

Expérimentations et nouvelles
méthodes de dimensionnement
des pieux battus développées
à l' Imperial College

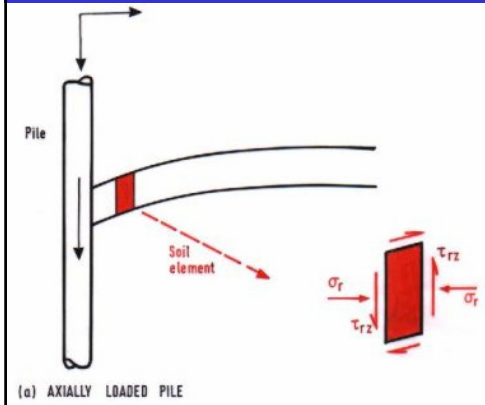
CFMS
9 Juin 2006

Richard Jardine

Thèmes principaux

- Le besoin de meilleures procédures
- Recherche sur les pieux équipés pour une meilleure compréhension du comportement fondamental.
- Nouvelles règles de conception et paramètres d'entrée
- Fiabilité des nouvelles méthodes
- Mise à jour et recherche récente

PREDICTION DES EFFORTS?

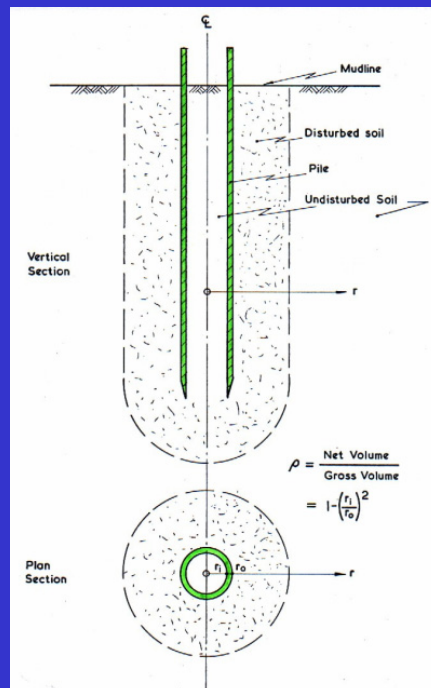


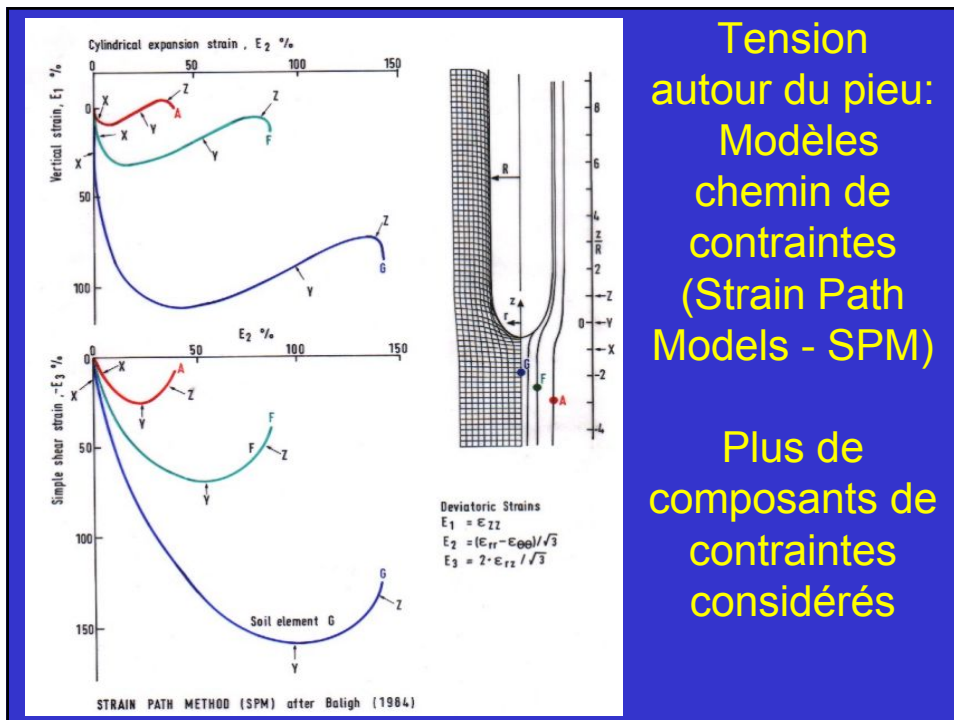
- Relation directe avec les tests in-situ (SPT, CPT, MPM etc), ou
- Pression de la terre et méthode de la charge maximale.
- Relié à σ'_{v0} par K pour le sable, ou S_u par α pour l'argile, ou
- Analyses sphériques ou cylindrique d'expansion de cavité 1-D, ou
- Solutions par chemin de contraintes?

Problème théorique: hypothèses non-prouvées pour le système de l'effort effectif développé par l'installation du pieu battu

Tension autour du pieu: modèles d'expansion de la cavité (MEC)

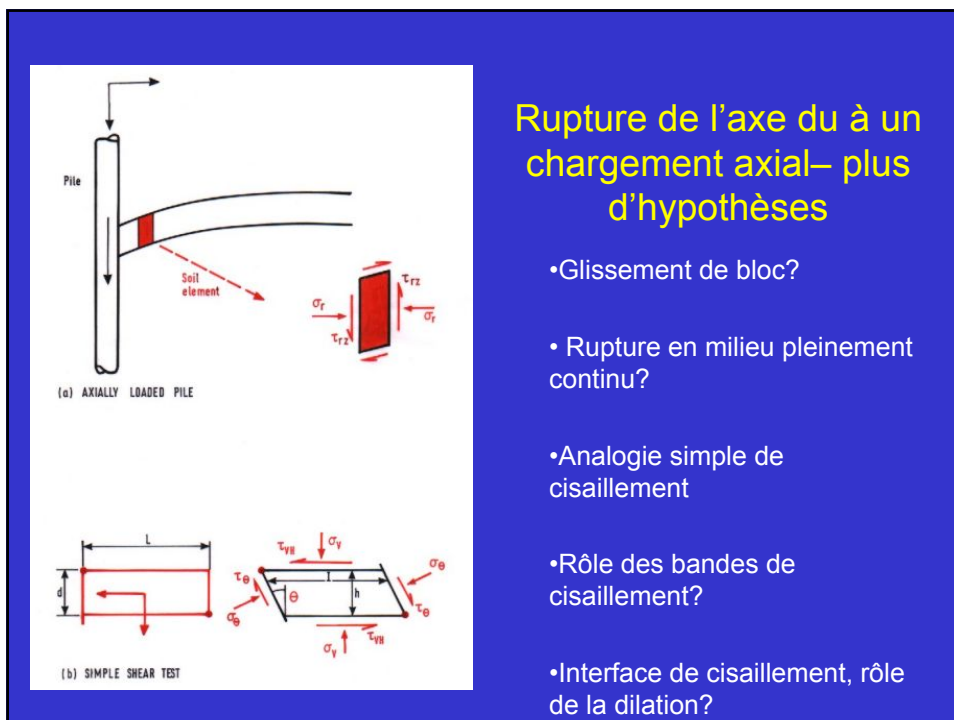
- Volume du pieu en fonction de l'expansion radiale de l'argile.
- Modèles des sols élastiques/plastiques pour la prédiction des tensions et la pression des pores en fonction du temps.





Tension
 autour du pieu:
 Modèles
 chemin de
 contraintes
 (Strain Path
 Models - SPM)

Plus de
 composants de
 contraintes
 considérés



Rupture de l'axe du à un
 chargement axial– plus
 d'hypothèses

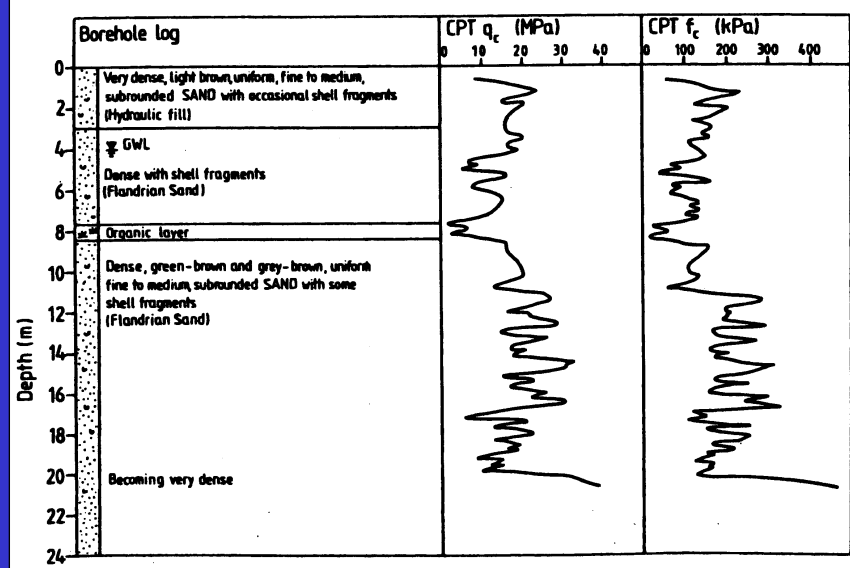
- Glissement de bloc?
- Rupture en milieu pleinement continu?
- Analogie simple de cisaillement
- Rôle des bandes de cisaillement?
- Interface de cisaillement, rôle de la dilation?

- Des solutions théoriques pour la capacité de l'axe et de la base existent, mais non fiables ou précises
- La plupart des praticiens emploient des approches empiriques liées aux paramètres in-situ ou d'essai en laboratoire
- Méthodes existantes dans la littérature offrent un éventail large de prédictions, certaines meilleures que d'autres.
- Compréhension quasi-inexistante des concepts de mécanique basiques

Règles conventionnelles de conception

Démonstration: essais sur pieu à Dunkerque

- Sable marin avec suffisance hydraulique dense à moyen-dense.
- Essai de rupture sur le terrain sur pieu acier 456mm OD
- Essais labo et in-situ abondants incluant les profils CPTU
- Evaluation prédictive basée sur des recherches web; concurrents qualifiés
- A considérer, plus tard, les bases de données plus importantes de Briaud & Tucker, Jardine & Chow



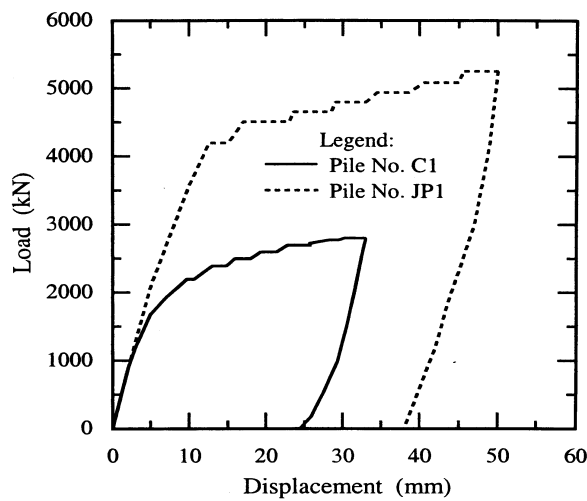
Dunkerque: profil typique CPT



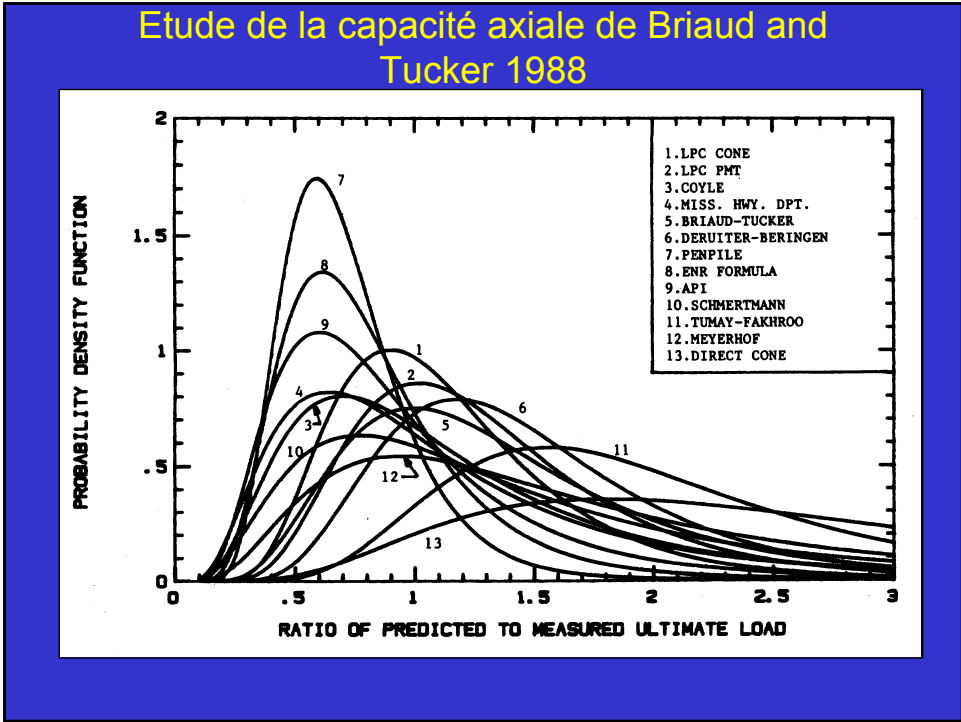
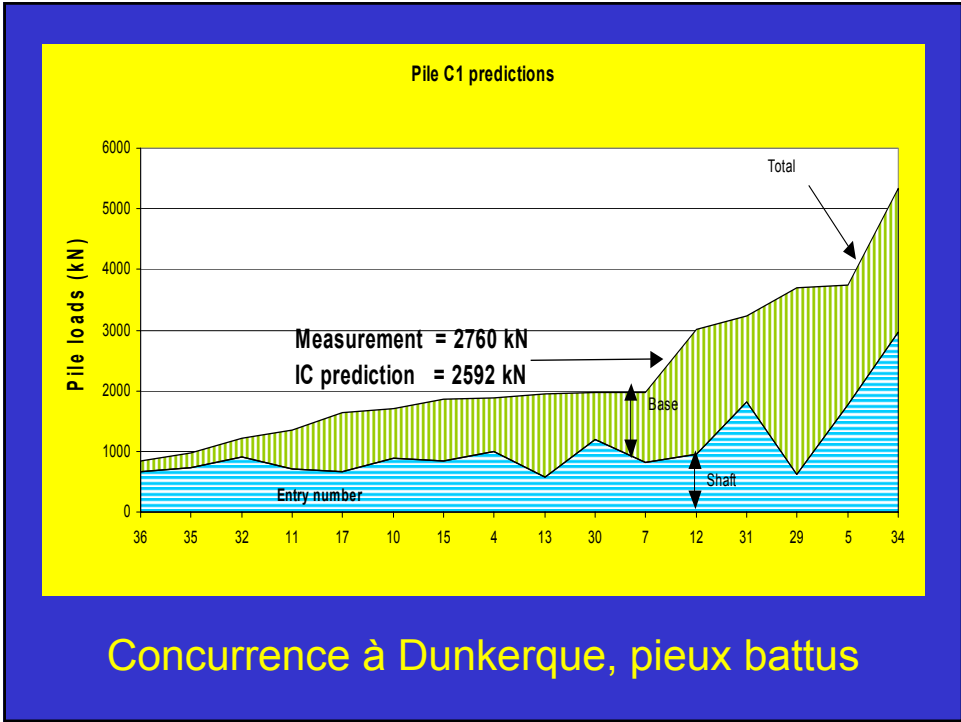
Pieu battu à Dunkerque



Essai de compression à Dunkerque 1998



Essai du chargement du pieu; projection de mortier JP1 et battus simples C1



- Méthode CPT de LPC donne globalement les meilleures prédictions

98 pieux battus dans l'argile et le sable:

Moyenne Q_c/Q_m	= 1.15
Ecart-type	= 0.46

API donne 0.90 (moyenne) et 0.63 (écart-type)

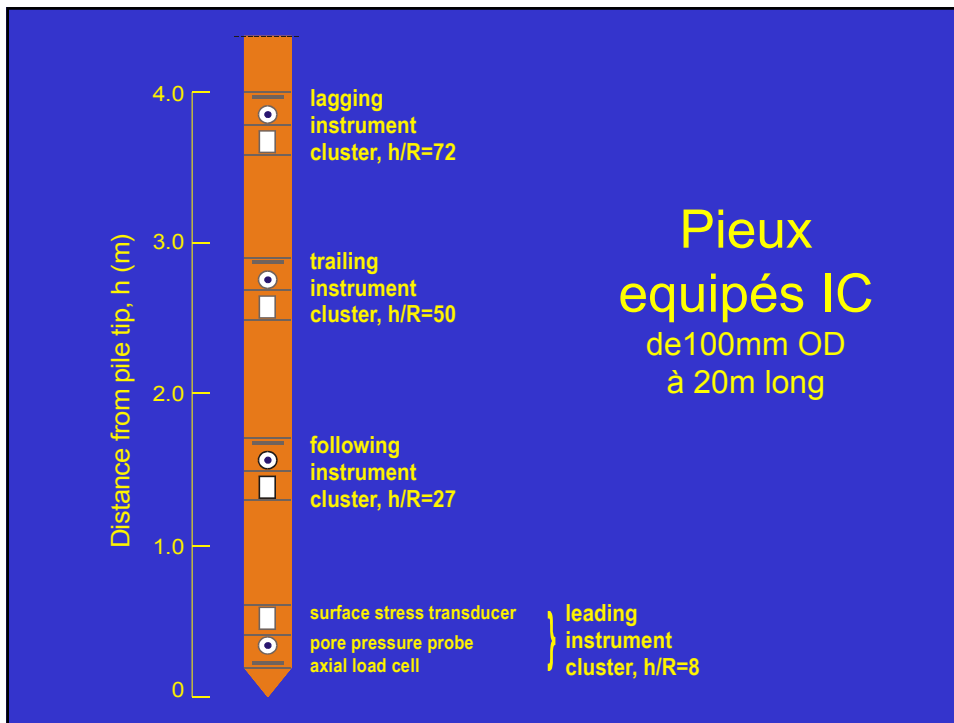
Résumé: Briaud and Tucker 1988

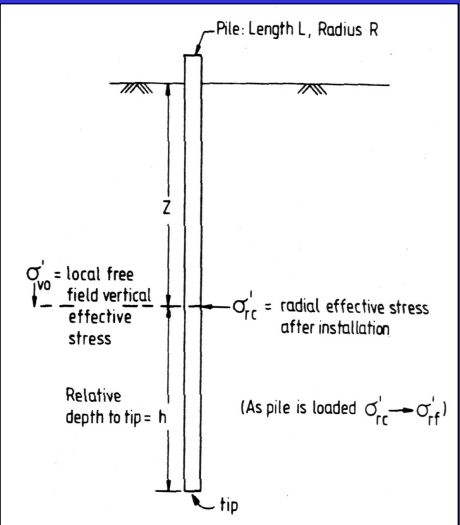
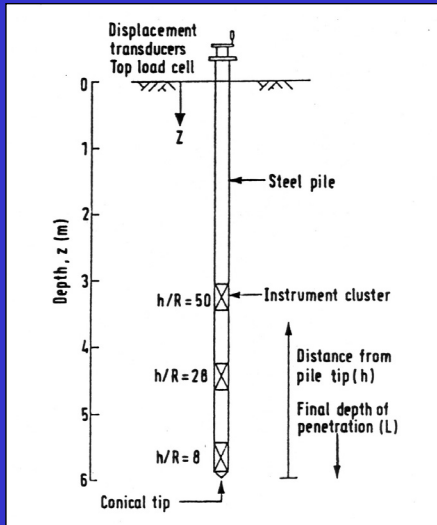
Recherche ICP 1985-1999

- Pieux ICP hautement équipés pour mesurer la tension effective durant l'installation; Egalisation; Chargement à la rupture; Action cyclique
- Expériences multiples sur sable à:

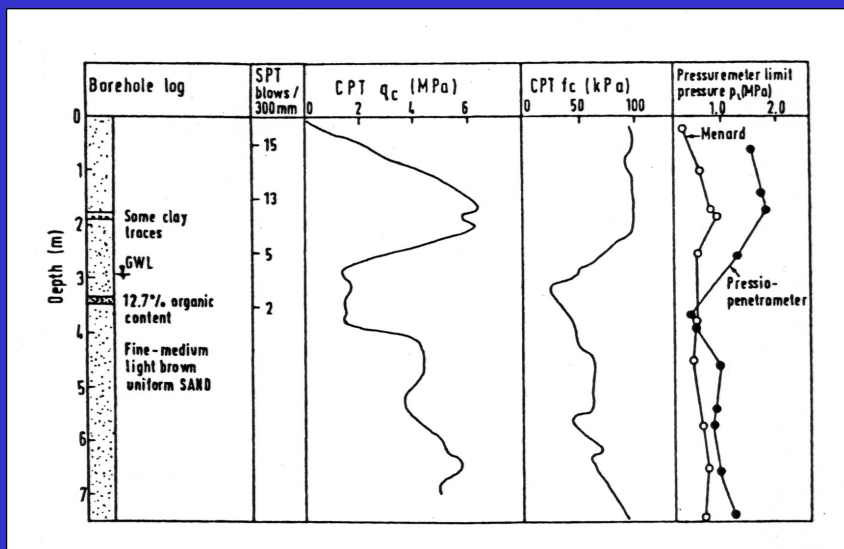
Labenne	Dune de sable (peu dense)
Dunkerque	Sable marin dense

Autres essais sur pieux battus à bouts ouverts par CLAROM à Dunkerque, plus 4 sites argileux...

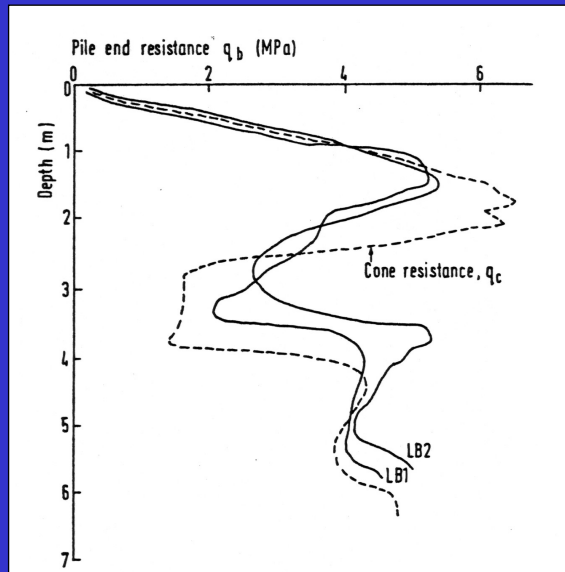




Configuration ICP pour essais Labenne. Définition des tensions et paramètre de pointe - h



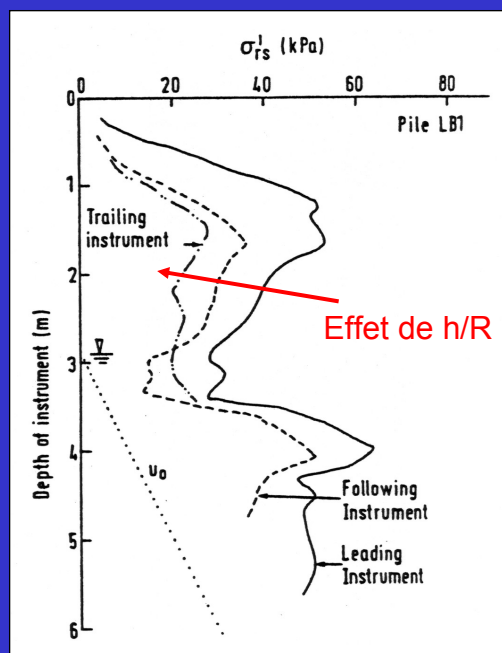
Profile géotechnique : Labenne

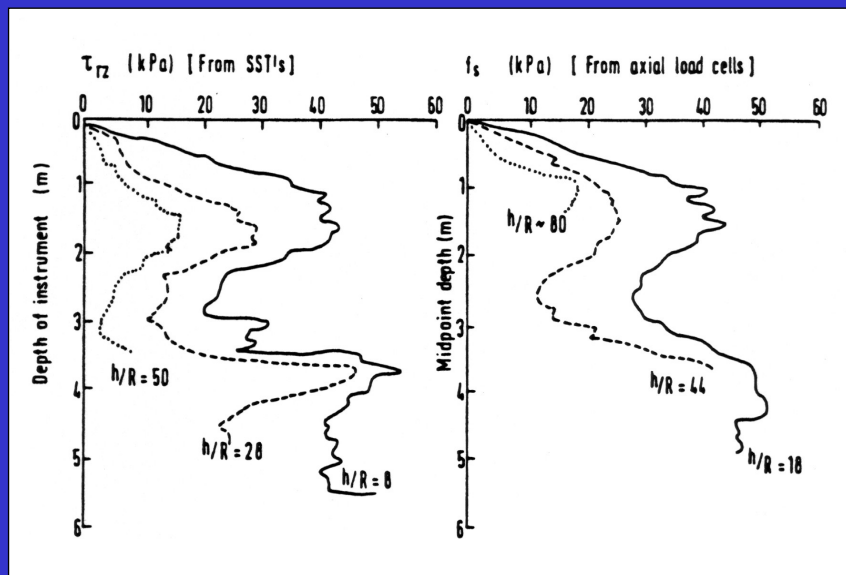


Labenne: résistance ICP de la base q_b et résistance CPT du point q_c

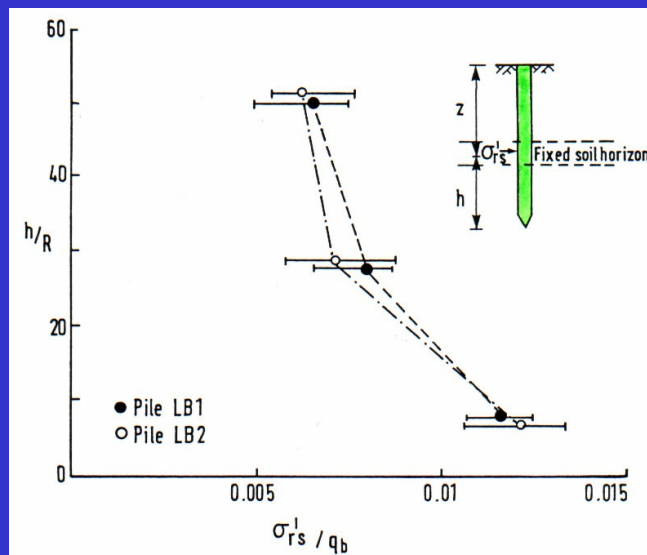
σ'_r local durant pénétration à Labenne

Influences des états variables (CPT – q_c) et profondeur de pointe du pieu (h/R)





Résistance au cisaillement de l'axe durant pénétration
 – Tendance similaire de q_c et h/R



Quotient de l'effort effectif radial sur la
 résistance de pointe. Essais ICP à Labenne

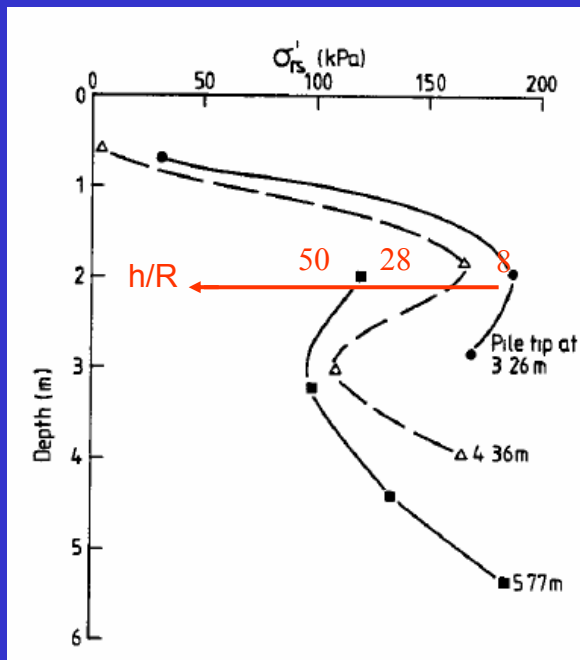
Essais ICP à: Dunkerque

σ'_r varie en fonction de
CPT q_c

h/R affecté aussi

Contraire aux
méthodes
conventionnelles

Courbe type à
Labenne



- Essais répétés sur sable dense à Dunkerque
- Tensions effectives radiales σ'_r varie avec q_c et h/R de la même façon qu'à Labenne
- La tension effective verticale a un effet supplémentaire mineur
- Décrite de façon fiable par:

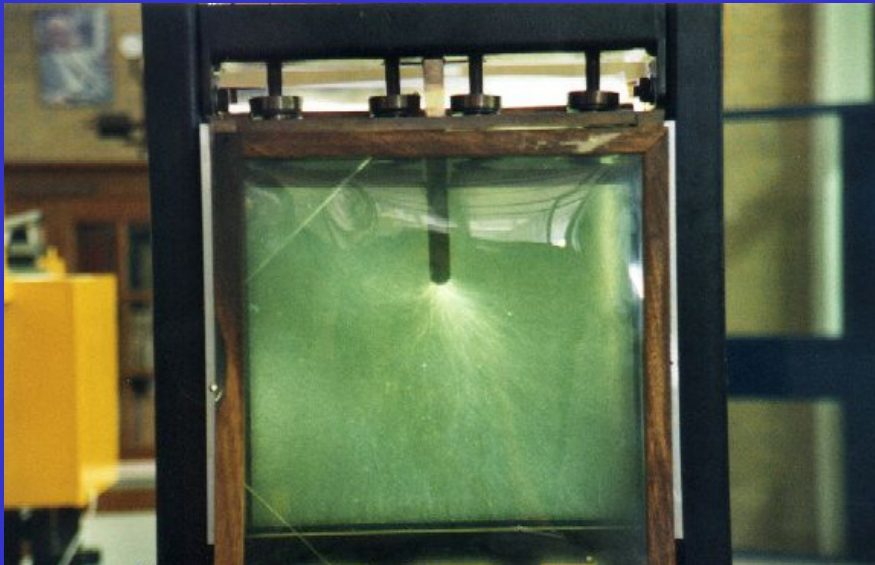
$$\sigma'_{rc} = 0.029 q_c [\sigma'_{v0} / P_a]^{0.13} (h/R^*)^{-0.38}$$

- Différence des types de pieux est considérée dans l'expression pour R^* (bouts ouverts/fermés, etc)

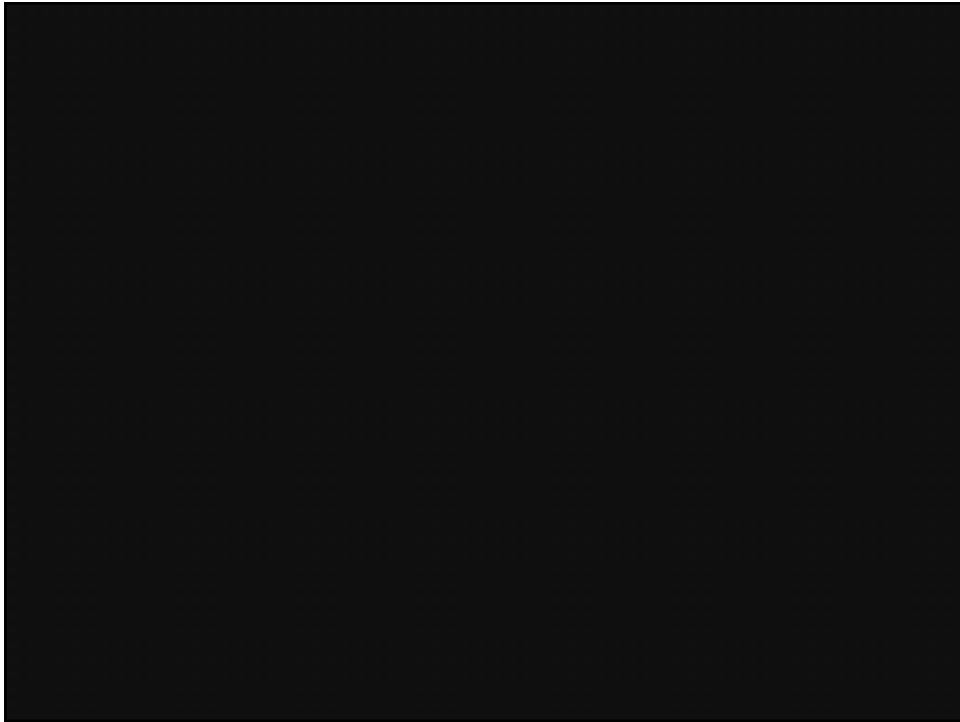
**Tensions effectives radiales avant le
chargement**

- Les résistances de la base varie avec q_c , règles directes développées pour prédire q_b à bout ouverts ou fermés.
- Des effets d'échelle importants incorporés suivant les essais labo à Oxford et autres données de terrain.
- Expérience particule photo-élastique nous eclaire sur les processus gouvernant.

Capacité de la base

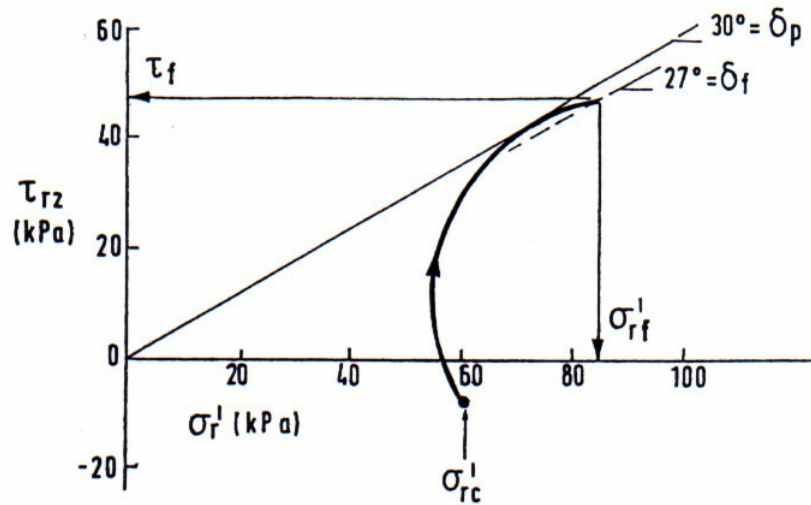


Expérience particule photo-élastique pour pénétration du pieu



RÉPONSE DE CHARGEMENT

- Essais de chargement du pieu effectués à Labenne et Dunkerque 2-3 jours après l'installation
- Mesures locales du cisaillement et des tensions effectives radiales.
- Des changements importants en σ'_r
- Le critère de rupture de Coulomb est validé



Chemin typique de la tension effective des essais ICP du sable de Labenne

- Coulomb: $\tau = \sigma'_{rf} \tan \delta$
- Mais σ'_r varie en fonction du chargement de pieu
- Contribution dilative: varie avec la rigidité de cisaillement de sol, rugosité de l'interface et le rayon du pieu.

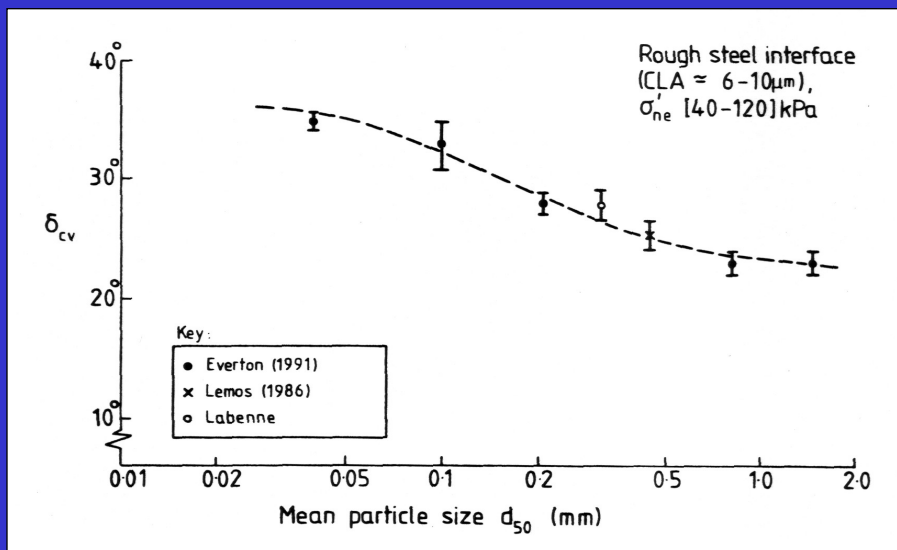
$$\sigma'_{rf} = \sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}$$

$$\Delta\sigma'_{rd} = 2G \delta h/R$$

$$G = f(q_c, \sigma'_{v0})$$

- Effet radial du pieu: dilation domine les petits modèles, effet insignifiant pour les gros pieux. Légèrement différent pour la tension; tous regroupés dans de simples expressions
- Et δ ?

Résultats principaux des essais de chargement dans le sable



Tendances typiques labo pour le sable à l'interface de cisaillement – Contraire aux règles usuelles!

- Rupture de l'axe implique valeur de δ à l'état critique, valeur indépendante de la densité relative
- δ dépend de la taille des grains de sable et de la rugosité et dureté du pieu
- Meilleure mesure de δ in soil-interface ring-shear or direct shear lab tests, facile à mettre en oeuvre et peu coûteux
- Très bon accord entre prédictions labo et les données de terrain

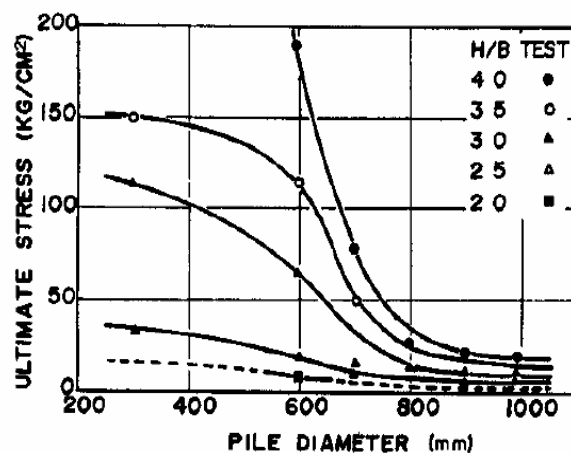
Angles de cisaillement à l'interface, δ

- Faire CPTUs, essais-labo de l'interface de cisaillement, distributions de la taille des particules, mesurer la hauteur de la nappe et poids unitaires
- Traceurs Piezocone font la distinction entre argile/vase et sable
- Application de formules simples pour la résistance locale de l'axe. Capacité globale sujet aux effets significatifs des couches, minceur (L/D) et diamètre, D
- Application d'équations simples pour la base q_b incluant facteur d'échelle
- A noter: effet du temps potentiellement important sur la capacité de l'axe

Points principaux sur les nouvelles procédures pour le sable

Effet du diamètre non-négligeable

Autres interprétations possibles



Effect of pile diameter and plug length on plug resistance (Kishida & Isemoto, 1977)

Règles de chargement du bout sur sable de l'analyse des bases de données

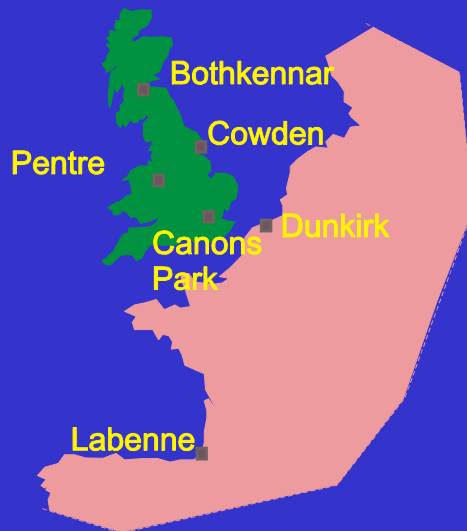
Recherche ICP sur argile

Expériences de terrain multiples sur l'argile entre 1984-1996 à:

Canons Park	Eocene London clay raide
Cowden	Dépot glaciaire très raide
Bothkennar	Argile marin Holocene peu profond, mou
Pentre	Argile-vase glaciolacustrine, petit OCR

Mesures des tensions effectives durant l'installation; égalisation, essai de chargement et cycle

Etudes laboratoires et théoriques supplémentaires; des essais sur pieux battus à trois sites mentionnés ci-dessus

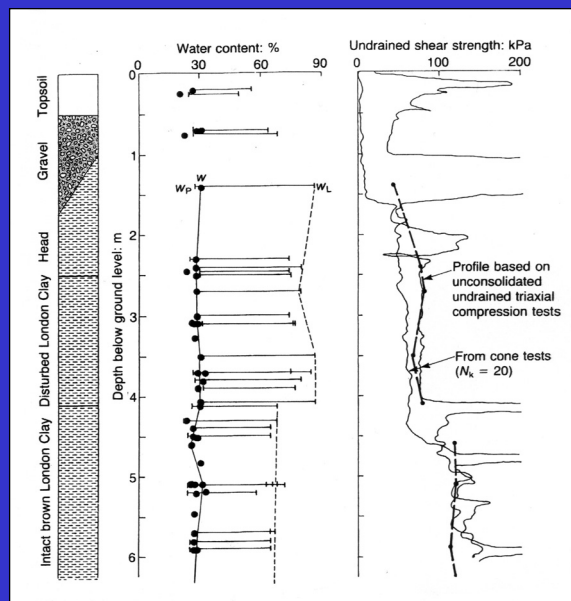


Localisation des essais pieu IC

- Essais ICP sur sites argileux mous à très d ur; δ décroissant; sensibilité décroissante.
- Historique apparent des tensions (YSR = OCR apparent), sensibilité et angles de cisaillement à l'interface (force résiduelle) sont les variables clefs
- h/R est aussi un paramètre essentiel, c.f. sable

RECHERCHE PIEUX BATTUS EN MILIEU ARGILEUX

London clay   Canons Park

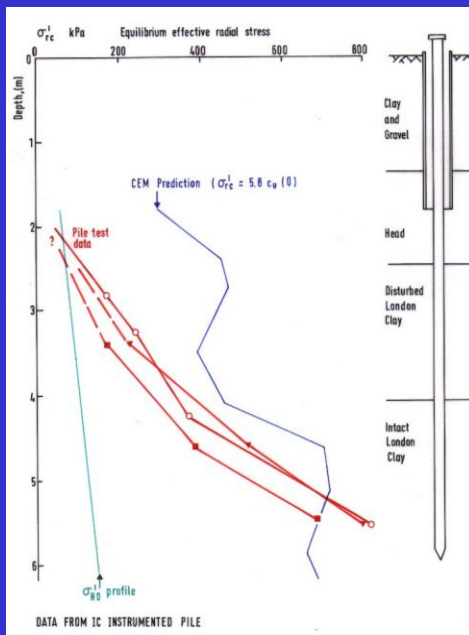


Essais ICP à Canons Park

Profils σ'_{rc} entièrement égalisés

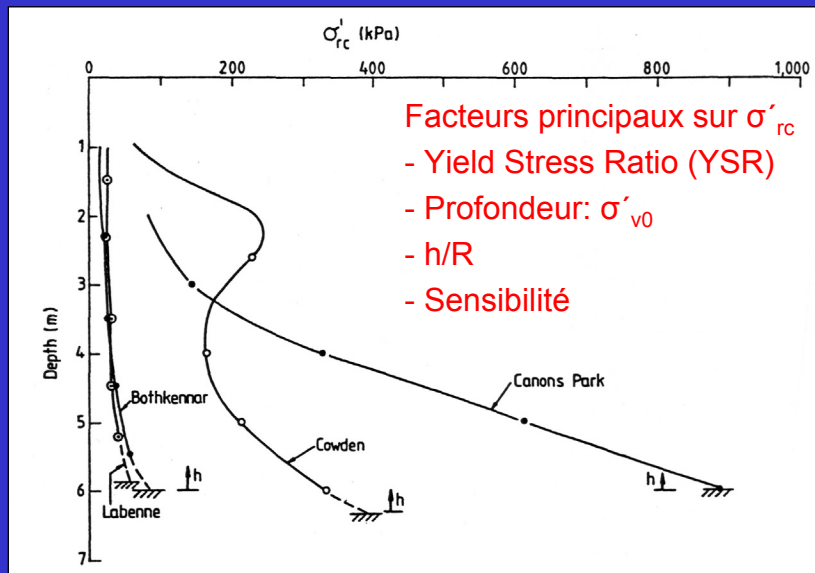
Prédictions à partir de K_0 , q_c , CEM, SPM etc

Pas de relation directe

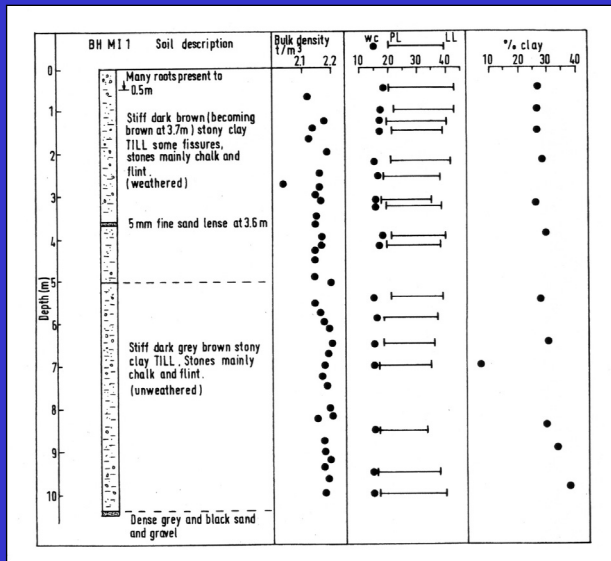


Facteurs principaux sur σ'_{rc}

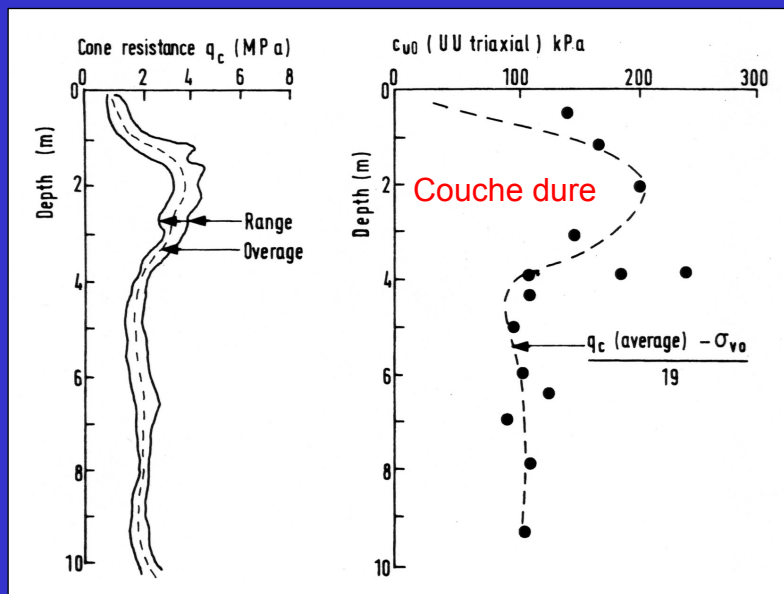
- Yield Stress Ratio (YSR)
- Profondeur: σ'_{v0}
- h/R
- Sensibilité



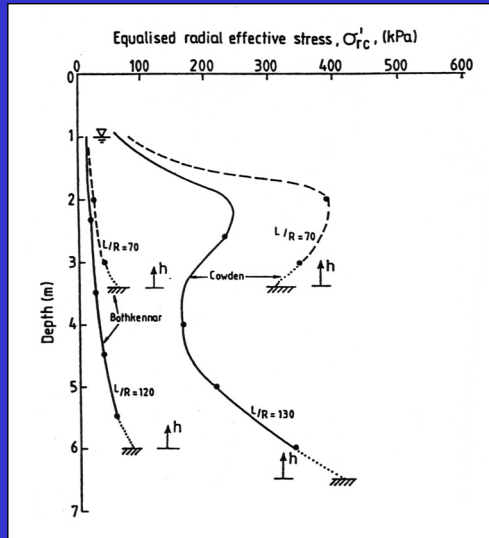
Profils σ'_{rc} entièrement égalisés à trois sites argileux



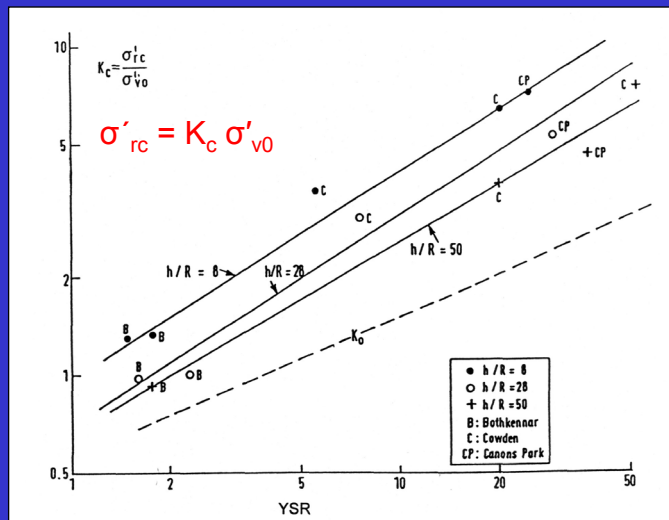
Cowden, Humberside – Moraine argileuse



Données CPT et S_u triaxial à Cowden



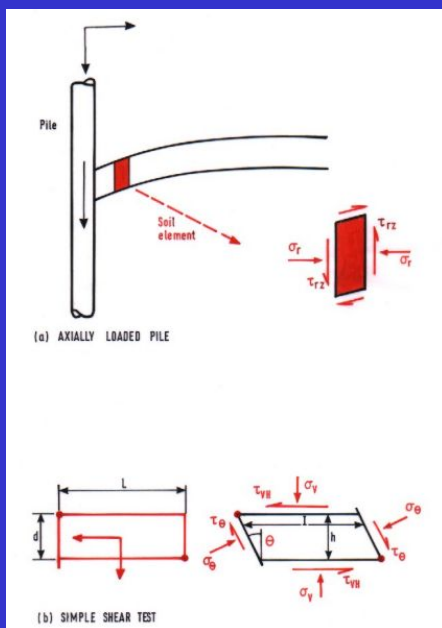
Effet de h/R sur σ'_{rc} et la couche dure de Cowden



Relation entre K_c , YSR et h/R , trois sites:
 $K_c = f(S_t, YSR, h/R)$

- Relation non-linéaire entre K_c et YSR et h/R
- Sensibilité S_t importante, mesurée par des essais de force ou des essais oedometer
- Des fonctions simples à entrer dans des tableurs

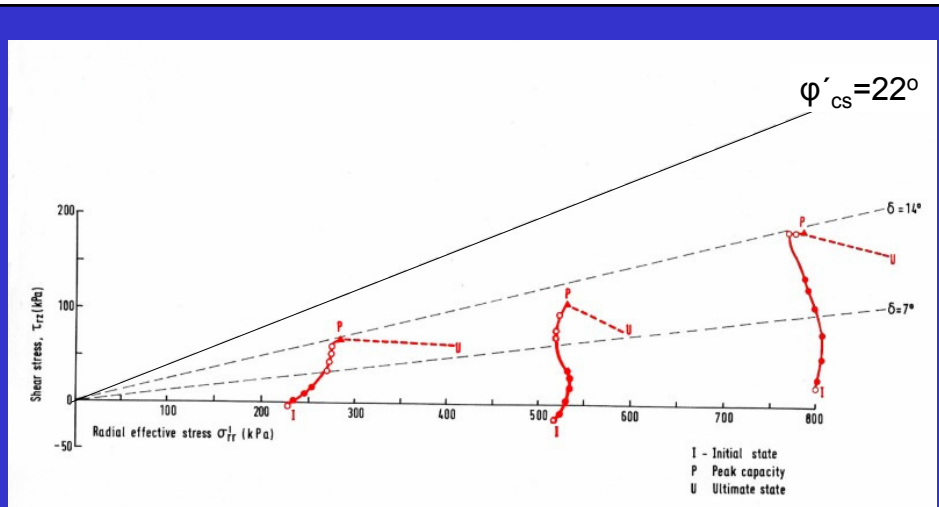
Procédures de conception simplifiées pour prédire $\sigma'_{rc} = K_c \sigma'_{v0}$, localement



Etape finale, réponse à une compression axiale

Hypothèses pour la rupture de l'axe

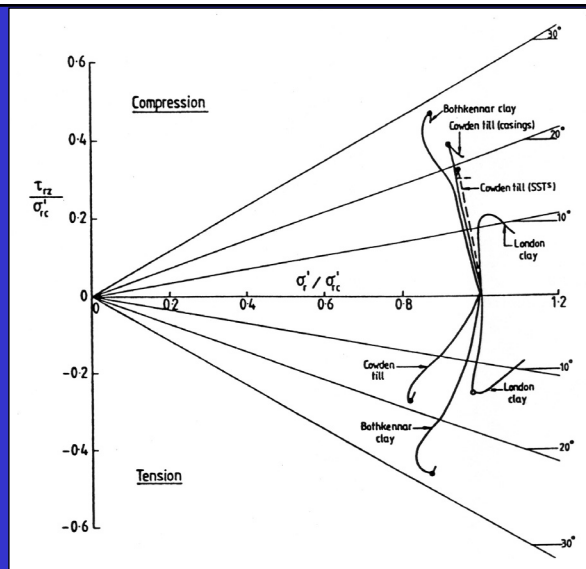
- Glissement de bloc?
- Rupture en milieu pleinement continu?
- Analogie cisaillement simple?
- Rôle des surface de cisaillement dans l'argile?
- Résultats probants des essais ICP



Essais ICP sur "London clay"; importance primordiale des surfaces de cisaillement résiduelle

- La résistance τ est régit par la simple loi de Coulomb
- En moyenne, σ'_{rc} décroît de 20% en fonction du chargement de l'axe à la rupture
- Large domaine de δ , de 10 à 35°. Prédications fiables des valeurs max et min des essais de fluage en laboratoire
- δ depend du minerai, % d'argile, rugosité et dureté de l'interface, et des conditions pré-cisaillement
- Larges erreurs possibles sans essais

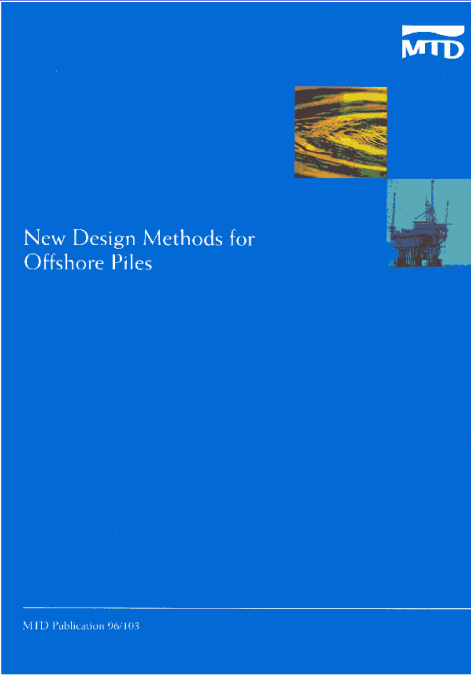
Resumé de la charge sur les argiles



Courbes d'effort effectif normalisées pour trois argiles des essais de pieu en tension et compression.

- Les résistances locales τ intégrées sur l'axe, enterrées pour trouver la capacité globale de l'axe, tenant en compte des fragilités possibles
- Bonne corrélation entre la capacité de la base mobilisable et CPT q_c
- Cas à bout ouverts ou fermés décrits par des formules simples, résultats dépend des couches, L/D etc
- De façon générale, la fiabilité des méthodes pour le sable et l'argile vérifiée par des cas d'études indépendants.

Résumé de la capacité sur les argiles



MTD

New Design Methods for Offshore Piles

MTD Publication 96/103

Méthodes ICP pour pieux battus

Jardine and Chow 1996

Evaluation sur 120 essais dans sables & argiles

Moyenne Q_c/Q_m proche de 1.0

Ecart-type des resultats (sables et argiles)

API	63%
ICP approche	23%
LPC cone (moyenne = 0.9)	46%



ICP DESIGN METHODS FOR DRIVEN PILES IN SANDS AND CLAYS

Richard Jardine, Fiona Chow, Robert Overy and Jamie Standing

Imperial College London

Développements pour l'édition 2005

Extensions et additions

- Domaine de recherche émergent
 - Période de temps écoulées
 - Action cyclique
 - Chargement sismique
 - Action groupe statique
- Applications en Azerbaïdjan et au Venezuela; Etudes des base de données:
 - 'Problèmes' argiles et sables
 - Sables mica et calcaires
 - Pieux carrés et en forme H
 - Choix basé sur la fiabilité pour FoS
 - Factors de charge et de résistance (LRFD)

Exemples cités où les méthodes de conception API conventionnelles occasionnent de sérieux problèmes

Sables mica et calcaires, capacités faibles

Dunkerque et EURIPIDES – vieillissement des pieux

Sungai Perak et Hound Point, capacités faibles

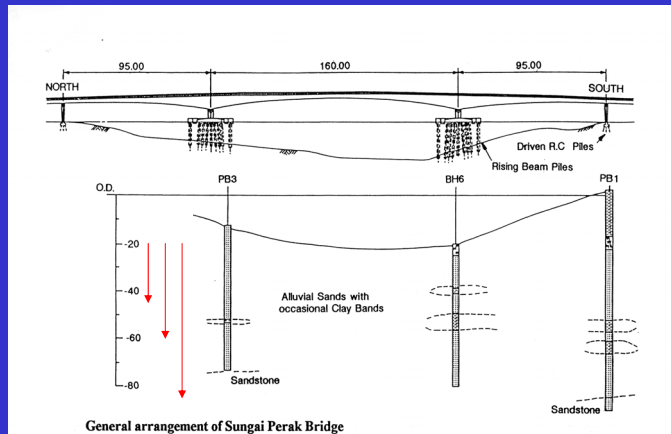
EURIPIDES, capacité largement sous-évaluée sur sable dense

Sungai Perak Bridge, Malaysia

Essais sur 1.50m OD, pieux tubulaires en acier de 33-38m de long, quatre essais

Predictions API des concepteurs: Q_c/Q_m : 1.85 (1.2 to 2.9 range)

Calculs ICP "à l'aveugle" de Chow: Q_c/Q_m : 0.91 (0.8 to 1.5 range)



EURIPIDES: 0.76m OD, 30.5-47m

Predictions ICP de Chow,
Randolph, Fugro, Total Fina
Elf, NGI...

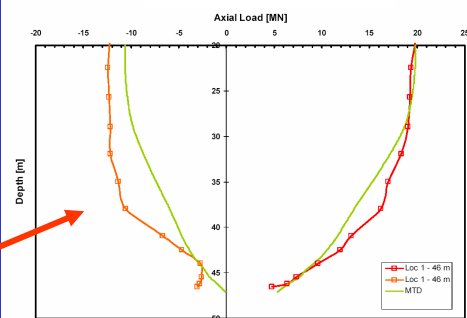
Fugro distributions de l'axe
(MTD = ICP)

Capacité ICP totale d'Overy
 Q_c/Q_m : ≈ 1.0 (0.78-1.12)

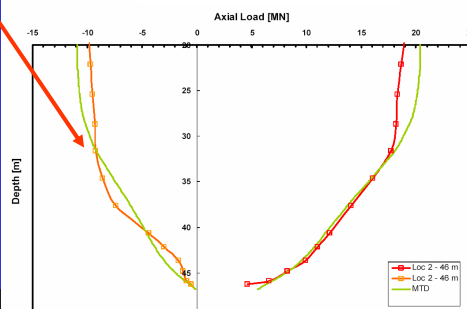
API: ≈ 0.6 (0.43-0.89)

Effets importants du
vieillessement

Axial Load Distribution - Location 1 - 46.9 m

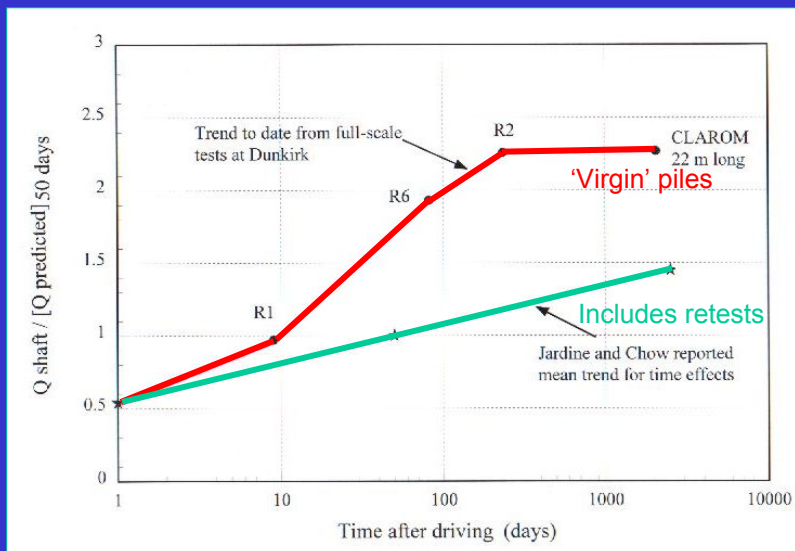


Axial Load Distribution - Location 2 - 46.6 m



Résumé général des données IC : 250 essais: Qc/Qm

	ICP	API
Capacité de l'axe dans le sable		
Moyenne	0.99	0.87
Ecart type	0.28	0.60
Capacité de l'axe dans l'argile		
M	1.03	0.99
ET	0.21	0.32
Capacité de la base dans le sable		
M	1.01	0.83
ET	0.19	0.98
Capacité de la base dans l'argile		
M	0.85	1.06
ET	0.30	0.73



Effet du temps sur la capacité des pieux battus
en sable à Dunkerque: Geotechnique; Jardine et al 2006

CONCLUSIONS

- Problème principal méthodes de conception traditionnelle: peu de fiabilité et fondements physiques incertains
- Méthodes ICP : expressions simplifiées de l'effort effectif à partir de la recherche sur les pieux hautement équipés, essais en lab etc
- Vérifications à partir des bases de données montrent des améliorations considérables de fiabilité: meilleure économie et sécurité

CONCLUSIONS

- Procédures prolongées jusqu'à 2005, pour couvrir un éventail plus large de pieux et sols
- Base de données élargie pour démontrer la fiabilité et identifier les limitations potentielles
- Recherche émergente pour étudier l'effet du vieillissement
- Etude supplémentaire sur les effets du chargement cyclique; action sismique; action de groupe sur la capacité axiale

- Dr Andrew Bond (PhD 1989)
- Dr Barry Lehane (PhD 1992)
- Dr Fiona Chow (PhD 1997)

- Collègues a LCPC, Bordeaux LPC, IFP
- Dr Jamie Standing
- Support de beaucoup d'autres à Imperial College et BRE

Remerciements