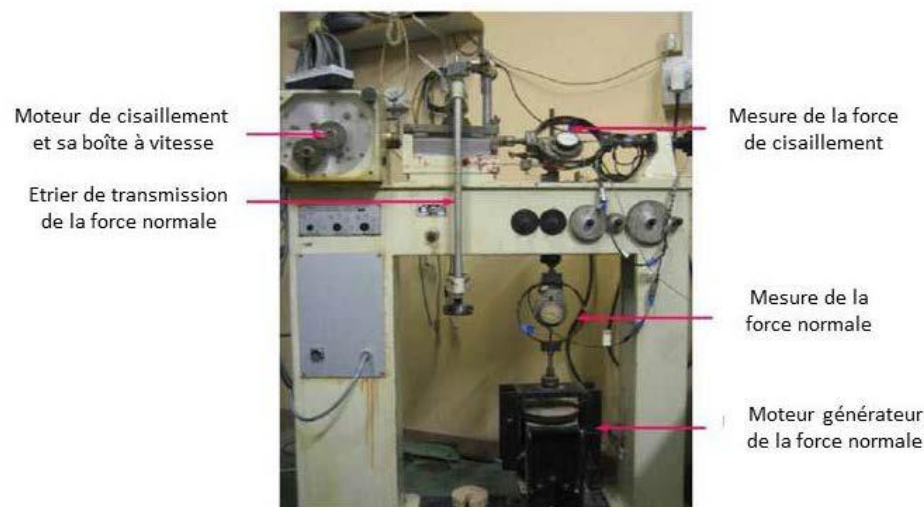
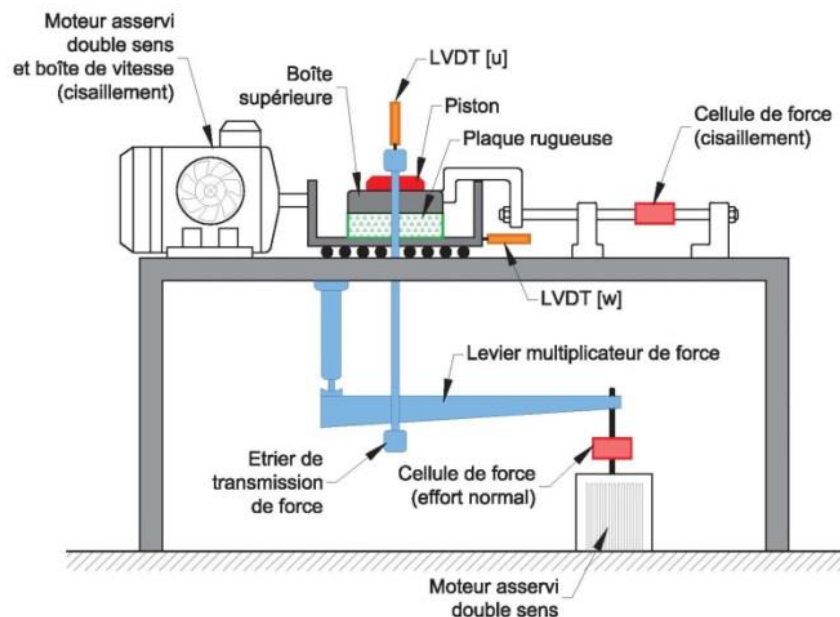


| Essai | $\tau_{cyc}$ (kPa) | $\tau_{cyc} / \sigma'_{n0}$ |
|-------|--------------------|-----------------------------|
| C18   | 10,4               | 0,025                       |
| C19   | 10,4               | 0,025                       |
| C20   | 20,8               | 0,05                        |
| C21   | 20,8               | 0,05                        |
| C22   | 20,8               | 0,05                        |
| C23   | 31,2               | 0,075                       |
| C24   | 41,6               | 0,1                         |
| C25   | 69,0               | 0,167                       |



## ► Cisaillement direct sol-structure à rigidité normale imposée (CNS) (M. Boulon, thèse S. Pra-ai, Master G. Pittos)

**Dispositif expérimental.** On mesure les **contraintes** normale et de cisaillement, ainsi que les **déplacements relatifs** normal et tangentiel entre plaque rugueuse (simulant la structure) et échantillon de sol. La **contrainte normale  $\sigma_n$**  et le **déplacement relatif normal  $[u]$**  sont **asservis** pendant l'essai par le logiciel d'acquisition asservissement.



## Conditions aux limites et types d'essais réalisés

$\sigma_n$  : contrainte normale

$\sigma_{n0}$  : contrainte normale initiale

$[u]$  : déplacement relatif normal

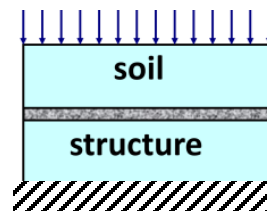
$[u]_0$  : déplacement relatif normal sous  $\sigma_{n0}$

Consigne d'asservissement

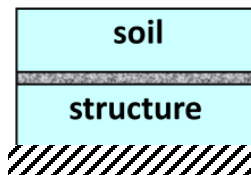
$$\sigma_n - \sigma_{n0} = k_n([u] - [u]_0)$$

$k_n$  est la rigidité normale externe imposée à l'interface: 3 possibilités

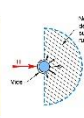
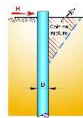
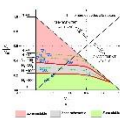
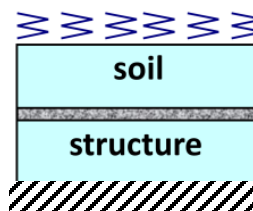
**CNL** = contrainte normale constante,  
ou  $k_n = 0$



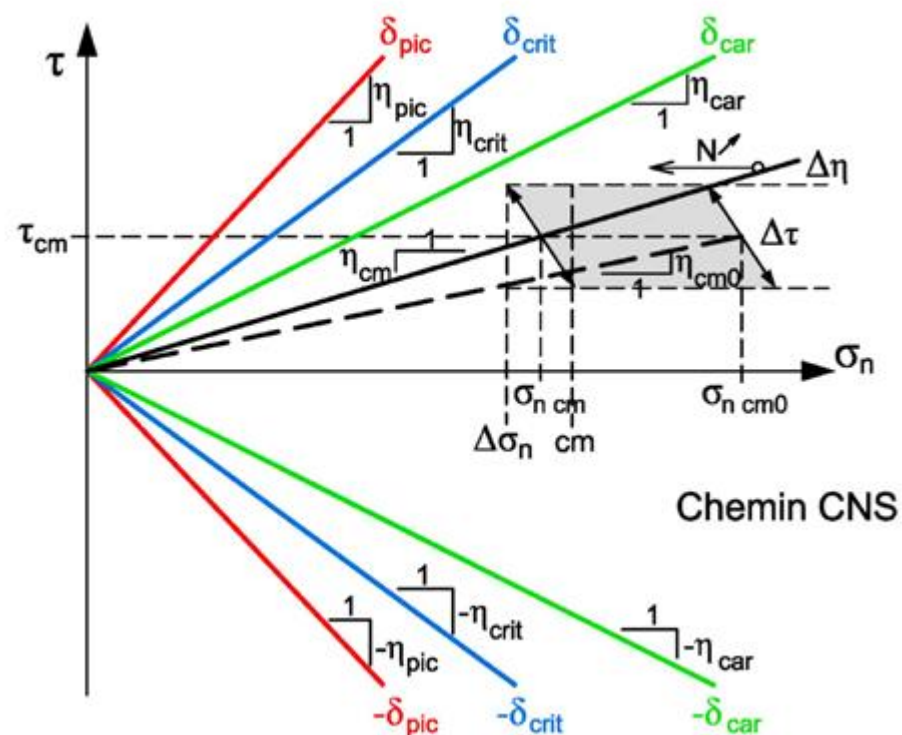
**VC** = volume constant, ou  
 $k_n \rightarrow \text{infini}$



**CNS** = rigidité normale imposée,  
Ou  $k_n > 0$







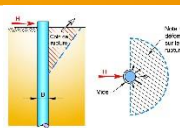
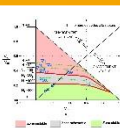
$$\eta_{cm} = \tan \delta_{cm} = \frac{\tau_{cm}}{\sigma_{ncm}} \quad \Delta \eta = \frac{\Delta \tau}{\sigma_{ncm}}$$

$$I_{D0} \quad \sigma_{n\,cm0} \quad \eta_{cm0} \quad \Delta\tau \quad k_n$$




Programme d'essais (N = 10000 cycles, sauf si rupture anticipée) → **Banque de données**

| Condition | $I_{D0}$<br>(%) | $\sigma_{n\ cm0}$<br>(kPa) | $\eta_{cm0}$<br>(-)                            | $\Delta \tau$<br>(kPa) | $k_n$<br>(kPa/mm) |
|-----------|-----------------|----------------------------|------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
| CNL       | 30, 90          | 60                         | $0 ; \approx 1/2 \eta_p ; \approx 9/10 \eta_p$ | 10                     | -                 |
|           |                 | 120                        | $0 ; \approx 1/2 \eta_p ; \approx 9/10 \eta_p$ | 10                     | -                 |
|           |                 | 310                        | $0 ; \approx 1/2 \eta_p ; \approx 9/10 \eta_p$ | 10, 20, 40             | -                 |
| CNS       | 30, 90          | 100                        | $\approx 1/2 \eta_p$                           | 10, 20                 | 1000, 2000, 5000  |



Essai CNS typique

$\sigma_{n\text{ cm}0} = 310 \text{ kPa}$

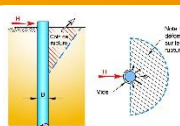
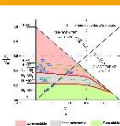
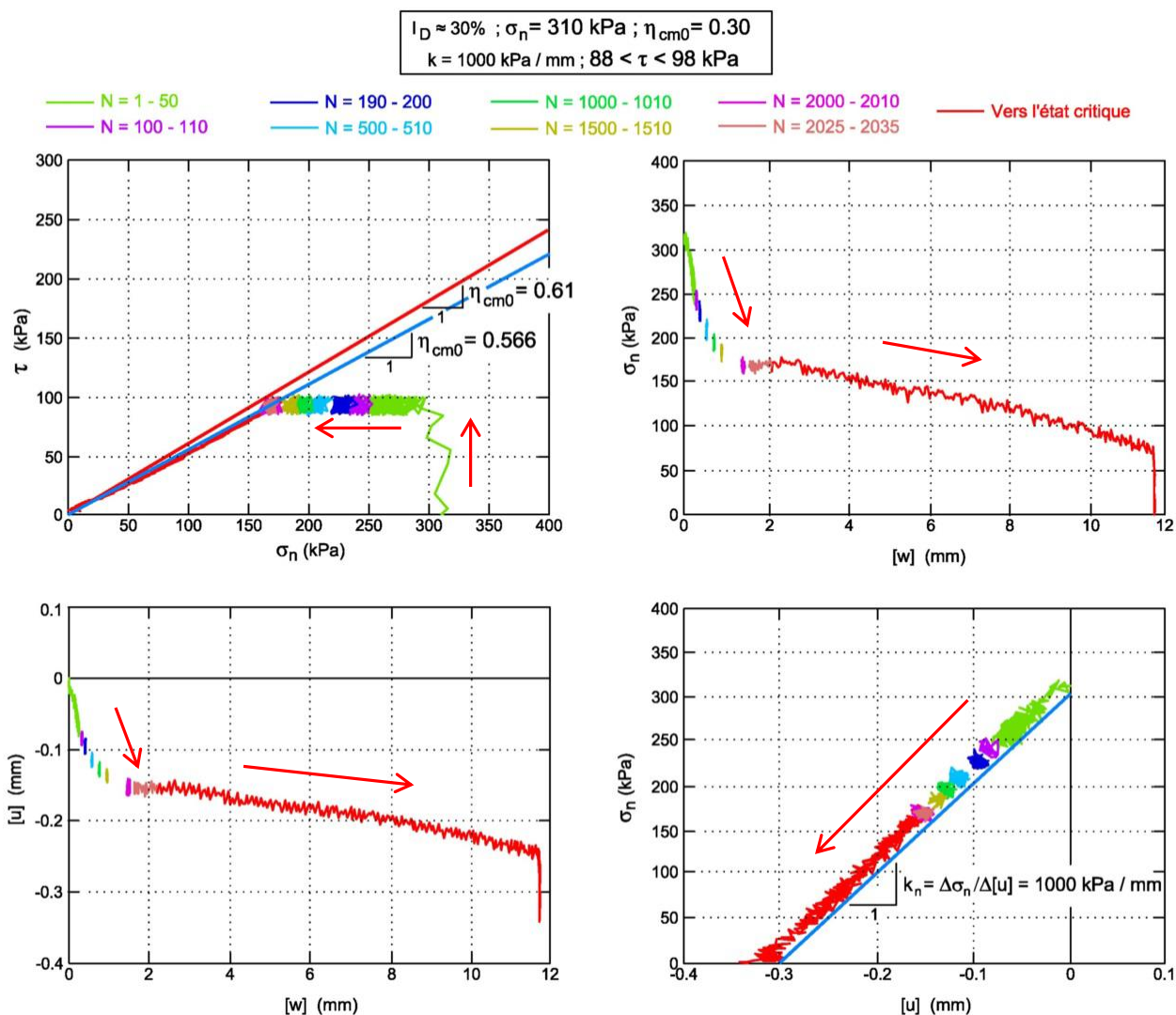
$\Delta\tau = 10 \text{ kPa}$

$I_{D0} = 30\%$

$k_n = 1000 \text{ kPa/mm}$

Dégradation  
relativement lente  
de la contrainte  
normale

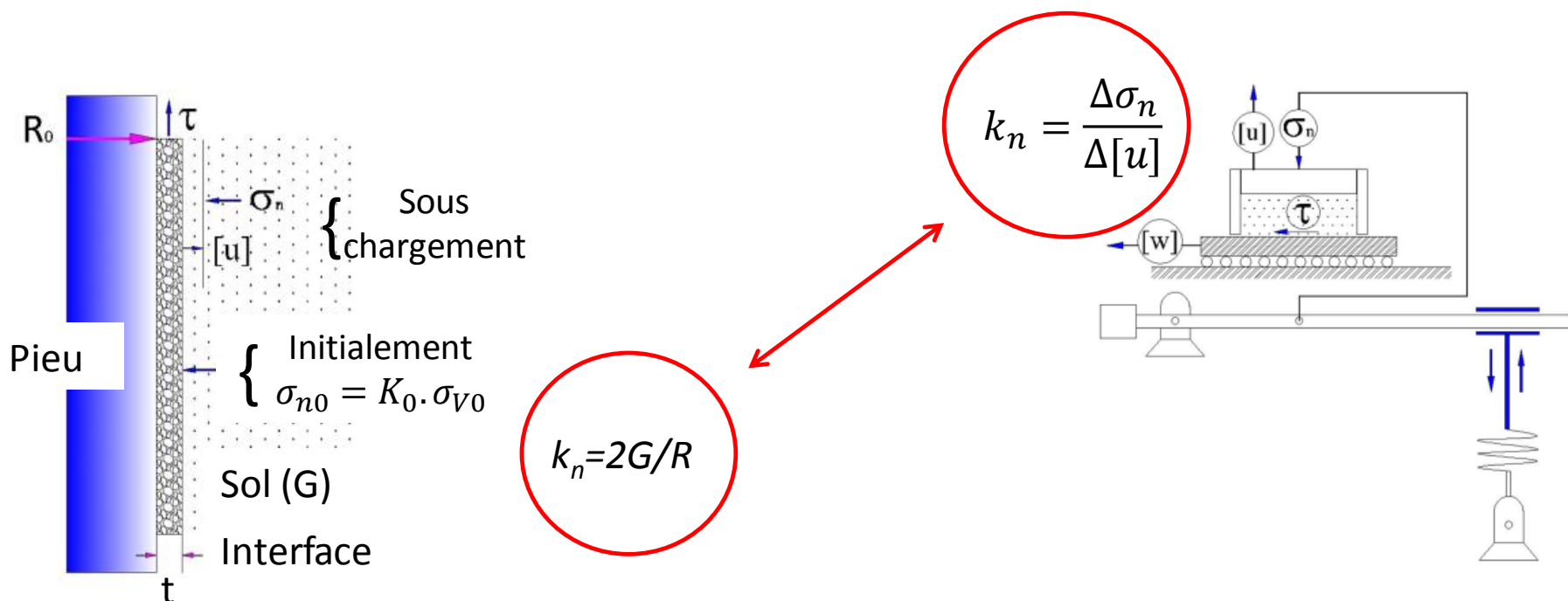
Les essais CNS  
sont toujours  
contractants



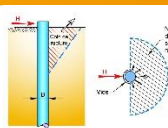
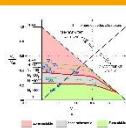
## Interprétation en vue de l'utilisation pour les pieux sous chargement cyclique axial

A partir de la banque de données des essais de cisaillement direct CNL et CNS, on formule la **dégradation (chute) de la contrainte normale, lors des essais , et ainsi** effective le long des pieux chargés axialement

$$\Delta\sigma_{n\,cm} = f(l_{D0}, \sigma_{n\,cm0}, \eta_{cm0}, \Delta\eta, k_n, N)$$

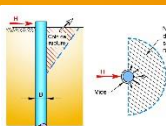
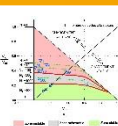
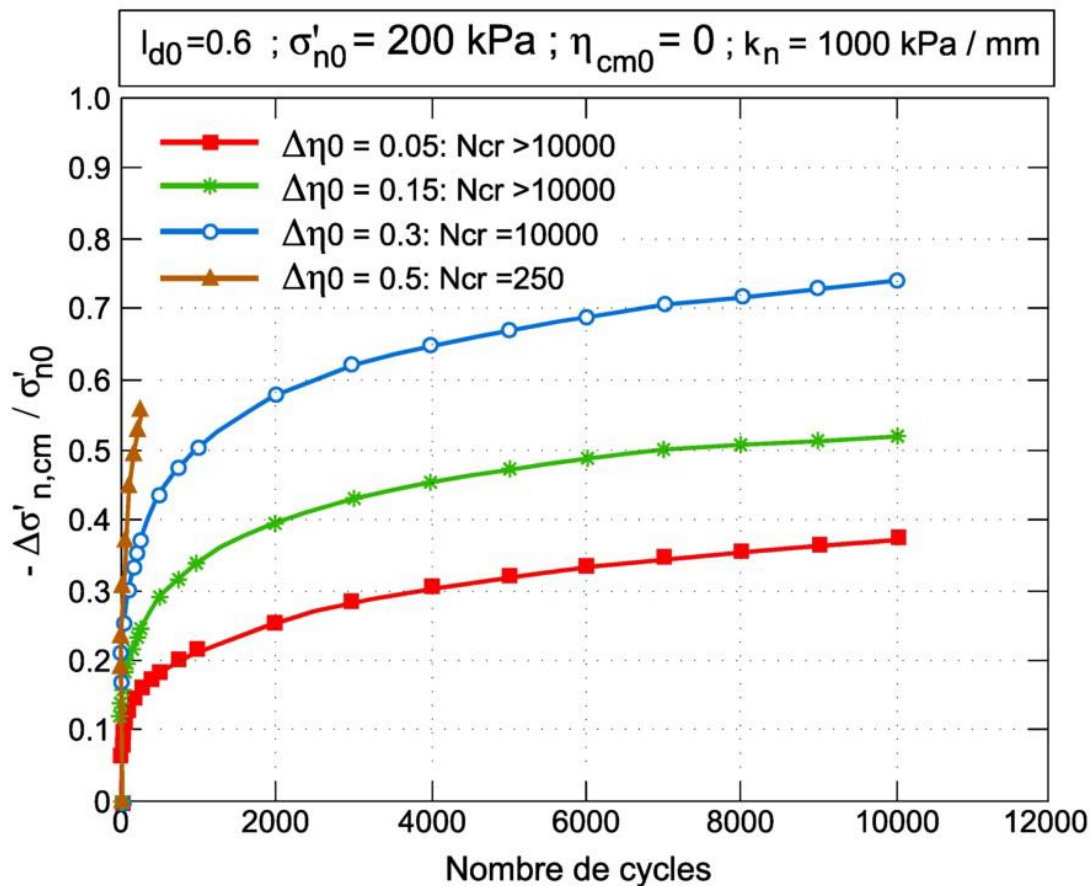


Boulon & Foray, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on numerical methods in offshore piling, Nantes, 1986.



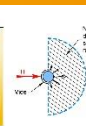
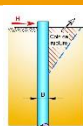
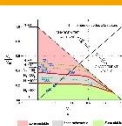
## Un abaque de dégradation de contrainte normale effective (module SOLCYP-DEG).

*Voir exposé de S. Burlon pour application aux pieux sous effort axial cyclique, avec méthode des coefficients de raideur (courbes tz-c) et/ou des éléments finis*

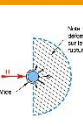
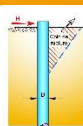
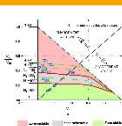


- ▶ ARGILES: les essais triaxiaux non drainés de Merville reconstituée,  $OCR = 4$ , montrent, par les déplacements cycliques cumulés, un comportement  $\approx$  rigide plastique, que l'on retrouve sur les essais de pieux.

- 
- ▶ SABLES:
    - ❖ les essais triaxiaux non drainés sur Fontainebleau et Loon-Plage indiquent une résistance cyclique conventionnelle (déformation = 5%) fonction décroissante du déviateur cyclique.
    - ❖ Les essais DSS à volume constant exhibent une **rapide dégradation de la contrainte normale effective** au cours des cycles.



- ❖ Les essais de cisaillement direct sol-structure CNS (à rigidité normale imposée) montrent aussi une **dégradation de la contrainte normale effective, plus lente que sur chemin DSS.**
- 
- La **dégradation du frottement latéral** des pieux sous sollicitation axiale cyclique provient de la **dégradation cyclique de la contrainte normale le long du fût.**
  - L'approche SOLCYP recommande l'utilisation d'essais CNS pour caractériser cette dégradation.
  - La banque de données existante sur sable de Fontainebleau, complétée par le module SOLCYP-DEG, constituent un guide d'évaluation de la dégradation pour d'autres sols, au prix d'un petit nombre d'essais.





- ▶ Merci à l'IREX pour avoir longuement, patiemment soutenu le projet SOLCYP
- ▶ Merci à tous mes collègues de l'ANR et du programme national SOLCYP pour leur vaillance avérée au fil de ces (8) années
- ▶ Merci aux participants à cette journée de restitution. Ils jugeront, j'espère, que nous apportons un vrai guide de travail sur les pieux sollicités cycliquement (à voir?)

