

Avant propos

- Ma vue de sa carrière au travers de 40 ans de collaboration (et d'amitié)
- Fil rouge: pieu - pénétromètre
- Point de vue subjectif
- Ne prétend pas à l'exhaustivité*



une randonnée ...



* Foray, HDR, 1991, Approche expérimentale du comportement des fondations profondes

Retour en 1971 – Théorie et empirisme

➤ Décennie 60: apparition des méthodes in situ:

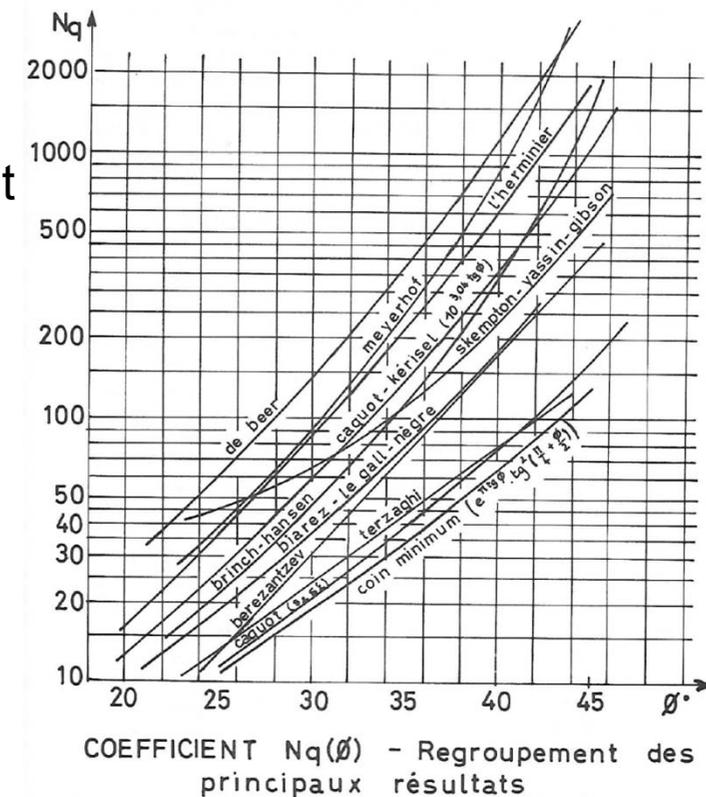
- Pénétrromètre statique: Schmertmann, Begemann, Parez, Sanglerat
- Pressiomètre: Ménard, Gambin

➤ Approche académique:

- Force portante des pieux en milieu pulvérulent
Equation de Terzaghi

$$q_p = \gamma' \cdot D \cdot N_q(\phi)$$

- Effort de pointe q_p linéaire en fonction de la profondeur
- Multitude de coefficients N_q (calculs en plasticité, empiriques)



Retour en 1971 – Théorie et empirisme

➤ Décennie 60: apparition des méthodes in situ:

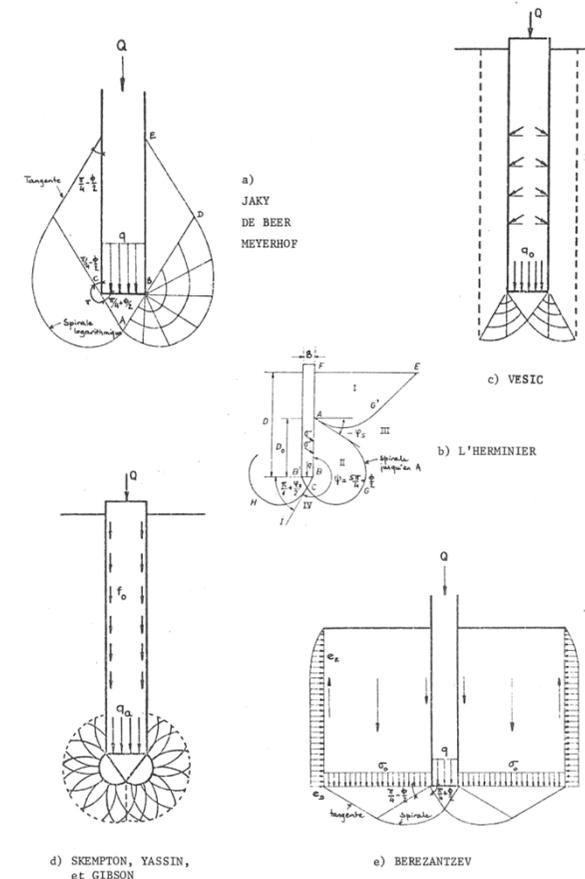
- Pénétrromètre statique: Schmertmann, Begemann, Parez, Sanglerat
- Pressiomètre: Ménard, Gambin

➤ Approche académique:

- Force portante des pieux en milieu pulvérulent
Equation de Terzaghi

$$q_p = \gamma' \cdot D \cdot N_q(\phi)$$

- Effort de pointe q_p linéaire en fonction de la profondeur
- Multitude de coefficients N_q (calculs en plasticité, empiriques)

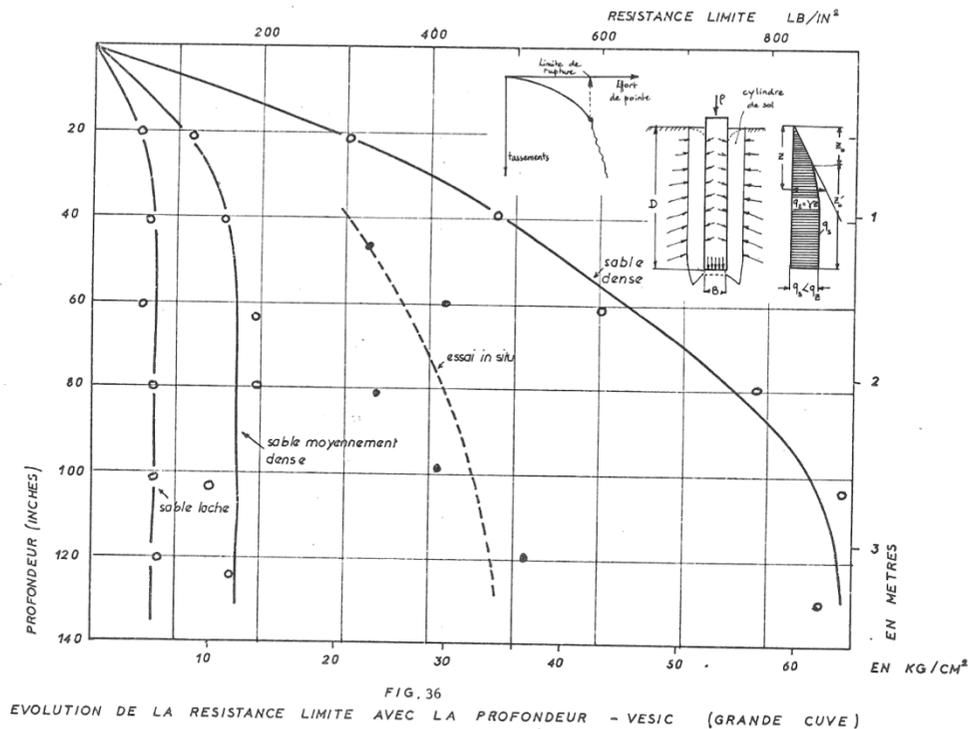


Retour en 1971- Les données expérimentales

- Essais de Vesic sur pieux moulés (1963)

Grande cuve (D= 2.5m
H= 6.7m, fiches 1 à 3m)

PAS DE LINEARITE



Retour en 1971- Les données expérimentales

- Essais de St Rémy les Chevreuse
Kerisel, Adam, Tcheng (1961-1966)

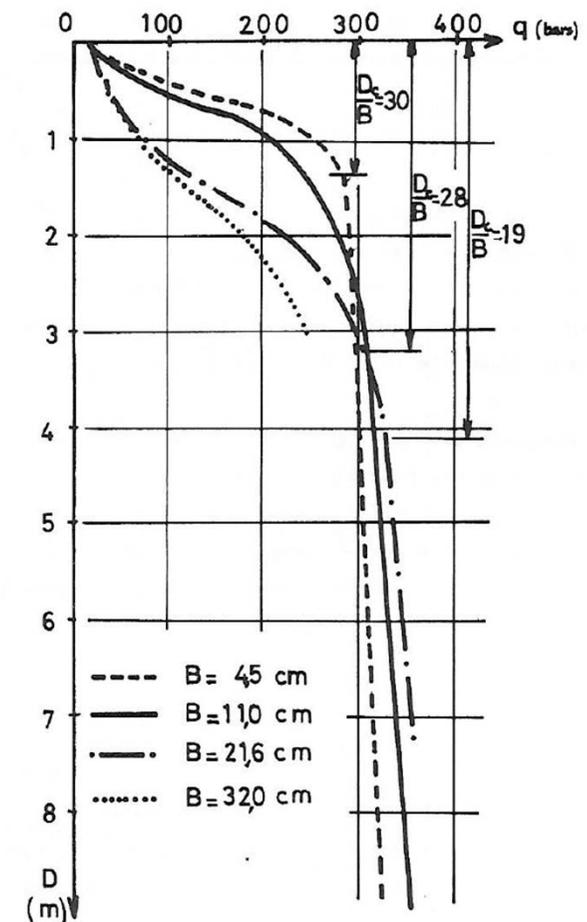
Sable de Loire

Cuve D=6,4m, H=10m

Pieux foncés;

B= 4,5cm, 11cm, 21,6cm, 32cm

- A faible profondeur ($D < D_c$)
 q_p fonction du diamètre
croissance parabolique ?
- A forte profondeur ($D > D_c$)
 q_p indépendant du diamètre
 q_p constant avec la profondeur ?



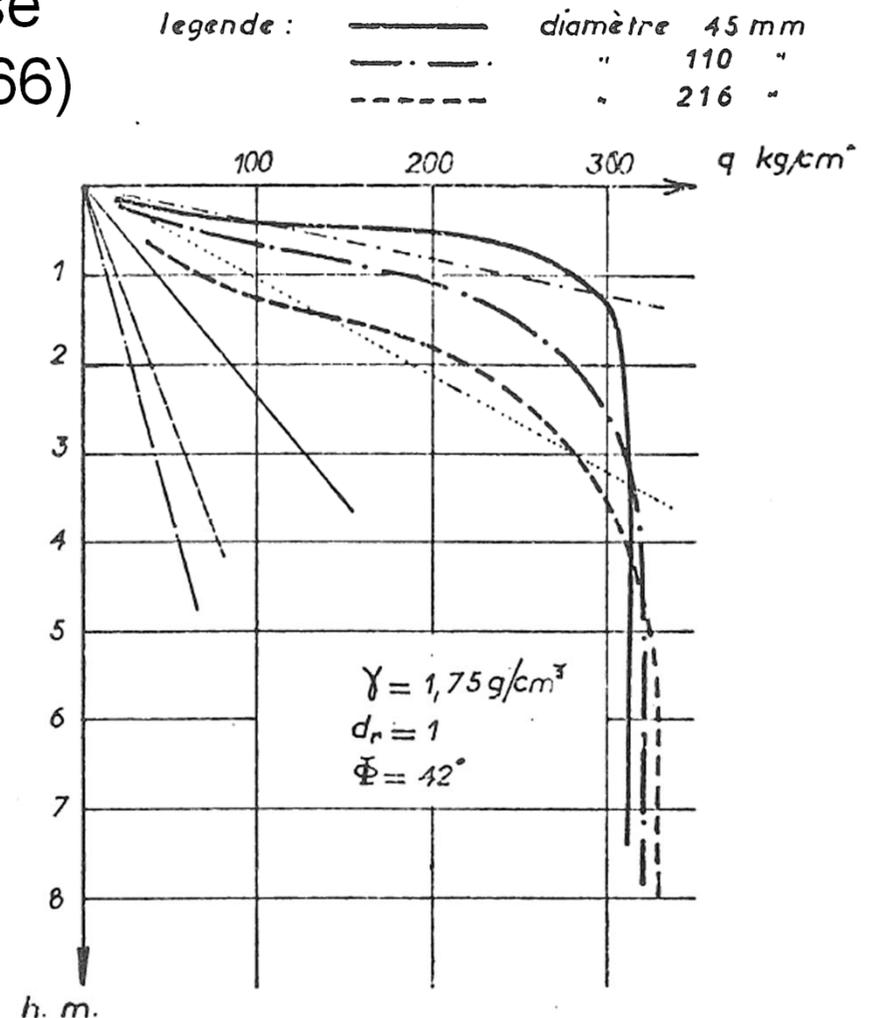
ESSAIS IRABA (KERISEL)
Variation de l'effort de pointe avec
la profondeur en milieu sableux
homogène pour différents diamètres
de pieux.

Retour en 1971- Les données expérimentales

- Essais de St Remy les Chevreuse
Kerisel, Adam, Tcheng (1961-1966)

Sable de Loire
Cuve D=6,4m, H=10m
Pieux foncés;
B= 4,5cm, 11cm, 21,6cm, 32cm

- A faible profondeur ($D < D_c$)
 q_p fonction du diamètre
croissance parabolique ?
- A forte profondeur ($D > D_c$)
 q_p indépendant du diamètre
 q_p constant avec la profondeur ?



Retour en 1971- Les données expérimentales

- Période 1965-1970 ; Laboratoire de Mécanique des Sols de Grenoble ; sous la direction du Professeur Jean BIAREZ

- Travaux sur le comportement des sables sous fortes contraintes: Dessaint, 1966; Le Long, 1968

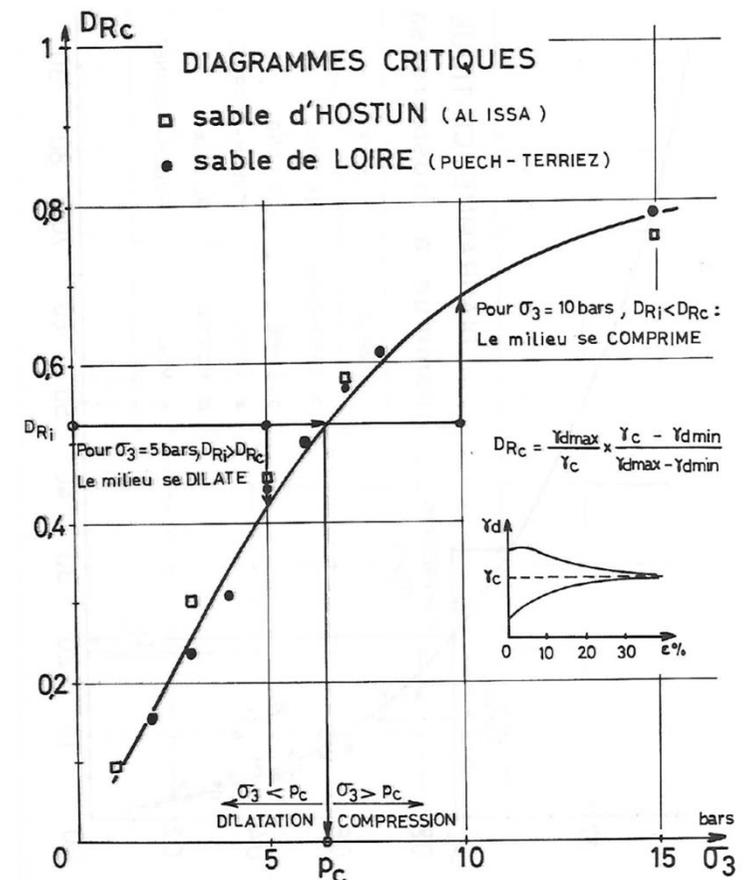
Densité critique

Pression critique

Diagramme critique des sables:

relation p_c - DR

- Essais de pénétration dans des sables en petites cuves. Formalisation du rôle de la compressibilité sur la valeur de q_p à grandes profondeurs ; Grésillon, 1970



1970-1975 Les essais en grande cuve

Thèses Foray (1972) et Puech (1975)

- Cuve: Diamètre 1.5m ; hauteur: 2m
- Pieux-pénétromètres: diamètre: 2cm , 3,3cm et 4,5cm
- Sables: Hostun et Loire
- Plusieurs densités, contrôlées par pluviation

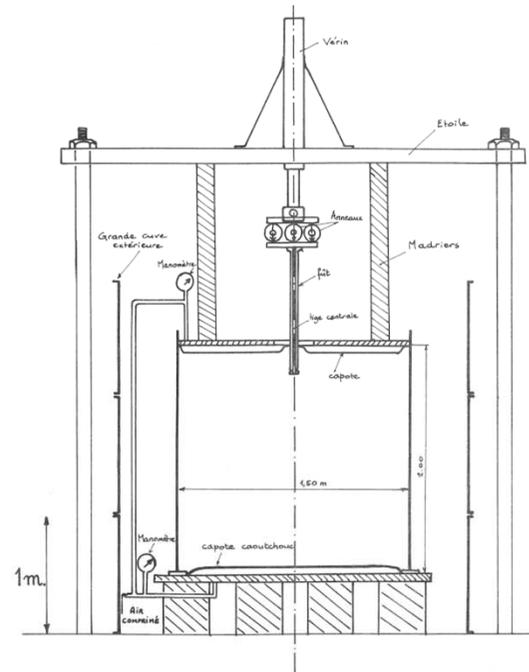
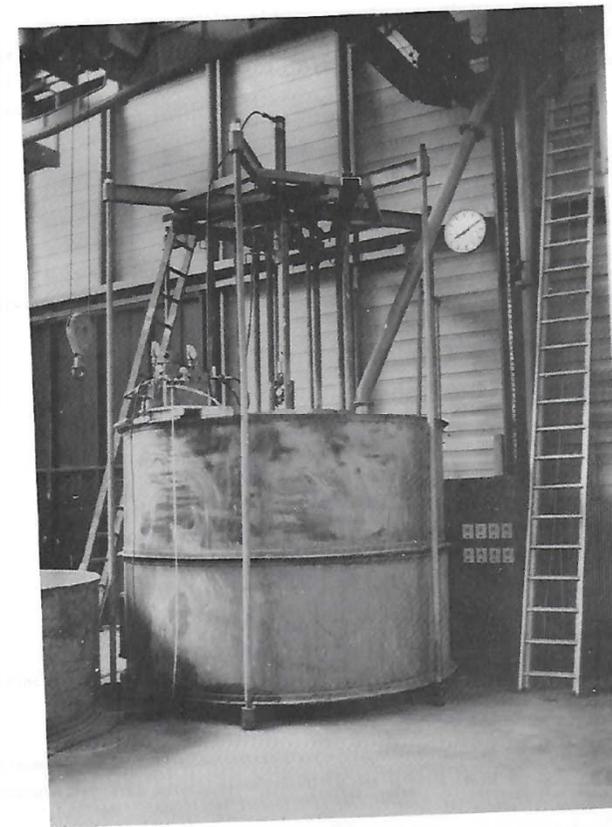


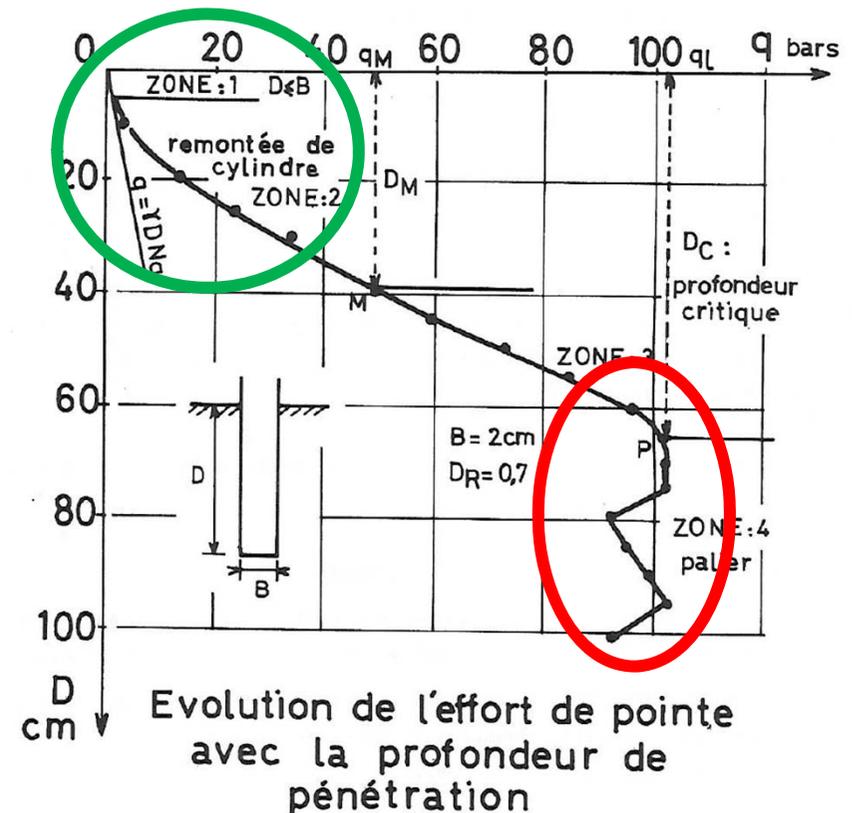
Figure 52 SCHEMA de la CUVE et du DISPOSITIF d'ENFONCEMENT.
(ici avec montage pour surcharge).



1970-1975 Les essais en grande cuve

Thèses Foray (1972) et Puech (1975)

- Deux zones principales
- **Faible profondeur:**
 - ✓ croissance parabolique de q_c ;
 - ✓ remontée de cylindre de sol (matériau incompressible)
- **Grande profondeur:**
 - ✓ palier de q_c
 - ✓ rôle de la compressibilité

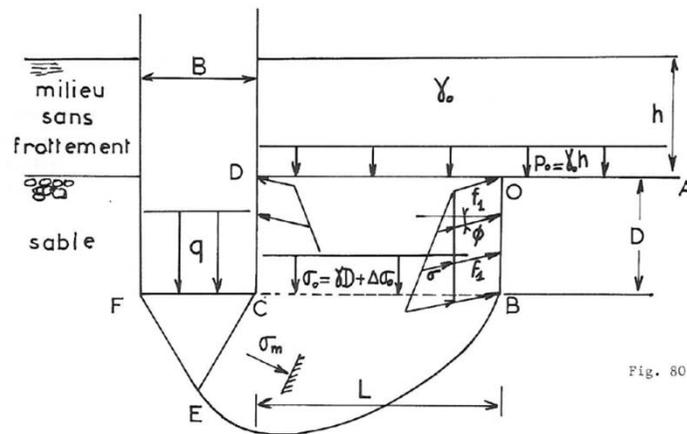


1970-1975 Les essais en grande cuve

Thèses Foray (1972) et Puech (1975)

- Modélisation faible profondeur

Remontée de cylindre :
 expérience : $\leftarrow \circ \rightarrow$ théorie : - - - -



Schema de la remontée de cylindre

Grésillon (1970)

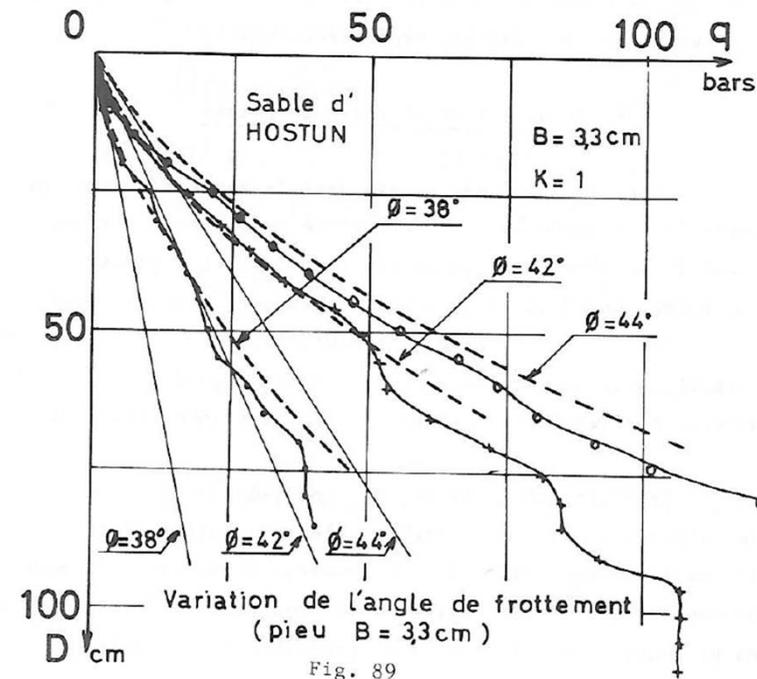


Fig. 89

1970-1975 Les essais en grande cuve

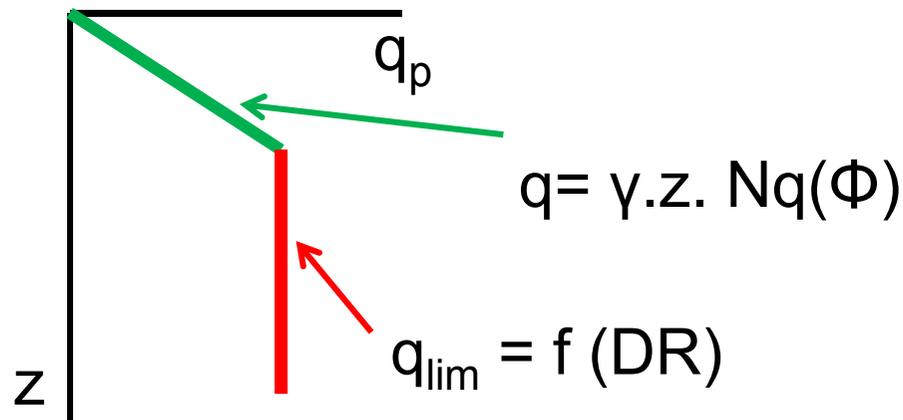
Thèses Foray (1972) et Puech (1975)

- Modélisation grande profondeur

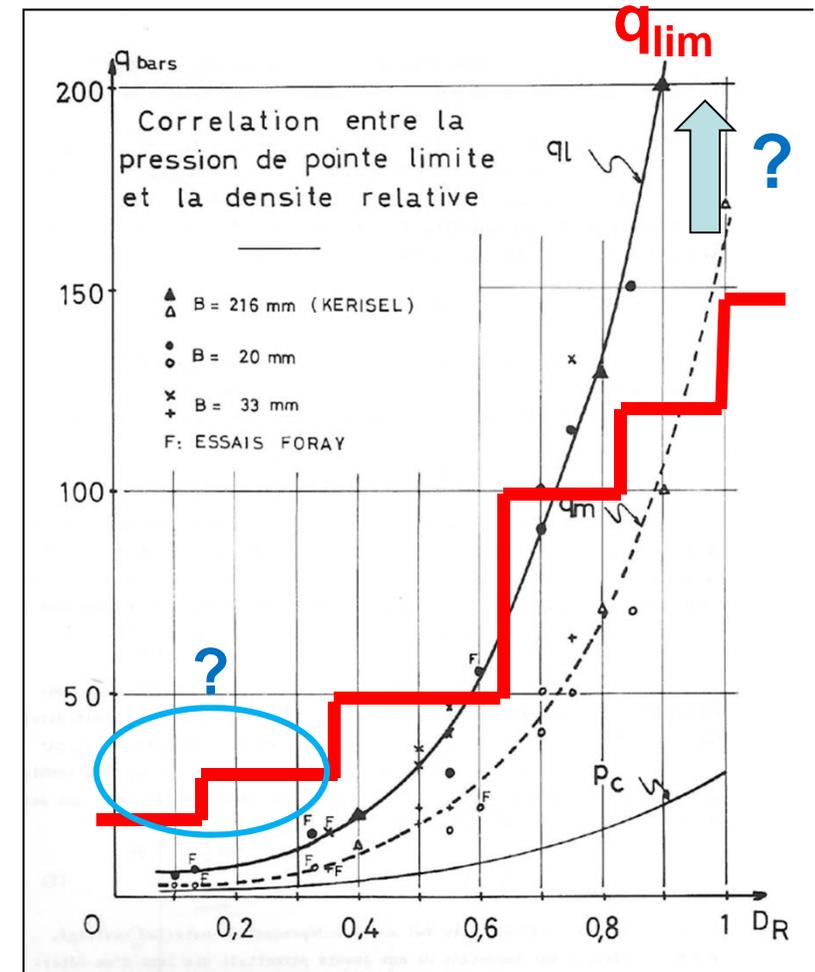
Grésillon, 1970 $q_1 = \lambda \alpha(\Phi) p_c$

Puech, 1975 $q_l = f(DR)$

- Approche adoptée par codes
e.g.: API RP2A (toujours en vigueur)



Même approche sur frottement f_{lim}



— q_{lim} API RP2A

Les doutes

- Relation q_{lim} - DR paraissait robuste mais.....
- DR obtenu par corrélation avec q_c (CPT) et
- *q_c ne dépendait-il que de DR?*
- *L'effet de la contrainte effective verticale ($\sigma'_v = \gamma' \cdot z$) n'avait-il pas été occulté par les essais en cuves*
- *Il n'y aurait pas de palier, ni de profondeur critique, mais une croissance "ralentie" avec la profondeur ?*

- Avènement des essais en simulation de contrainte:
 - chambres d'étalonnage:
 - US (Schmertmann);
 - Italie (ENEL/1978, ISMES/1981): LCC: D=1.22m; H=1.5m
 - centrifugeuses (en France: CESTA (IFP / LMS-EP) puis LCPC, Nantes)
 - gradient hydraulique (LMS-EP/Zelikson)

La confirmation

- Essais en grande chambre d'étalonnage (LCC) sur sable du Tessin (Ticino sand)

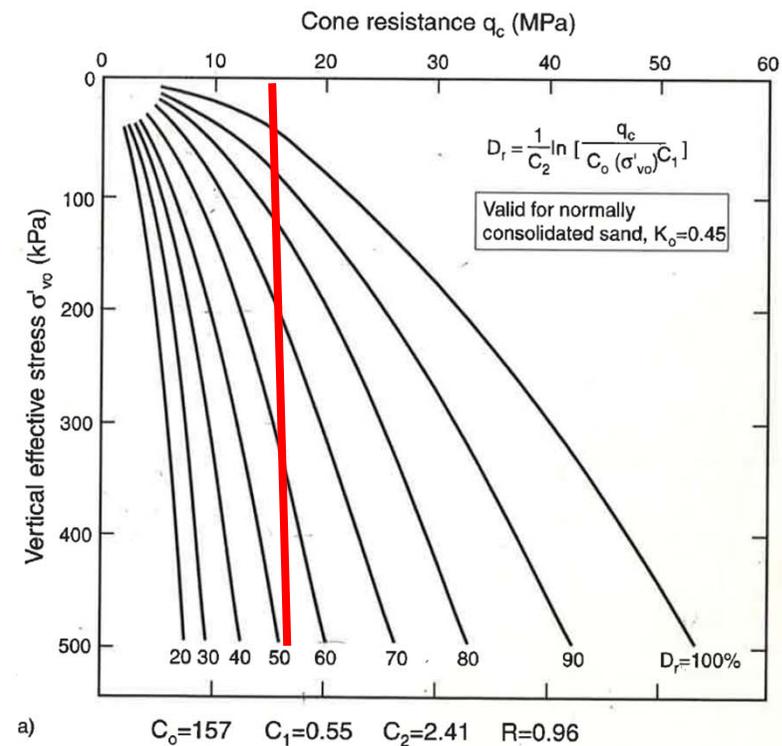
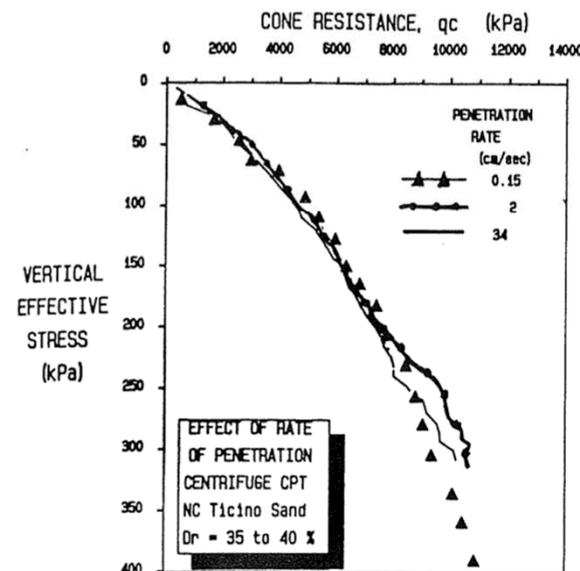
Belloti et al., 1981

Baldi et al, 1983 - Baldi et al., 1986

Jamiolkowski et al., 1988

Ghionna and Jamiolkowski, 1992

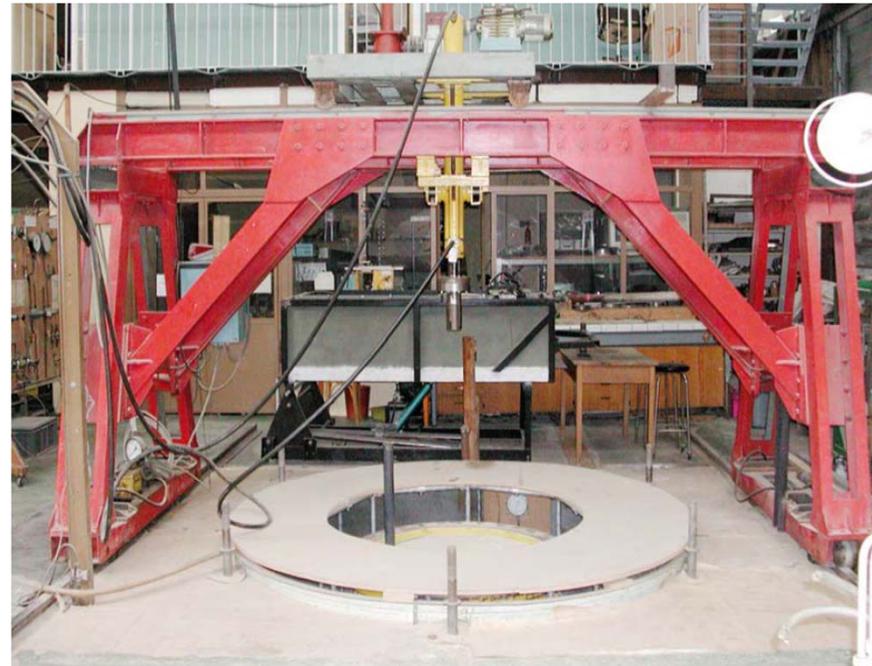
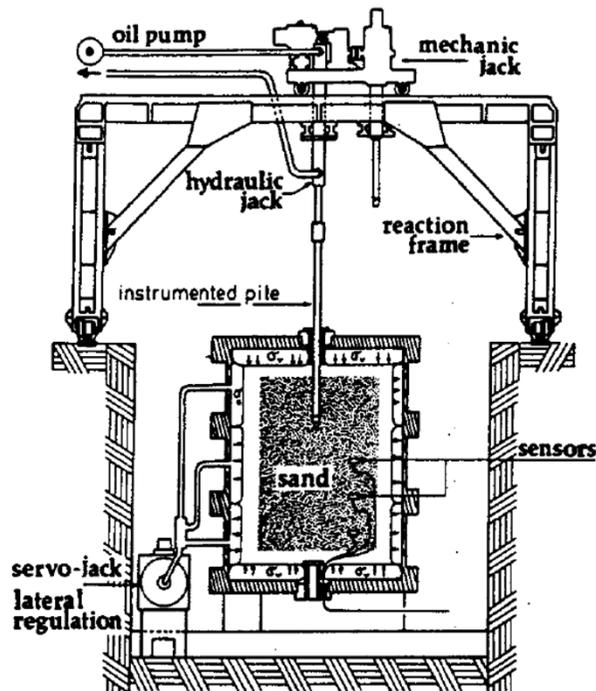
- Essais en centrifugeuse
e.g. Baldi, 1990



$$q_c = f(DR, \sigma'_v)$$

La chambre d'étalonnage du 3SR

- Mini chambre d'étalonnage $D = 300\text{mm}$; $H = 500\text{mm}$; Eyssautier, 1986
- 1986: conception/construction LCC $D=1.2\text{m}$; $H=1.5\text{m}$; $p=800\text{kPa}$



- 1987-1989: Mise au point; étanchéité des membranes; effets de bords: régulation des conditions aux limites (frontières latérales flexible)
- Thèse de Genevoix (1989);
- Séminaire sur les LCC de Grenoble. Jamiolkowski et Tatsuoka (1990)

1990-2000 Dimensionnement des pieux offshore

Contexte

- Remise en cause de la fiabilité des recommandations API RP2A pour le dimensionnement des pieux dans les sables:
 - méthode trop pessimiste pour les sables denses à très denses
 - méthode peu fiable pour les sables lâches

➡ Voir présentations de S. Lacasse, R. Jardine, JL Colliat
- Mise en évidence des phénomènes de “friction fatigue” dûs à l’installation par battage (perte progressive de frottement en partie haute du pieu; forts frottements concentrés en partie basse)
- Projet EURIPIDES (Fugro/Géodia, 1993): exécution d’un essai sur pieu 30” battu dans sable de Mer du Nord (30MN)
- Développement des méthodes de dimensionnement dans les sables basées sur le CPT (Introduction dans API RP2GEO en 2011)

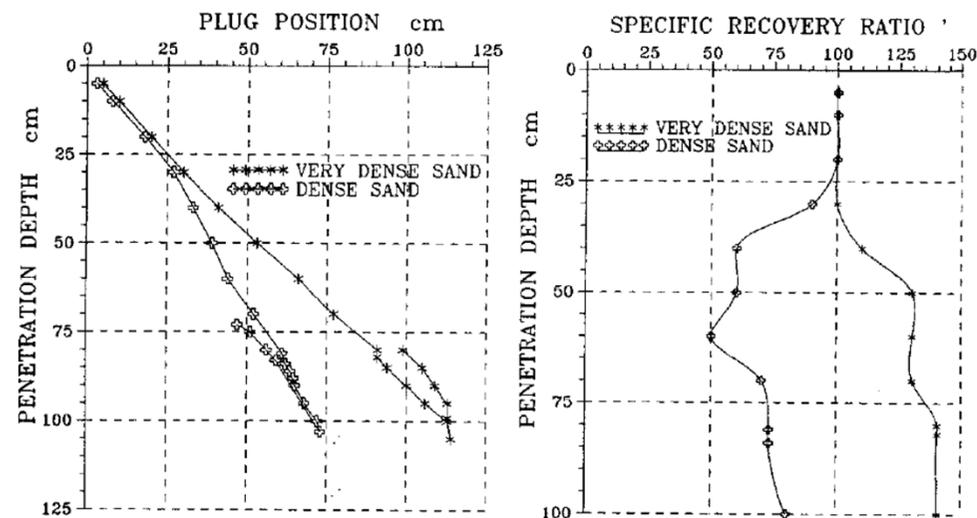
1990-2000 Dimensionnement des pieux offshore

Contribution 3SR

- Contrats de recherche en LCC: ELF, TOTAL, IFP, CLAROM
- Thèses Mokrani, 1991; Balachowski, 1995.

➡ Voir présentation de Jean-Louis Colliat

- Comportement pieux ouverts/fermés; rôle du bouchon



Formation du bouchon (Foray et al., 1993)

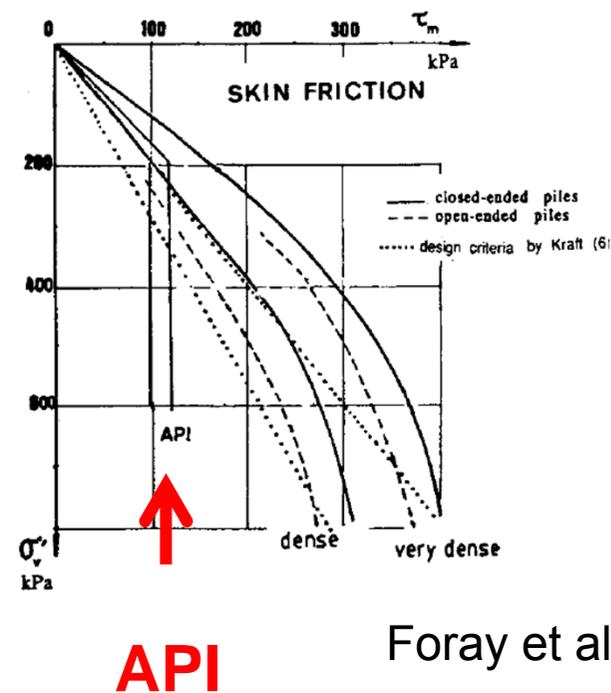
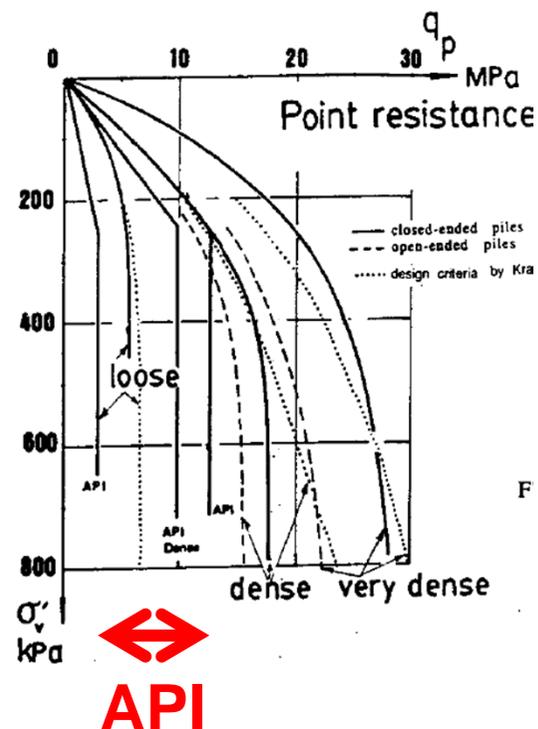
1990 – 2000 Dimensionnement des pieux offshore

Contribution 3SR

- Contrats de recherche en LCC: ELF, TOTAL, IFP, CLAROM
- Thèses Mokrani, 1991; Balachowski, 1995.

➡ Voir présentation de Jean-Louis Colliat

- Fortes valeurs de pointe et frottement en sables denses



Foray et al, 1998

1990 – 2000 Dimensionnement des pieux offshore

Contribution 3SR

- Contrats de recherche en LCC: ELF, TOTAL, IFP, CLAROM
- Thèses Mokrani, 1991; Balachowski, 1995.

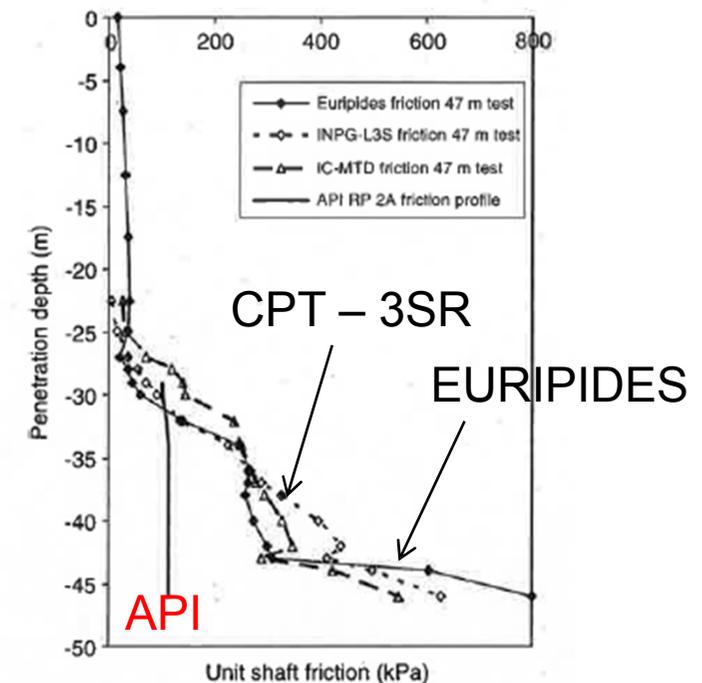
➡ Voir présentation de Jean-Louis Colliat

- Proposition d'une méthode CPT (Foray et Colliat, 2005)

$$q_b/q_c = f(\sigma'_v) \cdot (w/D)^{a(D)}$$

$$f_{\max} = 0.012 q_c(z) \cdot e^{-\alpha(L) \cdot (L-z)/D}$$

Frottement lateral (kPa)
Méthodes CPT vs pieu Euripides



1990 – 2000 Dimensionnement des pieux offshore

Contribution 3SR

- Contrats de recherche en LCC: ELF, TOTAL, IFP, CLAROM
- Thèses Mokrani, 1991; Balachowski, 1995.

➡ Voir présentation de Jean-Louis Colliat

- Sables carbonatés: matériaux très compressibles
Etude sous fortes contraintes (Thèse Colliat, 1986)

Contribution à la calibration
de la méthode CLAROM
Foray et al, 1999

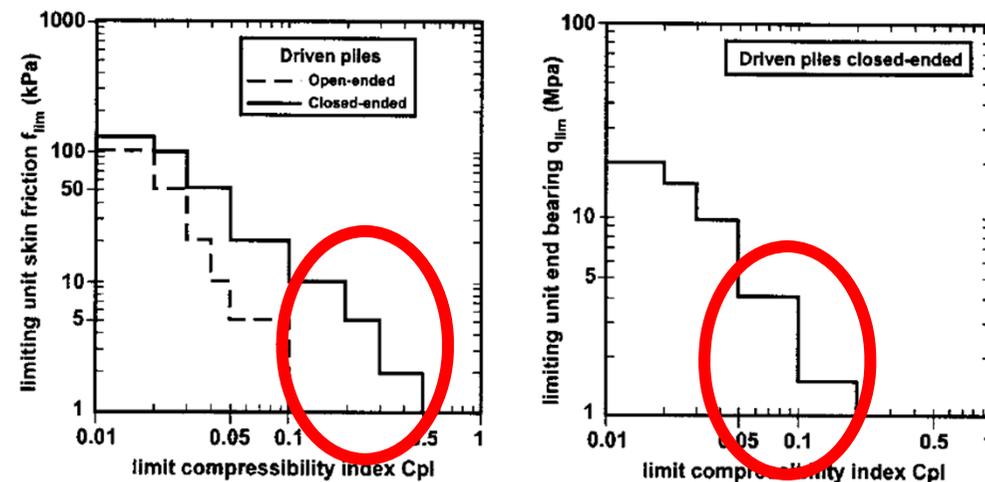


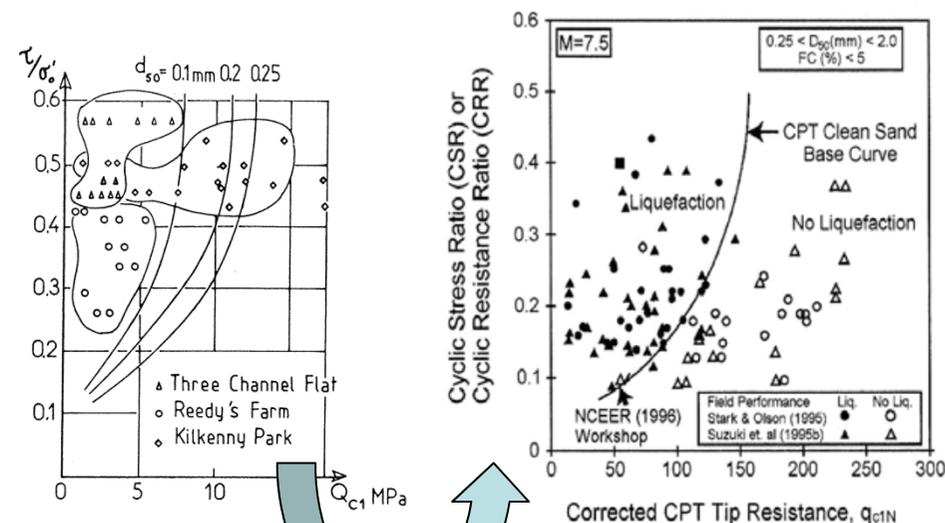
Fig. 10. Recommended pile design values (after Nauroy et al., 1986)

(Le Tirant, Nauroy, Meunier, Brucy)

Potentiel de liquéfaction des sables

- Projet National de Recherche “Le Piezocône et la liquéfaction”
- Collaboration avec Univ. de Canterbury, Christchurch, N.Z. (Prof. J.B. Berril)
- Etude de la réponse du Piezocône en Chambres d'étalonnage (3SR et Cermes). Travail de Puzenat (1985). Thèse Pautre (1992)
- Séjour sabbatique Foray en N.Z. (1986) puis Pautre en 1989
Essais au Piezocône sur sites ayant liquéfié sous séisme; Foray, 1988; Flavigny et al., 1988

- Contribution aux abaques de liquéfaction basés sur le piézocône
- Initiation de travaux parallèles à partir du pressiomètre, toujours en cours au CERMES (Canou, Dupla)

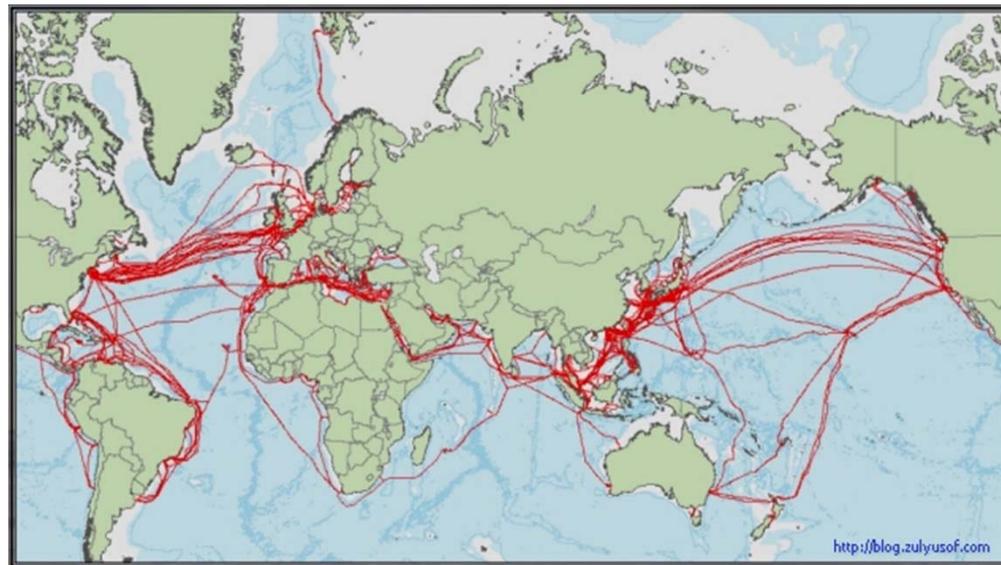


Présentation de R. Dobry par E. Flavigny

Robertson and Wride, 1998

Un défi singulier

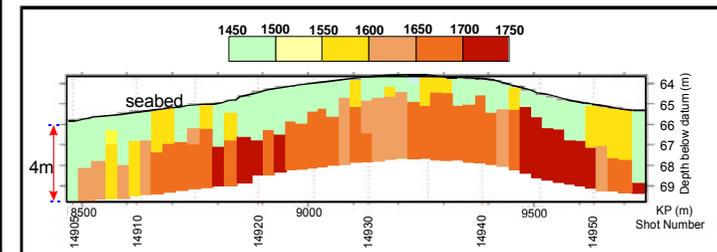
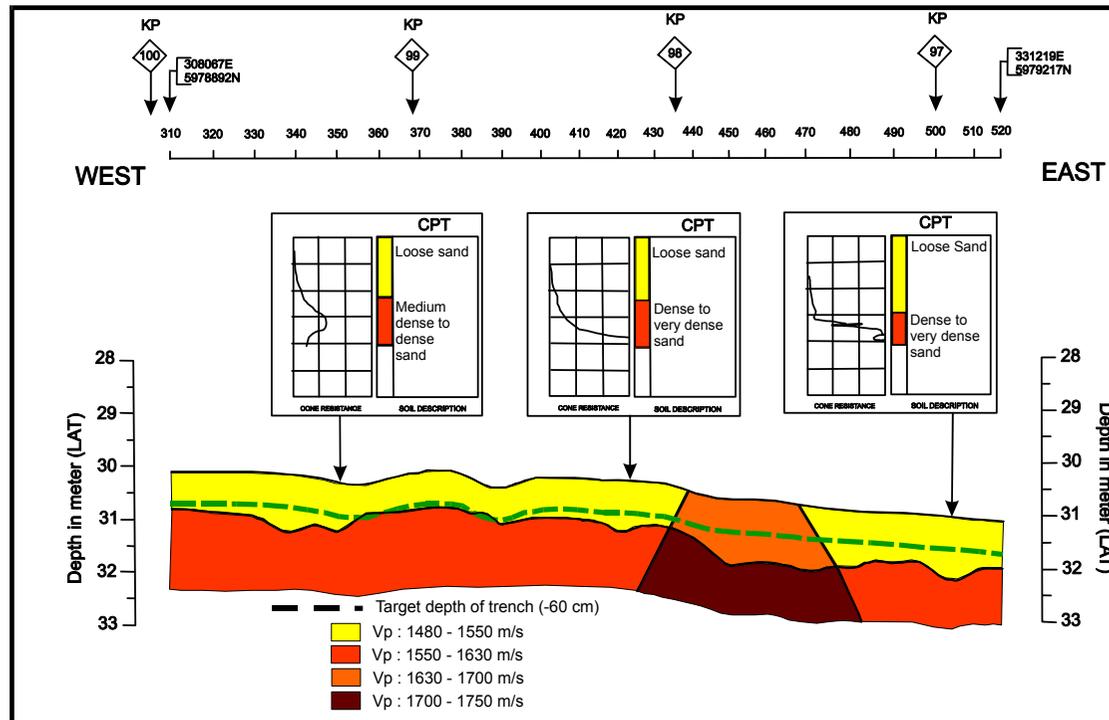
- Fin des années 90: marché des routes de câbles de télécommunication en expansion fulgurante.



- Câbles ensouillés (0.5 à 1m) sur le plateau continental et jusqu'à 800m de profondeur d'eau: reconnaissances sur plusieurs milliers de km pour prévoir les conditions d'ensouillage (type de machine, vitesse d'avancement, etc.)

Un défi singulier

- Les reconnaissances:
 - ✓ CPT à faible profondeur (2m) tous les km
 - ✓ Sismique réfraction THR (Gambas) en continu pour interpoler propriétés mécaniques entre les sondages



Retour à la case départ

- Comment interpréter les CPTs à faible pénétration?
Abaques valides pour $\sigma'_v > 50\text{kPa}$

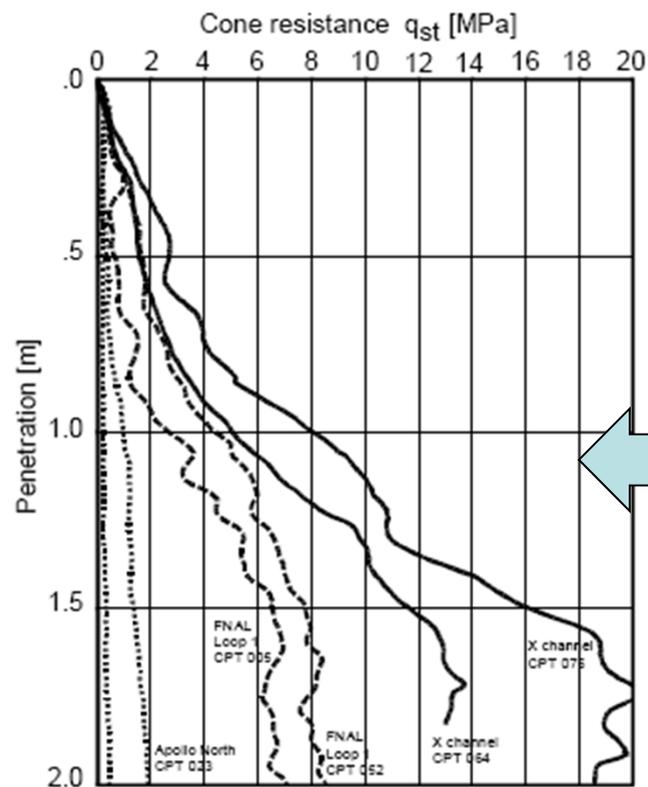


Fig. 1 : Typical cone resistance profiles obtained at shallow penetration in marine sands
Puech et Foray, 2002

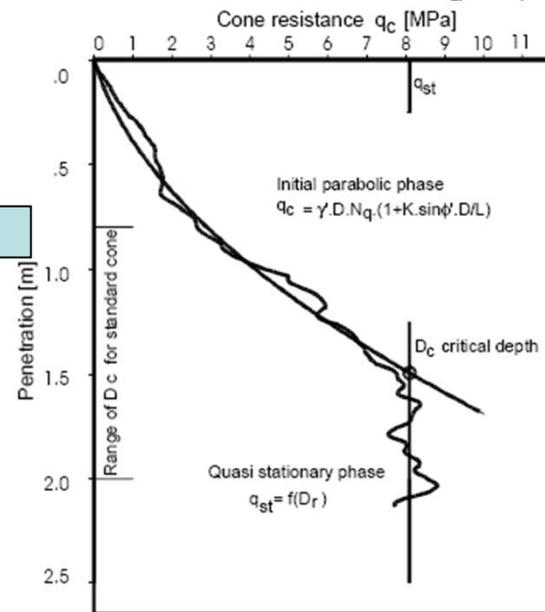
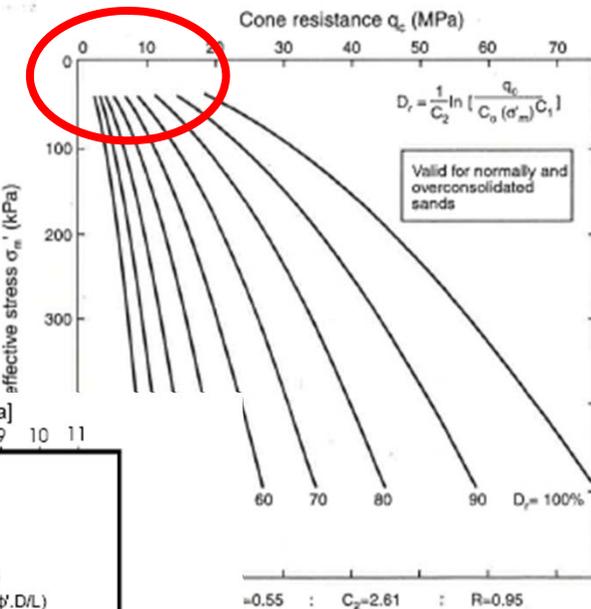


Fig. 5 : Conceptual model for interpreting shallow penetration CPTs in sands

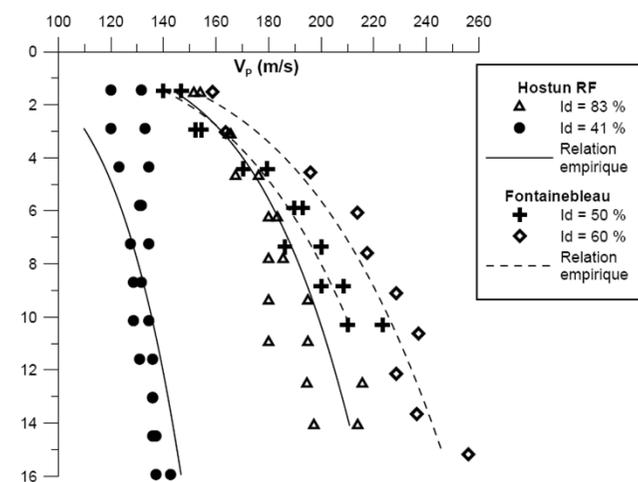
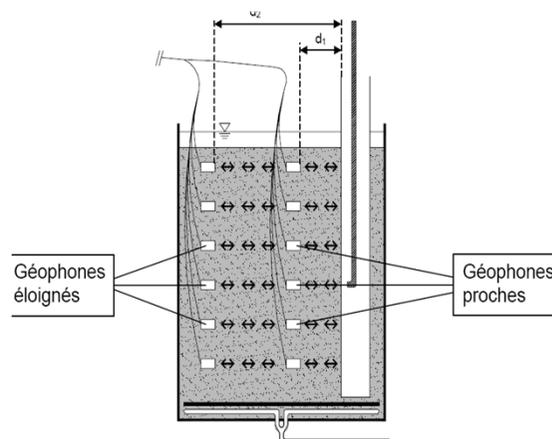
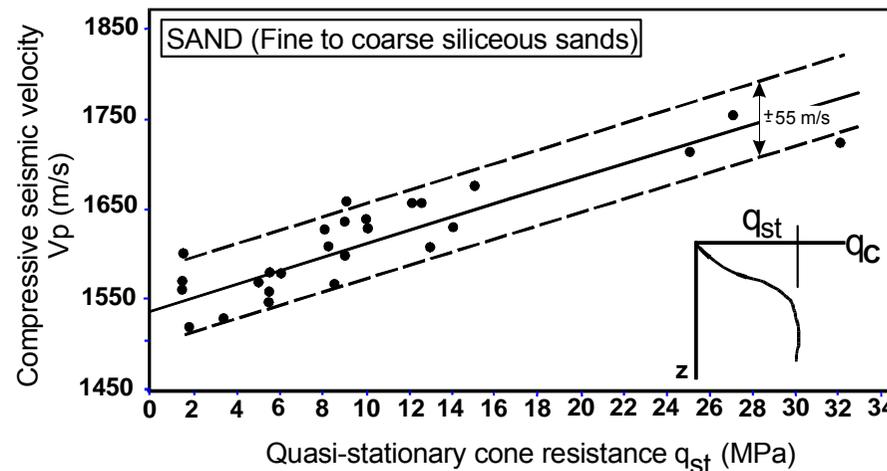
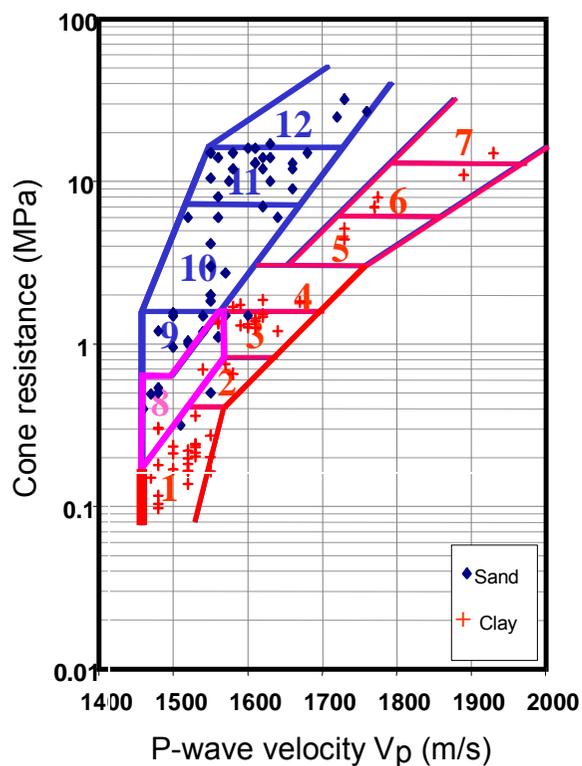


Retour au modèle de 1975

Echelle 1 en contraintes

Un défi singulier

- Comment corréler V_p (refraction) et q_c à faible pénétration?

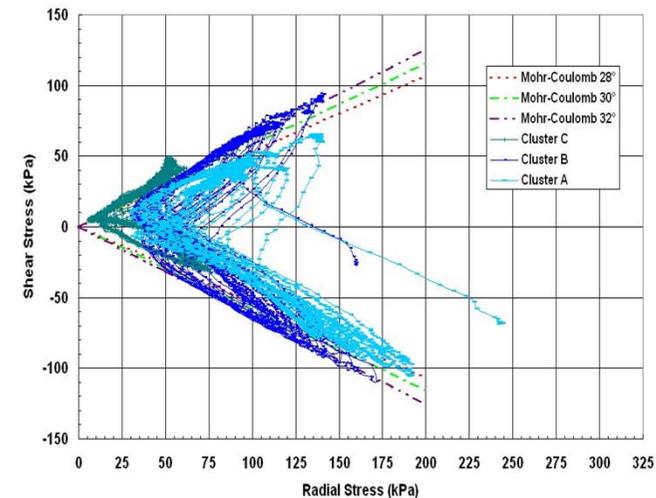
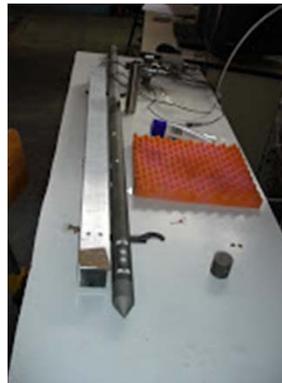


- Thèse Emerson 2000 – 2005
- ➔
- Contrat de Recherche : FUGRO

Voir présentation Elisabeth PALIX

2007 – 2014 Collaboration ICP-3SR (+ SOLCYP)

- Effet du temps sur la capacité des pieux battus dans le sable (ageing)
 - ➡ voir présentation de R. Jardine
- Effet des cycles sur le frottement latéral (tension)
 - ➡ voir présentation de M. Silva
- Très haut degré d'instrumentation du massif et des pieux (sonde ICP)



- Résultats de très grande qualité

Visucuve et DIC - (1) Le T-bar: 2008 - 2010

- Pénétromètre de type “full flow”
- Grande précision dans la mesure de S_u à faible pénétration
- Très utilisé dans les sols mous de grandes profondeurs

Questions

- Cinématique de pénétration?
- Interprétation à très faible pénétration: $N_t = q_t/S_u$?
Application à la prévision de pénétration des pipelines
- Pénétration minimale pour effectuer des cycles et mesurer la sensibilité?



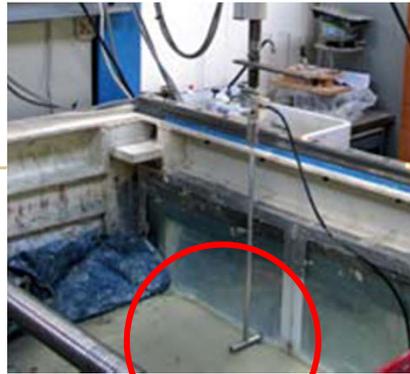
Solution

Utilisation combinée de la Visucuve et des techniques de corrélation d'images (DIC)
(S.Hall, J.Desrues,...)

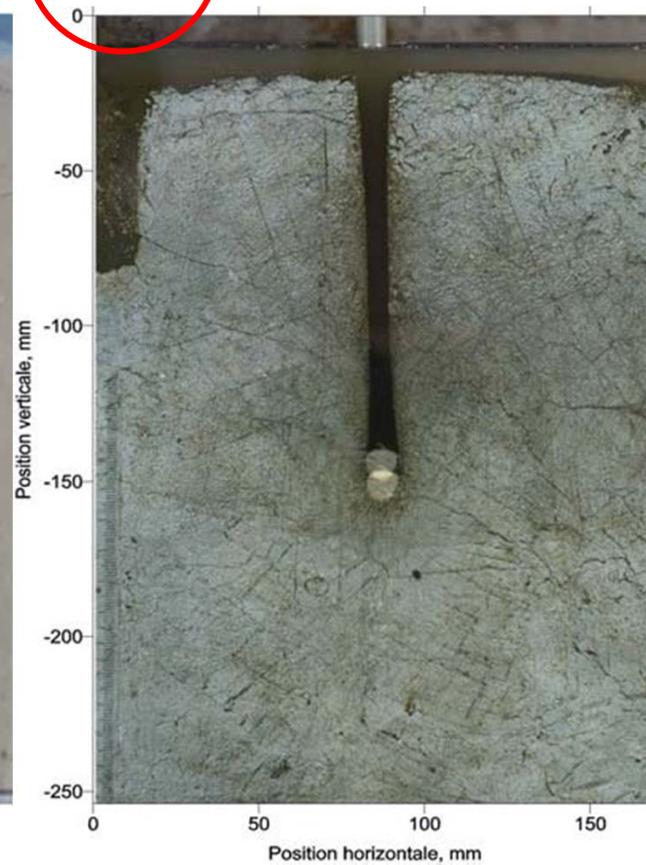


Thèse Marcos Orozco-Calderon, 2009
Contrat de Recherche: FUGRO

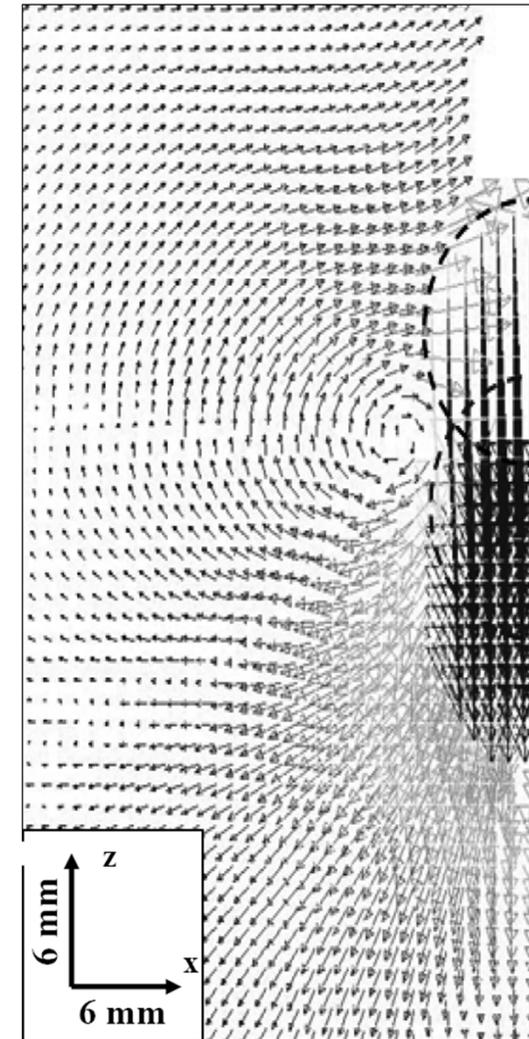
Le T-bar



Visualisation 2D



Visualisation DIC



Interpretation DIC

Visucuve et DIC - (2) La sonde GEOPS: 2012-

Contexte

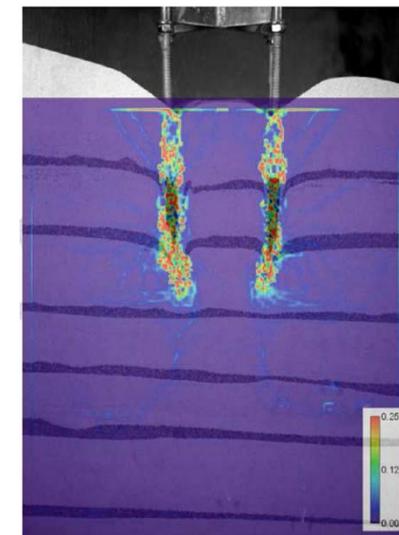
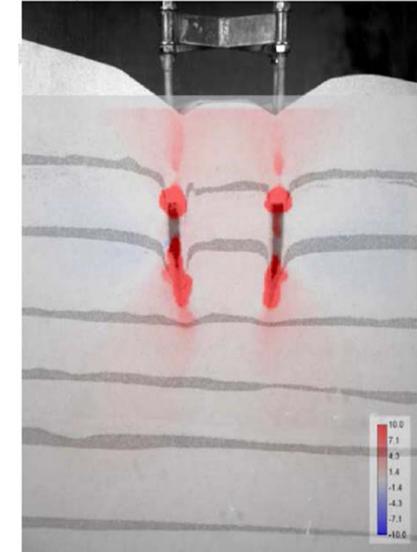
- Geohazards par grands fonds
- Présence de gaz dans les sédiments
- Gas libre affecte V_p (compressibilité) et V_s (dommages)
- Détection gaz libre par sonde mesure conjointe V_p + V_s

Sonde GEOPS

- Développement conjoint TOTAL-IFREMER-FUGRO
- Mesure V_s très sensible à remaniement du matériau à l'interface sonde-sol
- Optimisation de forme de la sonde pour minimiser perturbations de mesure V_s

Contrat 3SR - Visucuve

- Visualisation prototype 2D + DIC
- Test V_p - V_s sur prototype 3D



Merci Pierre,

Pour ton apport considérable à la géotechnique et la passion dont tu faisais preuve,

Pour la qualité de ton enseignement, et pour tous les ingénieurs géotechniciens que tu as si efficacement formés,

Pour ta bonne humeur permanente et pour ton indéfectible amitié.

