

Journée du CFMS du 7 avril 2006

*« Sollicitations cycliques et fatigue en géotechnique »*

Comportement des fondations profondes sous sollicitations cycliques

*J. Canou\*, J.-C. Dupla\*, A. Le Kouby\*\**

*\*CERMES, Institut Navier (ENPC/LCPC)*

*\*\* LCPC*

### ***PLAN DE L'EXPOSE***

- Exemples de sollicitations cycliques sur les fondations profondes
- Cadre de la présentation : chargements axiaux
- Mécanismes élémentaires de comportement
- Comportement global du système sol-pieu
- Concept de diagramme de stabilité cyclique
- Conclusions

### **SOLLICITATIONS « CYCLIQUES » :**

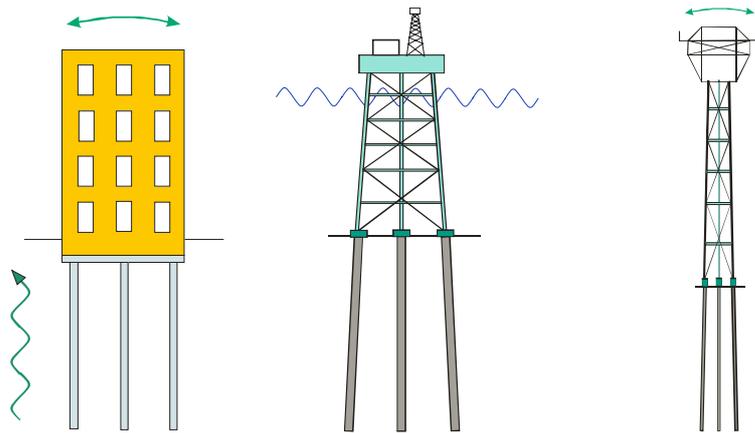
**Grande diversité de sollicitations environnementales et industrielles entraînant des chargements « cycliques » ou « répétés » des fondations, de caractéristiques très variées (fréquences, amplitudes, régularité, nombre de cycles caractéristique, etc.)**

### **Sollicitations environnementales :**

- **Séisme** (*tous types de structures*)
- **Houle** (*structures offshore, portuaires*)
- **Vent** (*pylônes, éoliennes, structures élancées diverses*)
- **Cycles divers, journaliers, saisonniers** : fluctuations de paramètres tels que température, niveau de nappe, marées,... (*tous types de structures*)

### **Sollicitations industrielles :**

- Circulation de véhicules divers (*infrastructures de transport*)
- Dispositifs de manutention (*quais, espaces industriels*)
- Machines tournantes, vibrantes (*bâtiments industriels, éoliennes*)
- Vidange et remplissage de réservoirs (*silos, stockage d'hydrocarbures, barrages, ...*)
- Processus divers tels que battage, vibrofonçage, vibroflottation, ...

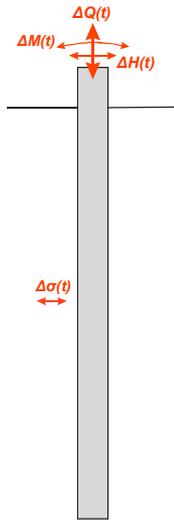


*Bâtiment soumis à séisme*

*Plate-forme jacket soumise à l'action de la houle*

*Pylône soumis à l'action du vent*

### Cas général



$$Q(t) = Q_0 + \Delta Q(t)$$

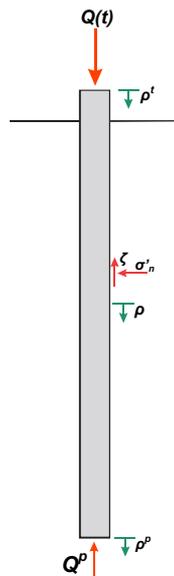
$$H(t) = H_0 + \Delta H(t)$$

$$M(t) = M_0 + \Delta M(t)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta \sigma(t)$$

Comportement global sous chargement combiné  
généralement très complexe

### Cadre de la présentation : cas des chargements axiaux



$$Q(t) = Q_0 + \Delta Q(t)$$

$$Q(t) = Q^p(t) + Q^s(t)$$

$Q^p$  : résistance de pointe

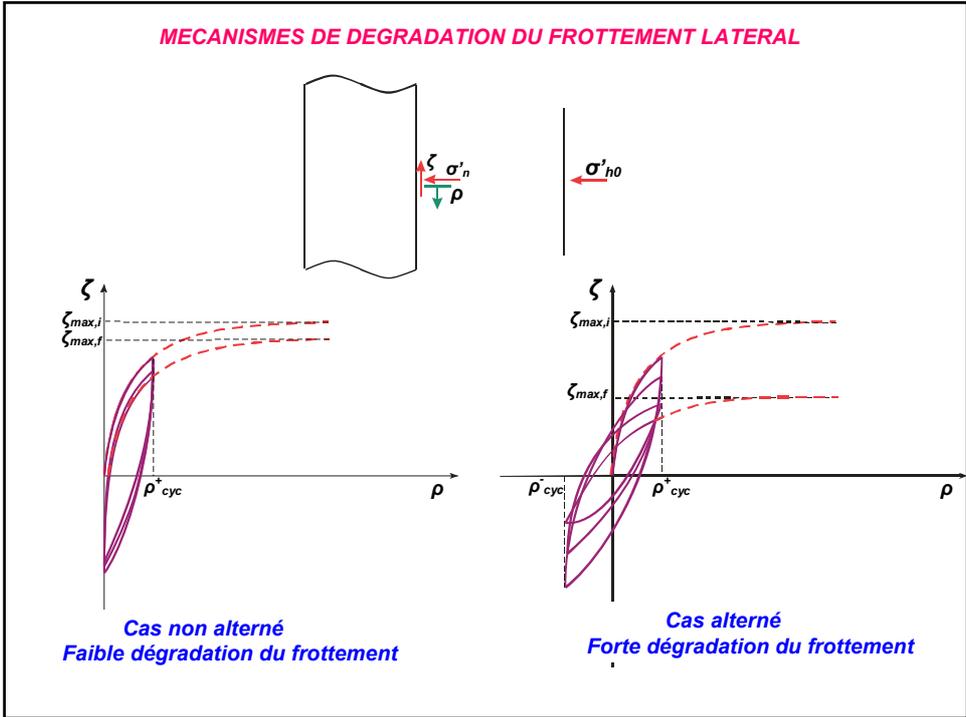
$Q^s$  : résultante du frottement latéral

$\zeta$  : contrainte de cisaillement locale

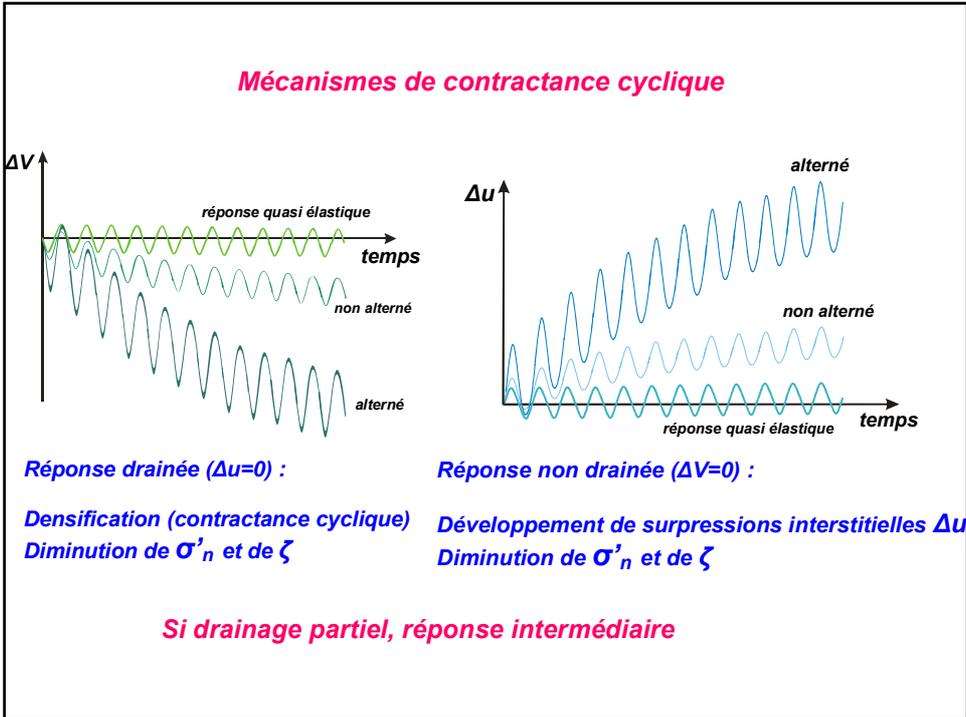
$\sigma'_n$  : contrainte normale effective locale

$\rho$  : déplacement local le long du pieu

**MECANISMES DE DEGRADATION DU FROTTEMENT LATERAL**



**Mécanismes de contractance cyclique**



### ***Autres facteurs possibles de dégradation***

- Rupture des grains, attrition (sables)
- Remaniement, destructuration progressive (argiles)
- Réorientation des particules (anisotropie induite)
- Localisation progressive des déformations le long de l'interface avec formation d'une surface de glissement

### ***Evolution de l'interface dans le temps après la séquence cyclique***

#### **•Cas drainé :**

- Redistribution des contraintes ?*
- Réaumentation de  $\sigma'_n$  ?*
- Renforcement à terme ?*

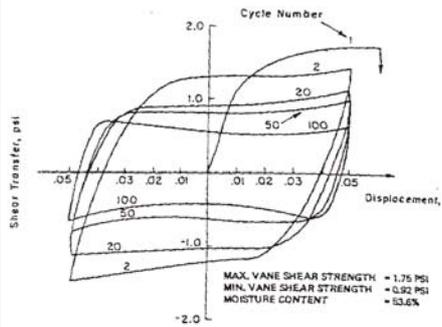
#### **•Cas non drainé :**

- Phénomène de consolidation avec réaumentation de  $\sigma'_n$*
- Etat final renforcé ?*

#### **•Notion de « cicatrisation »**

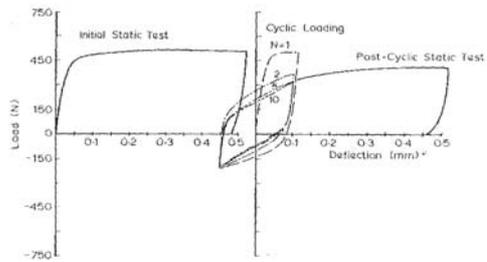
***Si la séquence cyclique n'amène pas le système à la rupture, celui-ci en sort-il à terme « renforcé » ?***

**Exemples de dégradation d'interface**



Cas d'une argile saturée

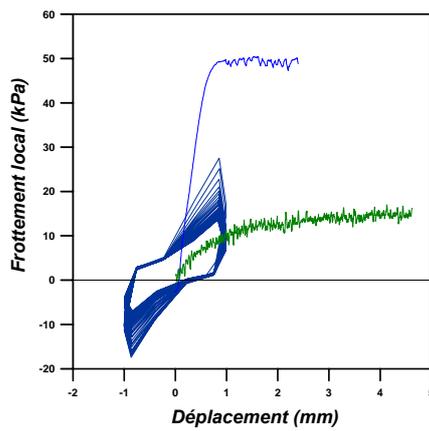
Matlock et al. (1982)



Cas d'un sable carbonaté

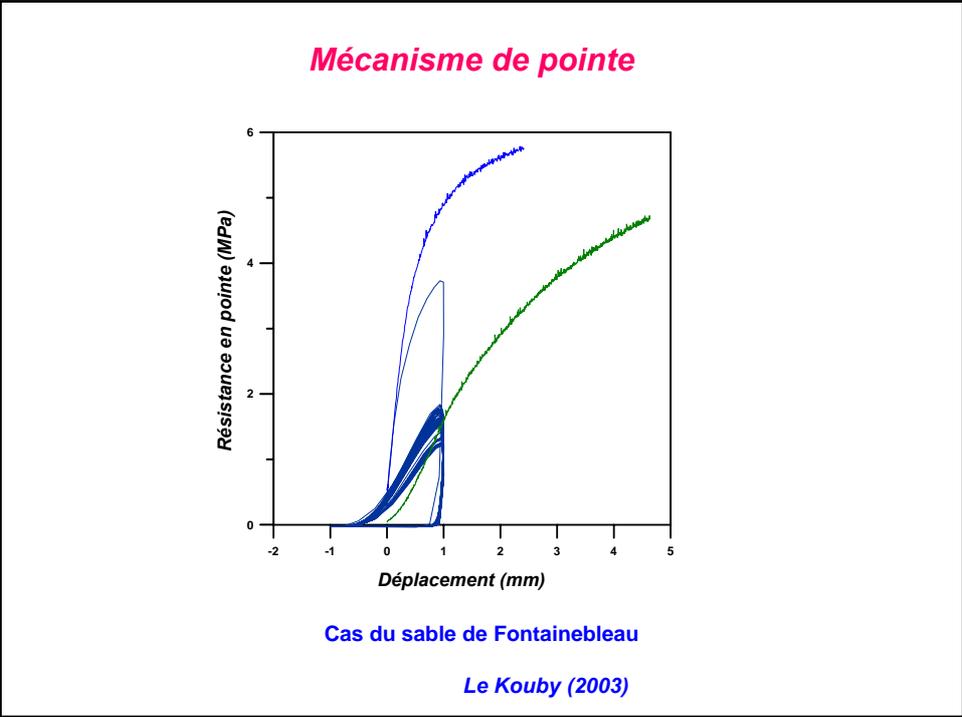
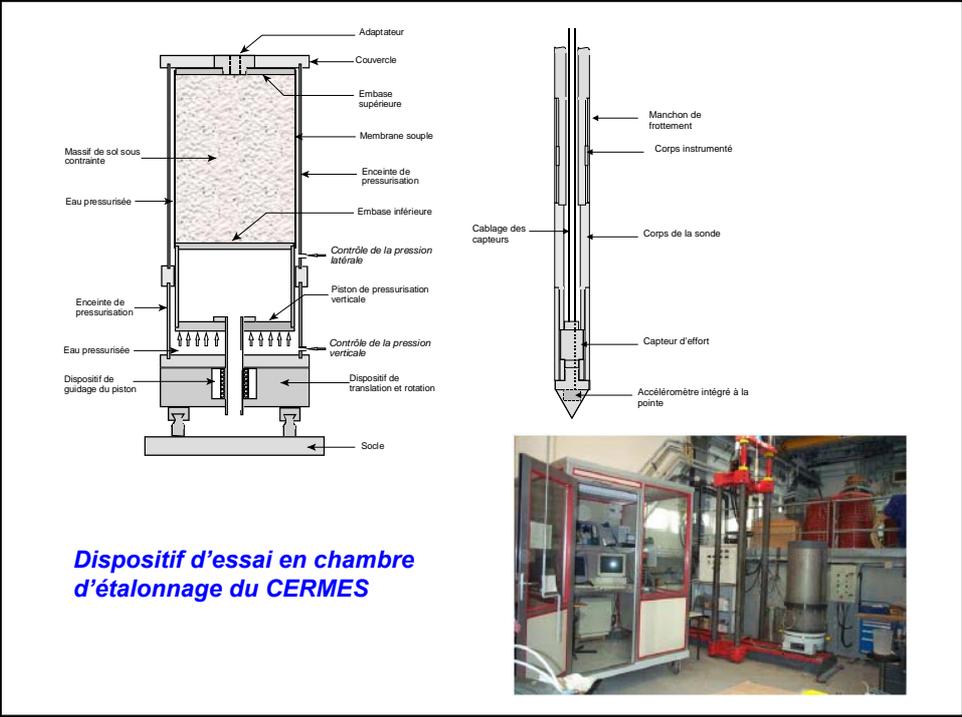
Poulos and Chan (1986)

**Exemples de dégradation d'interface**



Cas du sable de Fontainebleau

Le Kouby (2003)



## Mécanisme de pointe

Cas drainé :

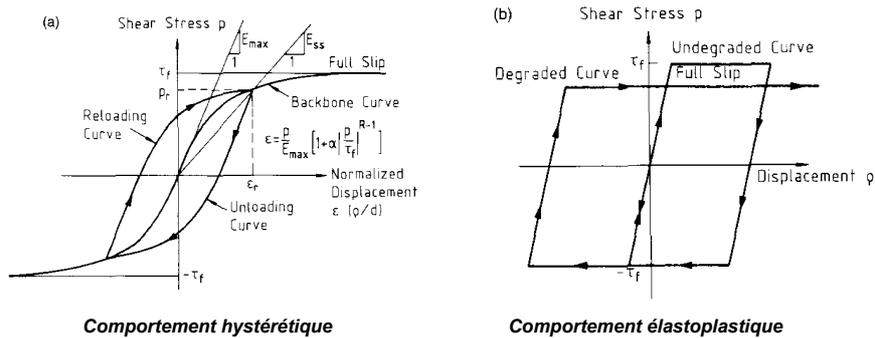
*Si remontée de la pointe à  $Q^t=0$ , phénomène de foisonnement (décollement éventuel) avec dégradation de la pointe*

*Sinon, densification et durcissement (écrouissage positif)*

Cas non drainé :

*Dégradation dans tous les cas par développement de surpressions interstitielles*

## Quantification de la dégradation des caractéristiques d'interface (travaux de Poulos et al.)



**Lois de dégradation :**

- **Frottement** :  $D_{\zeta} = \zeta_{f,cyc} / \zeta_{f,mon}$

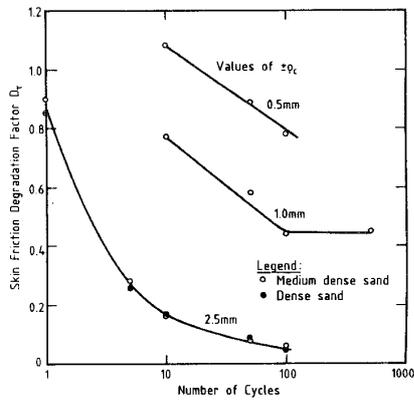
$D_{\zeta}(\rho_c)$  (Poulos, 1993)

$D_{\zeta} = (D'_{\zeta} - D_{\zeta,lim})(1-\lambda) + D_{\zeta,lim}$  (Matlock & Foo, 1979)

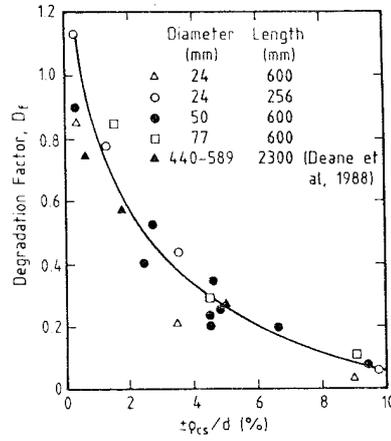
- **Module d'interface sécant** :  $D_E = E_{s,cyc} / E_{ss}$

- **Résistance de pointe** :  $D_B = Q_{p,cyc} / Q_{p,mon}$  (pris égal à 1)

### Evolutions du facteur de dégradation

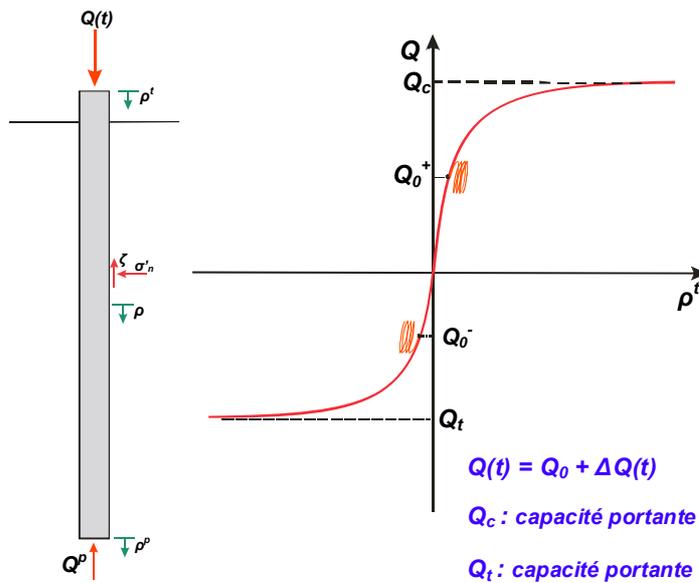


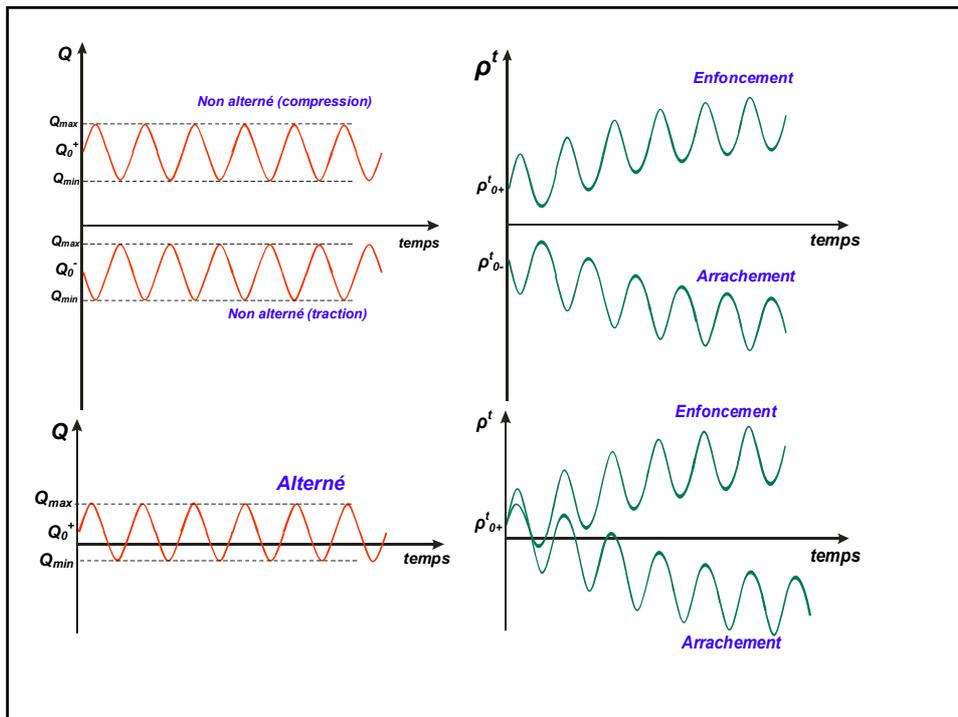
Lee & Poulos (1990)



Poulos (1989)

### Comportement global du système sol-pieu

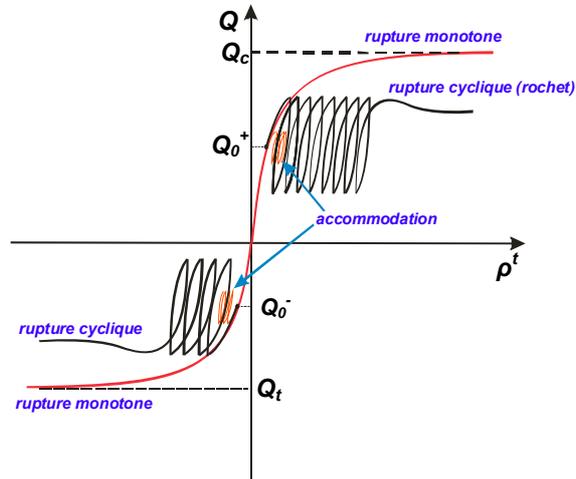




### **Effets potentiels des cycles**

- Aucune altération significative induite par les cycles
- Accumulation de déplacements significatifs pendant la séquence cyclique (sans rupture)
- Altération de la capacité portante statique du pieu induite par la séquence cyclique
- Rupture du système pendant la séquence cyclique

## Comportements globaux observés (cas non alternés)



## Comportements globaux observés

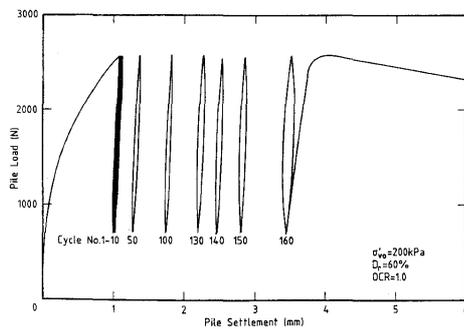
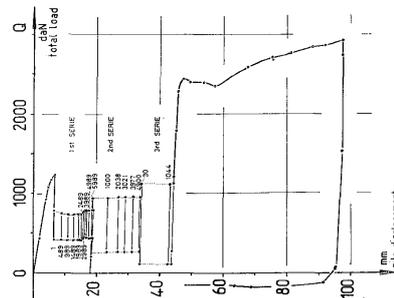


FIG.13 TYPICAL LOAD-CONTROLLED MODEL PILE TEST

**Lee & Poulos (1990)**

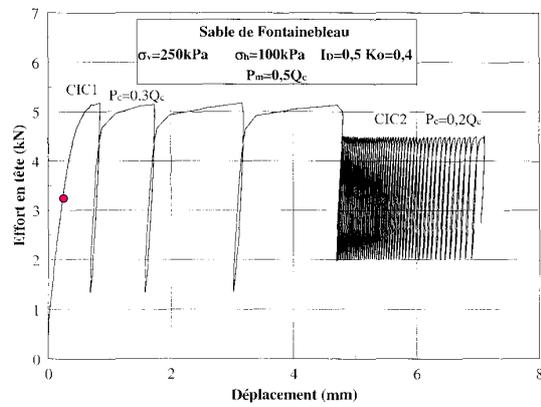
**Sable carbonaté, modèle phi 25 mm  
injecté dans forage préexistant**



**Boulon et al. (1980)**

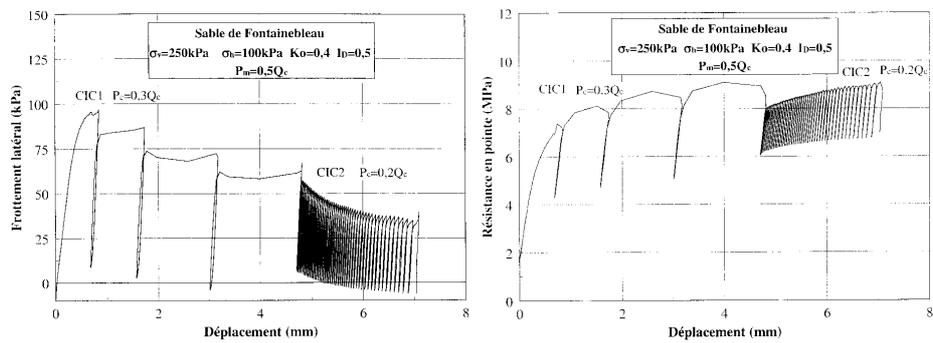
**Modèle phi 5,5 cm, préfabriqué,  
moulé en place en chambre  
d'étalonnage**

## Comportements globaux observés

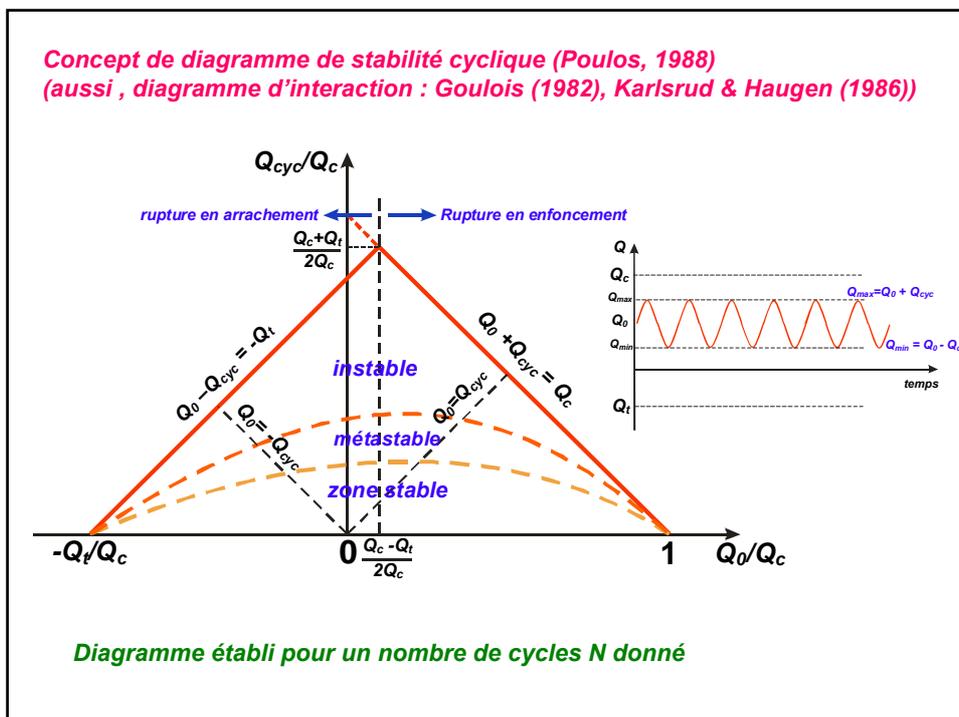
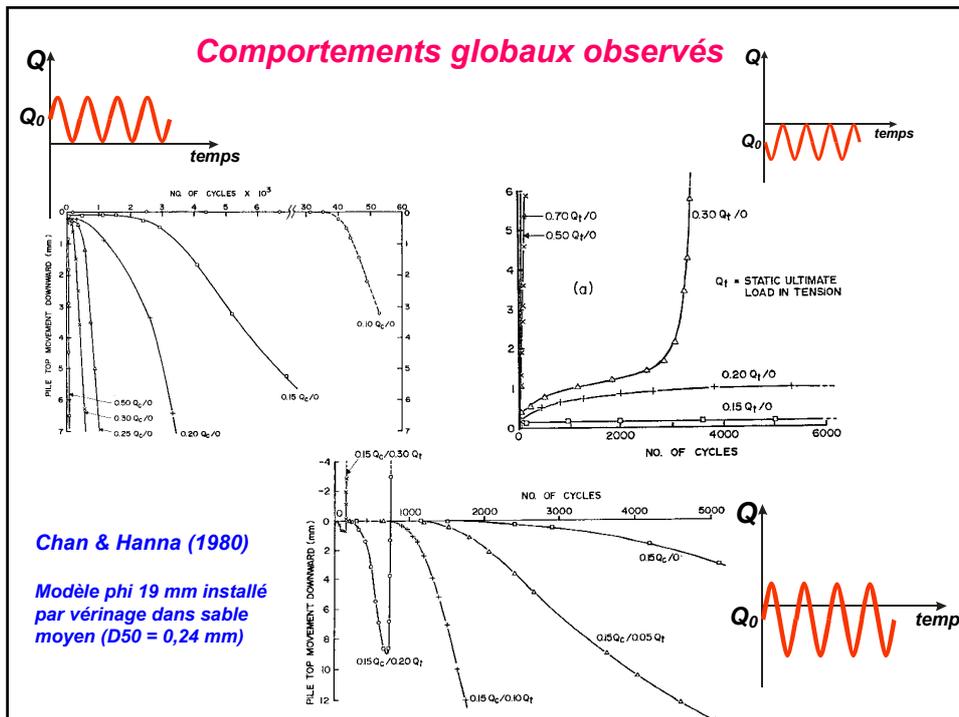


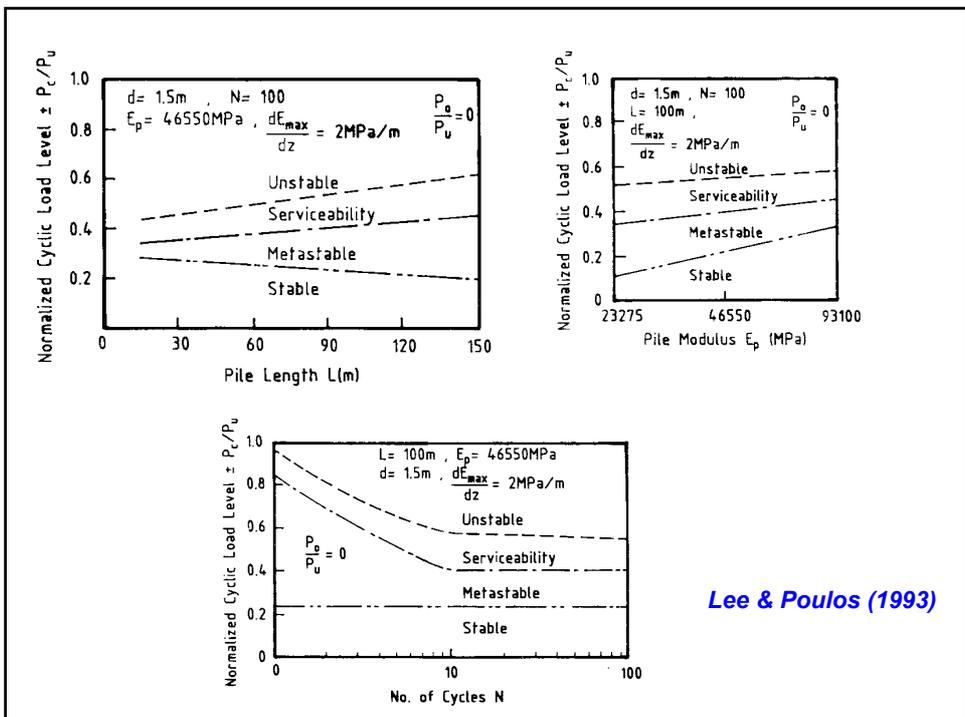
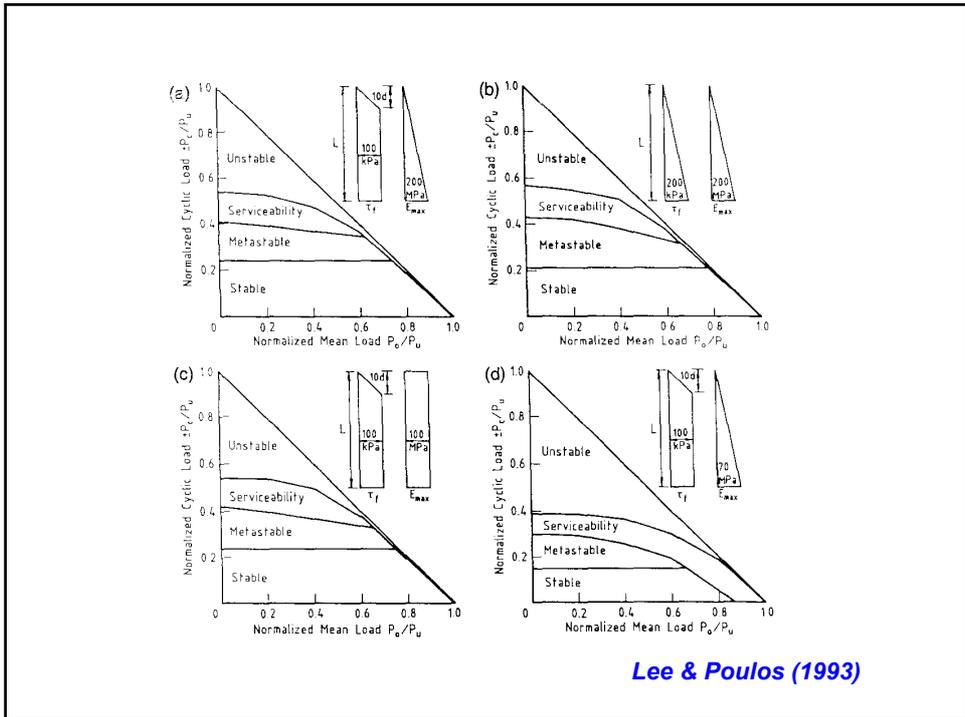
*Francis (1997)*

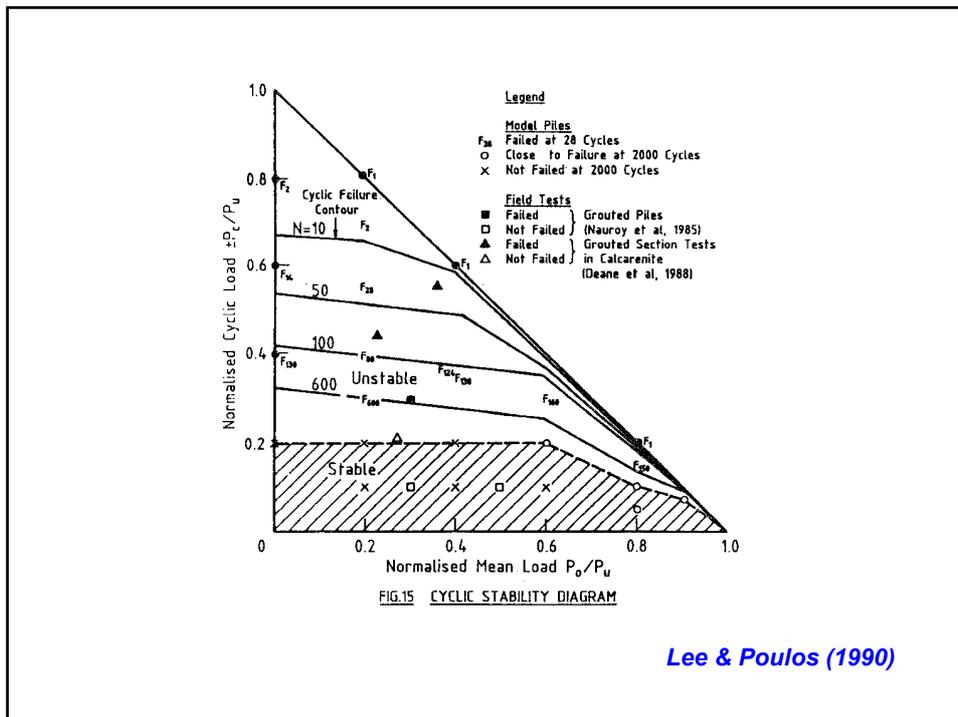
Sonde instrumentée (pointe et manchon)  $\phi$  20 mm



*Francis (1997)*







## CONCLUSIONS

- *Influence significative des sollicitations cycliques verticales, même de faible niveau, sur le comportement des pieux (sollicitations alternées traction-compression critiques)*
- *Travail encore nécessaire sur les mécanismes de dégradation du frottement (drainé, non drainé). Cas des grands nombres de cycles*
- *Intérêt du diagramme de stabilité cyclique (ou diagramme d'interaction), développé pour les pieux offshore, à étendre au domaine terrestre*
- *Résolution du problème global couplé reste très complexe :*
- *Chargements verticaux, latéraux, moments, effets dynamiques*
- *Nécessité de simplifications (légitimes...)*
- *Cas des groupes ...*