



© Marc Roussel / Total

# CAPACITE PORTANTE DES PIEUX BATTUS DANS LES SABLES DENSES

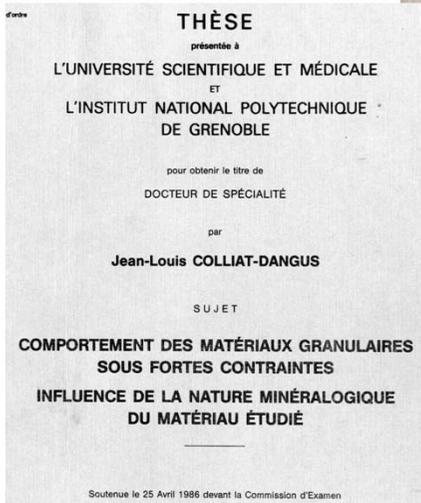
Quelques spécificités de l'offshore pétrolier

# PRESENTATION

- Effet du temps à court terme et long terme
- Pieux en sables denses – Effets d'échelle
- Cas des sables très denses de Mer du Nord
- Exemples d'application
- Conclusions

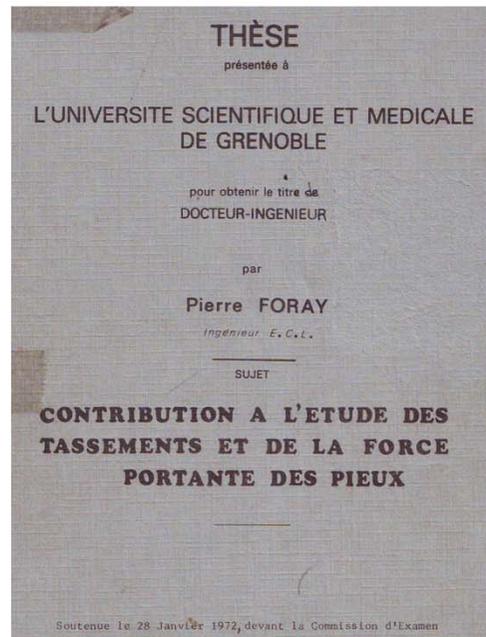
# 'PILE AGEING' OU... L'EFFET DU TEMPS QUI PASSE (1/2)

- 1985 – 2005: Effet du temps à court terme



## 'PILE AGEING' OU... L'EFFET DU TEMPS QUI PASSE (2/2)

- **1972 – 2014: Effet du temps à long terme**
  - Thèses de Pierre Foray (1972) et Alain Puech (1975)
  - Collaboration L3SR – Elf-Total depuis 1985
  - Thèses de Larbi Mokrani (1991), Lech Balachowski (1995) et Matias Silva (2014)
  - Publication Boulon & Foray (1986) « *Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand* » mentionnée par Fugro-McClelland dans la publication « *Impact of recent changes in the API recommended practice for offshore piles in sand and clay* » (Toolan & Ims, 1988)



UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

### THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité: Ingénierie-Matériaux Mécanique Énergétique Environnement

Procédés Production (510)

Arrêt ministériel: 7 août 2006

Présentée par

Silva Illanes, Matías Felipe

Thèse dirigée par Foray Pierre et

co-encadré par Combe Gaël

préparée au sein du Laboratoire 3S-R

dans l'École Doctorale IMEP2

Experimental study of ageing and axial cyclic loading  
effect on shaft friction along driven piles

Thèse soutenue publiquement le 10.10.2014.

# CONCLUSIONS

- L'échelle des pieux offshore ne permet pas la réalisation d'essais de chargement en vraie grandeur
    - Recours aux essais sur pieu modèle (CC ou centrifugeuse) pour étudier l'influence de différents paramètres (densité relative, chargements cycliques)
    - Les essais de pieux de Labenne, Dunkerque et Eemshaven/EURIPIDES ont permis la calibration de nouvelles méthodes de design basées sur l'essai CPT.
  - Difficulté de mise en application de ces nouvelles méthodes de design aux pieux de l'offshore pétrolier (même si elles sont beaucoup moins conservatives que la méthode API pour les pieux battus dans les sables très denses).
  - Les fortes puissances de battage disponibles (liées au développement des marteaux hydrauliques) ont fait que la capacité des pieux battus en sables denses est devenu un problème géotechnique moins aigu.
- L'étude de la capacité des pieux battus dans les sables denses est elle encore un sujet de R&D pour l'industrie pétrolière ?

# PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (1/6)

- **Energie de battage mise en œuvre (1/3):**
  - Pieu modèle 36mm battu dans la chambre de calibration L3S (1987)
  - Marteau MHU-500 pour l'offshore pétrolier (poids 112t, mouton 30t) pour battage de pieux avec  $D= 0,9m$  à  $4,5m$  (monopiles d'éoliennes)



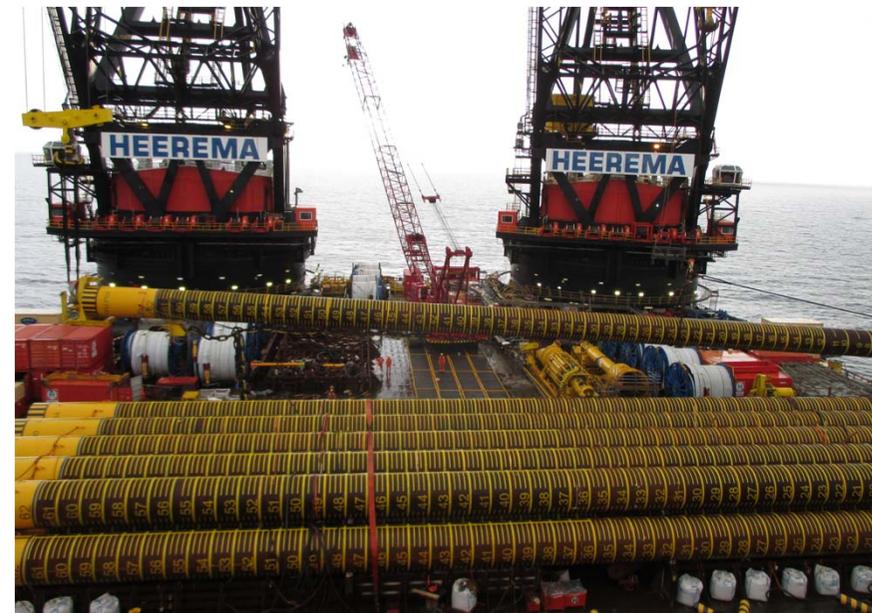
## PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (2/6)

- **Energie de battage mise en œuvre (2/3):**
  - Pieu modèle 36mm x 1m battu dans la cuve L3SR (46 à 256 impacts)
  - Tube conducteur: 0,76m x 60m (masse 5-30t, 1000 à 15.000+ impacts)



# PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (3/6)

- **Energie de battage (3/3):**
  - Années 70-90: Marteaux vapeur MRBS-3000 (ram=30t, 450kJ.60% = 270kJ) à MRBS-12500 (mouton=125t, 2200kJ.60% = 1300kJ)
  - Années 85-2000: Marteaux hydrauliques Menck MHU-500 (mouton=30t, 500kJ) à MHU-3000 (mouton=180t, 3000kJ)
  - 2013: Marteau hydraulique Menck MHU-3500 (310t, mouton= 175t, 3500kJ) pour battre des pieux jusqu'à D= 6,5m



## PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (4/6)

- **Essais de chargement de pieux:**

- Hoogzand (1975):  $D= 0,36\text{m} \times 5\text{--}7\text{m}$  (0,5 – 3 MN)
- Labenne (1992):  $D= 0,10\text{m} \times 6\text{m}$  (0,05 – 0,1 MN)
- Dunkerque (1989 et 1994):  $D= 0,32\text{m} \times 11\text{--}22\text{m}$  (0,4 – 3,2 MN)
- Eemshaven/EURIPIDES (1995):  $D= 0,76\text{m} \times 31\text{m--}47\text{m}$  (10 – 20 MN)

- **Dimensions typiques des pieux de Mer du Nord:**

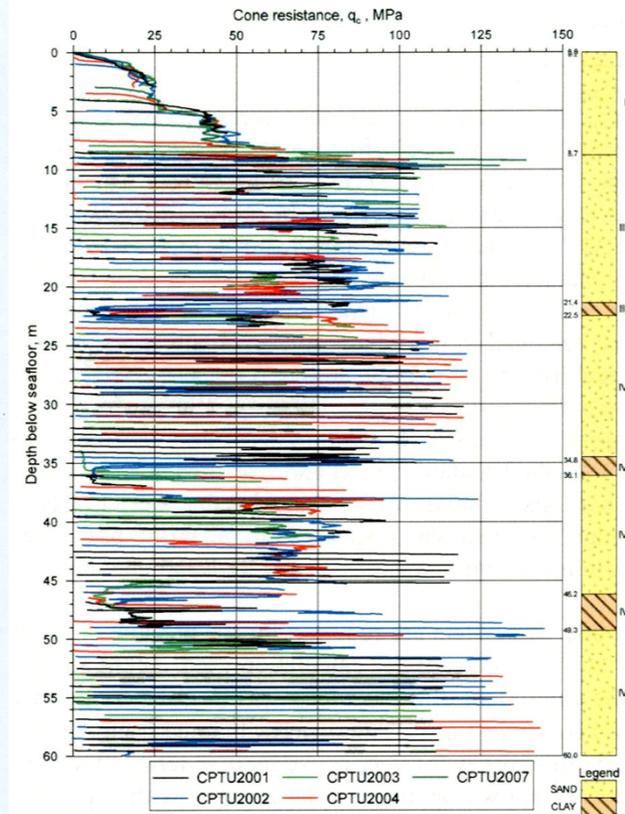
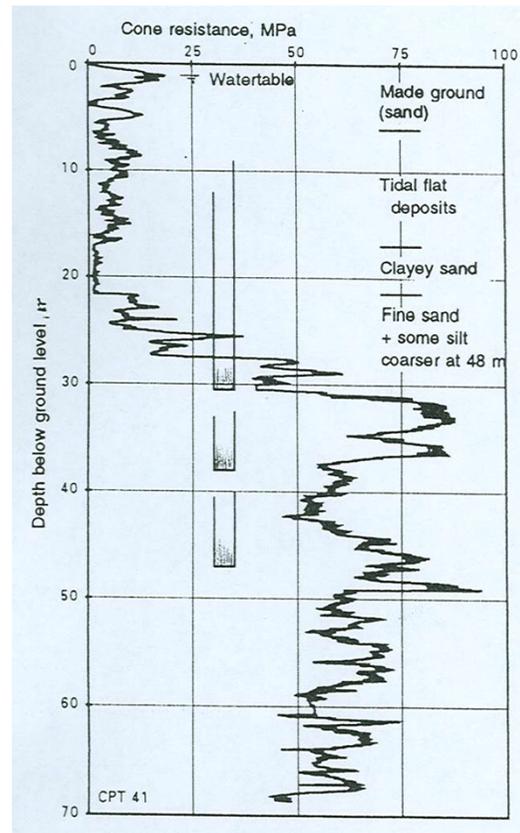
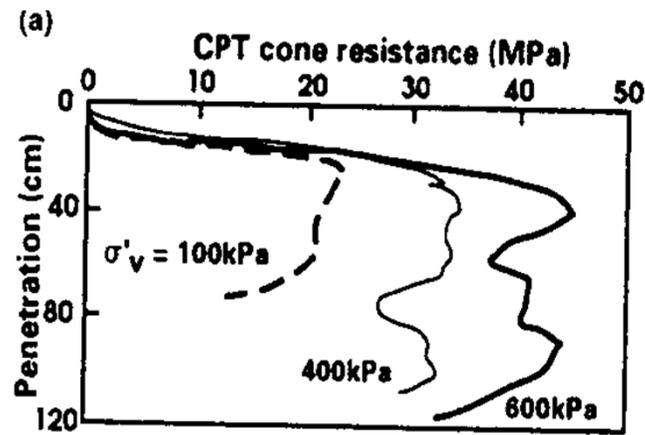
- Sables denses (Hollande):  $D= 1,10\text{--}1,80\text{m} \times 40\text{--}60\text{m}$  (15 – 50 MN)
- Autres (UK, Norvège):  $D= 1,10\text{--}2,60\text{m} \times 30\text{--}75\text{m}$  (20 – 100 MN)



# PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (5/6)

- **Caractérisation des sables avec l'essai CPT**

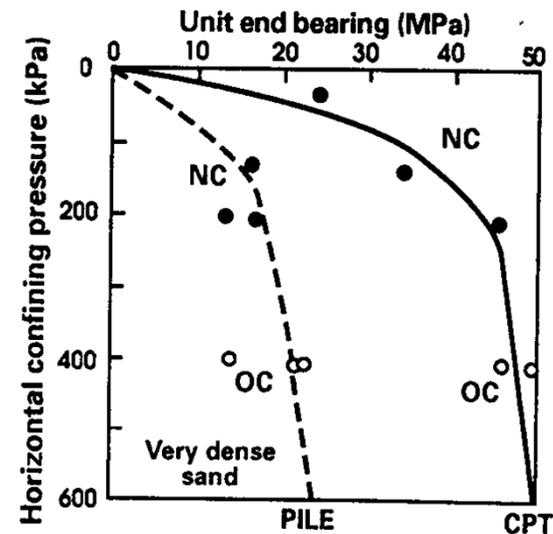
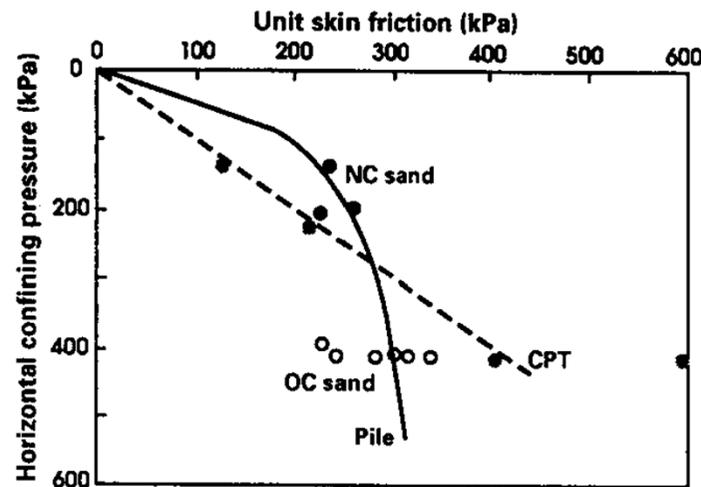
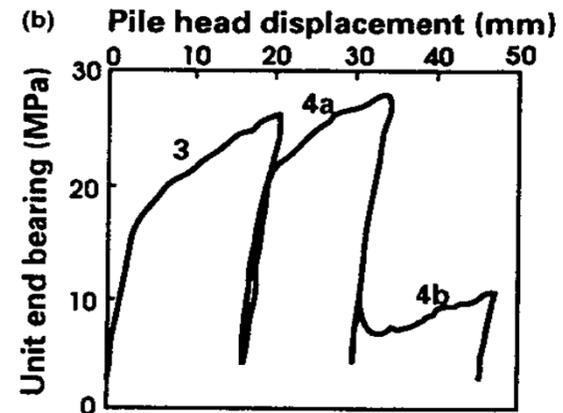
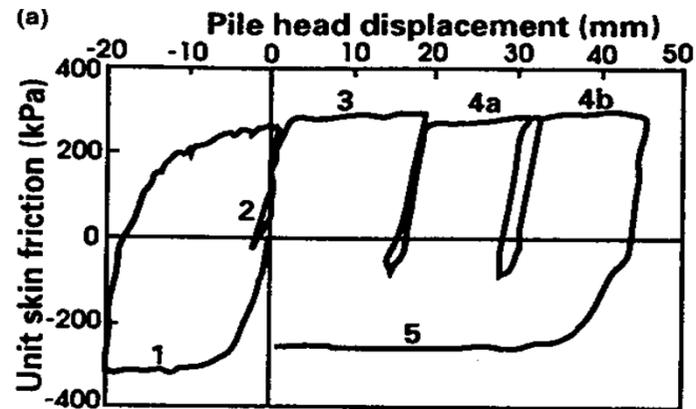
(Foray, Balachowski & Colliat, « *Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands* », Canadian Geotechnical Journal, 1998)



# PIEUX EN SABLES DENSES – EFFETS D'ECHELLE (6/6)

- **Essais sur pieu modèle dans la cuve L3S**

(Foray, Balachowski & Colliat, « *Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands* », Canadian Geotechnical Journal, 1998)



# CAS DES SABLES TRES DENSES DE MER DU NORD (1/3)

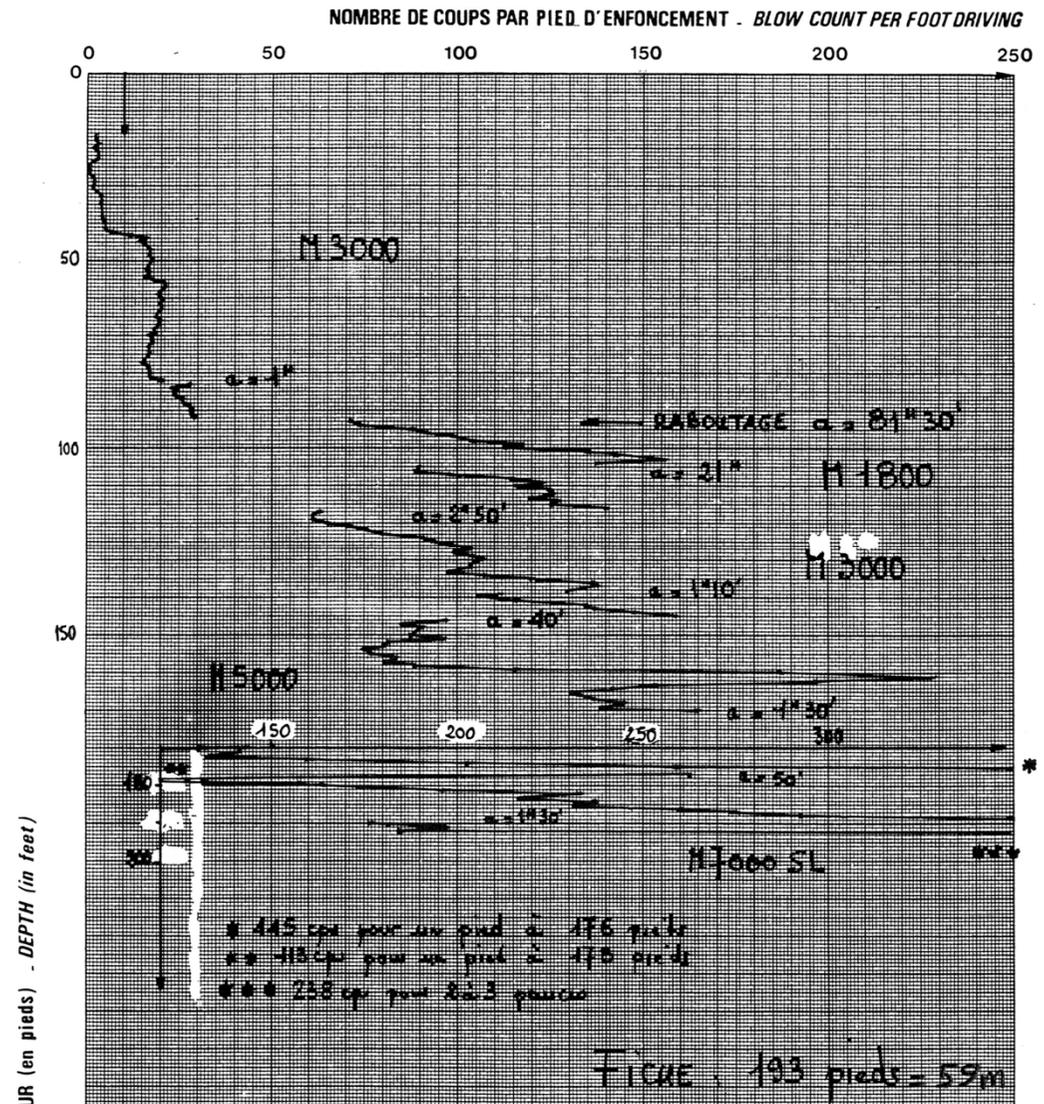
- Exemple des pieux des jackets L7H et K4A (Hollande)



# CAS DES SABLES TRES DENSES DE MER DU NORD (2/3)

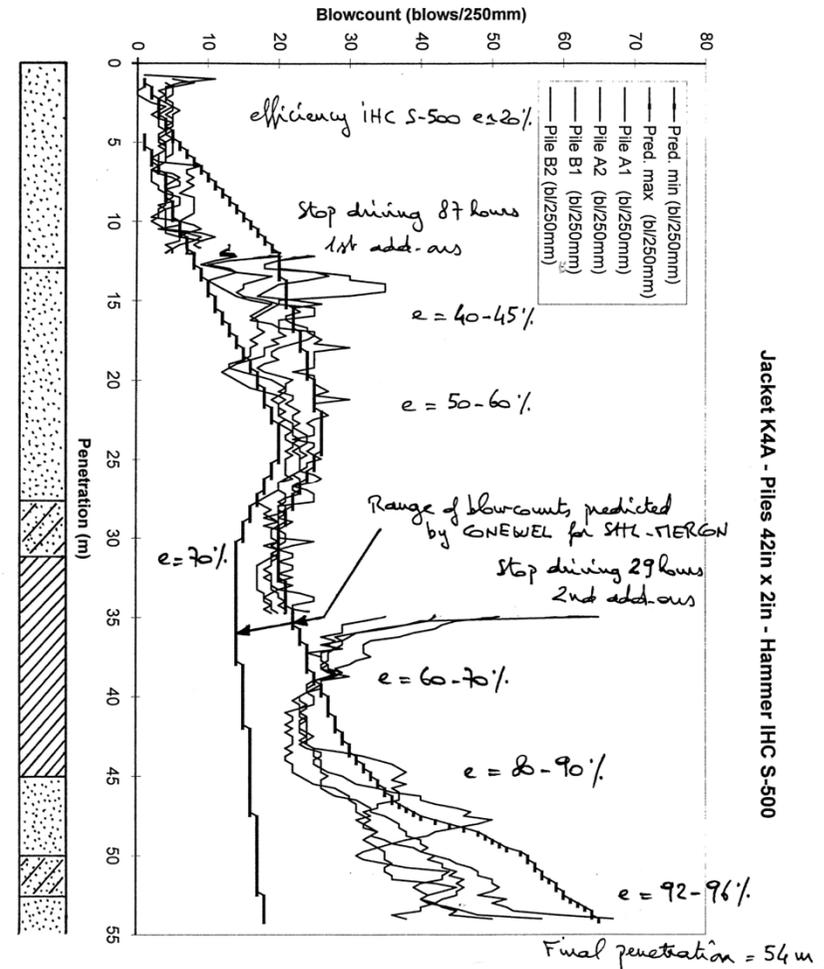
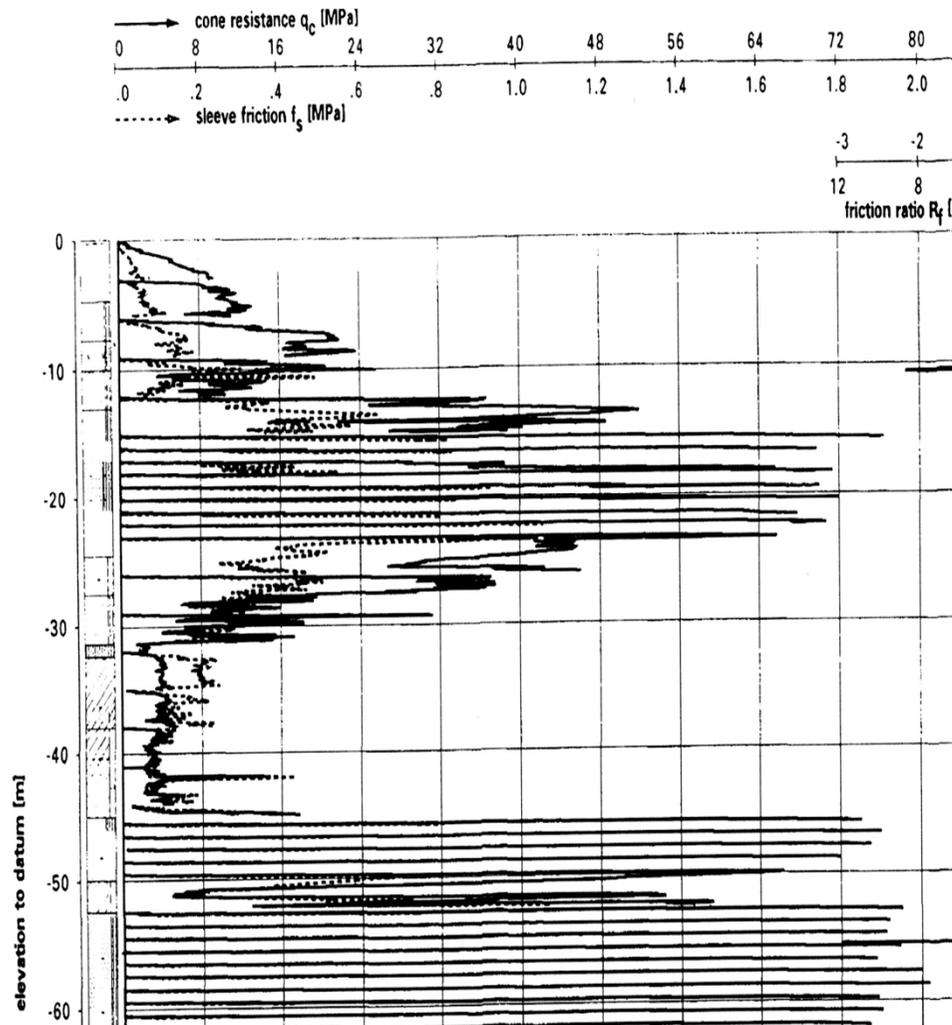
- **L7H (1989):**

- Pieux de diamètre 1,07m battus 'au refus' à 59m avec un Menck 7000SL (1200kJ.60% = 700kJ)
- Design initial avec méthode API (avec  $f_{max} = 115 \text{ kPa}$ ):  
**Fiche requise = 63m avec risque de refus au battage**
- Accord de BV pour appliquer une méthode de design moins conservative ( $f_{max} = 135 \text{ kPa}$ ) sur la base des résultats d'essais dans la cuve L3S et de la publication OTC 6001 de Lacasse & Goulois (1989):  
**Fiche requise = 59m**



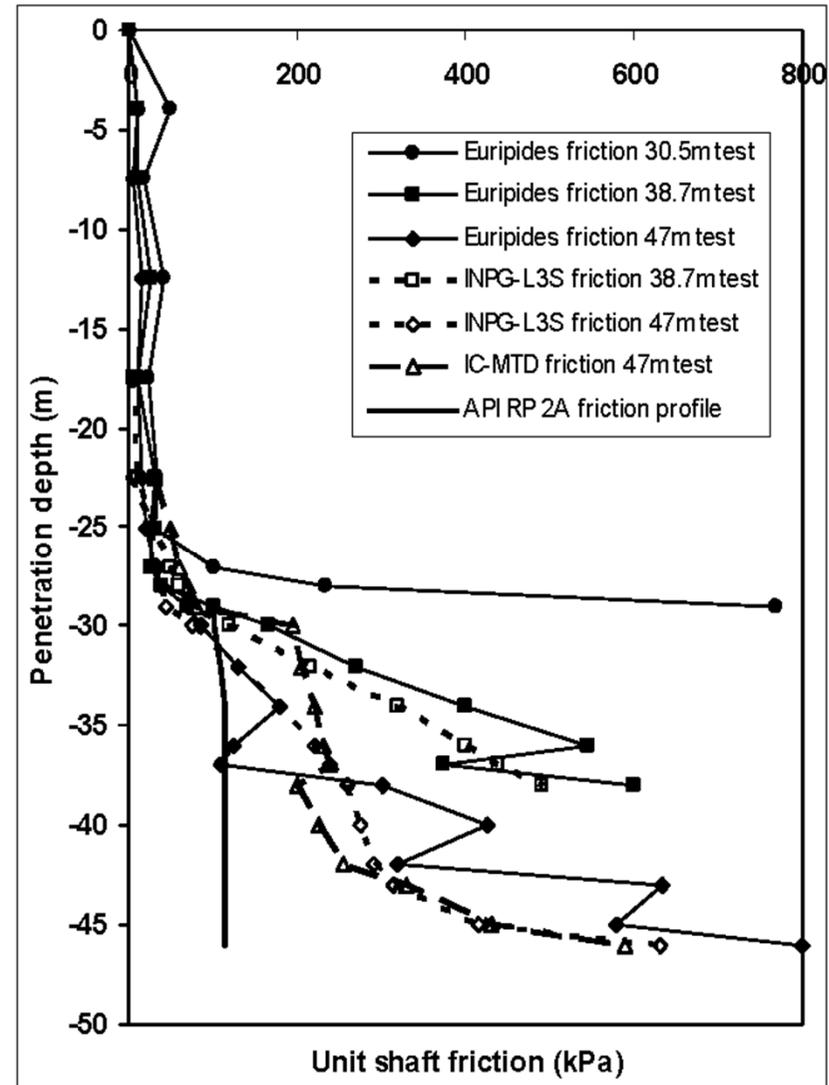
# CAS DES SABLES TRES DENSES DE MER DU NORD (3/3)

- **K4A (1998):** Pieux de diamètre 1,07m battus à 54m avec un IHC S-500



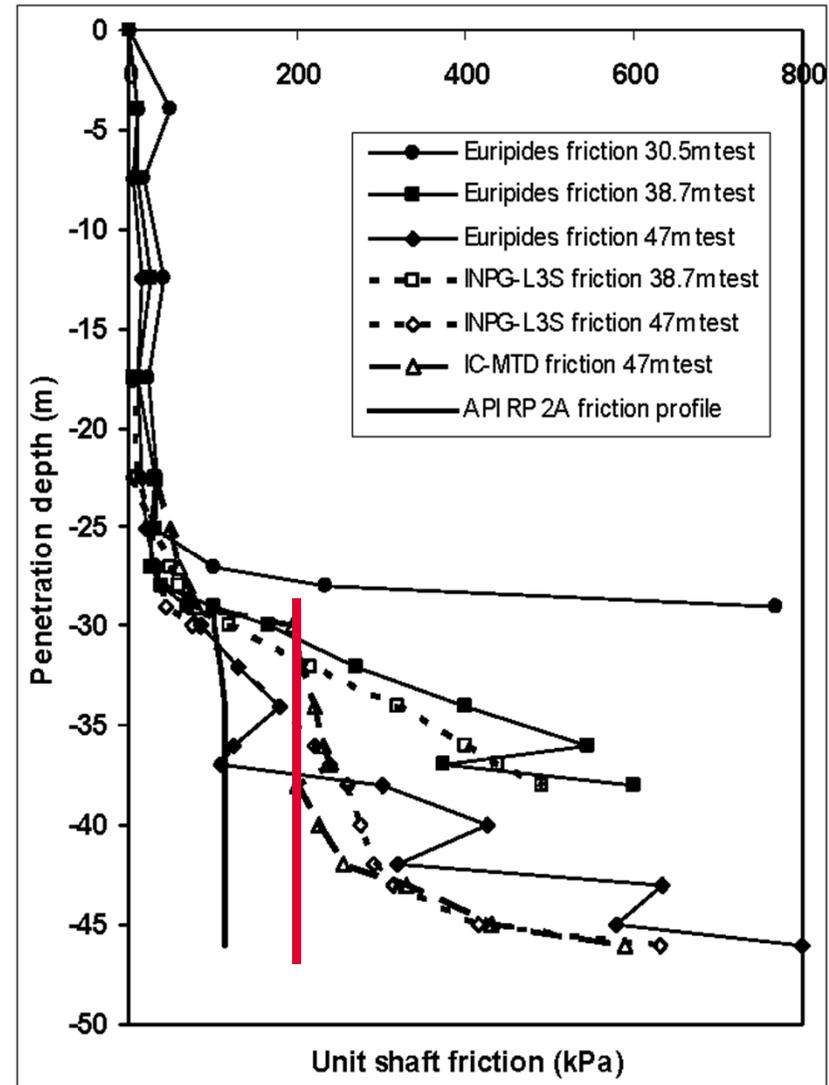
# APPLICATION DES NOUVELLES METHODES DE DESIGN (1/4)

- Différences entre méthode API et les méthodes de design basées sur l'essai CPT:
- Méthode API: Distribution linéaire du frottement latéral avec limitation à  $f_{max} = 115 \text{ kPa}$
- Méthodes CPT: Distribution exponentielle du frottement latéral (effet de 'friction fatigue') avec valeur max  $f_{max} = f(q_c)$



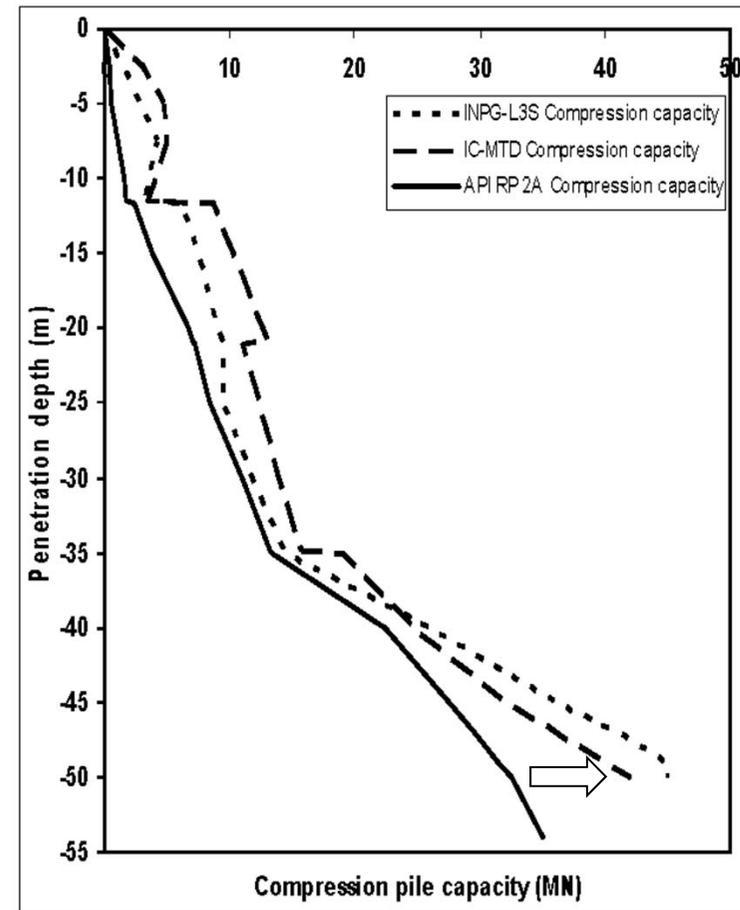
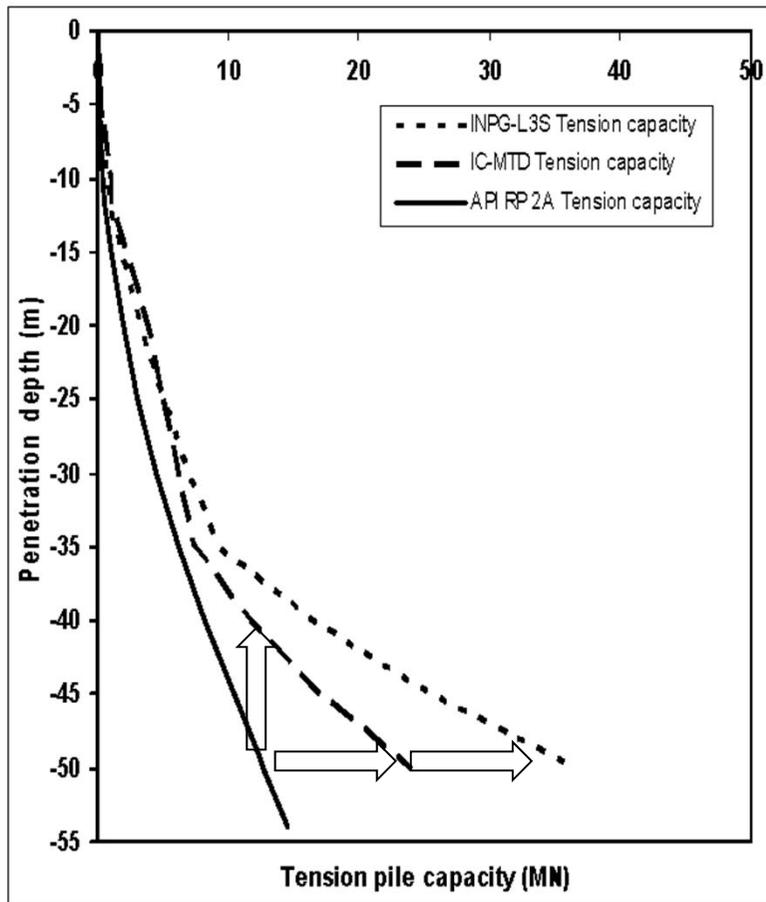
## APPLICATION DES NOUVELLES METHODES DE DESIGN (2/4)

- Différences entre méthode API et les méthodes de design basées sur l'essai CPT:
  - Méthode API: Distribution linéaire du frottement latéral avec limitation à  $f_{max} = 115 \text{ kPa}$
  - Méthodes CPT: Distribution exponentielle du frottement latéral (et effet de 'friction fatigue') avec valeur max  $f_{max} = f(q_c)$
- Méthode type 'API modifiée' pour approcher les résultats des essais EURIPIDES:
  - Frottement latéral avec  $f_{max} = 200 \text{ kPa}$  (Foray, Balachowski & Colliat, « *Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands* », Canadian Geotechnical Journal, 1998)



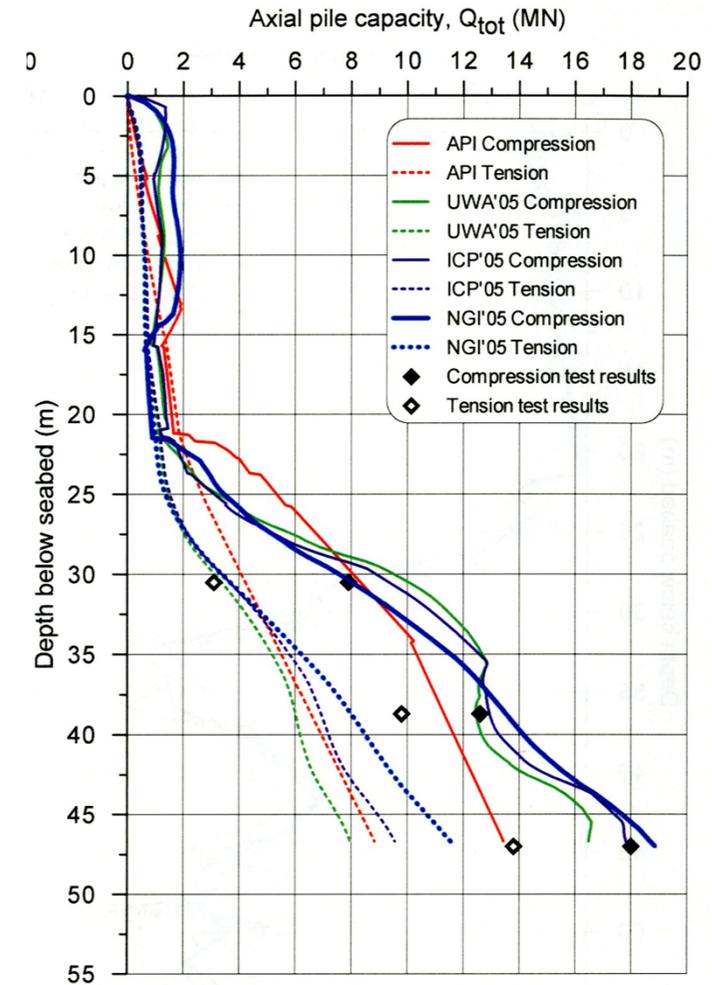
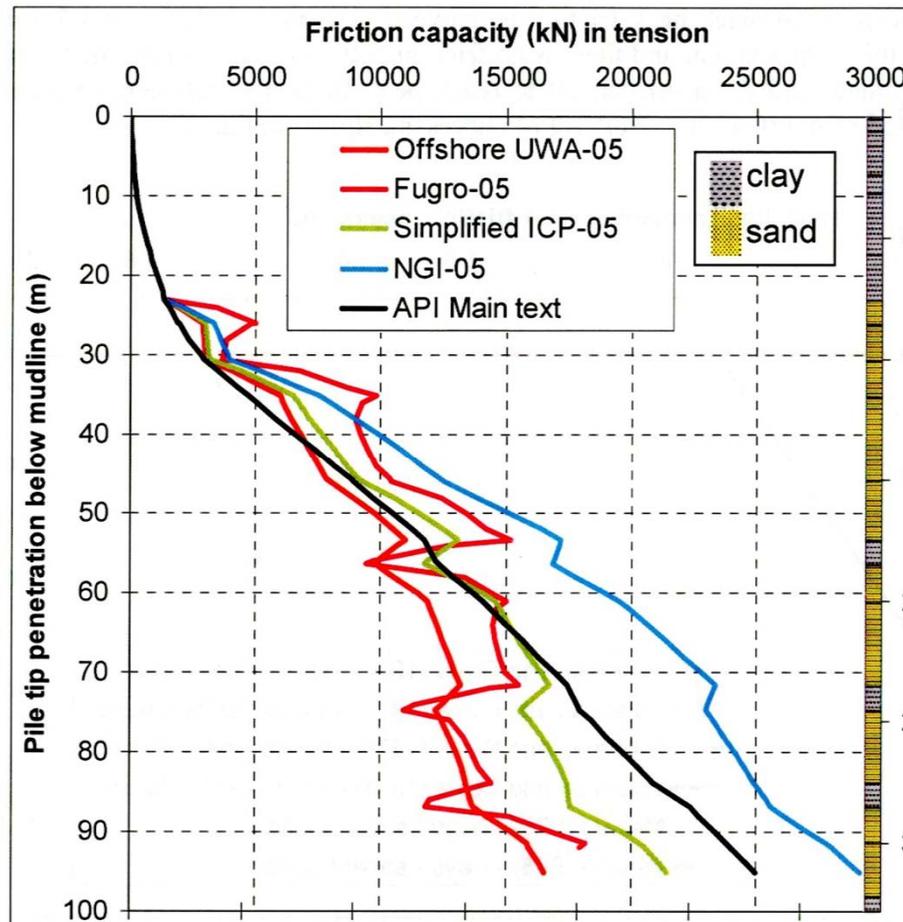
# APPLICATION DES NOUVELLES METHODES DE DESIGN (3/4)

- Méthode de design basée sur essais en cuve et sur les résultats des essais EURIPIDES (Foray & Colliat, « *CPT-based methods for design of piles driven into dense sands compared to the Euripides test results* », ISFOG 2005)



# APPLICATION DES NOUVELLES METHODES DE DESIGN (4/4)

- Exemples d'application des méthodes CPT (ICP, UWA , Fugro et NGI) sur un site du Golfe du Mexique (*Jeanjean et al., 2010*) et sur le site des essais Euripides (*Lacasse et al., 2013*)



# CONCLUSIONS

- Certains résultats de R&D disponibles depuis 1995 sont toujours en cours de discussion dans les groupes de normalisation API et ISO, en particulier
  - Ré-analyse des bases de données d'essais de pieux pour calibration des facteurs de sécurité
  - Effet du temps sur la capacité portante des pieux battus ('pile ageing').
- Application des méthodes de design aux monopiles de grand diamètre
  - Pour l'offshore pétrolier (pile 4.2m x 35m de Shell K17-FA1)
  - Pour les piles de fondation d'éoliennes (D= 3.0–7.0m x 20–35m).

# CAPACITE PORTANTE DES PIEUX BATTUS DANS LES SABLES DENSES – SPECIFICITES DE L'OFFSHORE PETROLIER

## Merci pour votre attention – Des questions ?



K17-FA1 (Shell, Hollande)



Eoliennes de Samsø (Danemark)