

Journée Technique du 27 Janvier 2015

« *Hommage au Professeur Pierre FORAY* »

Contribution des essais sur modèles à l'évolution des
méthodes de dimensionnement des pieux

Jacques GARNIER & Luc THOREL



IFSTTAR

Professeur Pierre FORAY, pionnier dans l'essor de la modélisation physique en géotechnique

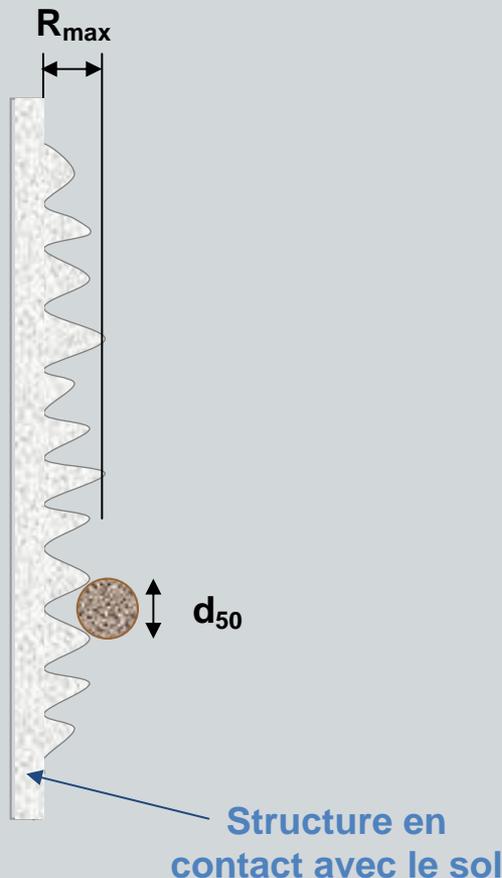
Travaux portant sur le développement de la méthode et des outils

- Conception et réalisation d'équipements, élaboration de techniques expérimentales au laboratoire 3S
- Coordination de programmes de recherches souvent sur contrats
- Interventions lors d'expérimentations dans différents laboratoires et universités en France et à l'étranger
- Nombreuses contributions à l'étude et à la définition des lois de similitudes (TC 104)
 - Modélisation de la rugosité dans les cisaillements d'interface
 - Effet de la taille des modèles sur la résistance au cisaillement
 - Nouvelle appréciation de la profondeur critique
 - Etat des contraintes le long du pieu et dans les massifs



Modélisation de la rugosité d'interface sol-structure

La rugosité R_{\max} est un paramètre dimensionné. Il doit être pris en compte dans toutes les modélisations d'interfaces (cf. hydrodynamique et aérodynamique).



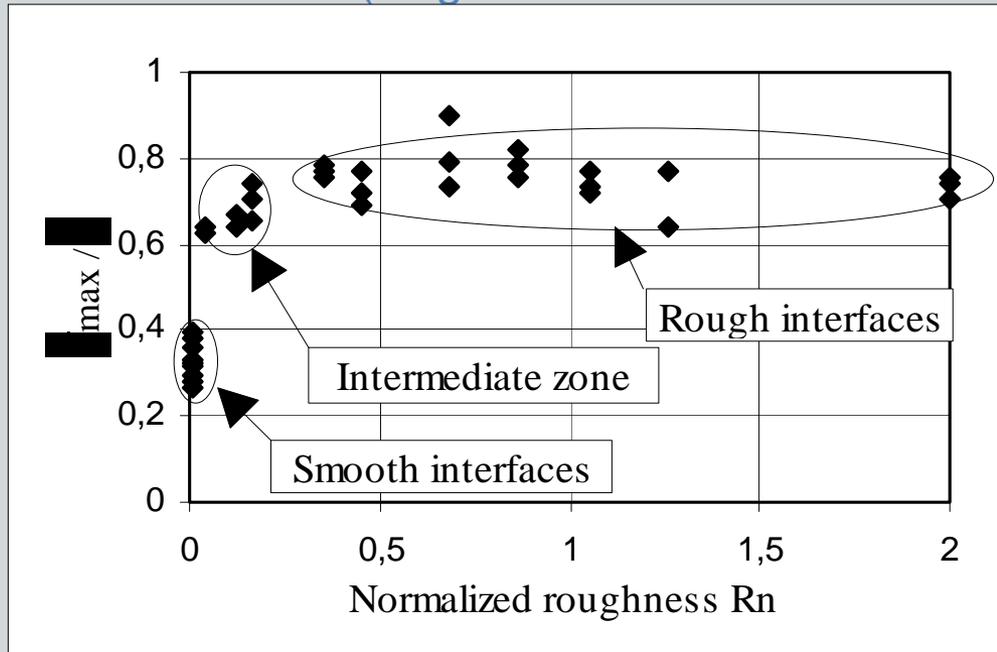
$$R_n = R_{\max} / d_{50}$$

Dans les milieux granulaires,
la **rugosité normalisée** R_n
joue un rôle déterminant sur le frottement
maximum mobilisable.



Modélisation de la rugosité d'interface sol-pieu

Essais à la boîte de cisaillement d'interfaces sable/acier
(Rugosités normalisées testées R_n de 0 à 2)



Résultats semblables obtenus à l'Imperial College avec des argiles (particules entre 0.001 et 1 mm et rugosités de 0.005 à 7 μ)
Lemos & Vaughan, 2000



Trois plages de rugosités :

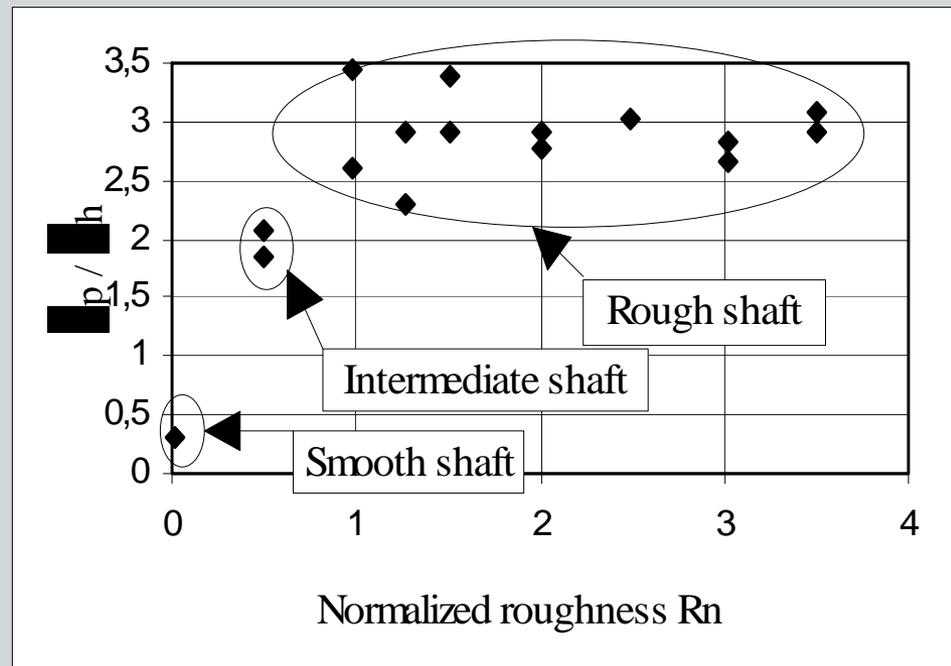
- Lisse si $R_n < 0.02$ (cisaillement au contact de la structure)
- Rugueux si $R_n > 0,5$ (cisaillement dans le sol, dilatance-contractance)
- Intermédiaire (τ_{max} dépend de R_n !)

Garnier & König, 1998



Modélisation de la rugosité d'interface sol-pieu

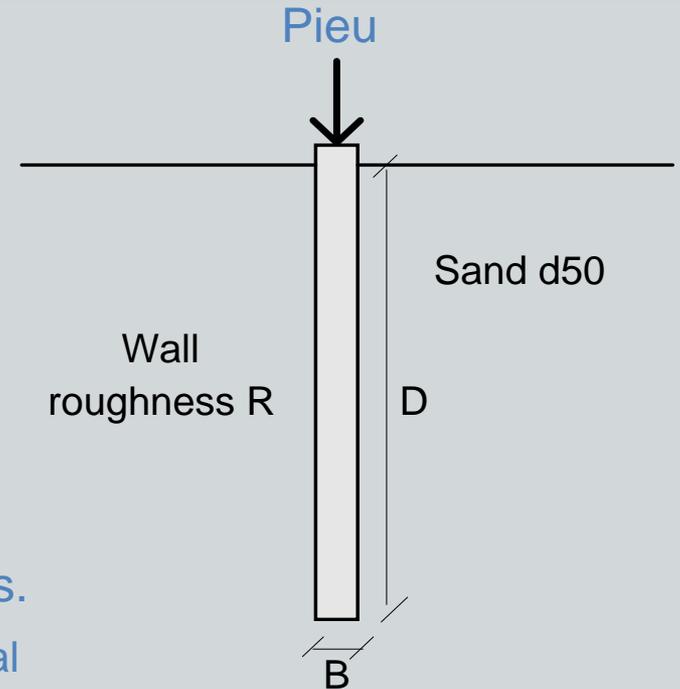
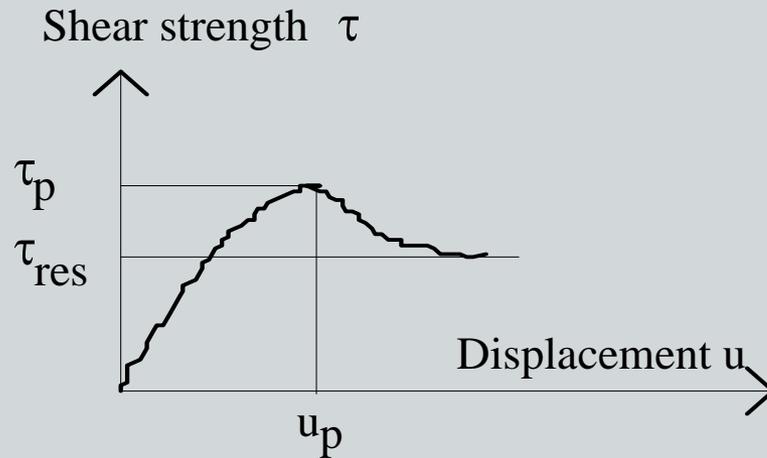
Essais de traction sur les pieux dans le sable de Fontainebleau
(Diamètre $B = 12\text{mm}$, fiche $D = 30\text{cm}$, rugosités testées R_n de 0 à 3,5)
Echelle 1/50 (essais réalisés sous 50 g)



Le comportement rugueux peut être assez correctement reproduit dans les modèles avec $R_n > 1$ (τ_{\max} est alors indépendant de R_n)

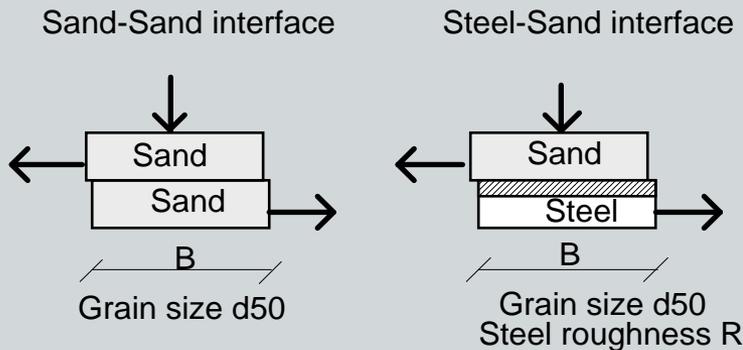


Effet de taille sur la résistance au cisaillement

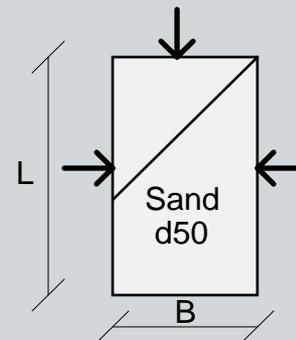


Les essais de laboratoire sont également affectés.

Boîte de cisaillement



Triaxial

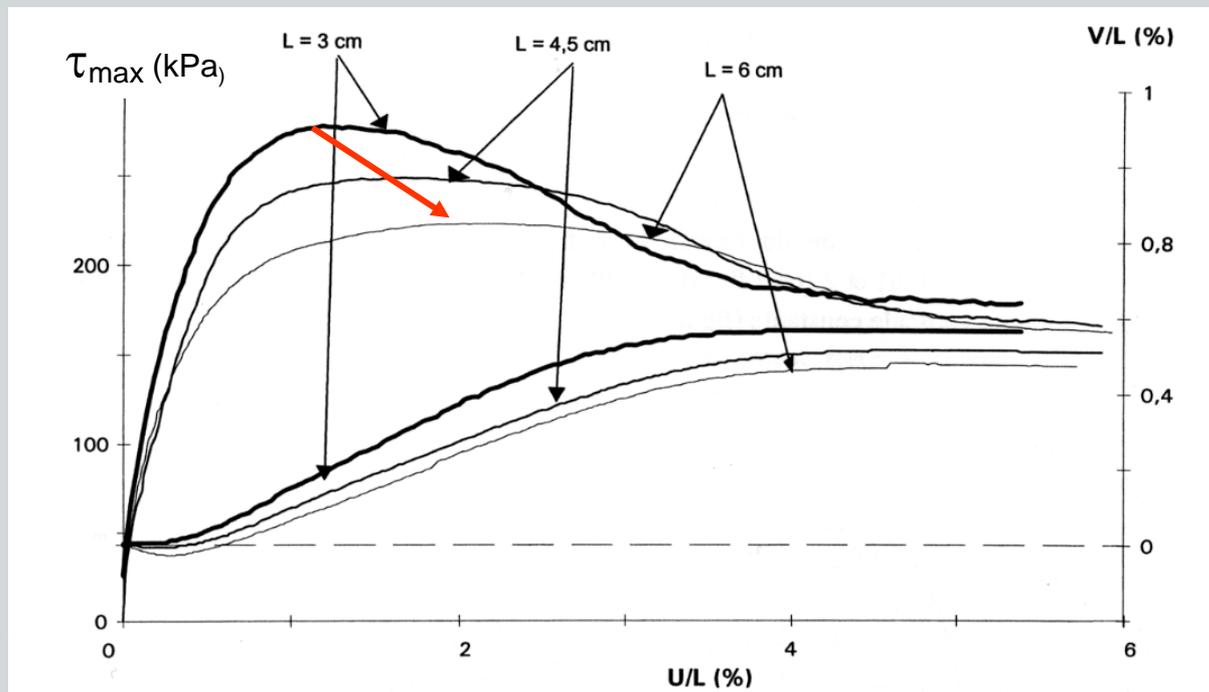


Dimensional variables
 B, D, R, d_{50}



Effet de taille sur la résistance au cisaillement (essais à la boîte)

Cisaillement de sable dans trois boîtes de tailles différentes
(largeur $L = 3\text{ cm}$, 4.5 cm et 6 cm)



La résistance au cisaillement τ_{\max} dépend de L
(τ_{\max} décroît lorsque L croît)

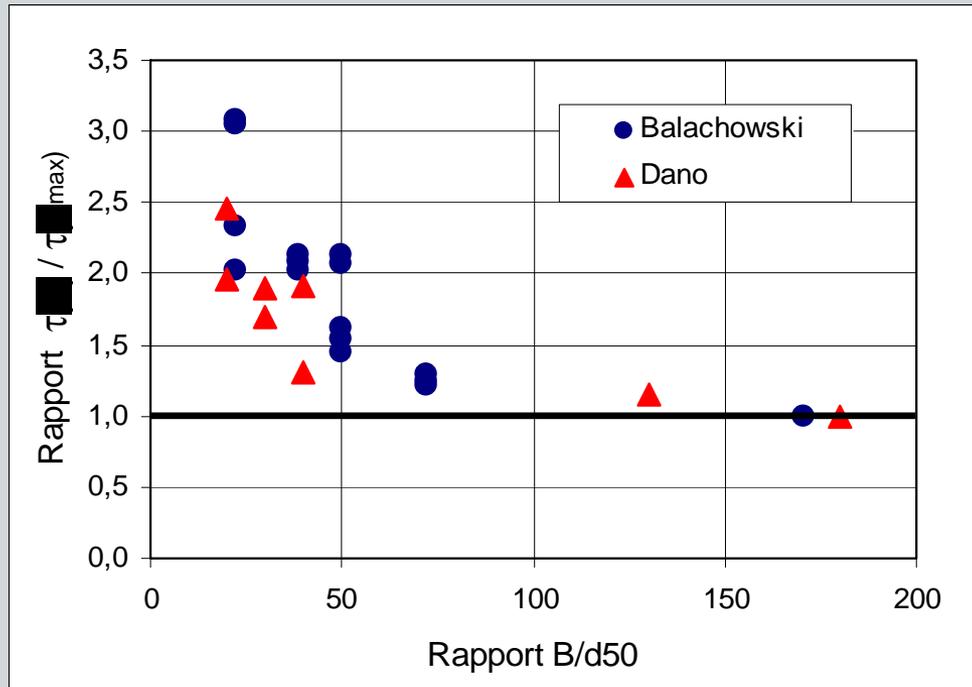


Effet de taille sur la résistance au cisaillement (frottement latéral sur les pieux)

Essais de traction sur des pieux rugueux de différents diamètres

(diamètre B de 4mm à 55mm, sables d'Hostun et de Fontainebleau)

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



Dano, Balachowski, 1995



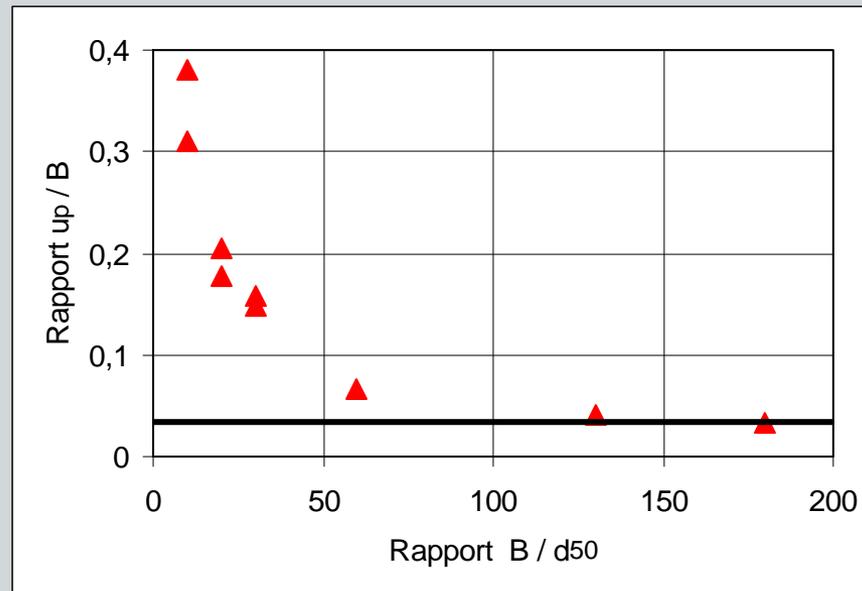
**Le rapport B/d_{50} doit être supérieur à 100
pour limiter l'effet de taille sur le frottement latéral**



Effet de taille sur la résistance au cisaillement (frottement latéral sur les pieux)

Essais de traction sur des pieux rugueux de différents diamètres
(B entre 4mm et 36mm, sable de Fontainebleau)

Effet du rapport B/d_{50} sur le déplacement au pic u_p / B



**Le rapport B/d_{50} doit être supérieur à 100
pour limiter l'effet sur le déplacement au pic**



Contributions au « Catalogue of scaling laws »

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

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: $B/d_{50} > 50(2) \text{ or } 100(1)$	Scaling law on displacement at peak strength is not known	(1) Foray et al. (1998) Garnier & König (1998) (2) Fioravante (2002)

Garnier et al. (2007) Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, *Int. J. of Physical Modelling in Geotechnic*, Vol.7, N°3 : 01-23



Contrats d'études et de recherche sur les fondations d'ouvrages offshore

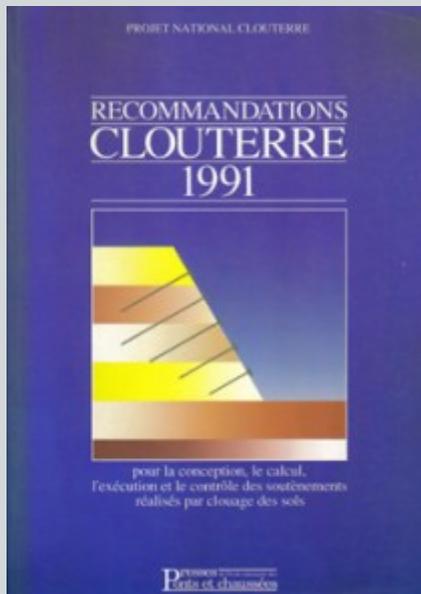
Exxon	Caissons (H=30m, D=15m) sous charges statiques & cycliques
Exxon	Caisson à succion (Comparaison avec essai sur site du NGI)
BOS & Geodia	Plancher de stabilité - Groupes de pieux - Fondations mixtes
Total	Caissons à effet de succion
Ifremer & Geodia	Caisson à succion - Groupes de 3 pieux pour tour souple
SBM	Ancres plates par grands fonds
Chevron	Pieux d'ancrage : plate-forme Genesis (L=76m, B=2,44 m)
Elf Aquitaine Production	Simulation des essais sur site (Euripides)
Exxon Mobil	Caissons à effet de succion (H=30m, D=6m)
Clarom & CONACyT-Mexico-SFERE	Stabilité de pipelines
Clarom	Programme de recherche « Grands fonds »



Contributions des modélisations physiques aux programmes nationaux

Trois partenaires et trois équipements très souvent associés :

- Cuve d'essai (Laboratoire 3S - Univ. Grenoble)
- Chambre d'étalonnage (CERMES - ENPC)
- Centrifugeuse (IFSTTAR Nantes)



Clouterre

Renforcement des sols par clouage (1986-1990)



Asiri

Amélioration des sols par les inclusions rigides (2006-2012)



Erinoh

Erosion Interne dans les ouvrages hydrauliques 2006-2014)

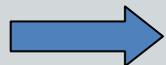


Contributions aux programmes nationaux

Programmes de recherche sur le comportement des fondations profondes

SOLCYP – Sollicitations cycliques des pieux

- Comportement des pieux sous charges axiales cycliques
- Effet des charges latérales cycliques sur :
 - les déplacements du pieu
 - le moment maximum
 - les réactions mobilisées



Recommandations du Projet national, 2015

FOREVER - Renforcement des sols par micropieux (1993-2001)



Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les micropieux, 2004



Contributions au PN FOREVER



Principaux apports des modélisations physiques

- Portance d'un micropieu isolé (effet de l'inclinaison)
- Effet de groupe sous charge axiale
- Résistance au flambement des pieux
- Portance des réseaux de micropieux
- Comportement sous charge latérale
(effet de la proximité d'un talus)



Effet de groupe pour les micropieux (Programme FOREVER)

Effet de la densité du réseau de micropieux sur la portance

- 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

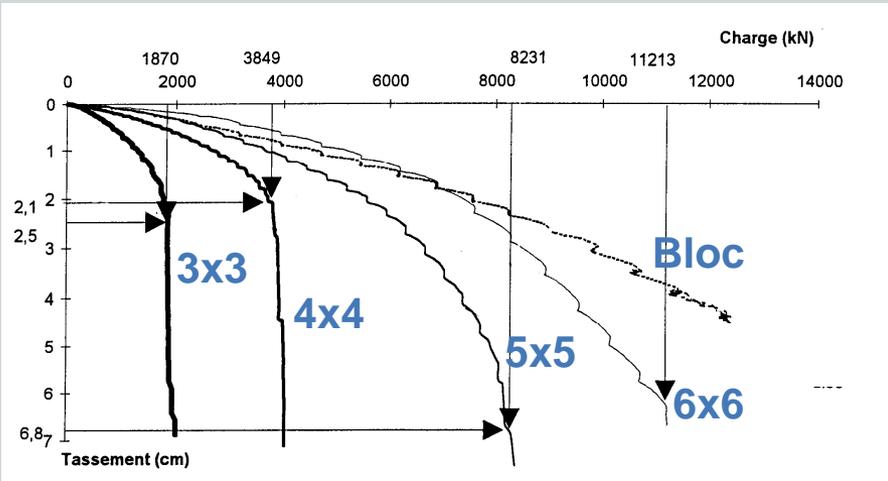


Nombre de pieux	Entraxe (B)
$3 \times 3 = 9$	10
$4 \times 4 = 16$	6.5
$5 \times 5 = 25$	5
$6 \times 6 = 36$	4

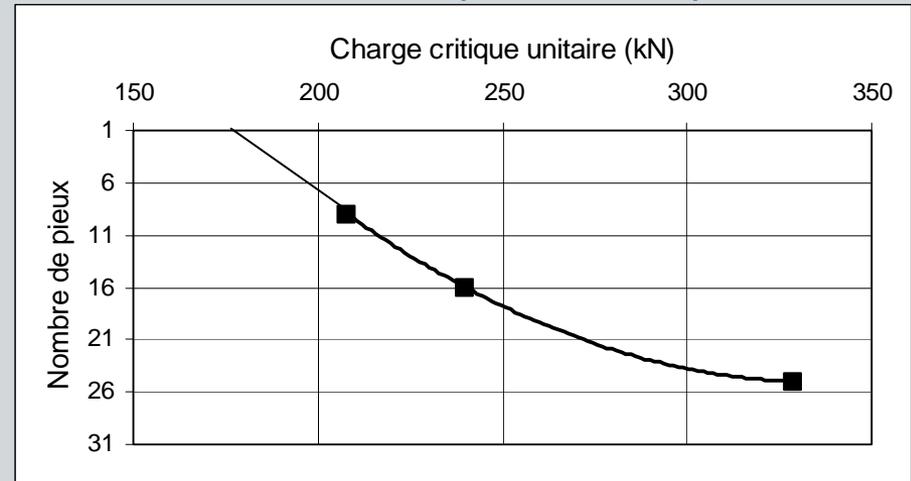


Effet de groupe pour les pieux (Programme FOREVER)

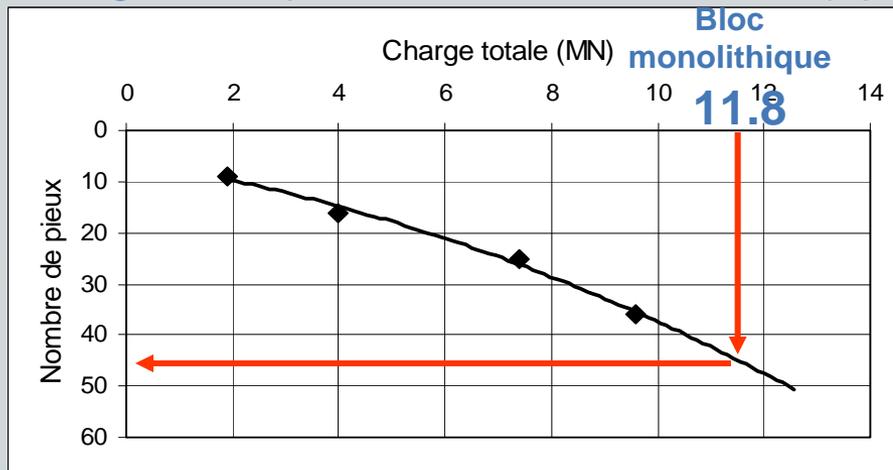
Courbes de chargement vertical



Effet du nombre de pieux sur la portance



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



Réseaux équivalent au bloc monolithique :

45 à 50 pieux soit un entraxe d'environ 3B



Résistance au flambement des pieux (Programme FOREVER)

Validation de l'approche expérimentale par des essais de flambement (sans sol)

Bonne concordance avec les valeurs théoriques

$$F_{cr} = (\pi^2 E_p I_p) / L^2 \quad (\text{Euler})$$



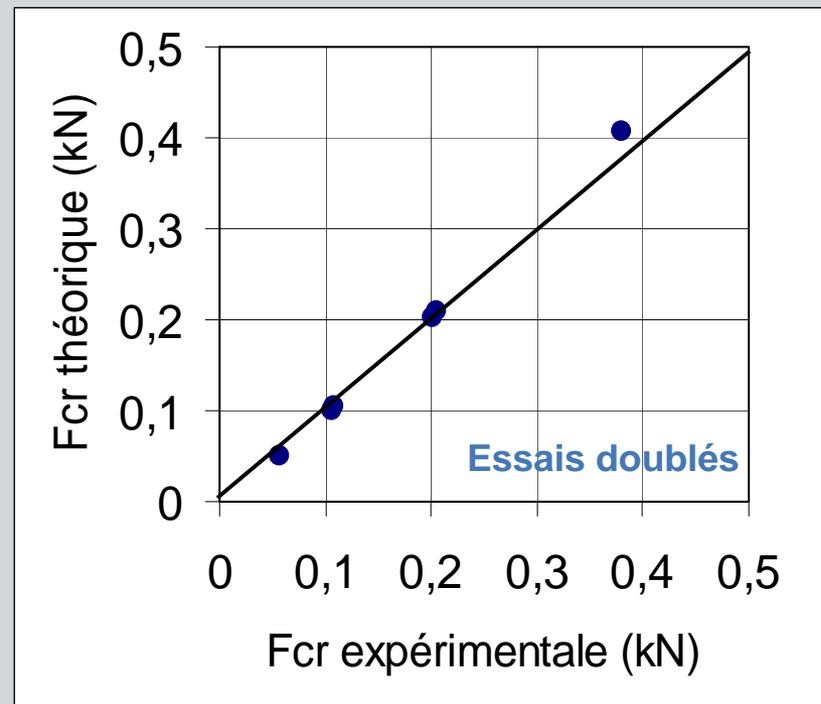
Avant
essai



AA



EA



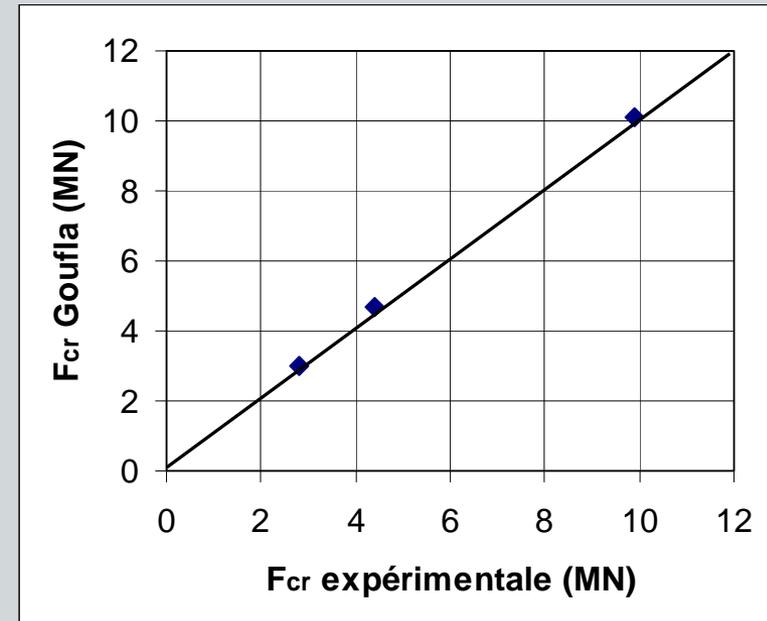
Résistance au flambement des pieux (Programme FOREVER)

Essai de flambement dans un sol Sable (24 essais) et argile (15 essais)

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

Essai	Fcr Argile (MN)	Fcr Sable (MN)
AA0,5	4.3	8.7
AA1,0	7.9	16.1
EA0,5	3.7	9.2
EA1,0	8.1	17.9
EE0,5	-	9.9
EE1,0	-	20.9

Comparaisons GOUFLA-Essais



Bonne estimation de Fcr par la solution de Mandel si le module E_s est pris
à $z = 3,5$ à $4l_0$ pour un sable mi-dense (E_s 50 à 75 Mpa)
à $z = 4,5$ à $6l_0$ pour une argile molle (E_s 3 à 5 Mpa)



Portance des pieux hélicoïdaux vissés

(Coopération avec l'Université de Sao Paulo)



Développement d'une méthode de dimensionnement

Etude sur modèles réduits de l'effet de la position et du nombre d'hélices



Pieux prototypes testés

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

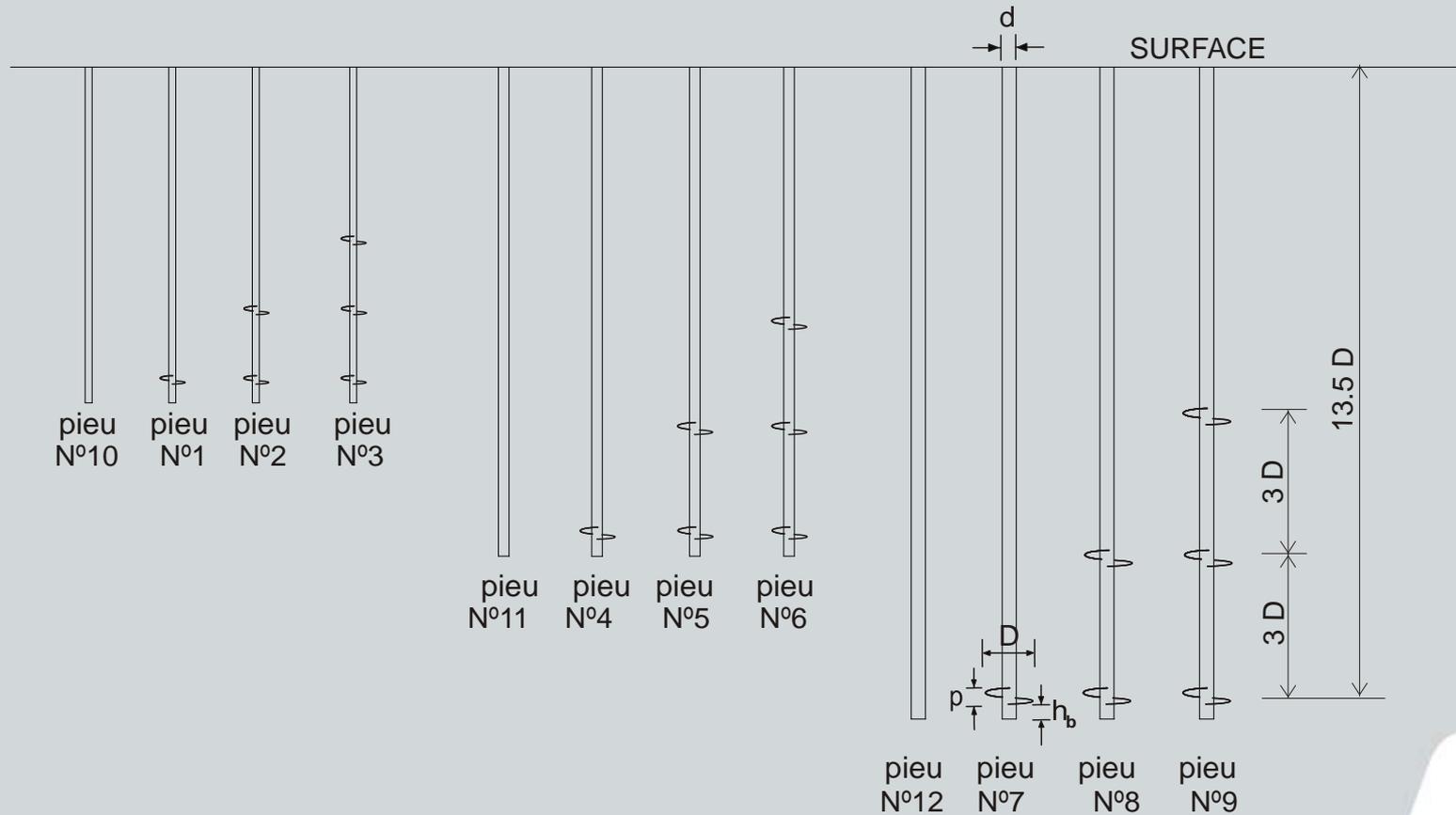
Sables : $I_D = 56\%$ et 85%



Portance des pieux hélicoïdaux vissés

(Coopération avec l'Université de Sao Paulo)

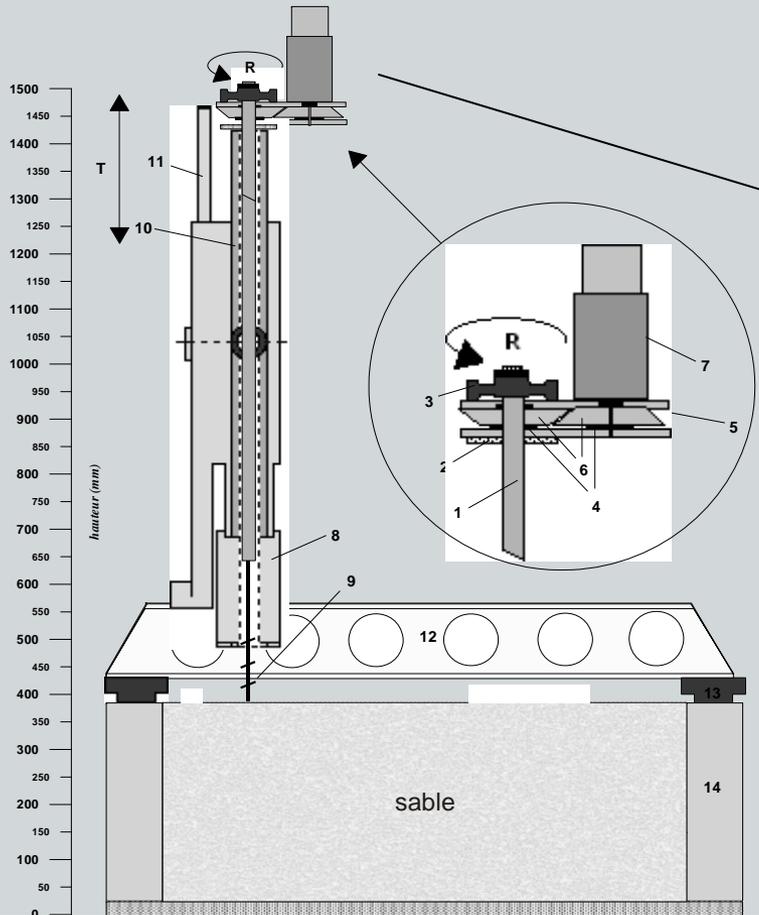
Caractéristiques des différents pieux vissés testés



Portance des pieux hélicoïdaux vissés

(Coopération avec l'Université de Sao Paulo)

Nécessité de développer un dispositif permettant la mise en place du pieu par vissage et le chargement, sans arrêt de la centrifugeuse

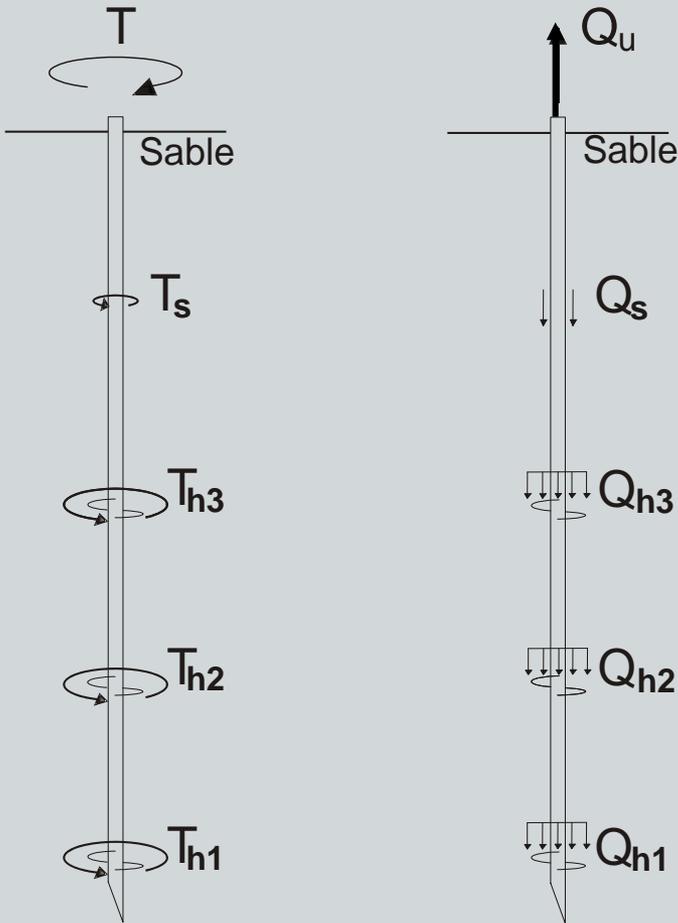


- 1 - Moteur pilotable par variateur
- 2 - Couplemètre dynamique
- 3 - Capteur de force
- 4 - Pignons de transmission
- 5 - Piston creux du servo-vérin



Portance des pieux hélicoïdaux vissés

(Coopération avec l'Université de Sao Paulo)



Relation théorique entre la résistance à la traction et le couple appliqué lors de la mise en place

$$Q_h = \frac{2T_h}{d_c \cdot \tan(\theta + \delta_r)} \quad Q_s = \frac{2T_s}{d}$$

$$d_c = \frac{2}{3} \left[\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right] \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{p}{\pi d_c} \right)$$

p : Pas de l'hélice au diamètre d_c

d : Diamètre de la tige

D : Diamètre de l'hélice



Portance des pieux hélicoïdaux

(Coopération avec l'Université de Sao Paulo)

Comparaison entre résistance à l'arrachement expérimentale et théorique

