



Essais de pieux

Expériences sur modèles réduits centrifugés

J. Garnier, L. Thorel, N. Chenaf, S. Escofier, G. Rault
Division Reconnaissance et Mécanique des Sols
LCPC (Nantes)

Journée Technique du CFMS – 27 janvier 2010



La centrifugeuse géotechnique du LCPC

En service depuis 1986

Fréquence d'utilisation : 200 à 220 jours/an



Rayon : 5.5m

Masse modèle (max.) : 2 tonnes

Accélération (max.) avec 2 tonnes : 100g

Conception : Acutronic/Actidyn - LCPC



Bâtiment (Nantes)



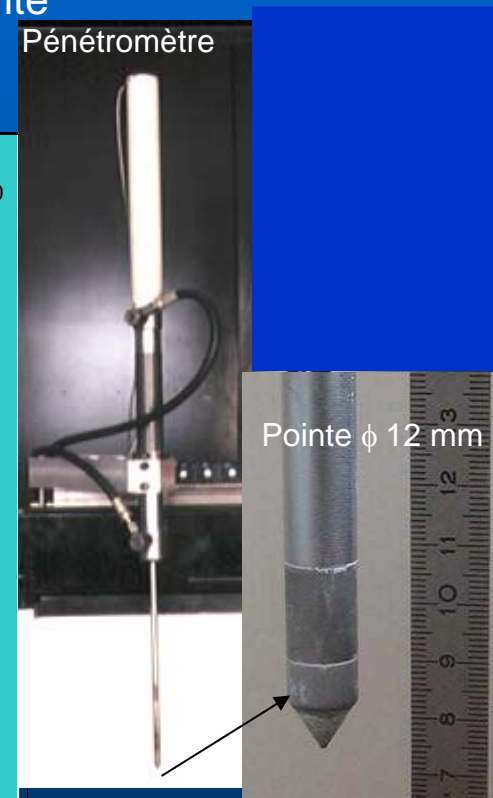
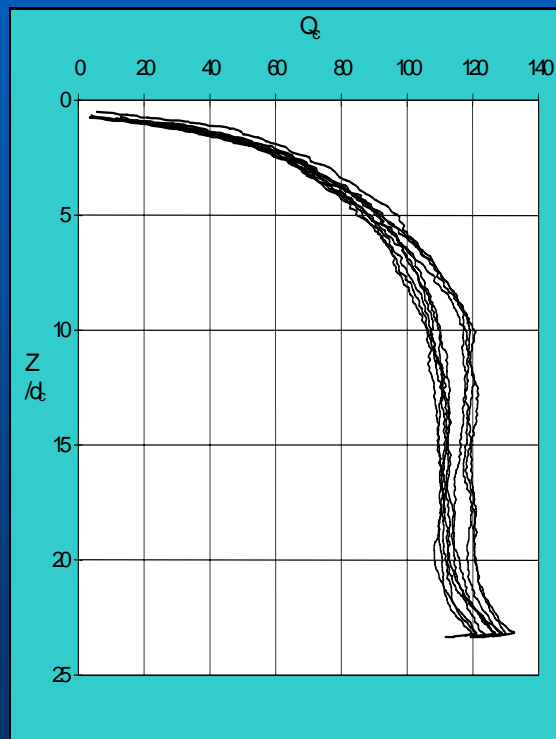
Préparation et caractérisation des massifs de sable

Salle et trémie de pluviation automatique



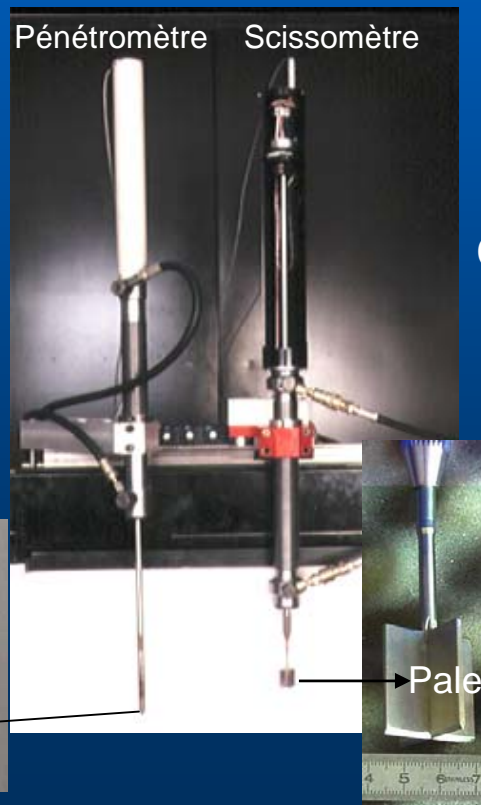
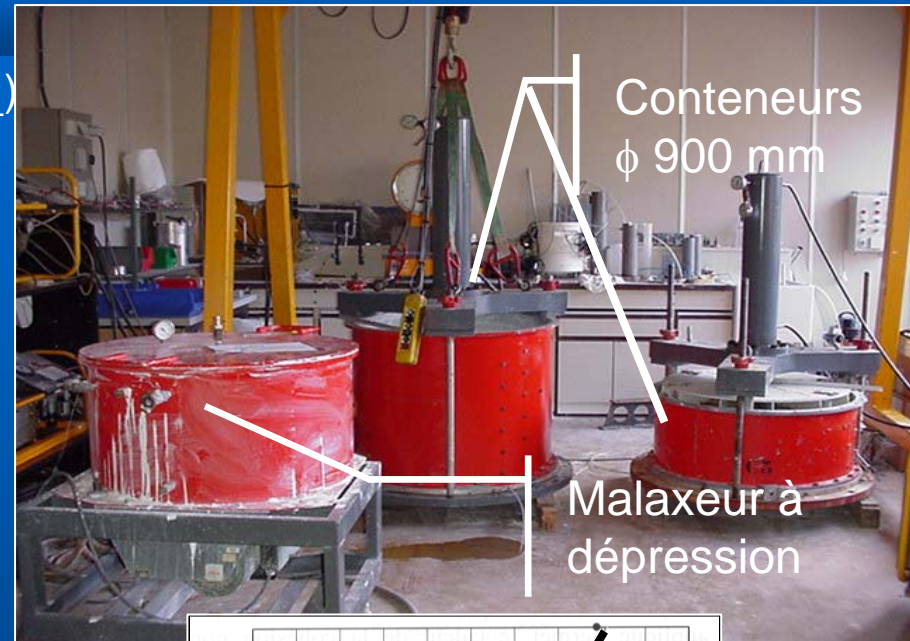
Résistance mécanique (pénétromètre)

Profils de résistance de pointe normalisée $Q_c = (q_c - \sigma_v') / \sigma_v'$



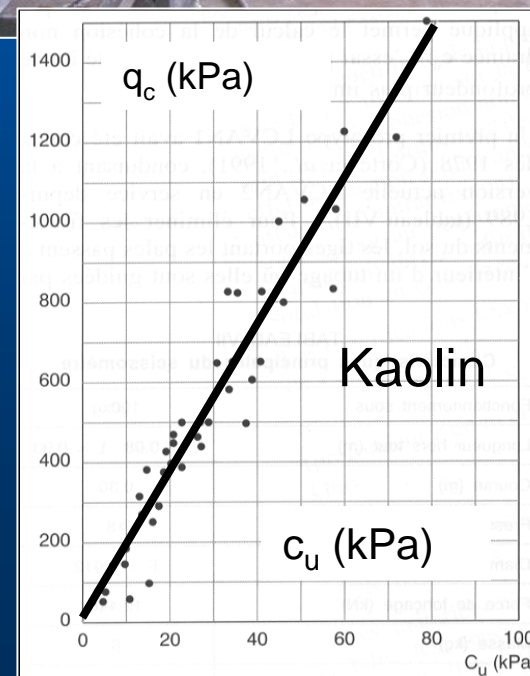
Préparation et caractérisation des massifs d'argile

- Malaxage argile+eau sous dépression ($w = 2w_L$)
- Consolidation de type oedométrique en conteneurs circulaires (ϕ 900 mm) ou rectangulaires (1200 mm x 800 mm)
- Essais in situ en cours de centrifugation (pénétromètre et scissomètre mobiles)



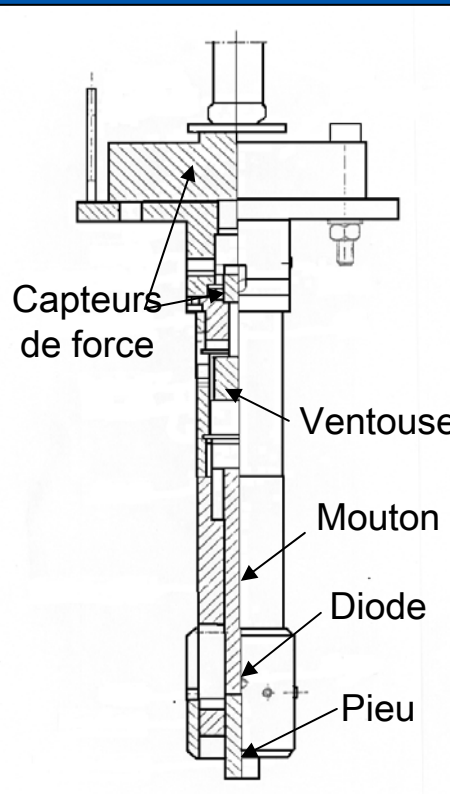
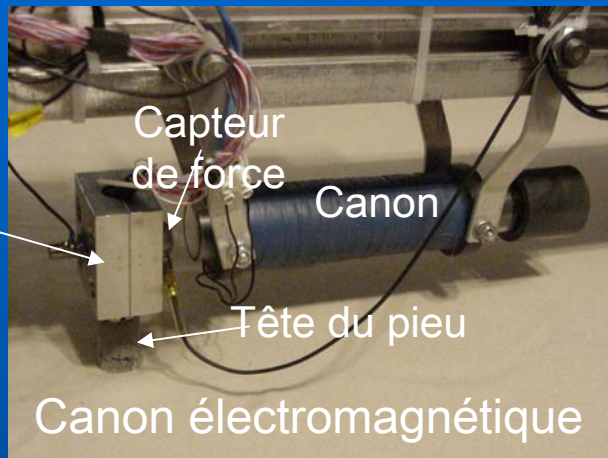
Corrélations q_c et c_u

$\text{Kaolin: } q_c = 18.5c_u$
 $\text{Rion: } q_c = 14.7c_u$
 $\text{Lysaker: } q_c = 15c_u$

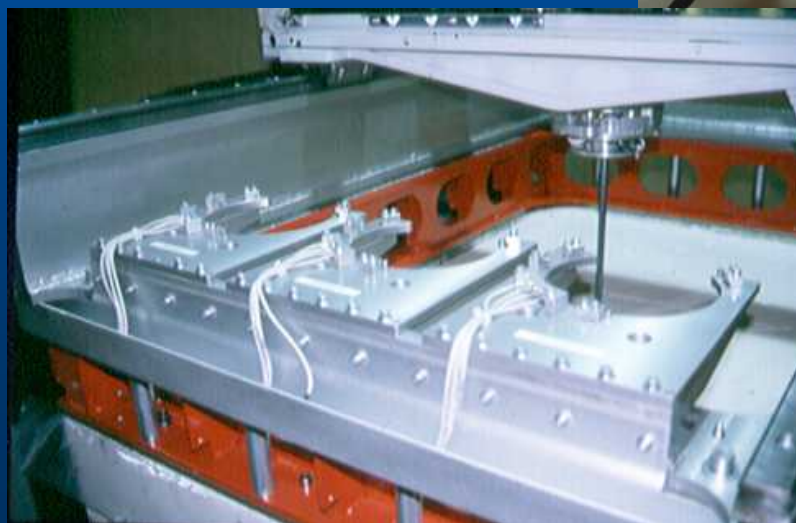
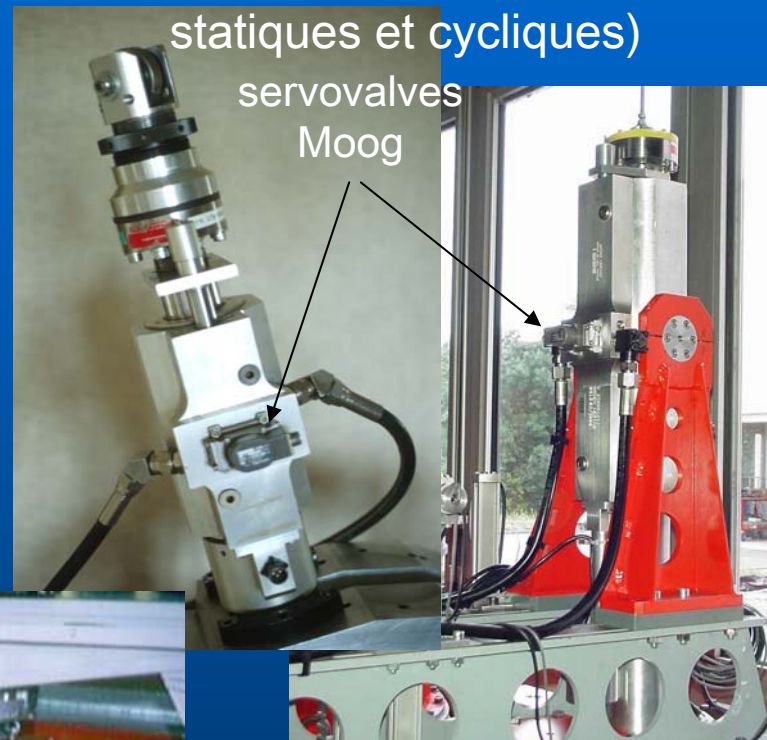


Dispositifs utilisés pour le chargement de pieux

Chevêtre
 Bateur
 électromagnétique



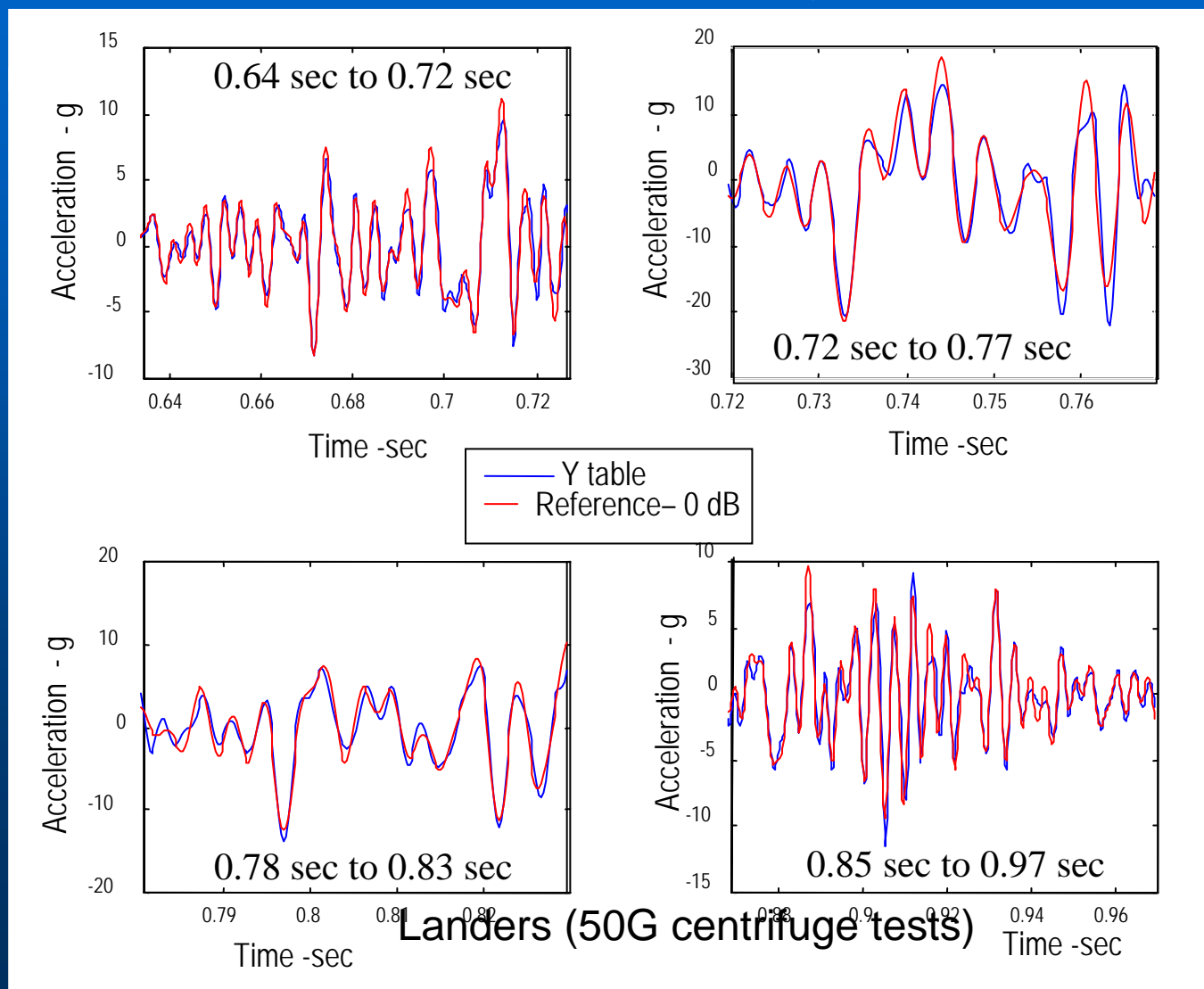
Servo-vérins (chargements
 statiques et cycliques)



Robot



Simulation du séisme de Landers (Essais sous 50G)





Technical Committee TC2 (Physical modelling in geotechnics)

IJPMG - International Journal of Physical Modelling in Geotechnics (2007), Vol.7, N°3 pp. 01-23

CATALOGUE OF SCALING LAWS AND SIMILITUDE QUESTIONS IN GEOTECHNICAL CENTRIFUGE MODELLING

*J. GARNIER, C. GAUDIN, S.M. SPRINGMAN, P.J. CULLIGAN, D. GOODINGS,
D. KONIG, B. KUTTER, R. PHILLIPS, M.F. RANDOLPH, L. THOREL*

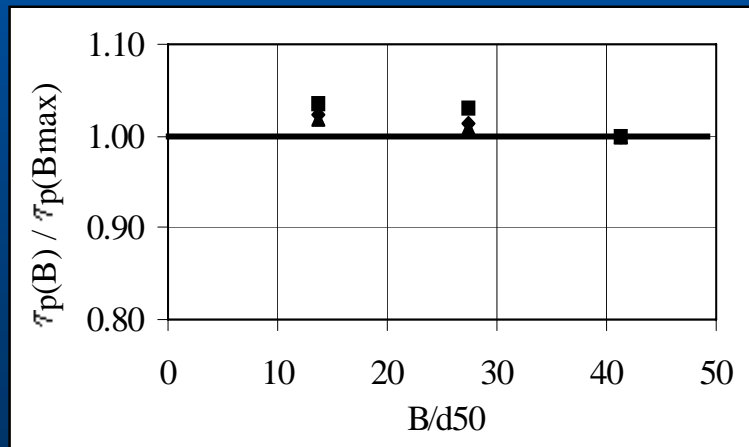
A-Fundamental laws of statics, time and rate scaling factors <i>(C. Gaudin, J. Garnier)</i>	B-Grain size effects on soil-structure interaction <i>(D. König, J. Garnier)</i>	C-Grain size effects on interfaces and shear band patterns <i>(B. Kutter, D. König,)</i>	D-Size effects derived from continuous media mechanics <i>(C. Gaudin, J. Garnier)</i>	E-Density and stress distribution in centrifuge models <i>(J. Garnier)</i>
F-In-flight in-situ tests <i>(M.F. Randolph, J. Garnier)</i>	G-Fluid flow in saturated centrifuge samples <i>(D. Goodings)</i>	H-Unsaturated conditions <i>(D. König, J. Garnier)</i>	I-Dynamic conditions <i>(B. Kutter, S.M. Springman)</i>	J-Aqueous phase transport in saturated soils <i>(P.J. Culligan)</i>
K-Non aqueous phase transport in soils and fractures <i>(P.J. Culligan)</i>	L-Heat transfer <i>(P.J. Culligan)</i> Frost, Ice <i>(R. Phillips)</i>	M-Erosion, sedimentation <i>(D. Goodings)</i>	N-Current propagation, electro-osmosis <i>(L. Thorel)</i>	Other topics to come ?

Cas du frottement latéral (cisaillement d'interface)

Effet du rapport B/d_{50} sur le frottement latéral maximum τ_p

Main topic	Similitude problem	Known data and results	Still open questions	Basic references
C – Grain size effects on interfaces and shear band patterns	C1 – Grain size effects on frictional interface	In pullout loading tests, limited effects on peak shear strength are observed if the diameter of the model pile B satisfies: $B/d_{50} > 50(2)$ or $100(1)$	Scaling law on displacement at peak strength is not known	(1) Foray et al. (1998) Garnier & König (1998) (2) Fioravante (2002)

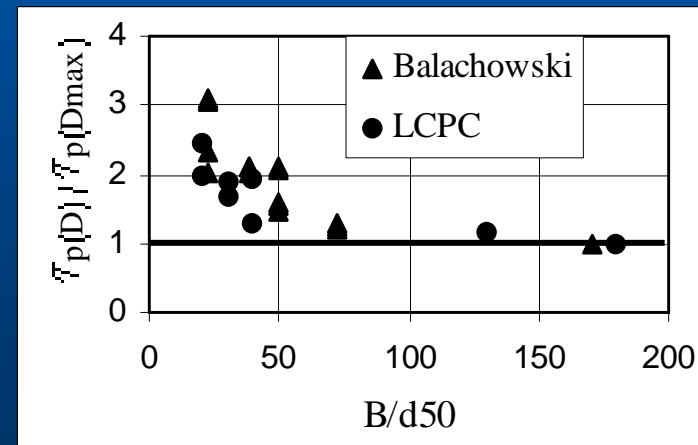
Interfaces lisses $R_n/d_{50} < 0,02$



Cisaillement dans le sol

Peu d'effet de la taille des grains

Interfaces rugueuses $R_n/d_{50} > 1$



Cisaillement à l'interface

Effet sensible pour $B/d_{50} < 50$ ou 100



Niveau international

Contrats Chevron, Exxon, Exxon-Mobil, Total

Niveau européen

Programmes QUAKER, SERIES

Niveau national

Programmes PN FOREVER, ANR et PN SOLCYP, R2GC

Niveau LCPC

OR Ouvrages en sites sismiques, Fondations et amélioration des sols

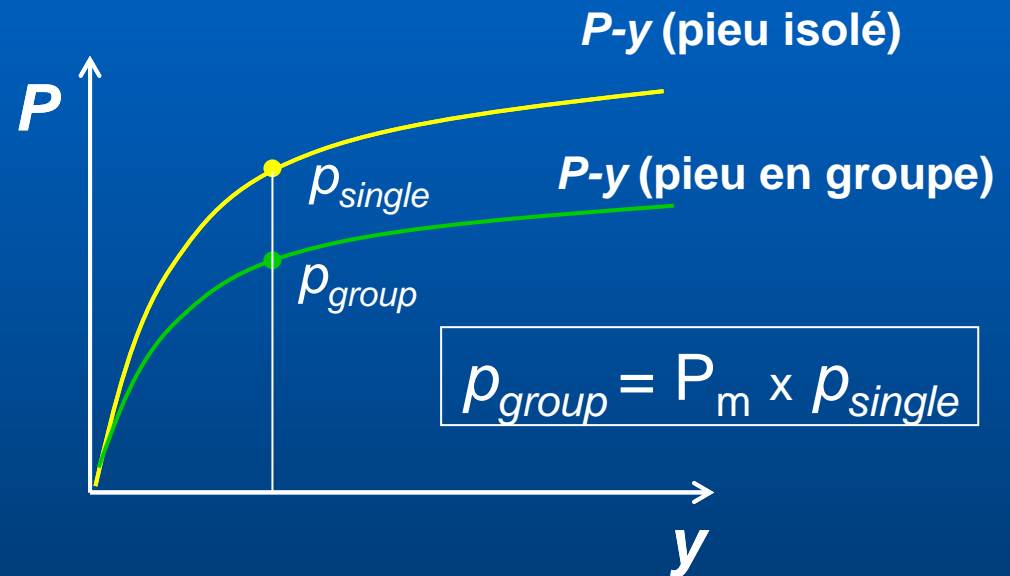
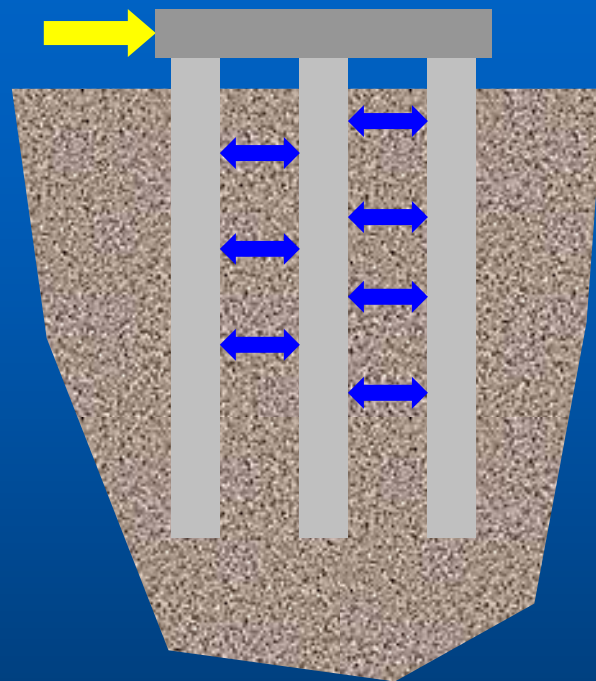
Principaux contributeurs

Doctorants LCPC : *Bouafia, Mezazigh, Remaud, Rosquoët, Chenaf, Rakotonindriana*

Autres doctorants : *Rezende, Balachowski, Bonab, Tsua, Khemakhem*

Equipe technique actuelle : *Audrain, Favraud, Gaudicheau, Neel*

Effets de groupe sur les courbes de réaction $P-y$



Deux composantes de l'effet de groupe (p-multiplier P_m) :

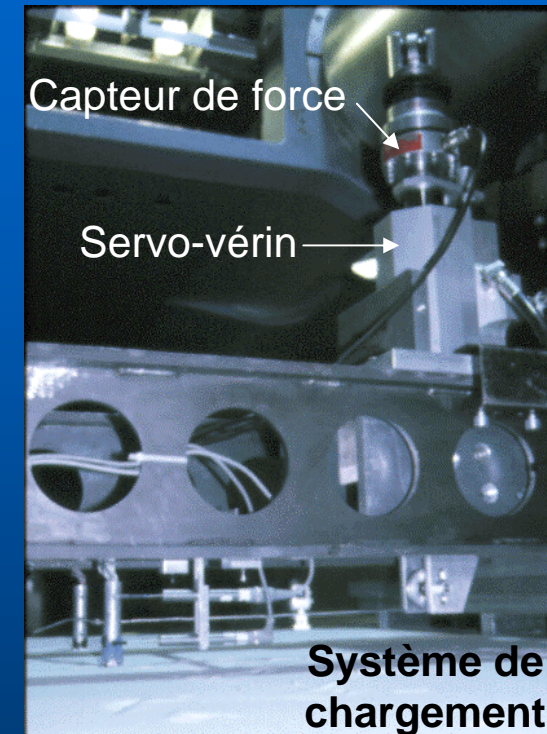
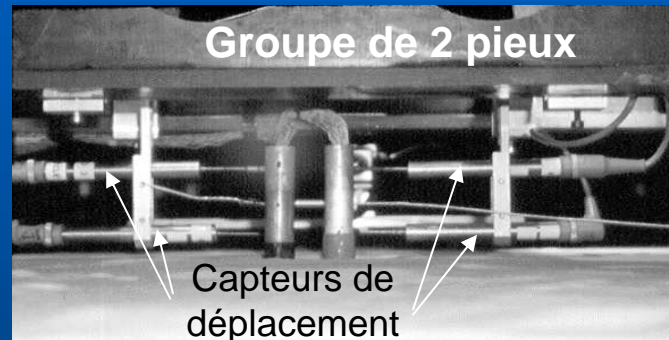
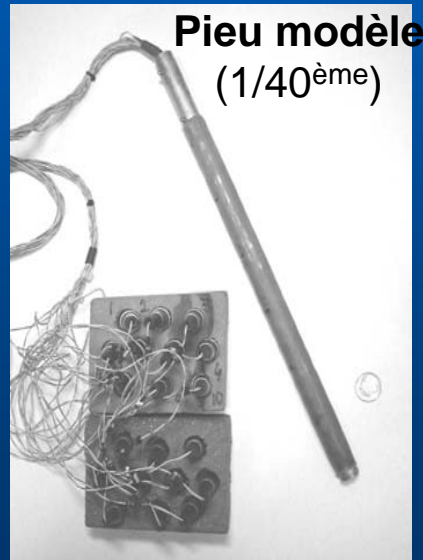
- Interaction mécanique pieu-sol-pieu (pour tous types de pieux)
- Modification des caractéristiques du sol due à la mise en place des pieux (seulement pour les pieux "refoulant")

Etudes expérimentales des effets de groupe

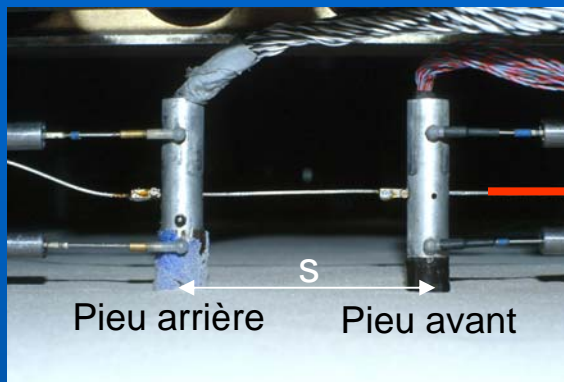
Prototype : $D = 12 \text{ m}$, $B = 0.72 \text{ m}$, $EI = 474 \text{ MN.m}^2$

Modèles (échelle 1/40) instrumentés de 20 paires de jauges

Paramètres étudiés : Nombre de pieux, arrangement, espacement, mode de mise en place, type de chargement.....



Effets de groupe dans le cas de deux pieux



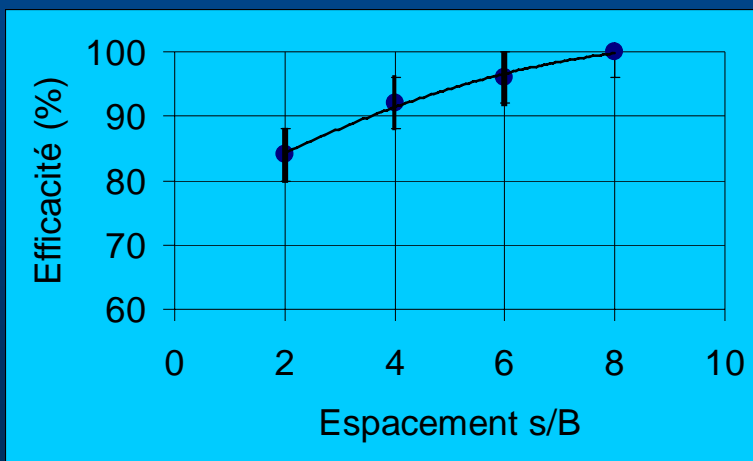
Pieu avant

Charge Q

Effet de groupe sur les moments

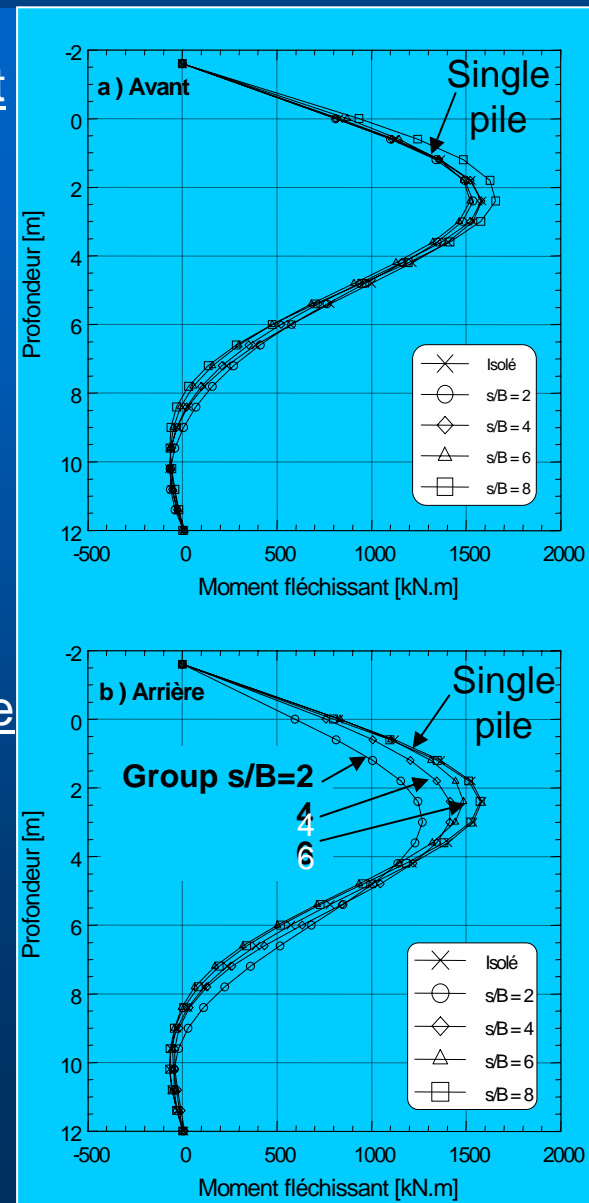
- Pas d'effet si $s/B > 6$
- Léger effet sur le pieu avant (pour $s/B < 6$)
- Effet plus marqué sur le pieu arrière (pour $s/B < 6$)

Effet sur la résistance latérale Q

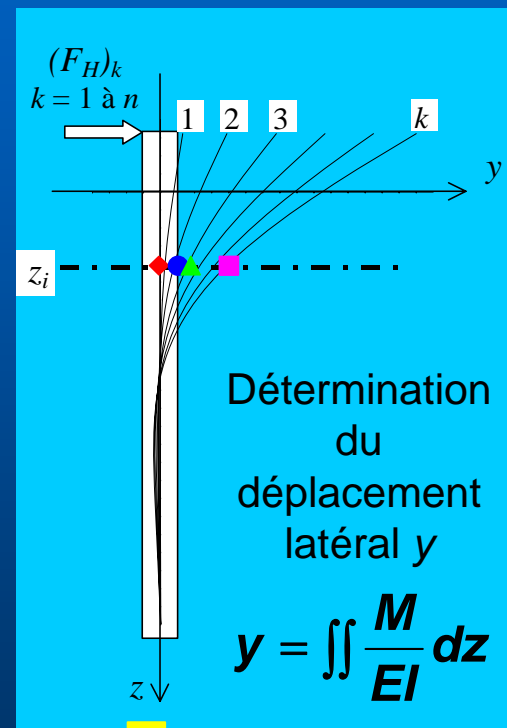
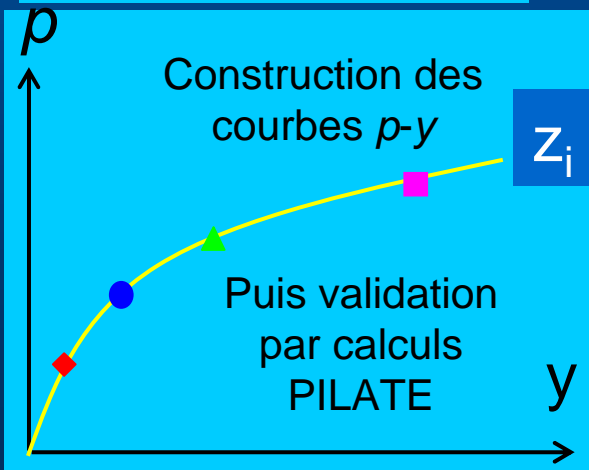
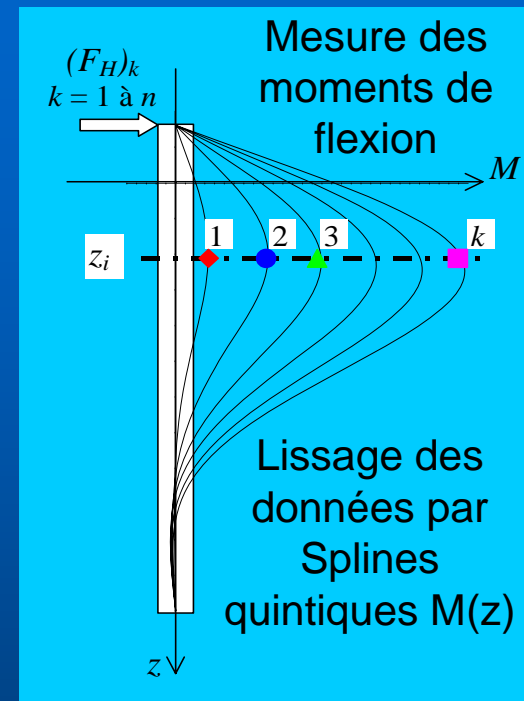
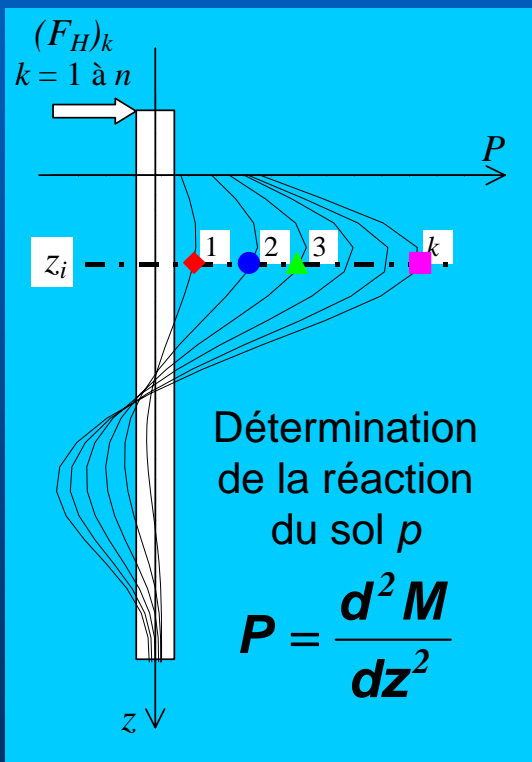


Efficacité ($e = Q_{\text{group}} / nxQ_{\text{Single}}$)

Pieu arrière

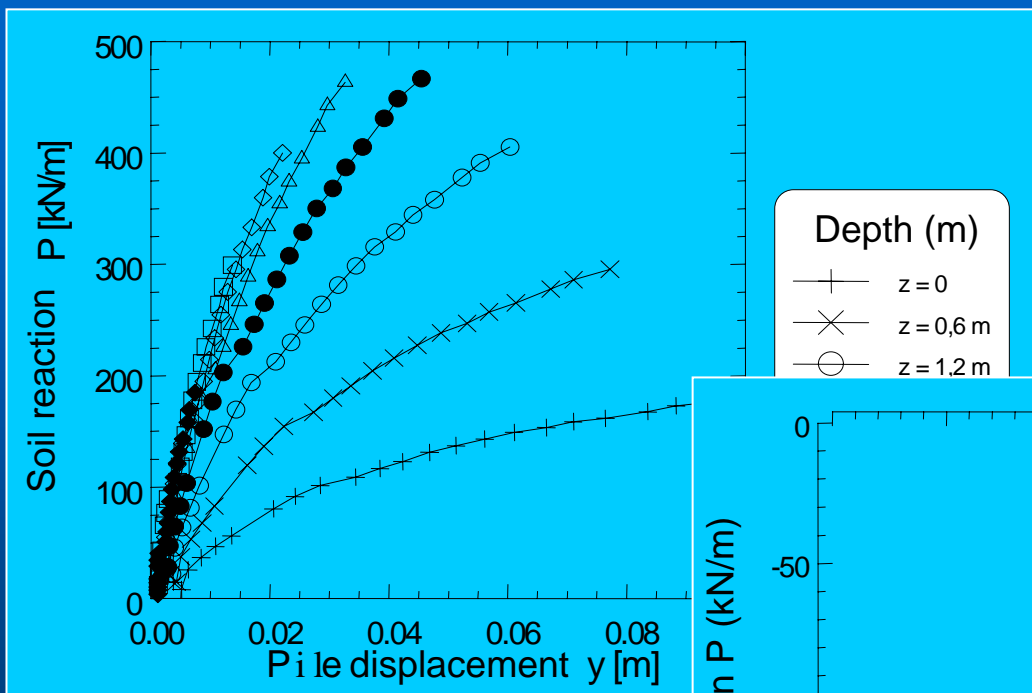


Détermination expérimentale des courbes de réaction $P-y$ à partir des profils de moment



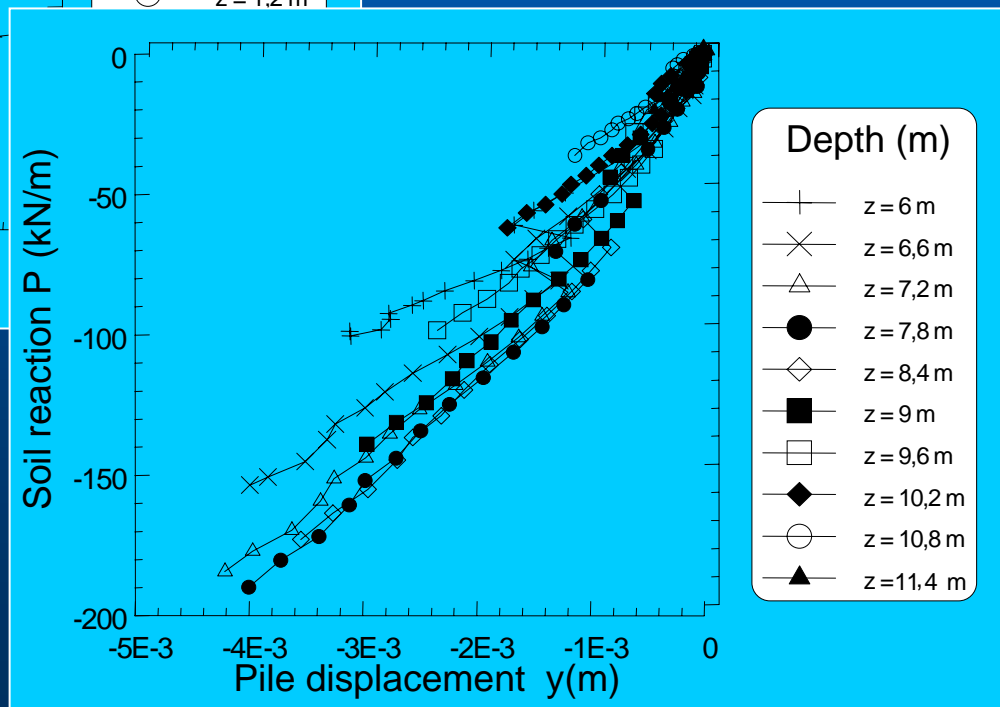
Exemple de courbes p-y statiques obtenues pour un pieu isolé

Massif de sable de Fontainebleau $I_D = 86\%$



Courbes P - y au-dessus du point de rotation

Courbes P - y au-dessous du point de rotation



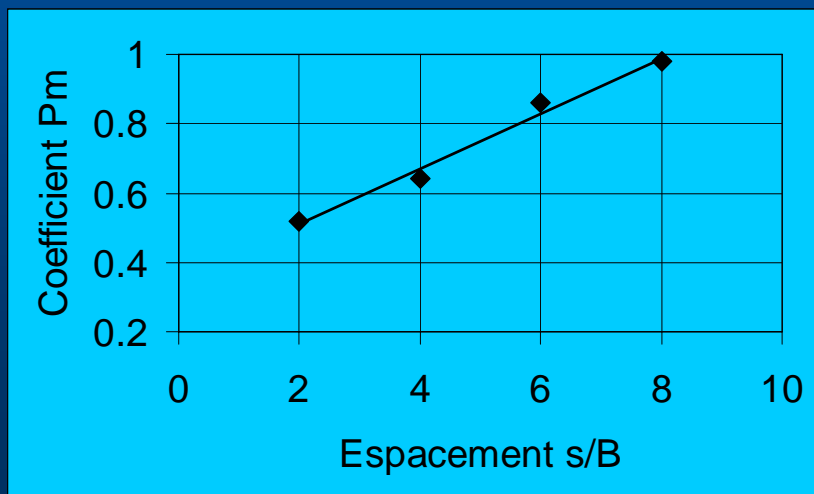
Effet sur les courbes $P-y$

- Pas d'effet si $s/B > 6$
- Peu d'effet sur le pieu avant quelque soit s/B
- Effet nettement plus marqué sur le pieu arrière (pour $s/B < 4$)



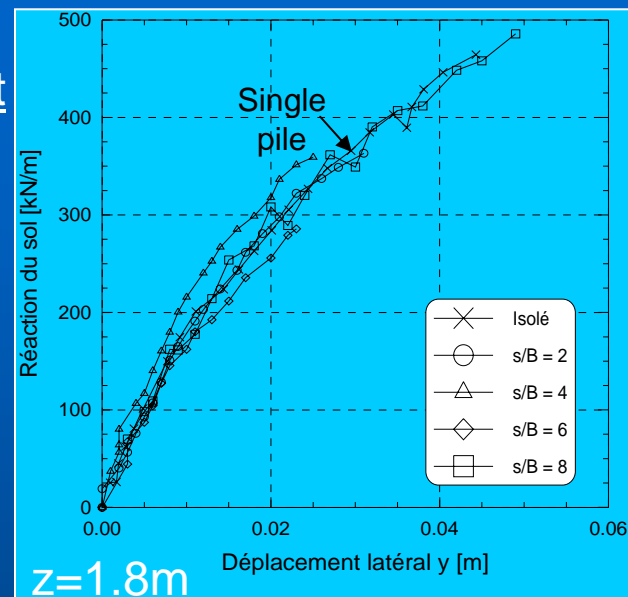
$$\rho_{Avant} = \rho_{Isolé}$$

$$\rho_{Arrière} = P_m \times \rho_{Isolé}$$

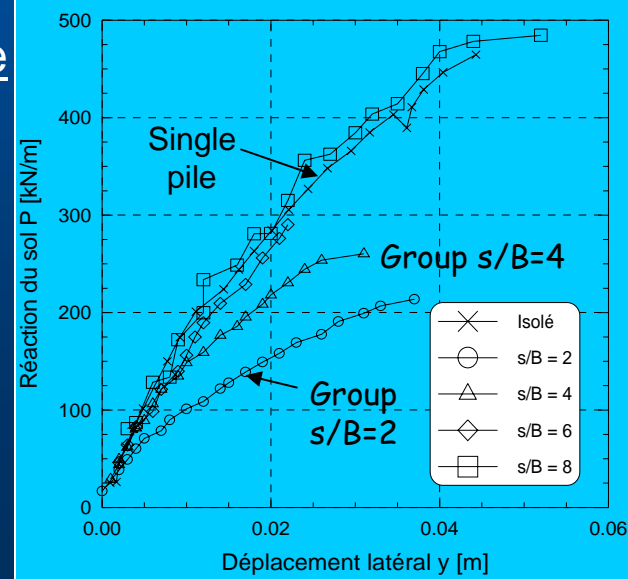


Coefficient P_m en fonction de s/B

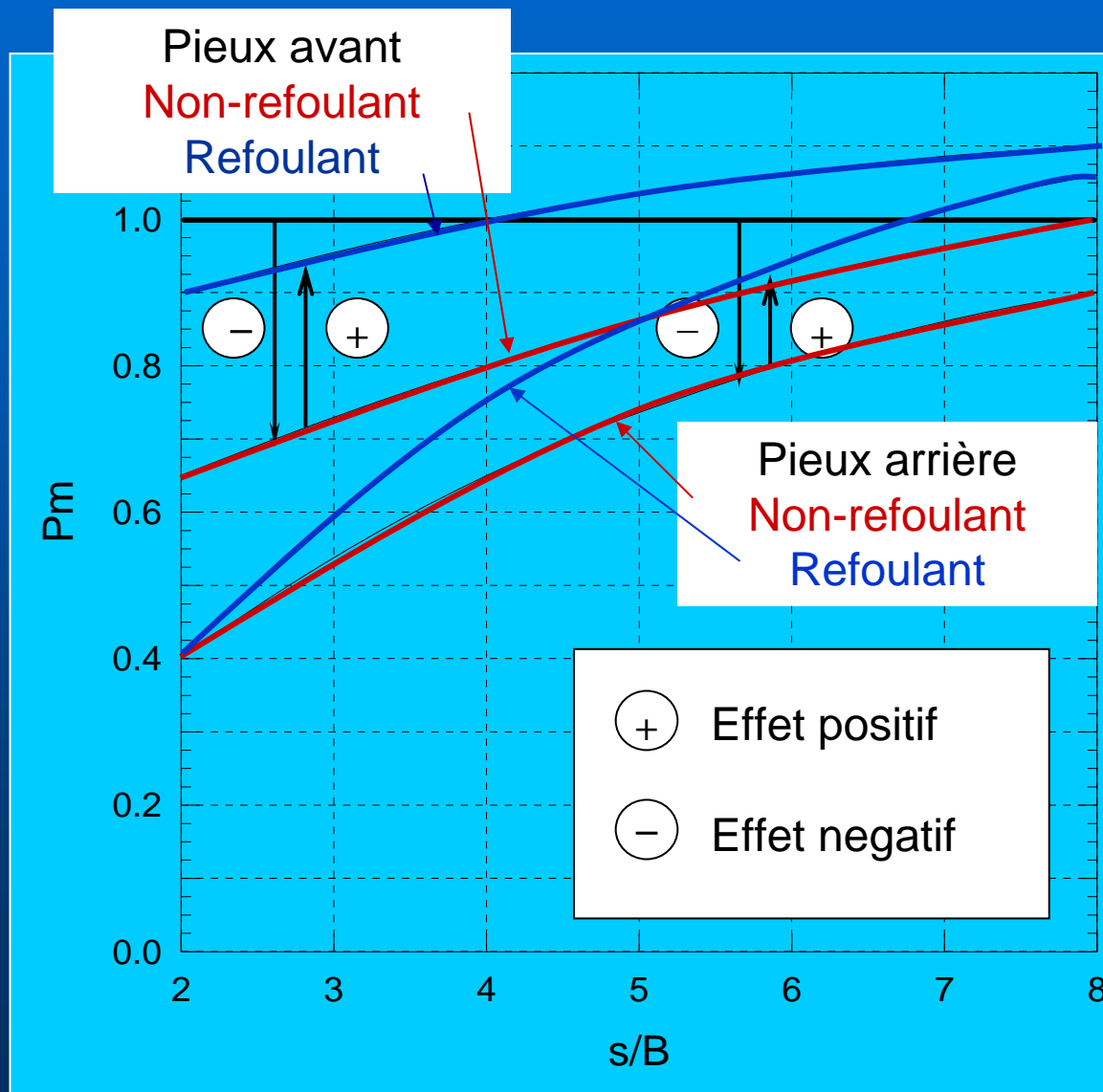
Pieu avant



Pieu arrière



Généralisation au cas d'un groupe de 9 pieux



Construction des
courbes p-y pour les
pieux en groupe

$$p_{Group} = P_m \times p_{Single}$$

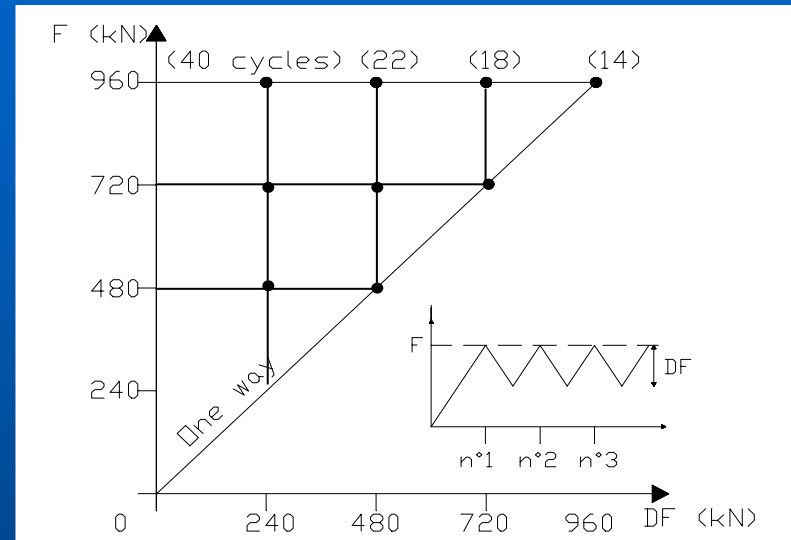
Valeur des coefficients P_m en
fonction de la distance
relative entre pieux s/B

Pieux sous charges latérales cycliques

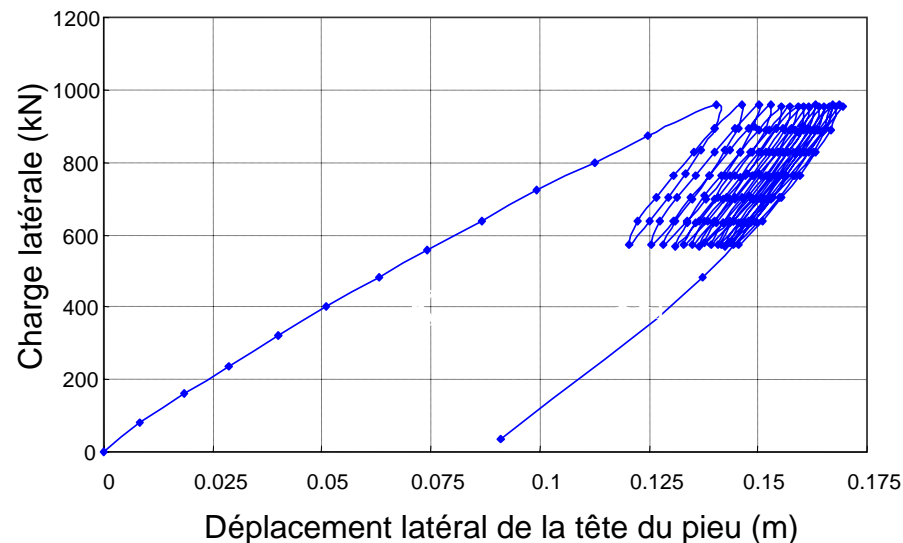
Charges cycliques caractérisées par :

- Nombre de cycles n
- Charge maximale appliquée F
- Amplitude de la variation DF

Domaine des séquences cycliques étudiées



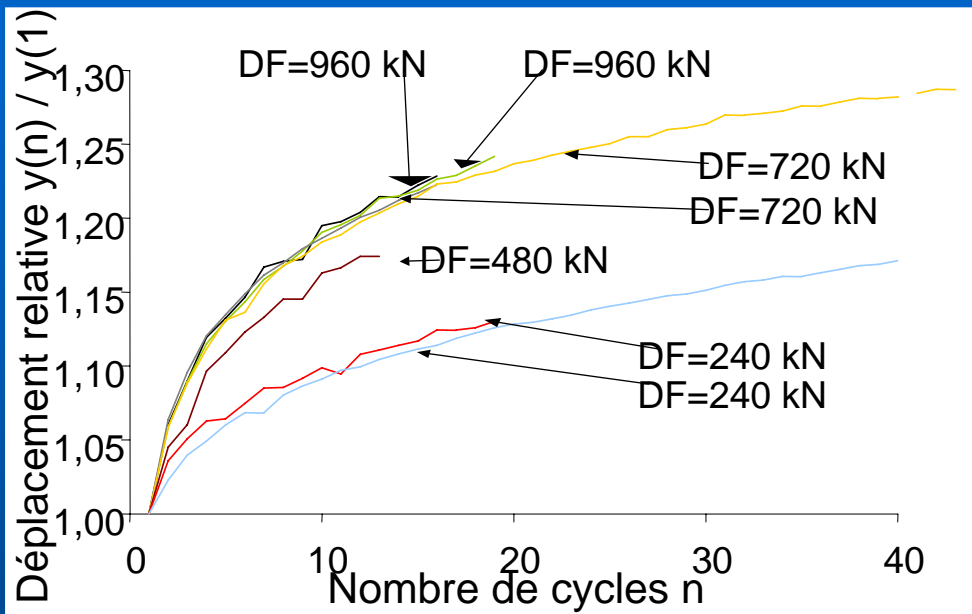
Charge en fonction du déplacement de la tête



Exemple de courbe de chargement cyclique
($F = 960$ kN, $DF = 480$ kN)

Charge cyclique maximale : 960 kN
(1/3 de la résistance latérale ultime)
Pieu en conditions de service

Effets des cycles sur le déplacement y de la tête du pieu



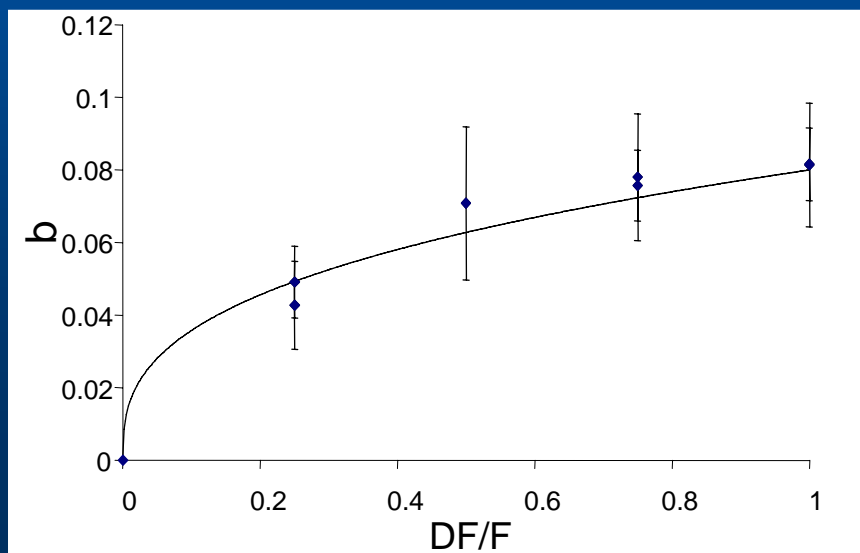
Rapport $y(n)/y(1)$ en fonction du nombre de cycles n pour différentes charges cycliques DF (cas $F=960$ kN)

$$\frac{y(n)}{y(1)} = 1 + b \ln(n)$$

Coefficient b déduit des essais sous différentes valeurs de F et DF

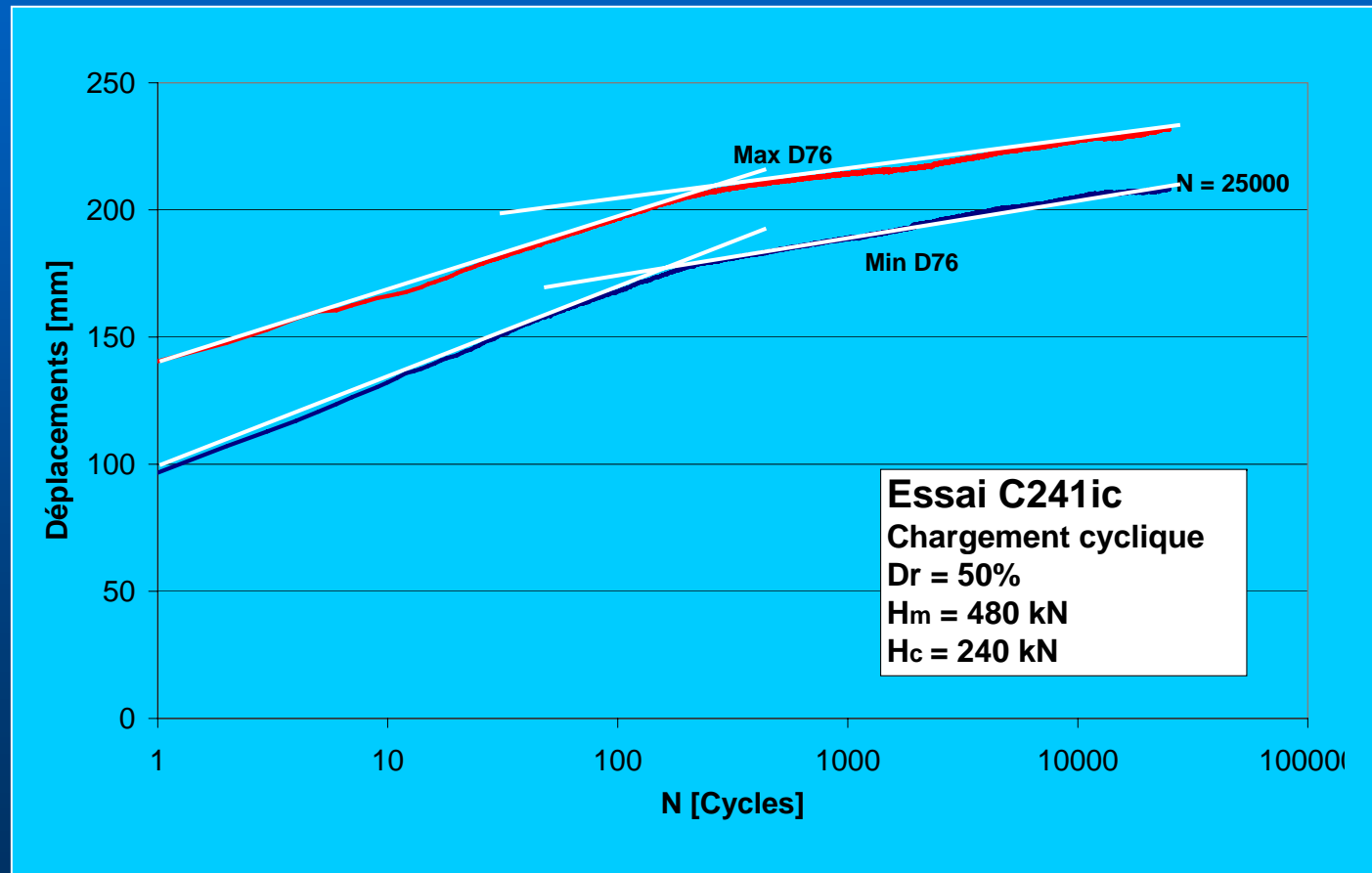
$$b = 0.08 \left(\frac{DF}{F} \right)^{0.35}$$

$$R^2 = 0.98$$

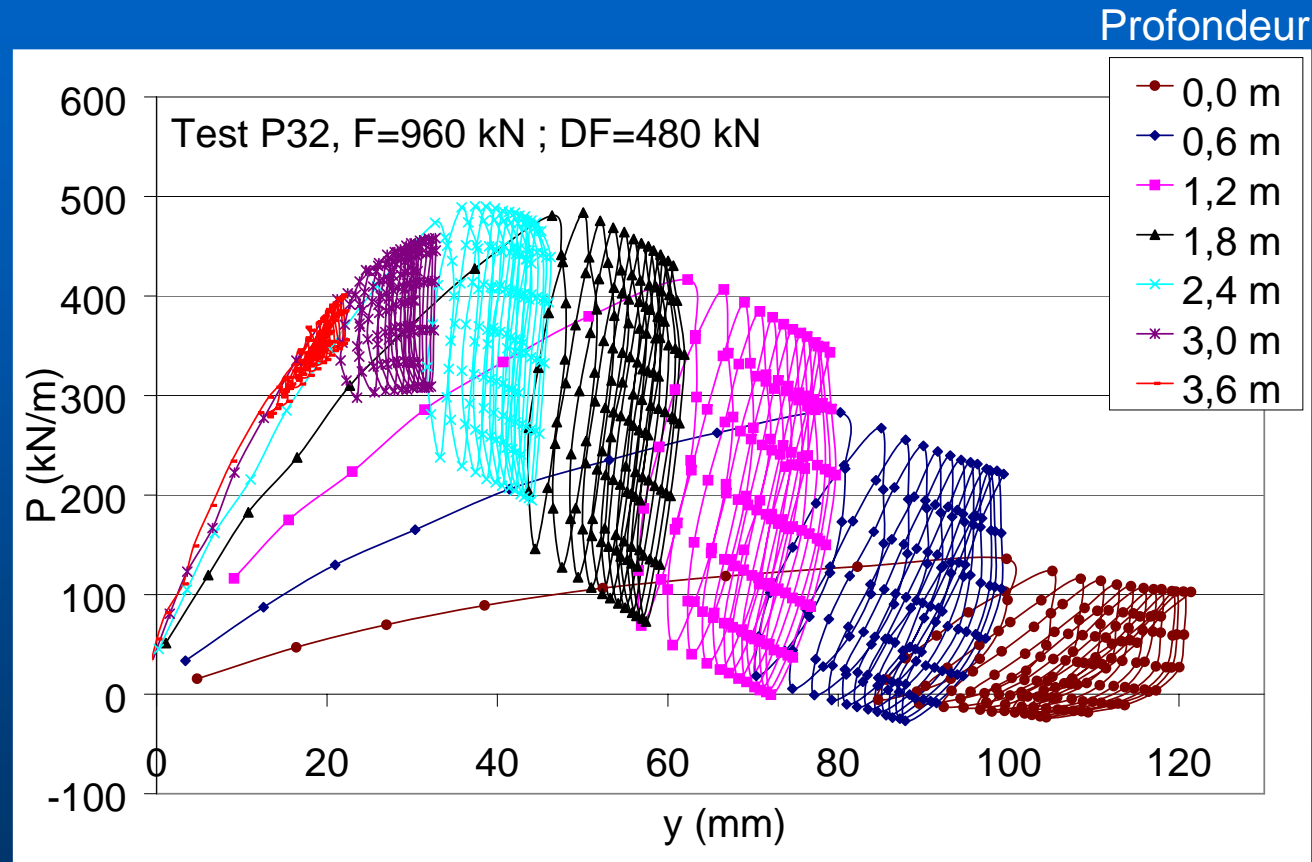


Effet des cycles sur le déplacement y de la tête du pieu

Confirmation de la loi logarithmique de Rosquoët (2004) jusqu'à 500 cycles
Apparition d'une seconde loi logarithmique entre 500 et 25000 cycles



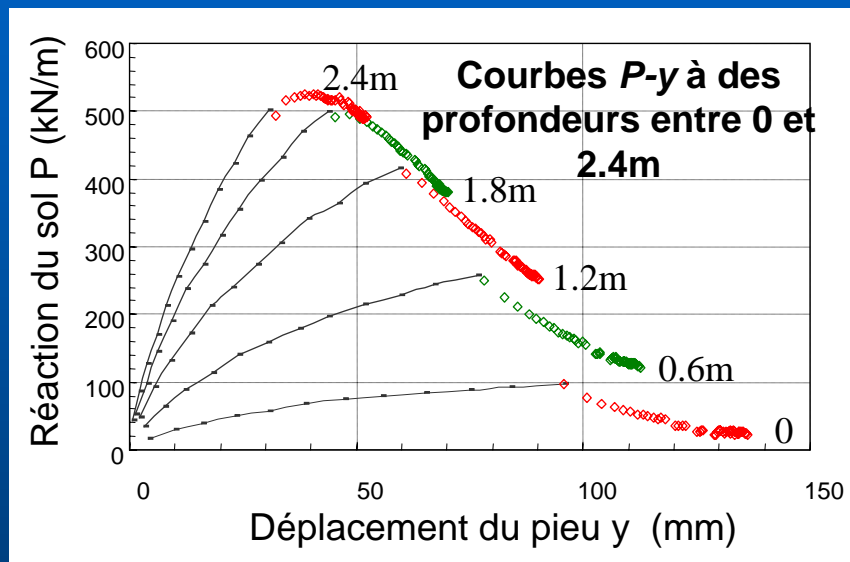
Exemples de courbes de réaction cycliques obtenues dans le cas $F = 960$ kN et $DF = 480$ kN



- Dégradation régulière de la réaction latérale dans les couches de surface
- Pas d'effet significatif à plus grandes profondeurs

Evolution des courbes P-y selon la profondeur

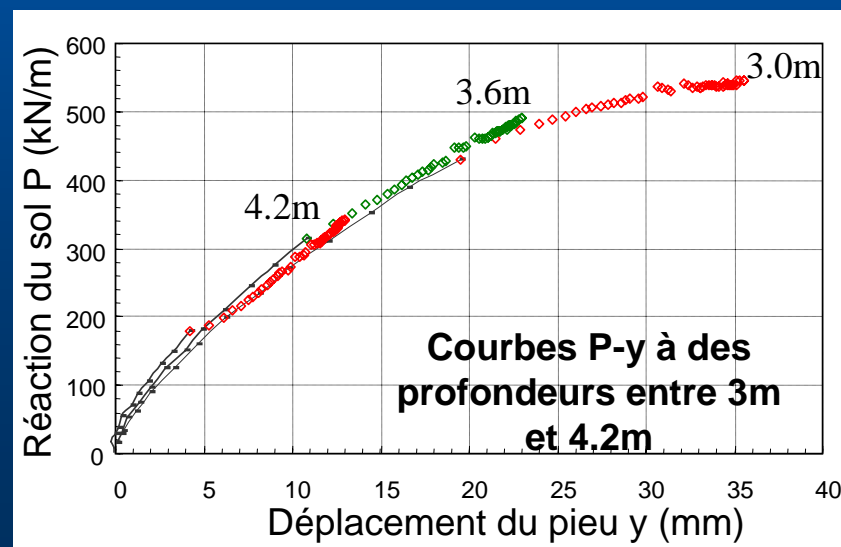
Réaction P du sol en fonction du déplacement y du pieu observés sous la charge latérale maximale (Exemple de cycles avec $F=960$ kN et $DF=480$ kN)



A faible profondeur, les cycles réduisent la réaction latérale du sol (le point de rotation est situé à environ 5m de profondeur)

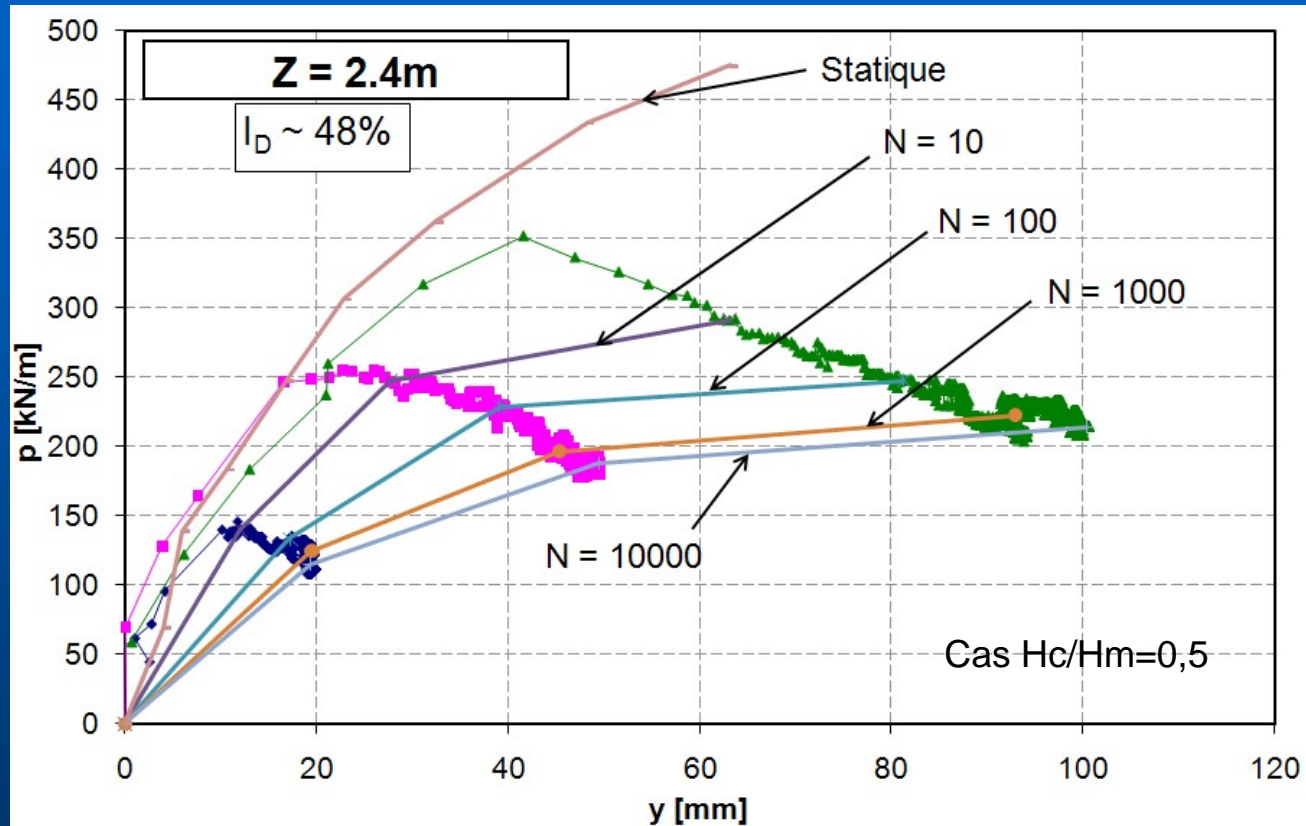
A plus fortes profondeurs, les courbes P-y ne sont pas affectées par les cycles

➔ Transfert de charge en profondeur



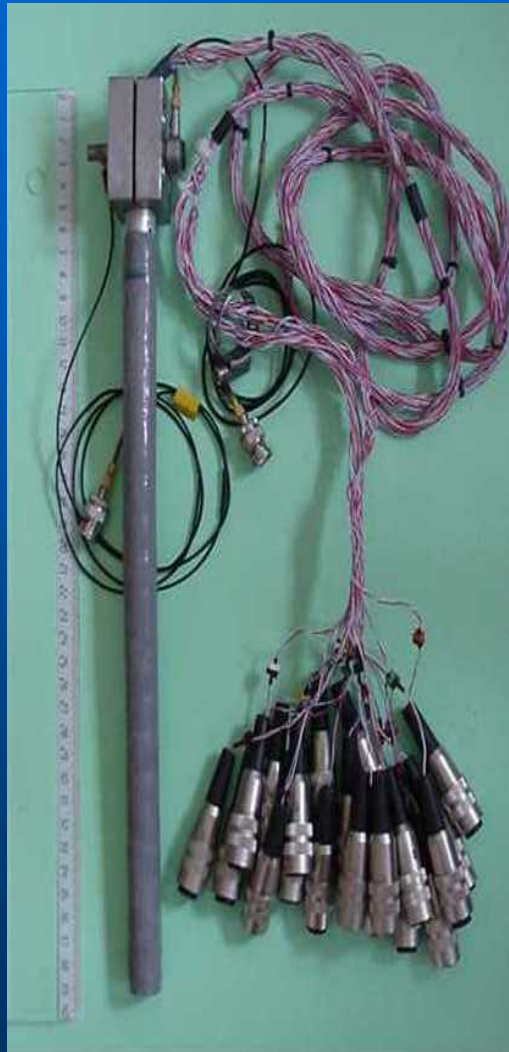
Synthèse des résultats sur les courbes p-y cycliques

Détermination expérimentale des courbes p-y pour un nombre donné de cycles



- Nécessite la réalisation d'essais à différents niveaux de chargement
- Montre que les courbes p-y cycliques n'évoluent plus au-delà de 3000 cycles

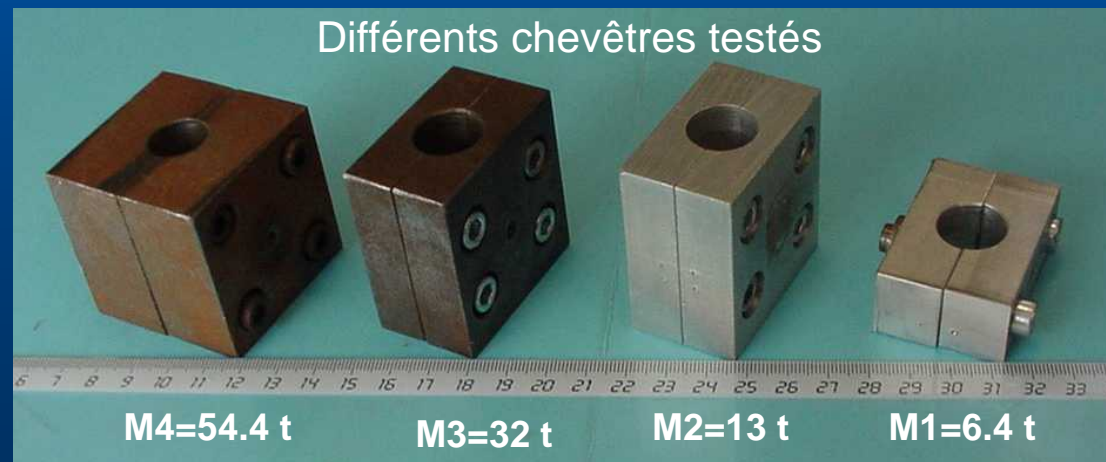
Chargement latéral dynamique



1 - Etude de l'effet du nombre d'impacts, de la masse du chevêtre, de la méthode de mise en place du pieu

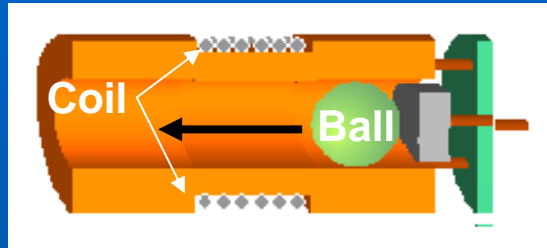
2 - Etude du couplage des interactions inertielle et cinématique

- Pieu prototype pile: fiche 12m, diamètre 0.72m
- Modèles réduits 1/40 (essais sous 40G)
- Impact latéral à 2,2 m au dessus du sol
- Mesure en tête: accélération, déplacement, force
- 20 paires de jauges

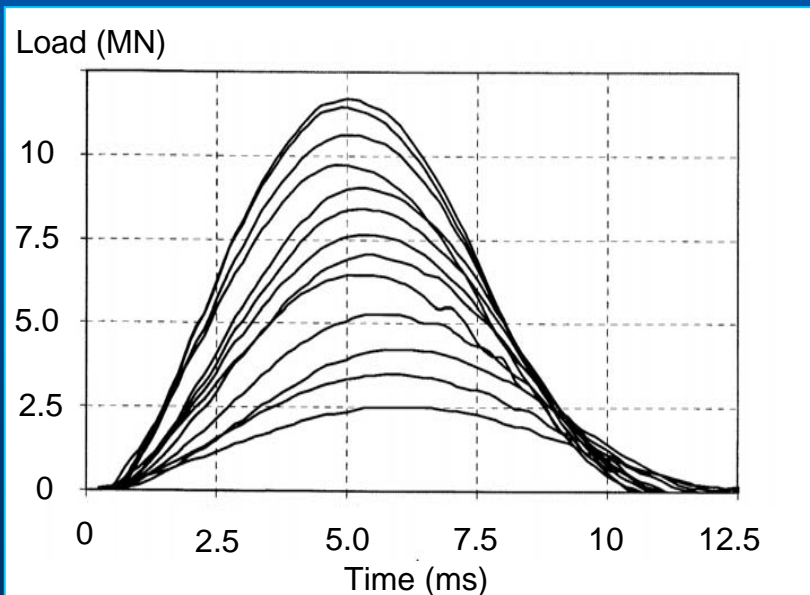


Dispositif de chargement latéral dynamique

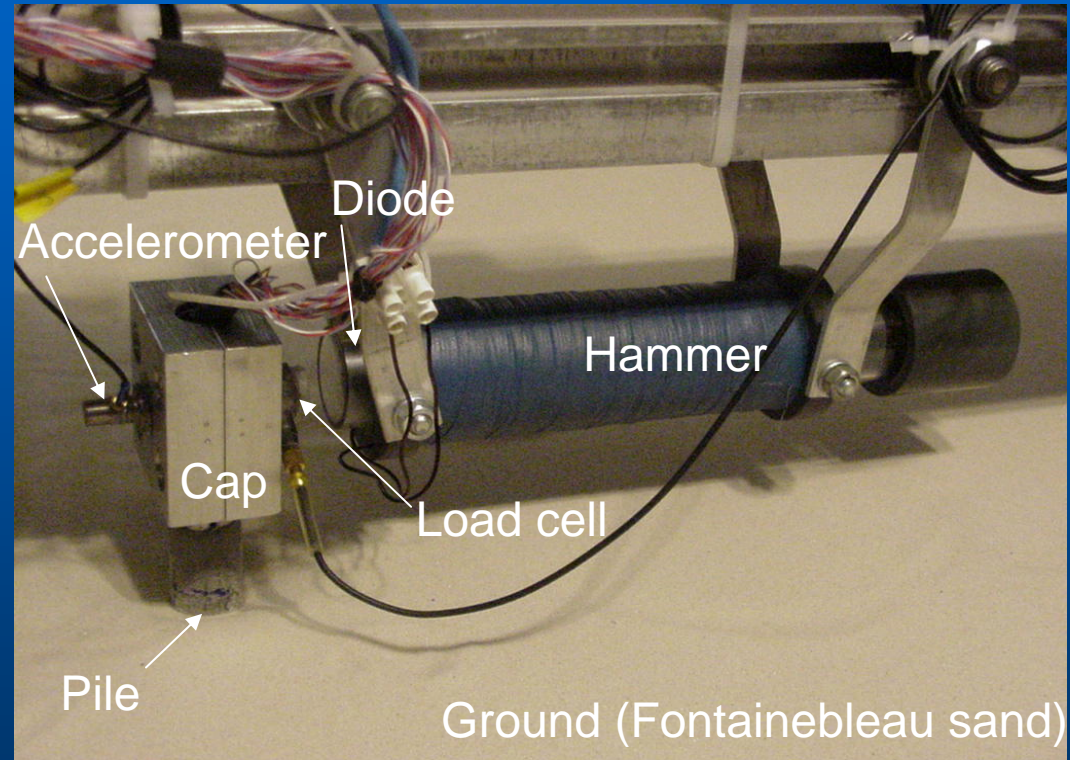
Marteau électromagnétique



- Succession d'impacts sans arrêt de la centrifugeuse
- Ajustement de l'intensité de l'impact



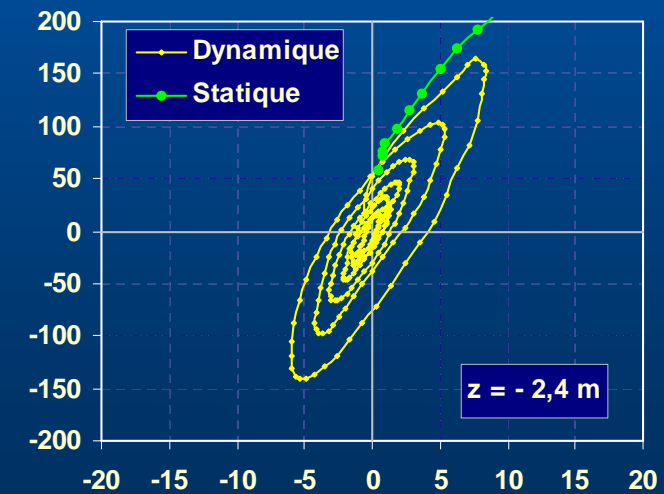
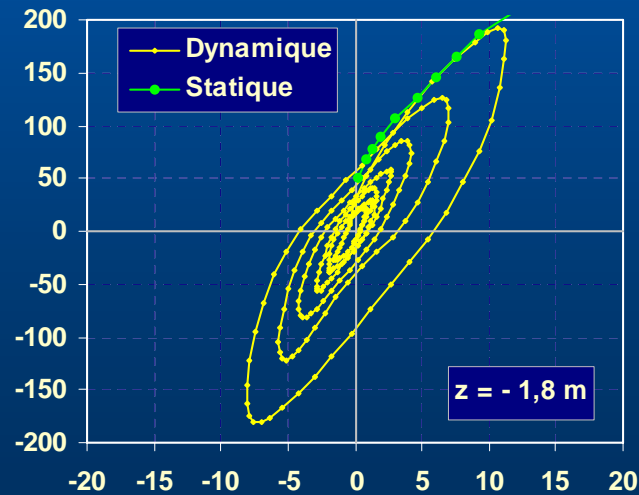
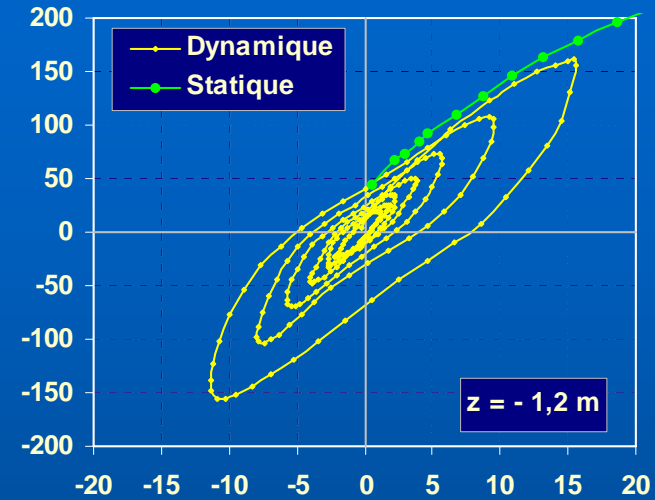
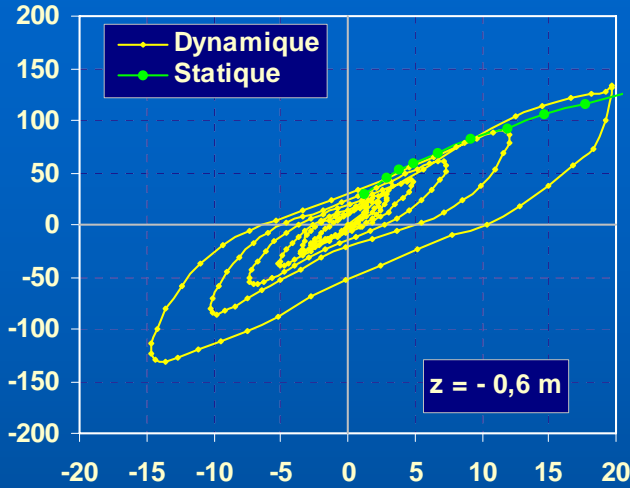
Performance du dispositif



Vue du montage

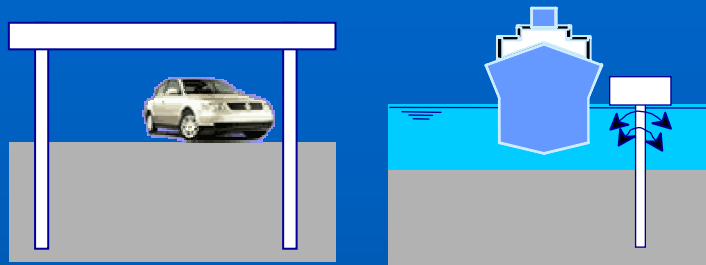
Exemples de courbes de réaction dynamique

Dynamic reaction P (kN/m)

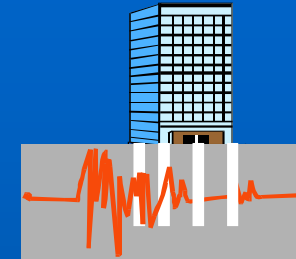


Pile displacement y (mm)

Couplage des interactions inertielle et cinématique

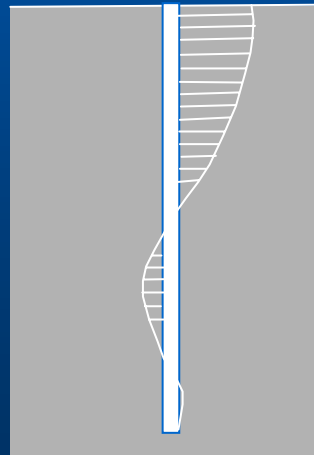


Impact en tête



Événement sismique

Chargement transmis
par la superstructure

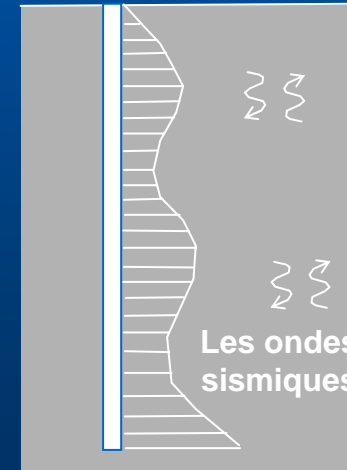


Interaction inertielle



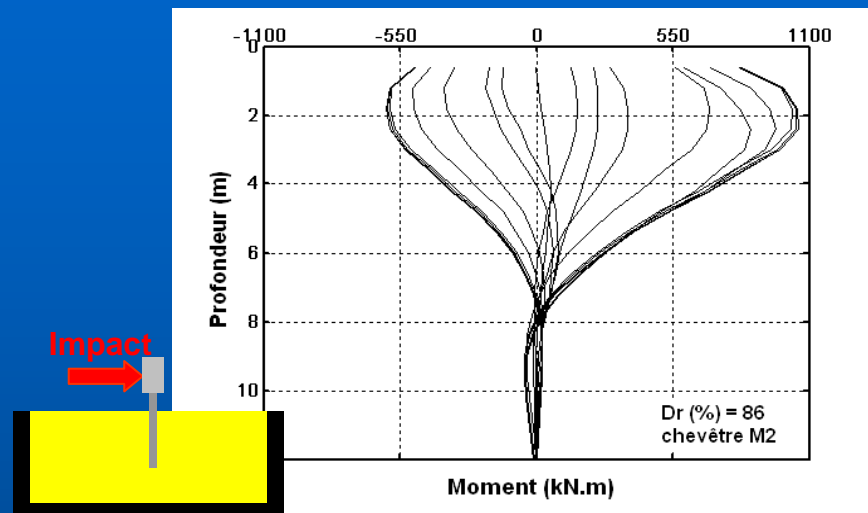
Eurocode 8
Partie 5

Chargement transmis
par le sol

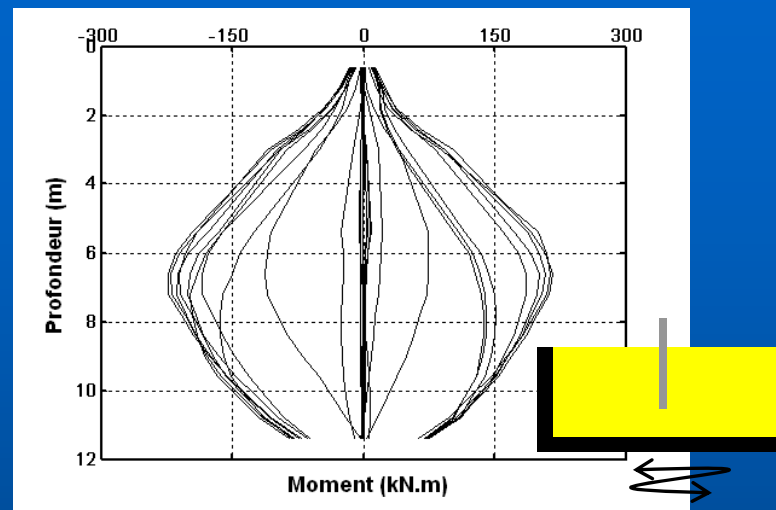


Interaction cinématique

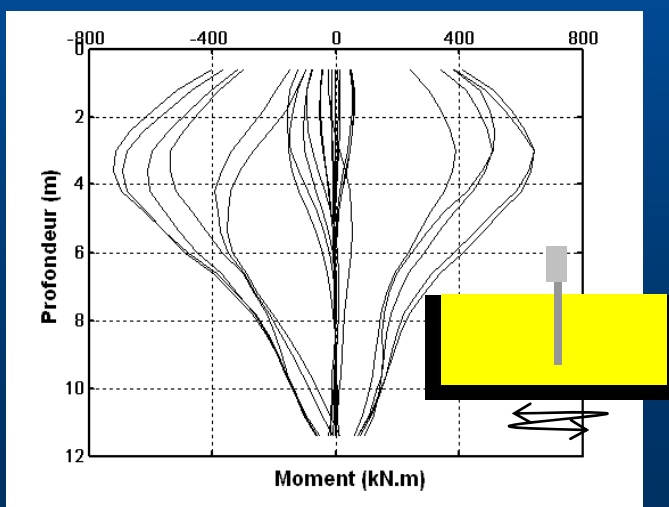
Profils des moments fléchissants



**Inertielle pure
(Chevêtre, impact en tête)**



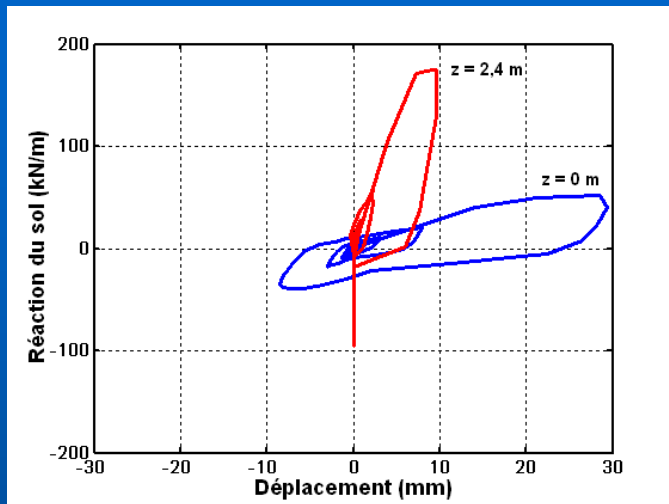
**Cinématique pure
(Sans chevêtre, séisme)**



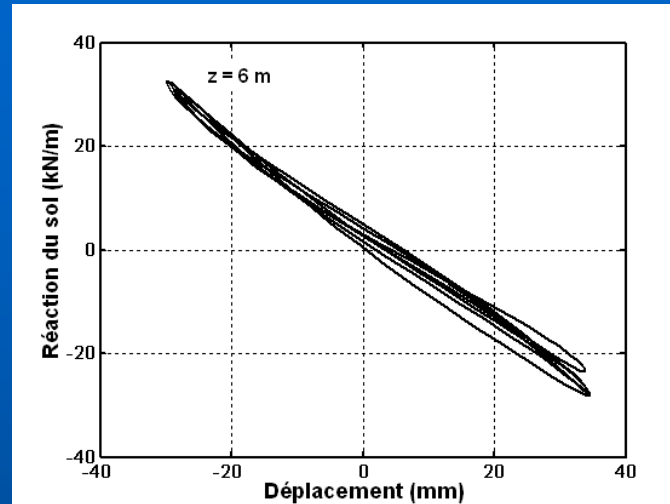
**Interactions couplées
(Chevêtre, séisme)**

Cumul des deux effets → Interactions en phase

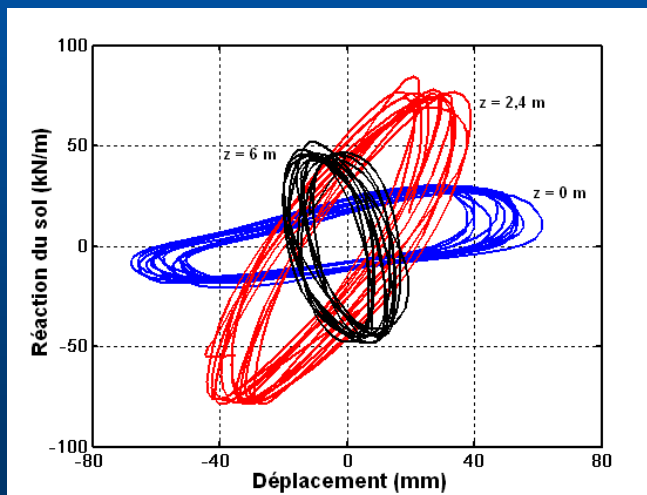
Comparaison des boucles p-y



Inertielle pure



Cinématique pure



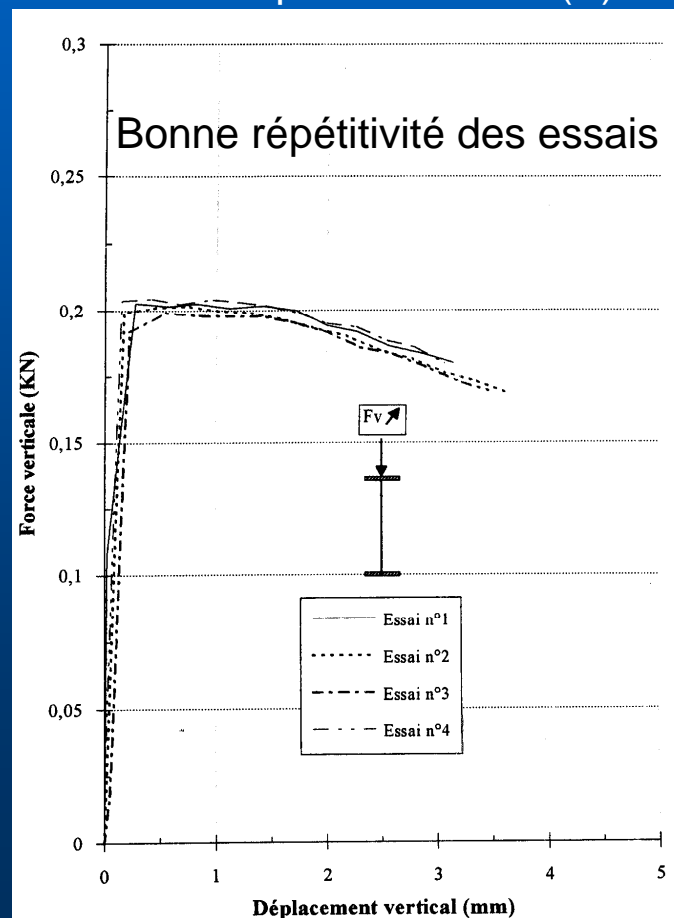
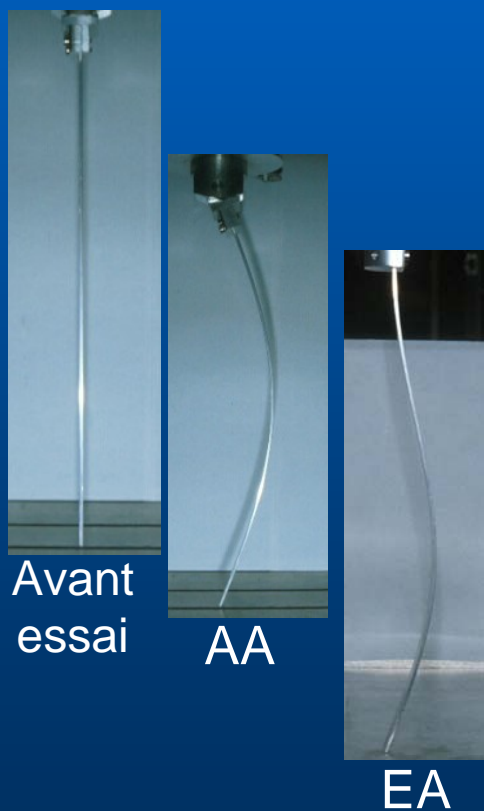
Interactions couplées

Effet inertiel prédominant en surface - Effet cinématique domine en profondeur

Première phase : Validation de l'approche expérimentale par des essais de flambement à l'air (sans sol)

Barrettes aluminium | Section 10mm ou 20mm x 2mm, Longueur 300 mm

Liaisons en tête et en pied: Articulée (A) ou encastree (E)



Bonne concordance avec les valeurs théoriques (Euler)

$$F_{cr} = (\rho^2 E_p I_p) / L^2$$

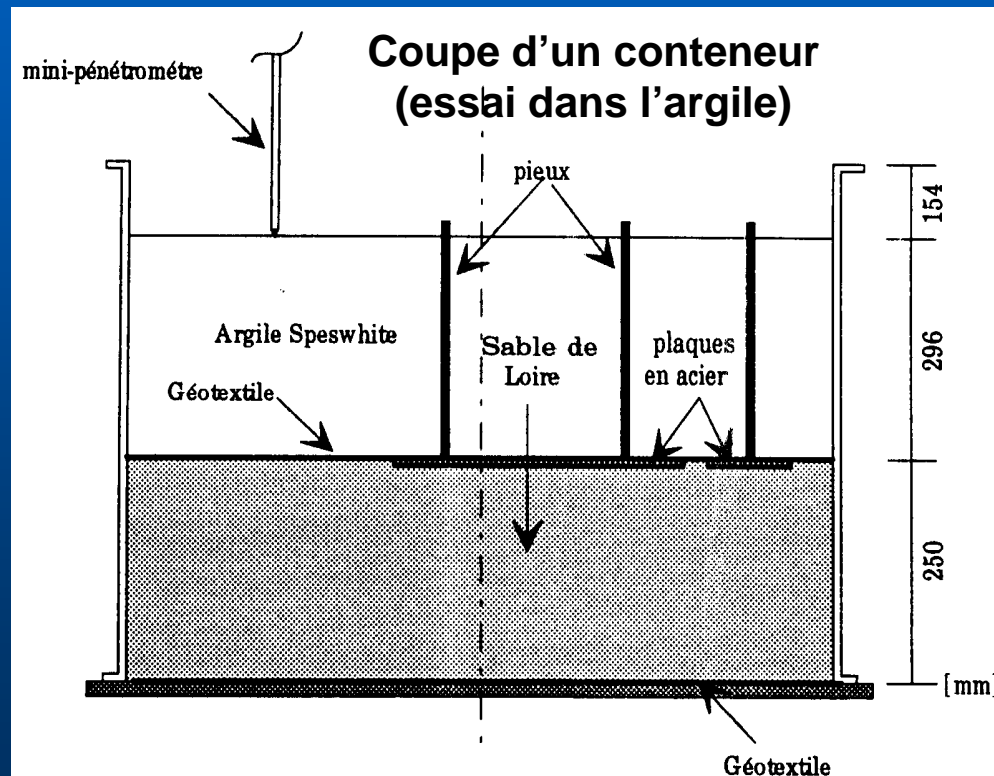
Essai	Exp. (kN)	Théor. (kN)	Ecart (%)
AA10	0.057	0.051	12
AA20	0.106	0.101	5
EA10	0.109	0.104	5
EA20	0.206	0.208	1
EE10	0.202	0.203	0.5
EE20	0.381	0.406	6

Essai de flambement dans le sol (50g)

Modèles (1/50^{ème}) : Barrettes rectangulaires en aluminium

Prototypes : Largeur B = 0.5m et 1m, Epaisseur E = 0.1m, Longueur L = 15m

Sols d'essais : Sable de Fontainebleau (24 essais) et argile molle (15 essais)



Type d'essai	Fcr Argile (MN)	Fcr Sable (MN)	(Fcr sable)/(Fcr argile)
AA10	4.3	8.7	2
AA20	7.9	16.1	2
EA10	3.7	9.2	2.5
EA20	8.1	17.9	2.2
EE10	-	9.9	-
EE20	-	20.9	-

Principales conclusions sur le flambement des pieux

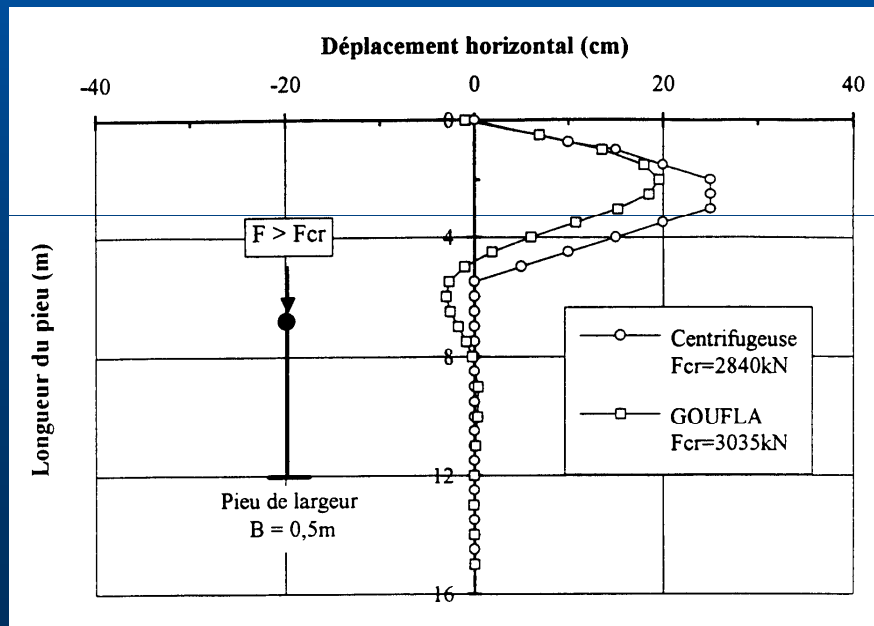
- Vérifications à faire dans le cas de micropieux en acier ($B < 100\text{mm}$)
- Les abaques de Mandel ne sont applicables qu'aux sols homogènes ($E_s \text{ cst}$)
- ➔ Choisir pour E_s la valeur que prend le module aux profondeurs suivantes:

3,5 à 4 l_0 pour un sable mi-dense (E_s 50 à 75 Mpa)

4,5 à 6 l_0 pour une argile molle (E_s 3 à 5 Mpa)

$$l_0 = (4E_p l_p / E_s)^{1/4}$$

- Le logiciel GOUFLA fournit une assez bonne estimation de la force critique



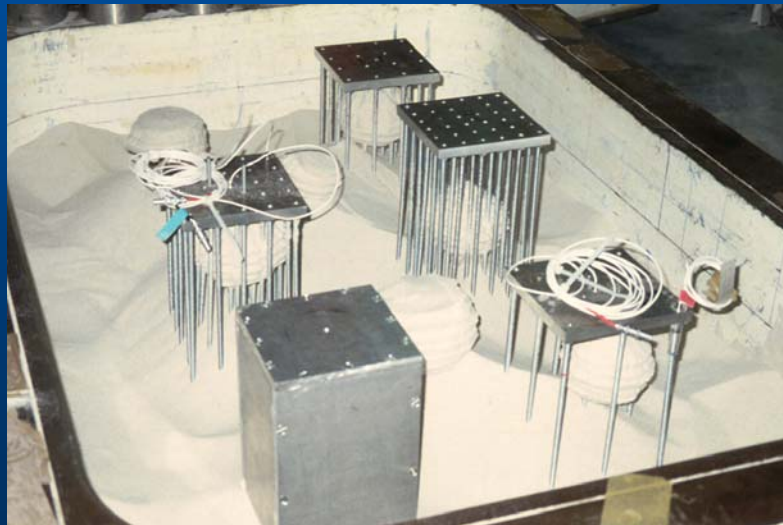
Comparaisons GOULA-Essais
(massif discrétisé en couches homogènes)

F_c (MN)	Argile EA	Argile AA	Sable EA
ESSAIS	4,4	2,8	9,9
GOUFLA	4,7	3,0	10,1

Effet de la densité du réseau de micropieux sur la portance

Objectifs : Détermination de l'effet du nombre de micropieux
Détermination du réseau équivalent au bloc monolithique

- Réseaux de 9, 16, 25 et 36 pieux et bloc monolithique
- Pieux prototypes : Fiche 5 m, Diamètre 120 mm
- Sable de Fontainebleau ($\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$)
- Chevêtre de liaison : Carré 3.2 m x 3.2 m sans contact avec le sol

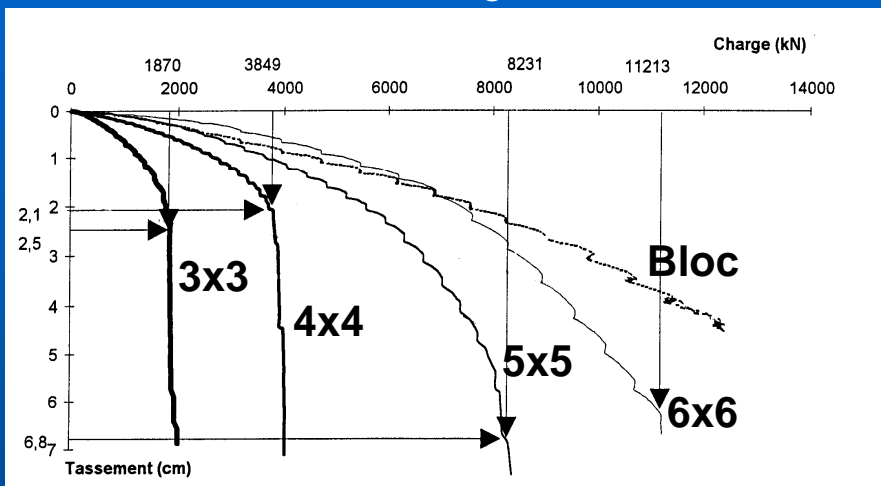


Conteneur après essais

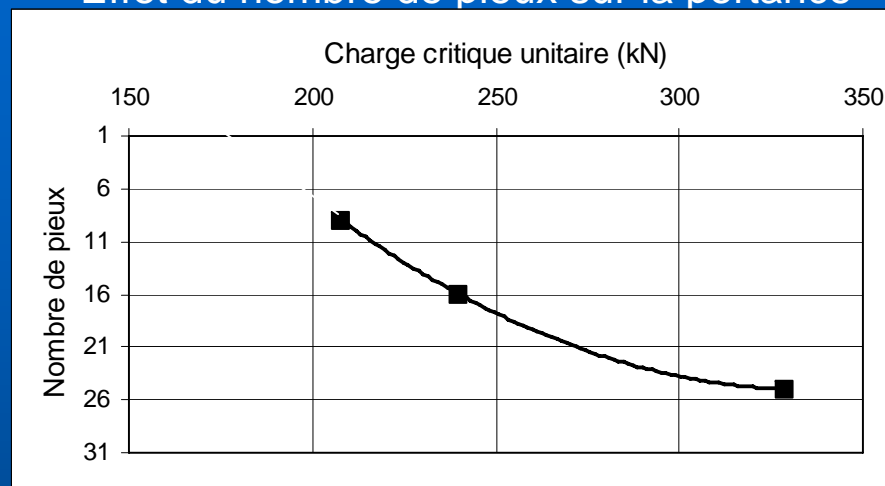
Nombre de pieux	Entraxe (B)
$3 \times 3 = 9$	10
$4 \times 4 = 16$	6.5
$5 \times 5 = 25$	5
$6 \times 6 = 36$	4

Effet de la densité du réseau de micropieux sur la portance

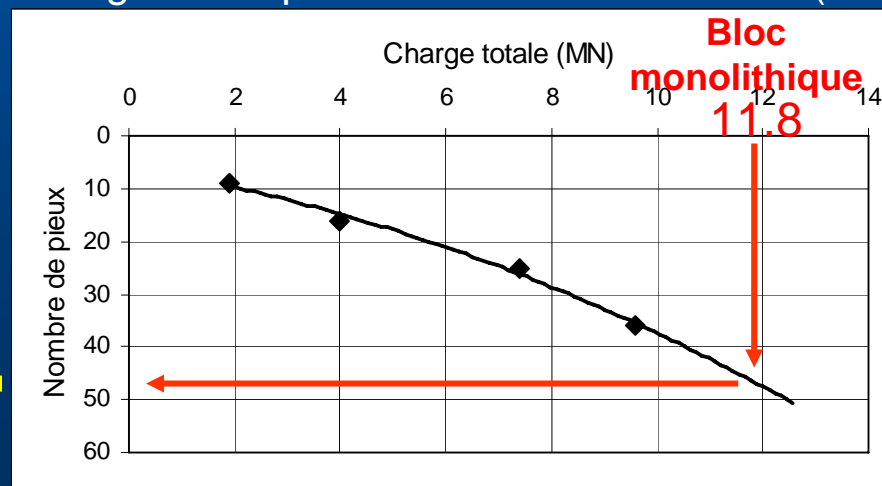
Courbes de chargement vertical



Effet du nombre de pieux sur la portance



Charge totale pour un tassement de 4 cm (B/3)



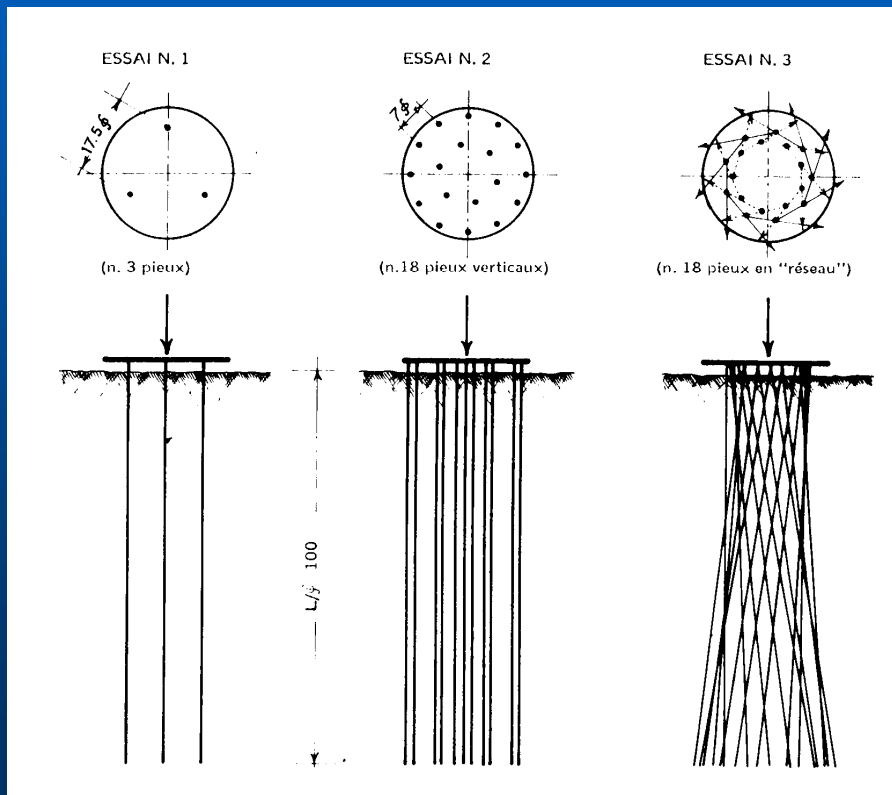
Réseaux équivalent au bloc monolithique :

7 x 7 pieux soit un entraxe de 40 cm (3.3B)



Pieux Lizzi | Diamètre B = 10 mm (barres d'acier Φ 8mm enduites de sable)
Longueur D = 1 m (D/B = 100)

Sol : Sable tamisé « incohérent », densité non précisée



Charges limites et coefficient d'efficacité du pieu isolé, du groupe de 18 pieux verticaux et du réseau de 18 pieux inclinés (Lizzi, 1979)

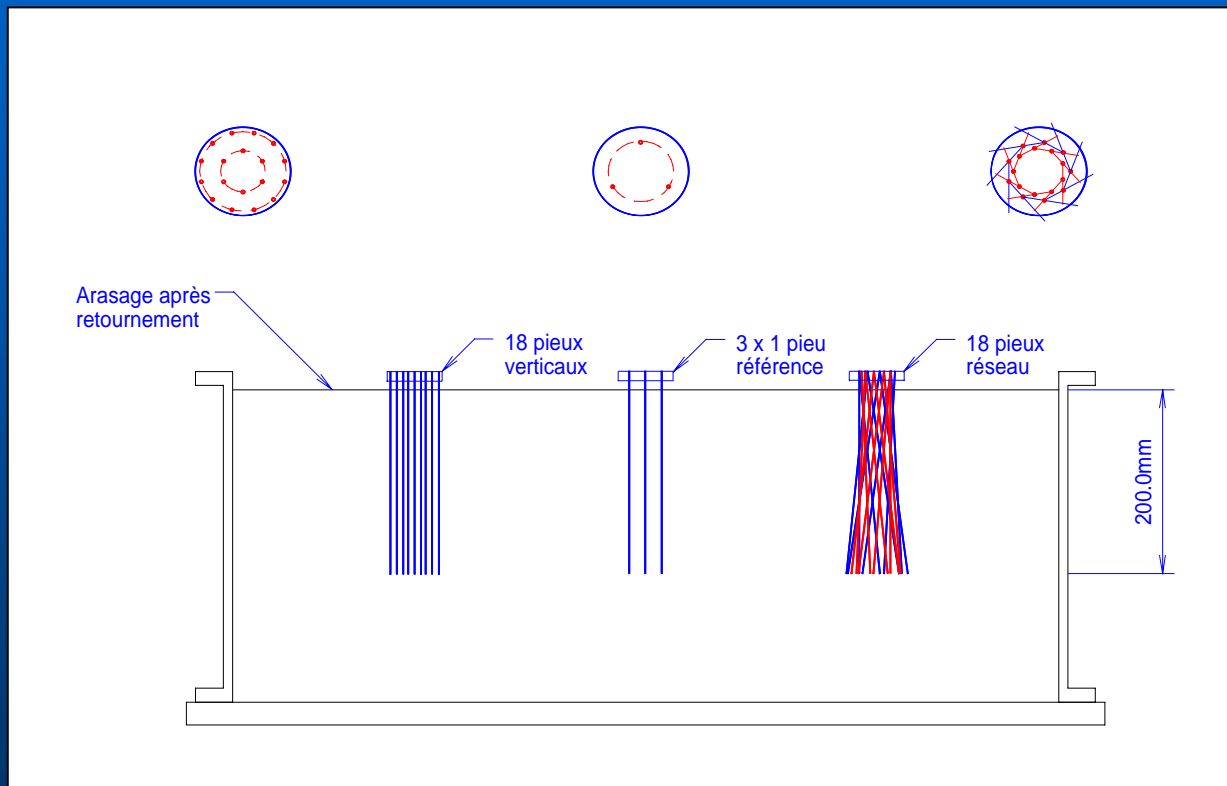
	Pieu vertical isolé x 18	Groupe de 18 pieux verticaux	Réseaux de 18 pieux
Charge limite	14.4 kN	24.2 kN	32 kN
Coefficient d'efficacité	1	1.68	2.22



Essais de réseaux sur modèles centrifugés (10g)

Modèles : Diamètre B = 2mm Longueur D = 0.2 m ($D/B = 100$)

Sol : Sable de Fontainebleau sec dense (16.2 kN/m^3)

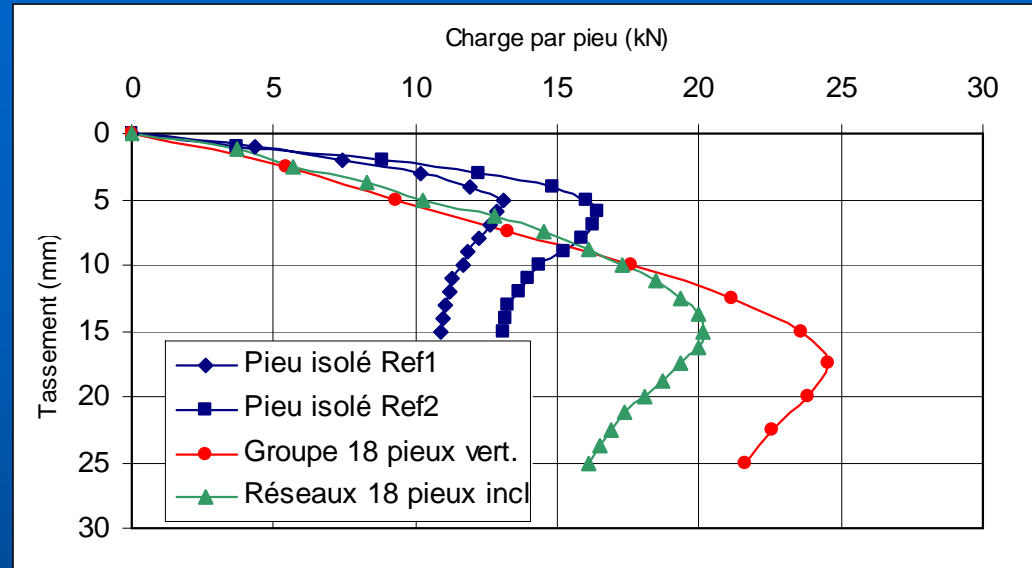


Conteneur d'essai



Résultats des essais sur modèles de réseaux

Courbes de chargement
(charge - Tassement)



Comparaison groupe et réseau

Comparaison avec les données Lizzi

Coefficient d'efficacité C_e	Groupe de 18 pieux verticaux	Réseaux de 18 pieux
Essais Lizzi	1.68	2.22
Essais LCPC	1.61 & 1.56	1.31

Autres réseaux étudiés



« Il s'agit de recherches expérimentales essentiellement qualitatives » Lizzi, 1979

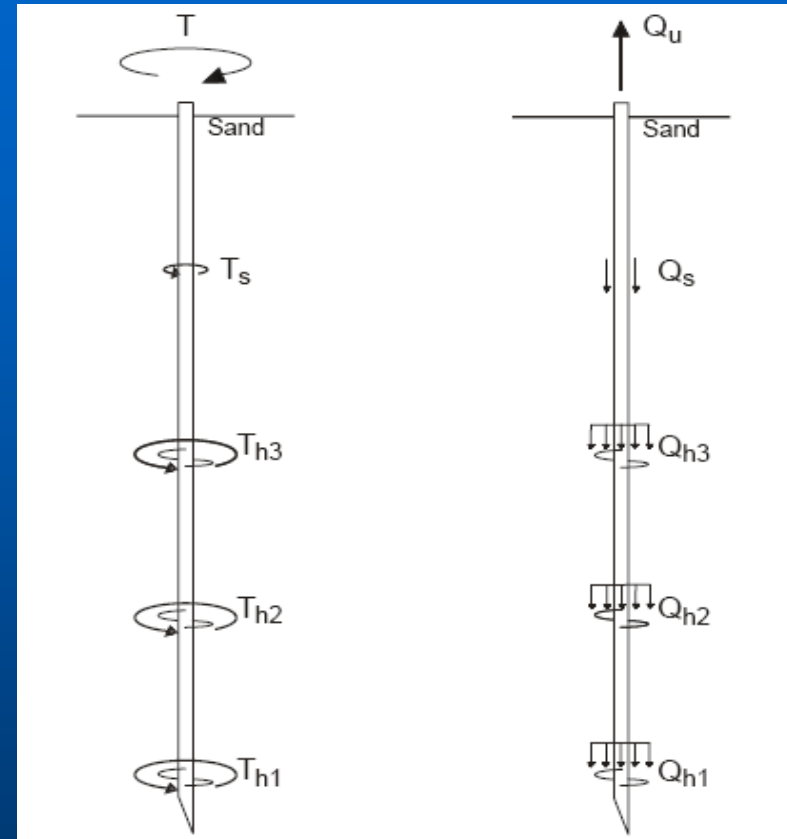
Pieux hélicoïdaux – Mise en place et résistance

Objectifs des essais sur modèles :

- Etude de l'effet de la compacité du sol, du nombre et de la position des hélices

- Validation du modèle théorique liant la résistance à l'arrachement Q_u au couple appliqué lors de la mise en place T

$$Q_u = \frac{2T_h}{d_c \cdot \text{tg}(\theta + \delta_r)} + \frac{2T_s}{d}$$



➡ Nécessité de développer un dispositif permettant la mise en place (vissage) et le chargement sans arrêt de la centrifugeuse

Installation et chargement de pieux hélicoïdaux

Dispositif de mise en place asservi (22g)



Pieux testés (prototypes)

Diamètre du fût : 64, 97 et 132 mm

Diamètre des hélices : 214, 325 et 440 mm

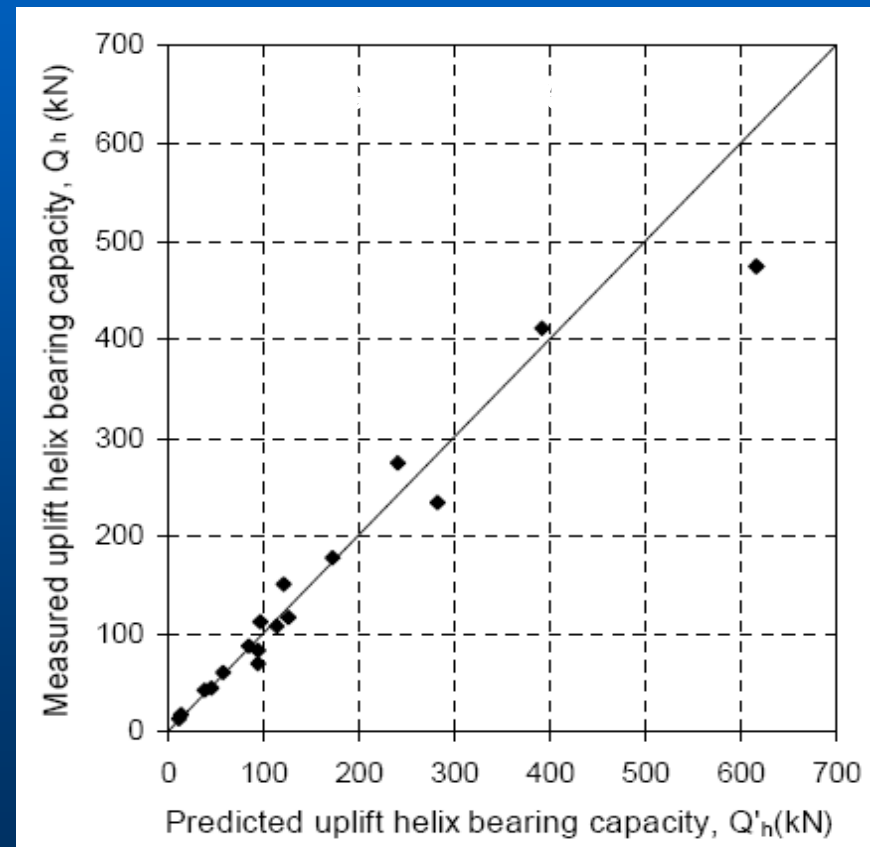
Nombre d'hélices : 1 à 3

Profondeur : 2,9m à 6,2m

Sables : $\gamma_d=15,46 \text{ kN/m}^3$ ($I_D=56\%$, $\phi=31^\circ$)

$\gamma_d=16,30 \text{ kN/m}^3$ ($I_D=85\%$, $\phi=41^\circ$)

Comparaison entre résistance à l'arrachement mesurée et calculée



Tsuha (2007)

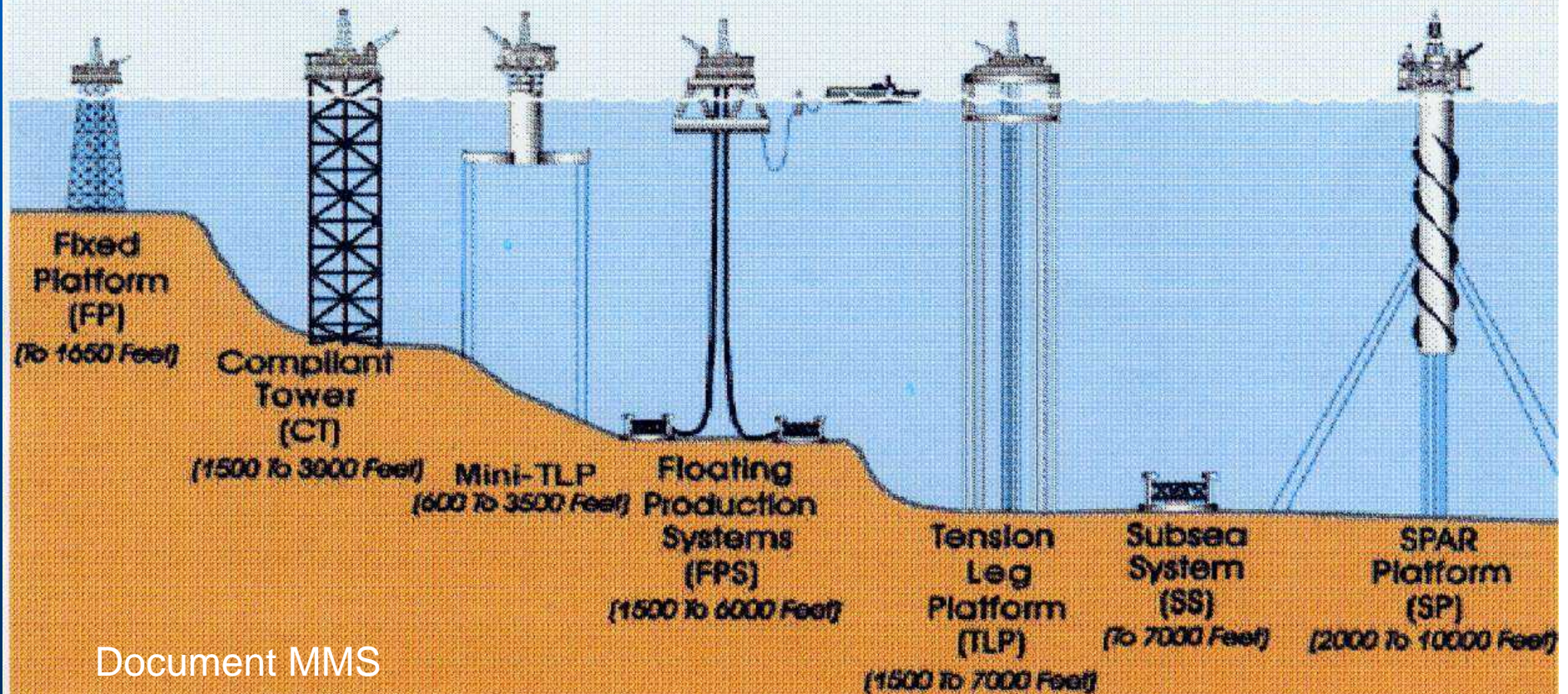


Application aux fondations d'ouvrages offshore

Exxon	Caissons H=30 m D=15 m charges vert. statiques&cycliques
Exxon	Caisson à succion - Comparaison essai sur site NGI
BOS-Geodia	Plancher de stabilité à effet de succion
BOS-Geodia	Groupe de 9 pieux et fondations mixtes
Ifremer-Geodia	Caisson à succion sous charges statiques et cycliques
Ifremer-Geodia	Groupes de 3 pieux pour tour souple
Chevron	Pieux d'ancrage : plate-forme Genesis (L=76 m, B=2,44 m)
Ifremer-Sage-Geodia	Caissons à effet de succion
Exxon Mobil	Caissons à effet de succion (H=30m, D=6m)
Total	Caissons à effet de succion

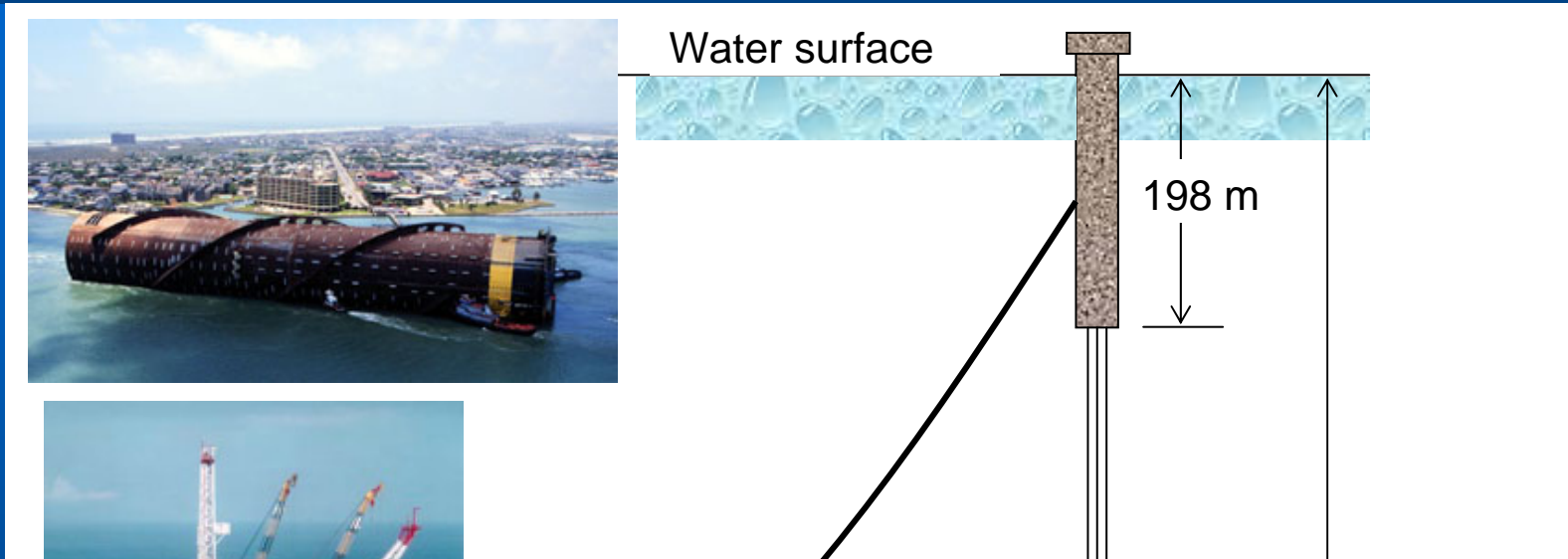
Clauses de confidentialité !

Deepwater Systems



Document MMS

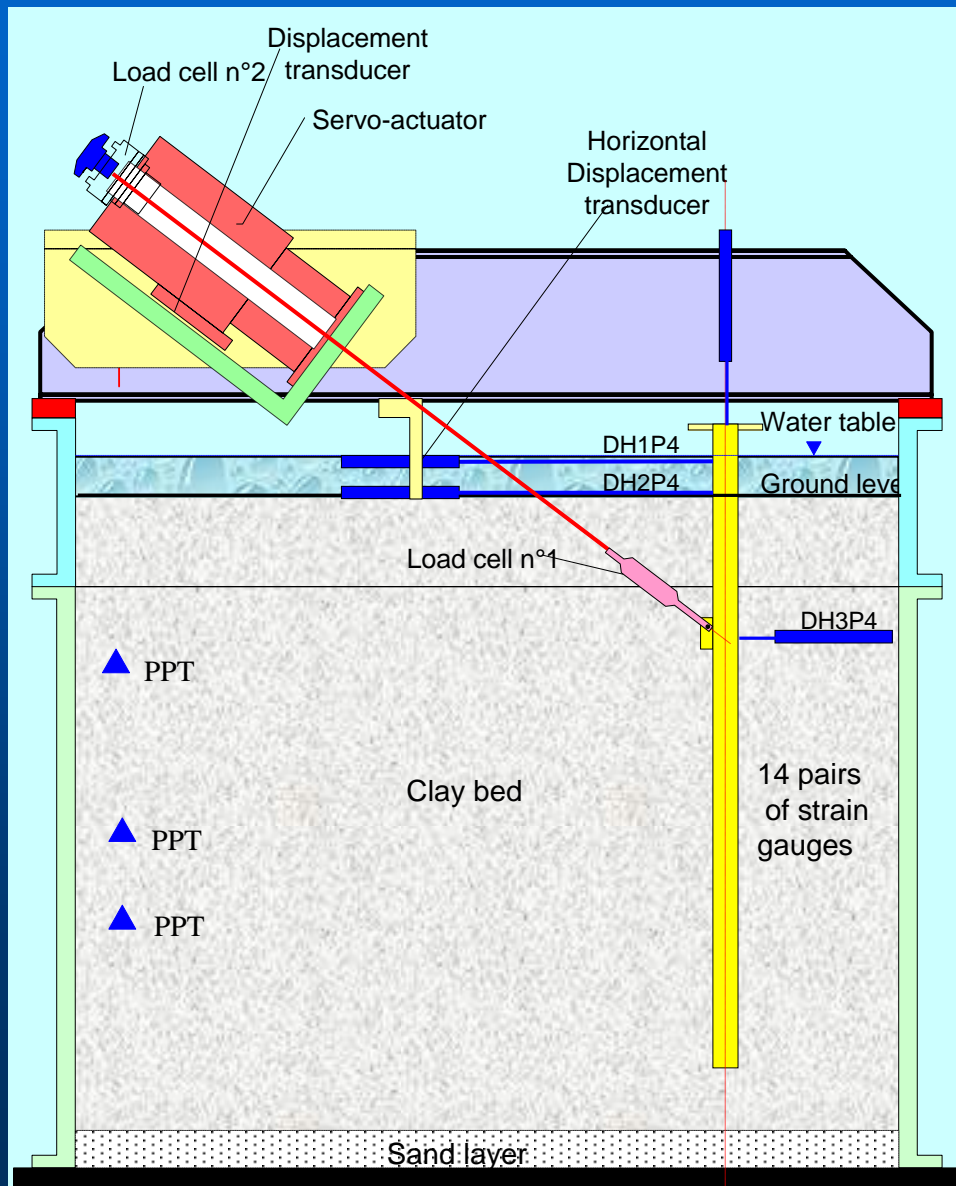
Fondation de la plate-forme Genesis (Chevron)



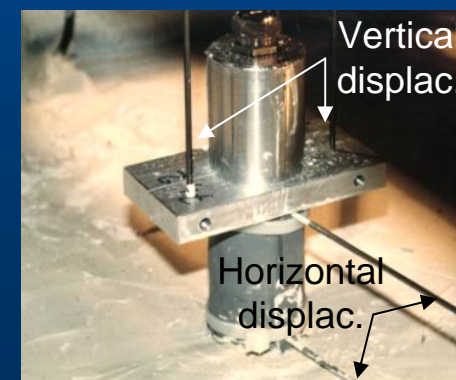
Objectifs des essais

- Détermination des profils de moments de flexion (pieux à inertie variable)
- Validation du découplage (composante verticale – composante latérale)
- Comportement sous séquences cycliques (tempêtes)
- Détermination expérimentale des courbes P-y
- Relation entre P_u et résistance au cisaillement non drainée du sol

Dispositif expérimental (Plate-forme Chevron Genesis)



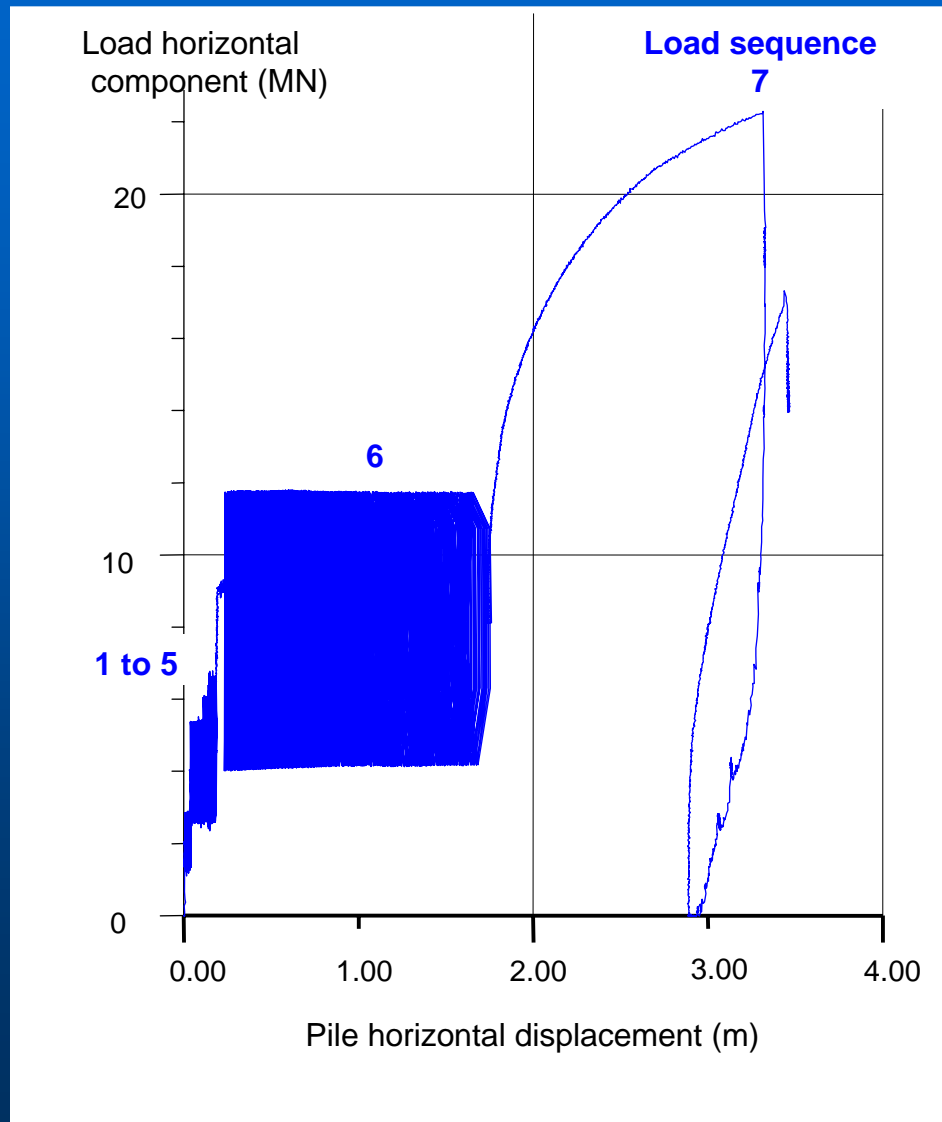
Pieux modèles Echelles 1/100 et 1/74



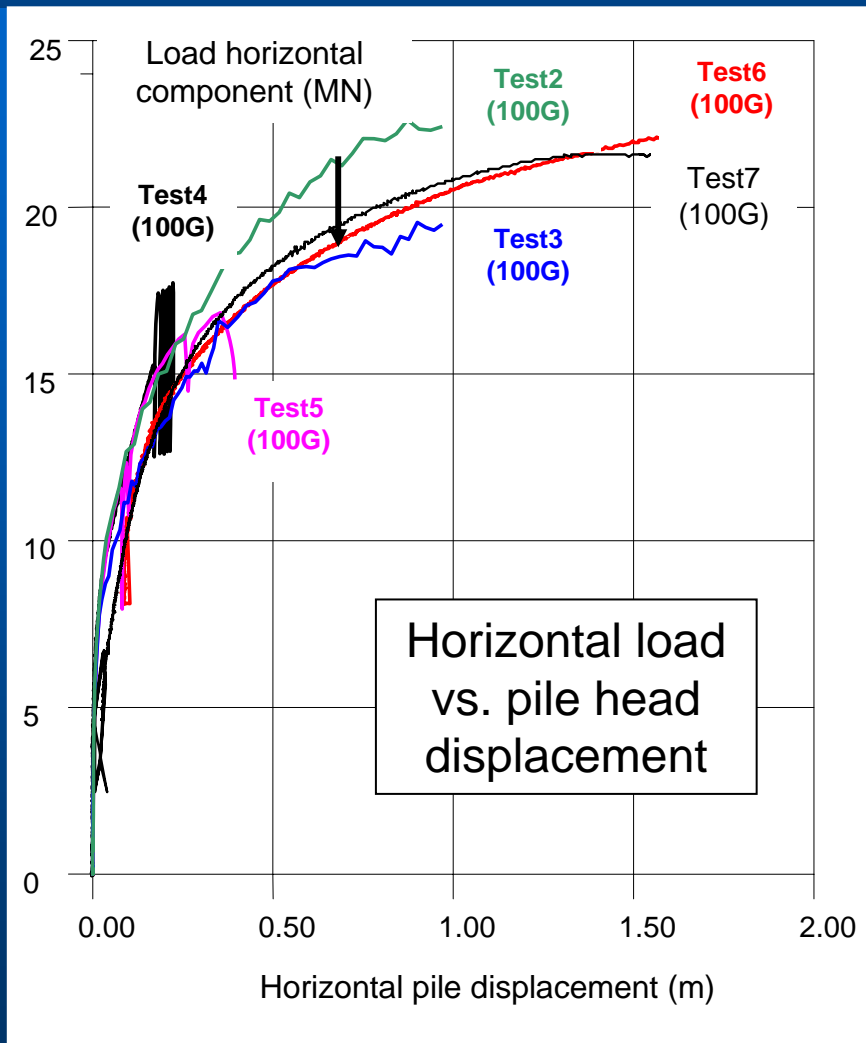


Exemple de séquences de chargement (Test 6)

Load seq.	Cycles	Qmin (MN)	Qmax (MN)
1	Monotonic loading from 0 to 2,8 MN		
2	1800 cycles	1,7 MN	3,9 MN
3	1500 cycles	3,6 MN	7,6 MN
4	1000 cycles	3,6 MN	8,4 MN
5	500 cycles	3,4 MN	9,2 MN
6	500 cycles	5,6 MN	16,8 MN
7	Monotonic loading from 11,6 MN to failure and unloading		



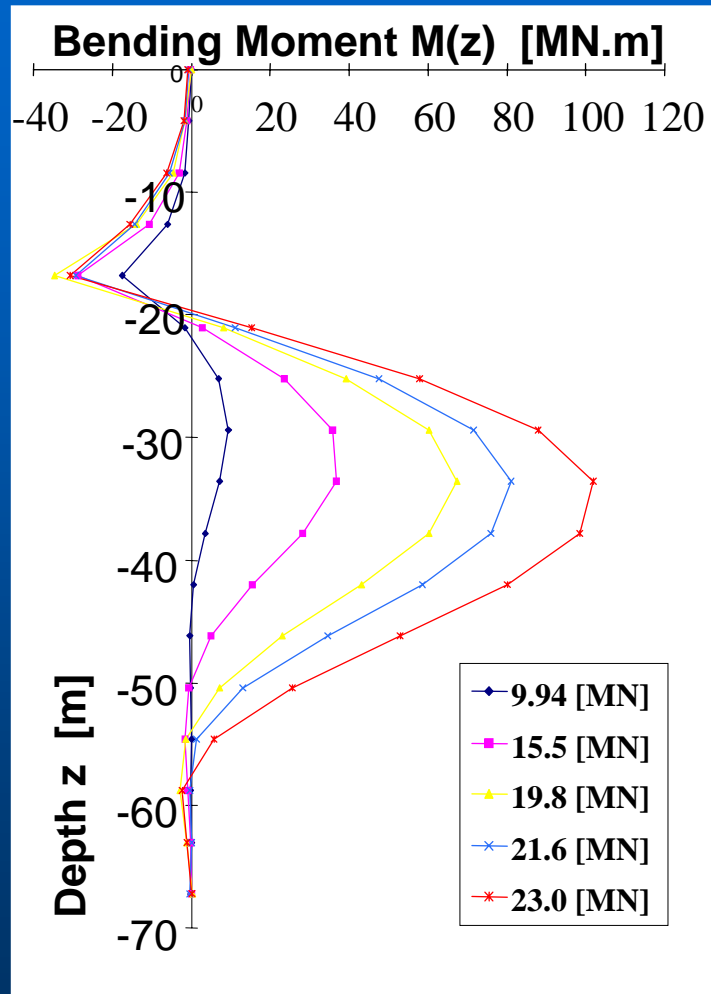
Comportement sous charge monotone



Test 1	Vertical monotonic
Test 2	Horizontal monotonic
Test 3	Inclined monotonic
Test 4	Inclined cyclic
Test 5	Inclined monotonic
Test 6	Inclined cyclic
Test 7	Inclined cyclic
Test 8	Vertical monotonic

Chargement statique final (horizontal ou incliné),
réalisé après les séquences cycliques

Exemple de profils de moment de flexion

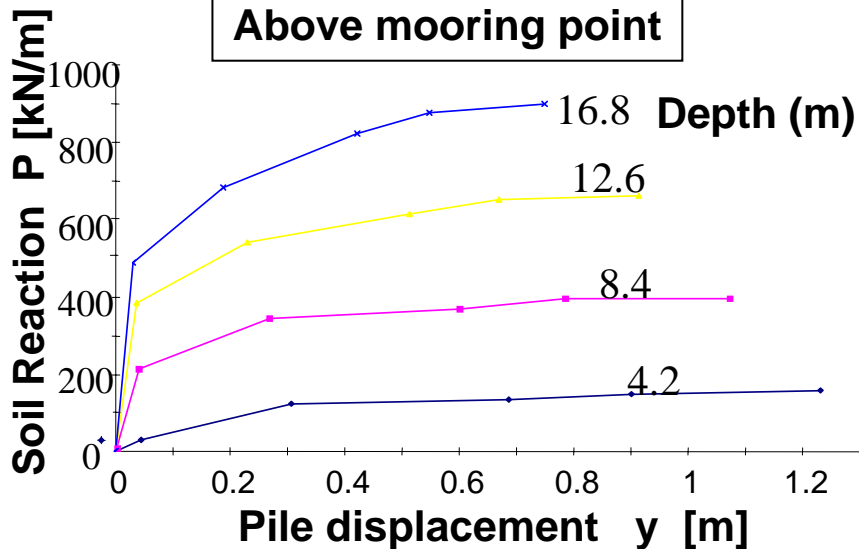


Test 2 (Chargement latéral)

- Lissage des données par Spline quintique
- Double dérivation (détermination de P) et double intégration (détermination de y)
- Construction des courbes de réaction $P-y$ à différentes profondeurs

Profils des moments dans le pieu sous différentes charges latérales (Test 2)

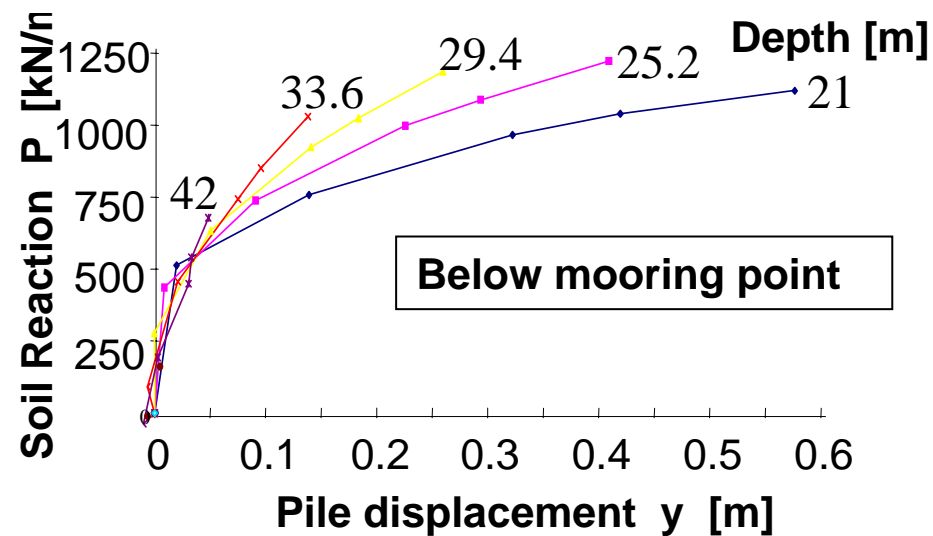
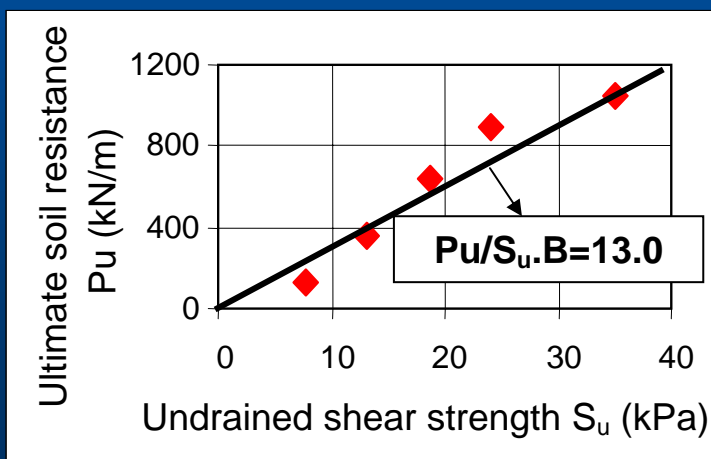
Courbes $P-y$ et résistance latérale ultime



Courbes de réactions $P-y$ déduites des essais de chargement

- Détermination des réactions ultimes P_u
- Comparaison entre P_u and S_u

$$P_u/S_u \cdot B = 13.0$$



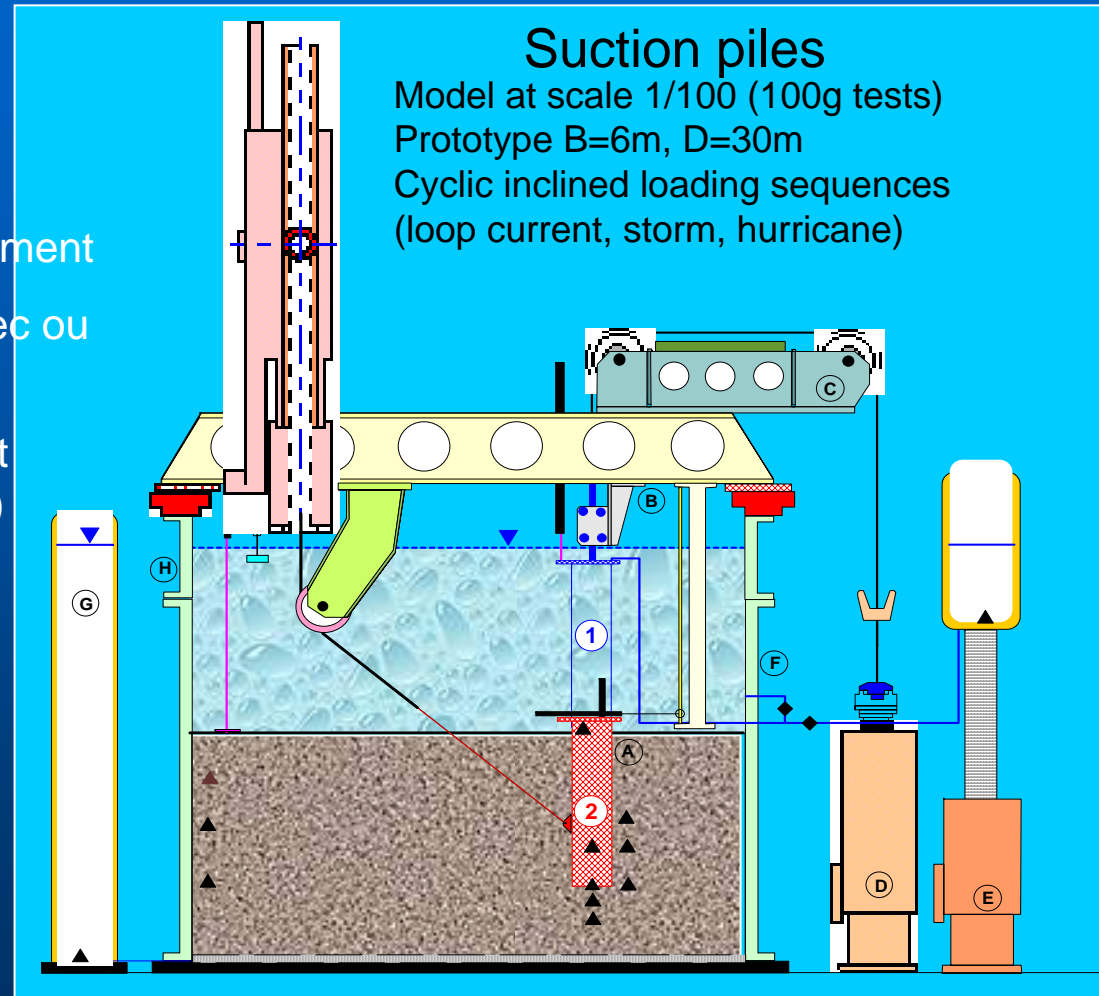
Caissons à suction (ExxonMobil)

Important programme d'essais sur modèles centrifugés

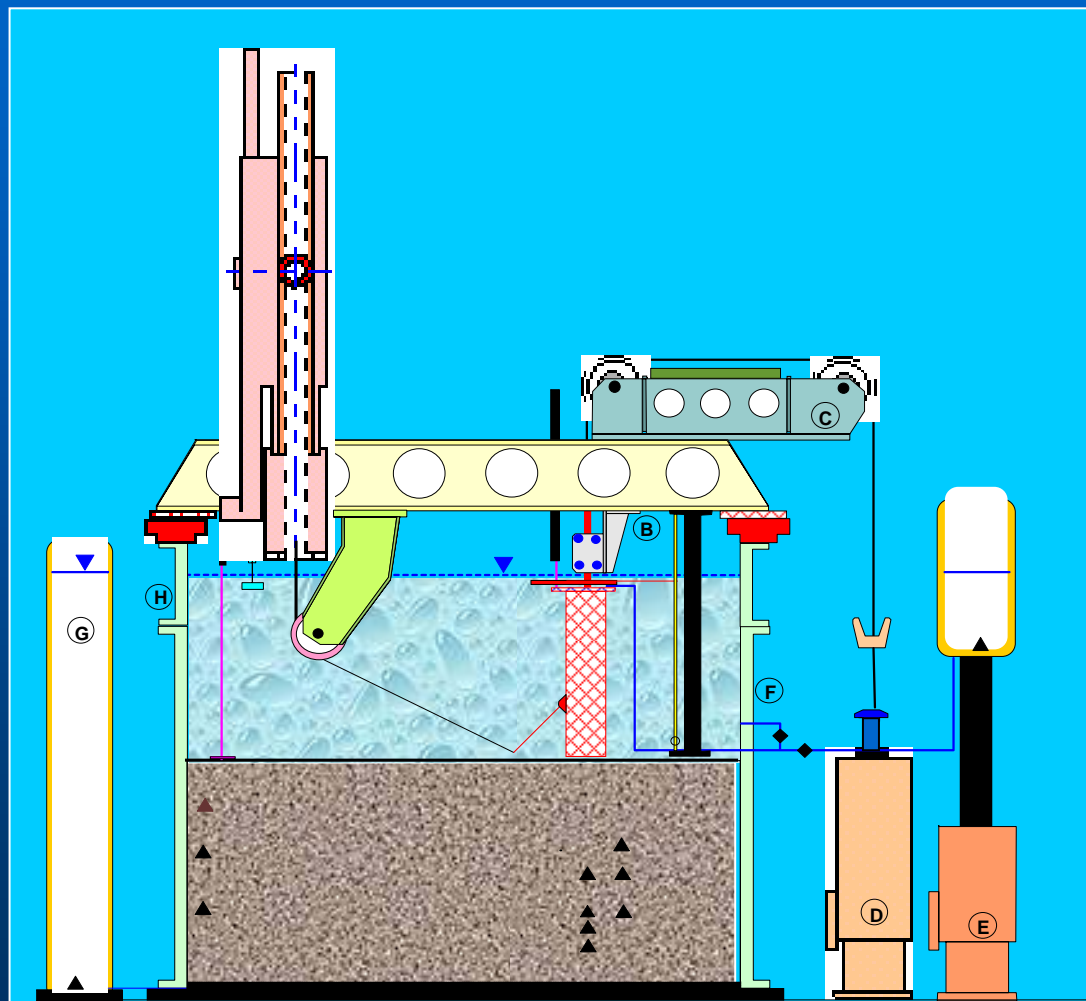
19 massifs argileux, 28 essais de chargement

Etude de la mise en place des pieux (avec ou sans suction)

Réponse aux chargements monotones et cycliques (effets des courants, tempêtes)



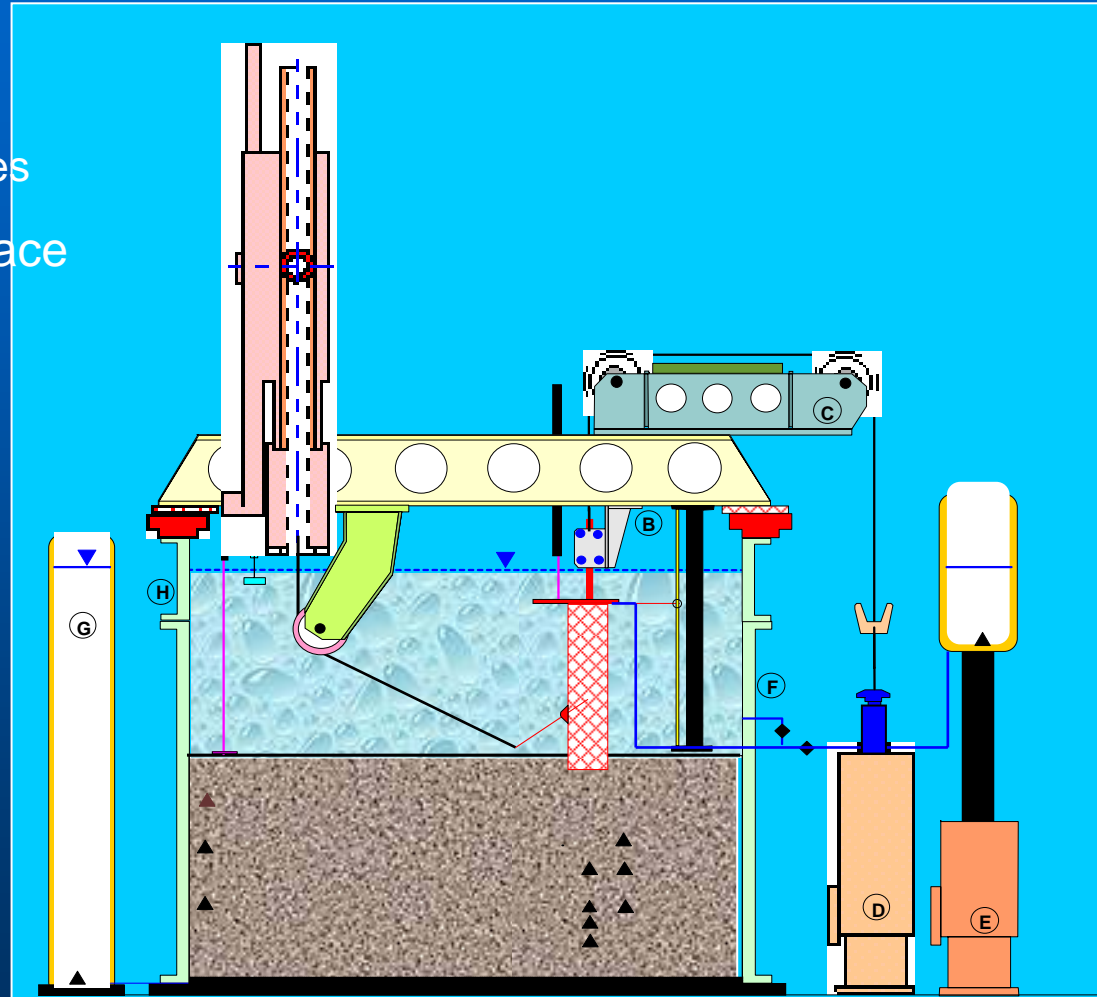
1-Pieu suspendu sous la chaîne
Tête ouverte
Pieu guidé



Technique de mise en place des pieux

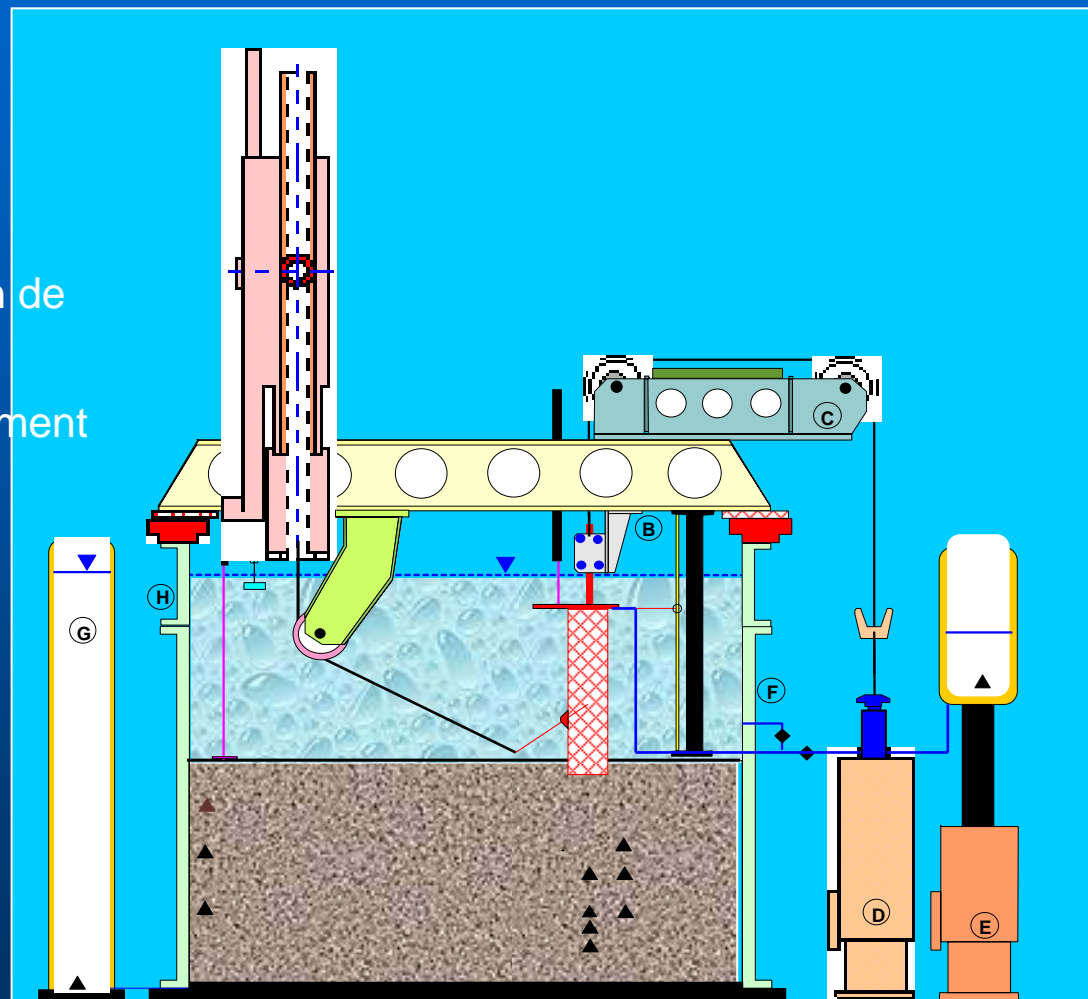
1-Pieu suspendu sous la chaîne
Tête ouverte sur l'extérieur
Pieu guidé sur les premiers mètres

2-Première phase de mise en place
Connexion de la tête au dispositif
de succion



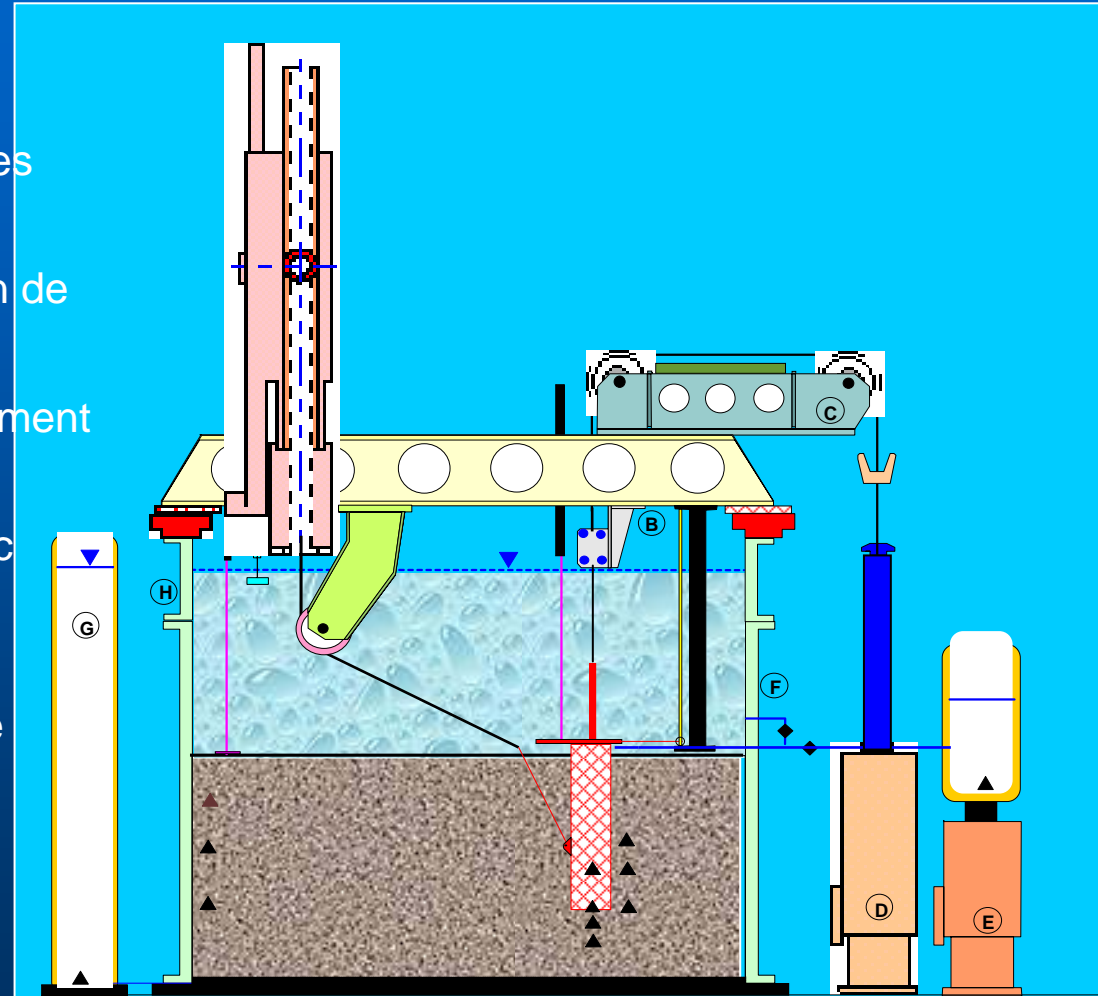
Pile installation technique

- 1-Pieu suspendu sous la chaîne
Tête ouverte
Pieu guidé
- 2-Première phase de mise en place
sous poids propre puis connexion de
la tête au dispositif de succion
- 3-Application de la succion (déplacement
du réservoir de succion



Pile installation technique

- 1-Pieu suspendu sous la chaîne
Tête ouverte sur l'extérieur
Pieu guidé sur les premiers mètres
- 2-Première phase de mise en place
sous poids propre puis connexion de
la tête au dispositif de succion
- 3-Application de la succion (déplacement
du réservoir de succion)
- 4-Poursuite de la mise en place avec
accroissement contrôlé continu
de la succion
- 5-Fin de l'installation et fermeture de
la tête du caisson





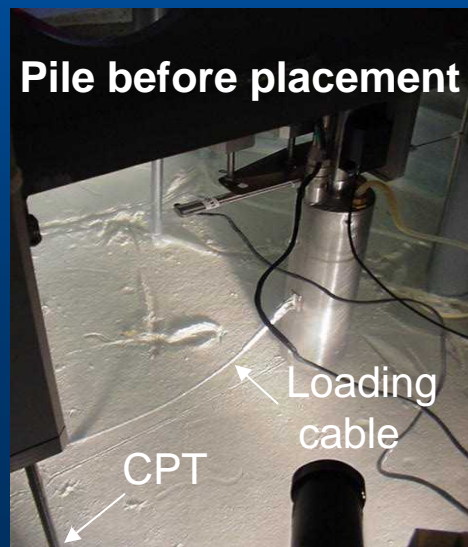
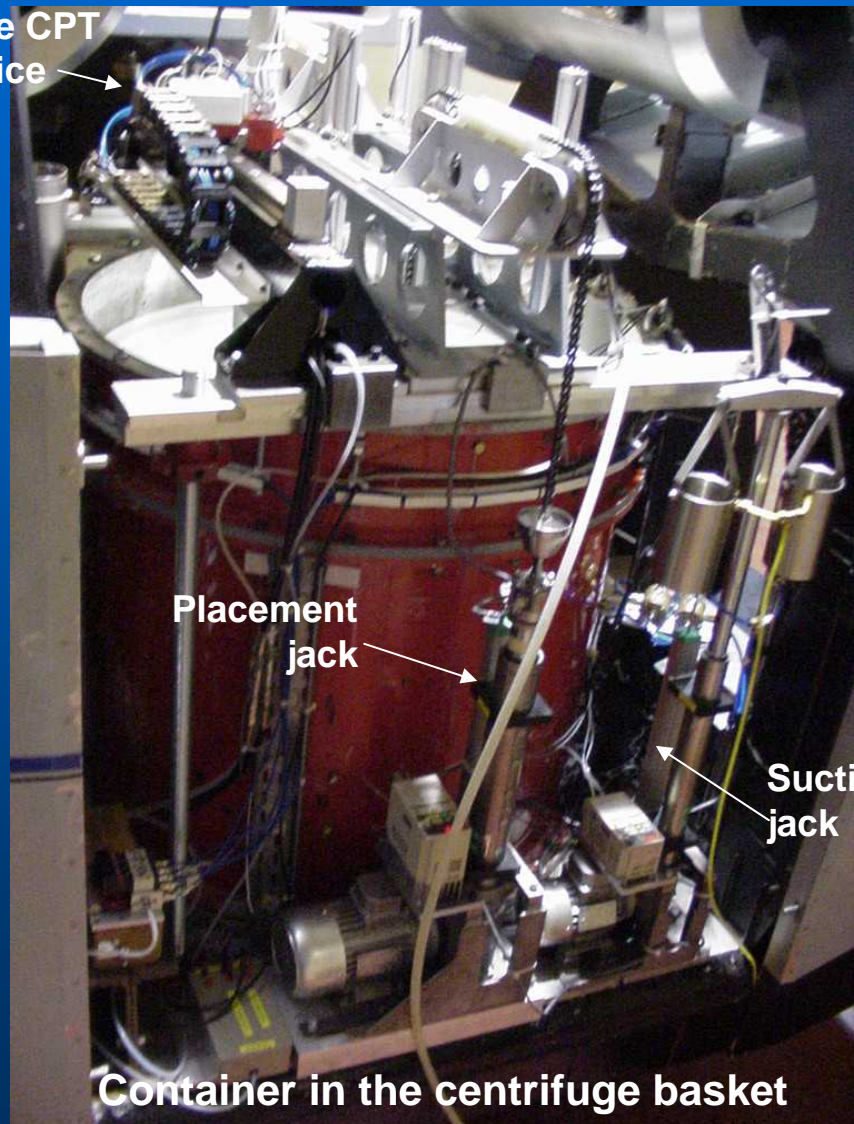
Pieux modèles et dispositifs d'essais (100g)



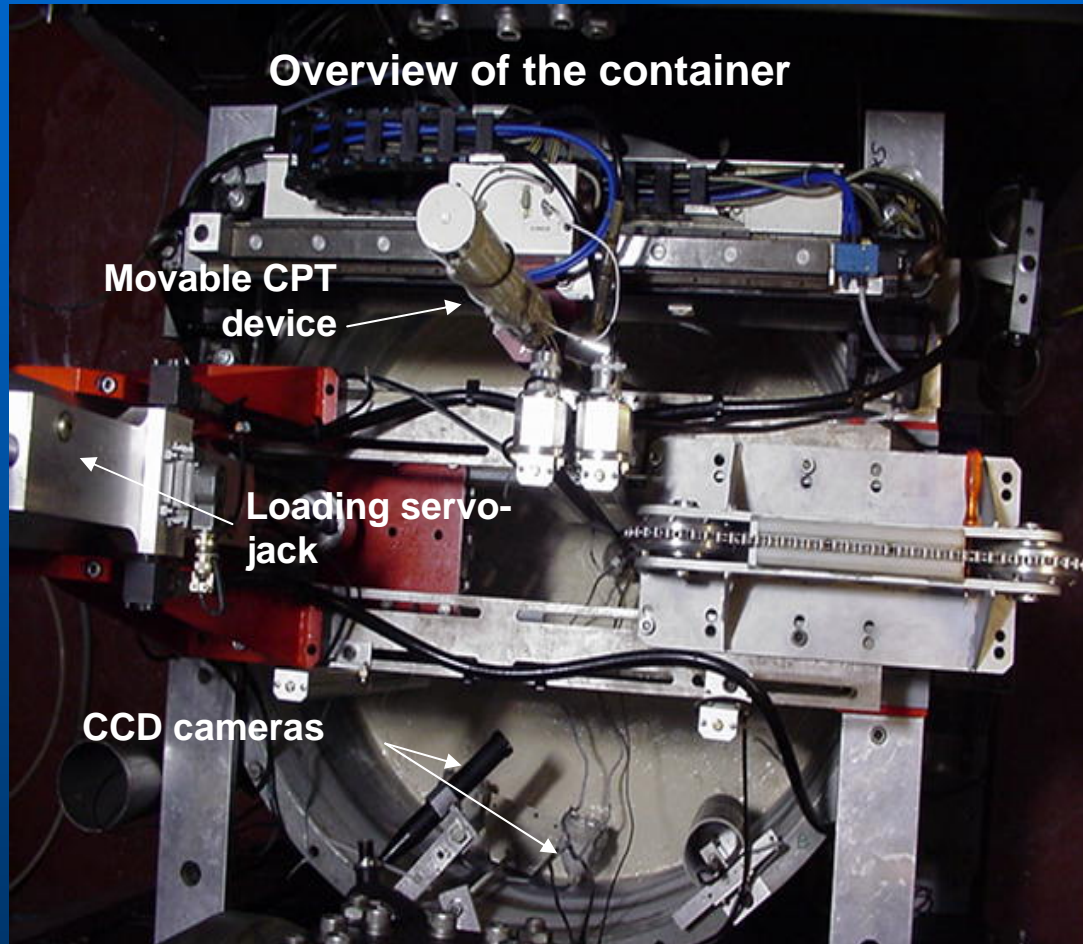
Scale 1/100
(100-g tests)



Movable CPT
device



Essais de chargement



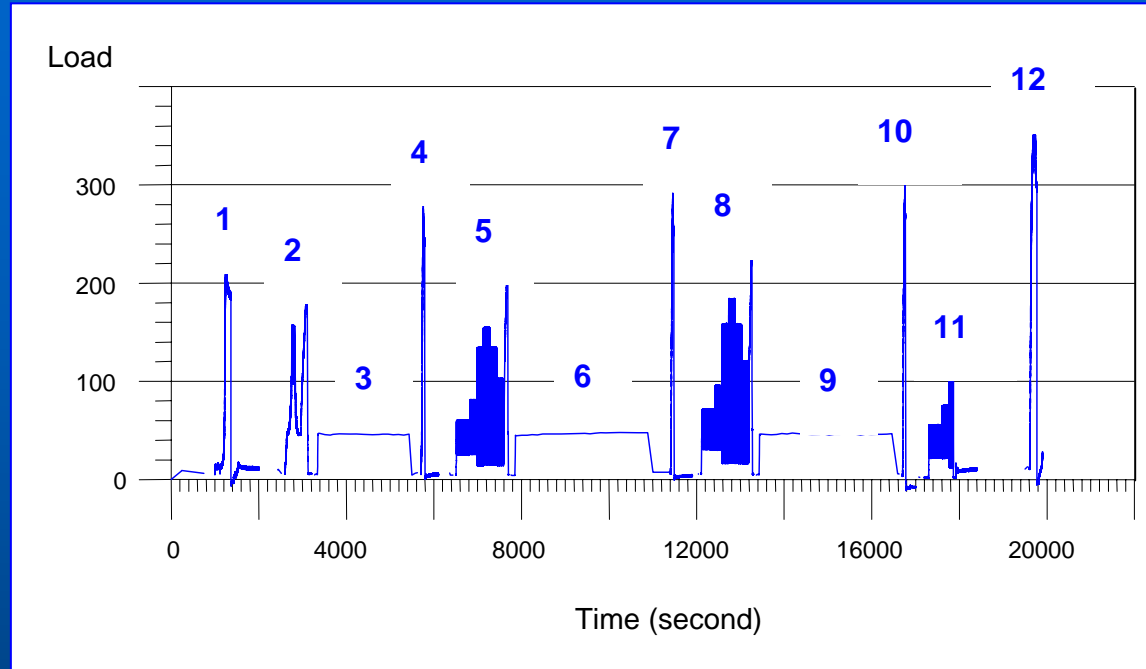
Servo-vérin longue course conçu spécialement

- Asservissement en force
- Asservissement en déplacement

Chargement après mise en place du pieu sans arrêt de la centrifugeuse

- Monotonique non drainé (avec ou sans succion)
- Charge maintenue constante (8 à 12 mois)
- Cycles dus aux courants (40 jours, 40 cycles)
- Tempête (28 heures, 728 cycles)

Exemple de séquences de chargement



1 Monotonic loading

2 Loop current sequence + Monotonic loading

3 Sustained load (35 min ~ 8 months)

4 Monotonic loading

5 Hurricane n°1 + Monotonic loading

6 Sustained load (52 min ~ one year)

7 Monotonic loading

8 Hurricane n°2 + Monotonic loading

9 Sustained load (52 min ~ one year)

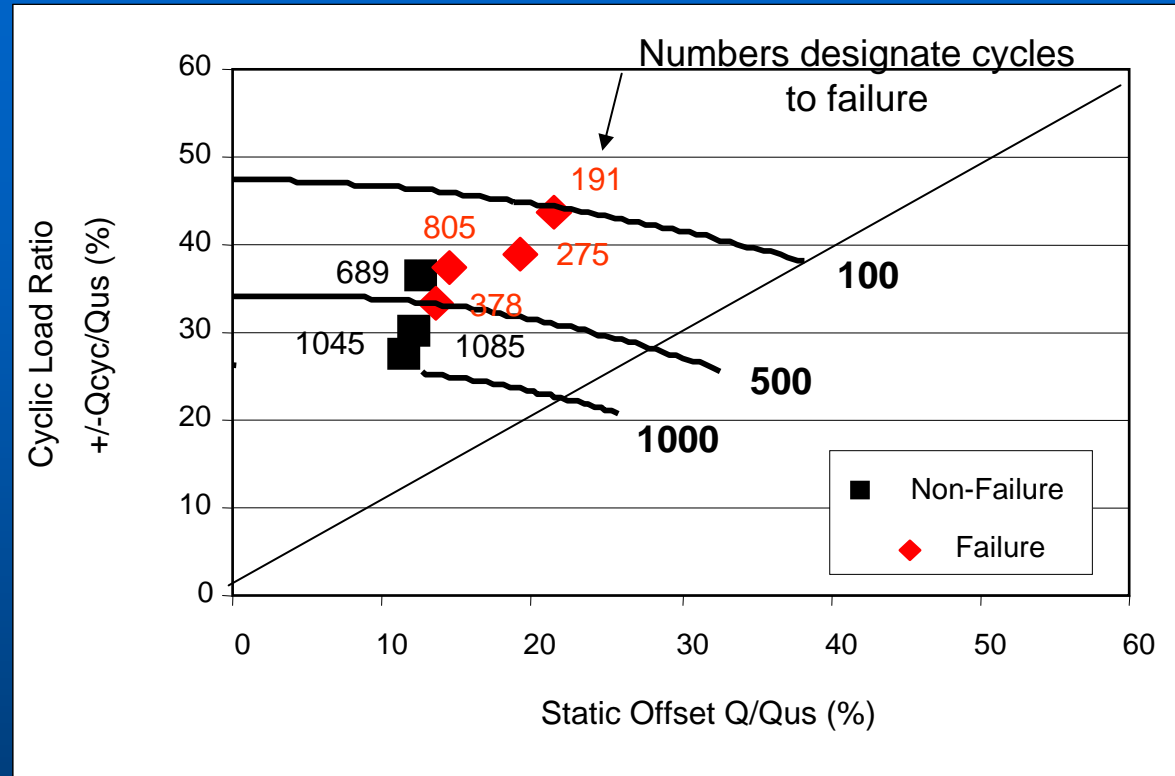
10 Monotonic loading

11 Hurricane n°3

12 Monotonic loading to failure

(Monotonic loadings are displacement controlled, other sequences are load controlled)

Diagramme de stabilité des caissons



Cyclic ratio vs. static offset

Abaque donnant le nombre limite de cycles avant rupture

Conclusions provisoires

Possibilités.....et..... limites (actuelles !)

<ul style="list-style-type: none"> • Méthode expérimentale bien adaptée aux études paramétriques et à la validation de modèles théoriques ou numériques 	<ul style="list-style-type: none"> • Application à un projet spécifique fonction des possibilités de modéliser correctement le massif de sol
<ul style="list-style-type: none"> • Progrès constants dans le développement des techniques expérimentales, de l'instrumentation et du traitement d'images • De plus en plus d'interventions complexes en vol (robots embarqués) 	<ul style="list-style-type: none"> • Développement en cours de simulateurs de séismes 2D, de chambres atmosphériques • Parc de centrifugeuses stable en Europe, en explosion en Asie
<ul style="list-style-type: none"> • Maîtrise et connaissance précise des caractéristiques physiques et mécaniques des massifs de sol (sables et argiles) 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès récents sur les sols non saturés <ul style="list-style-type: none"> • Recherche en cours pour les sols « intermédiaires »
<ul style="list-style-type: none"> • Conditions de similitudes connues et souvent faciles à satisfaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Deux facteurs d'échelle différents pour le temps (diffusion et dynamique)