

Calibrage des facteurs de sécurité requis pour le dimensionnement de la capacité axiale des pieux offshore

Suzanne Lacasse
NGI, Oslo

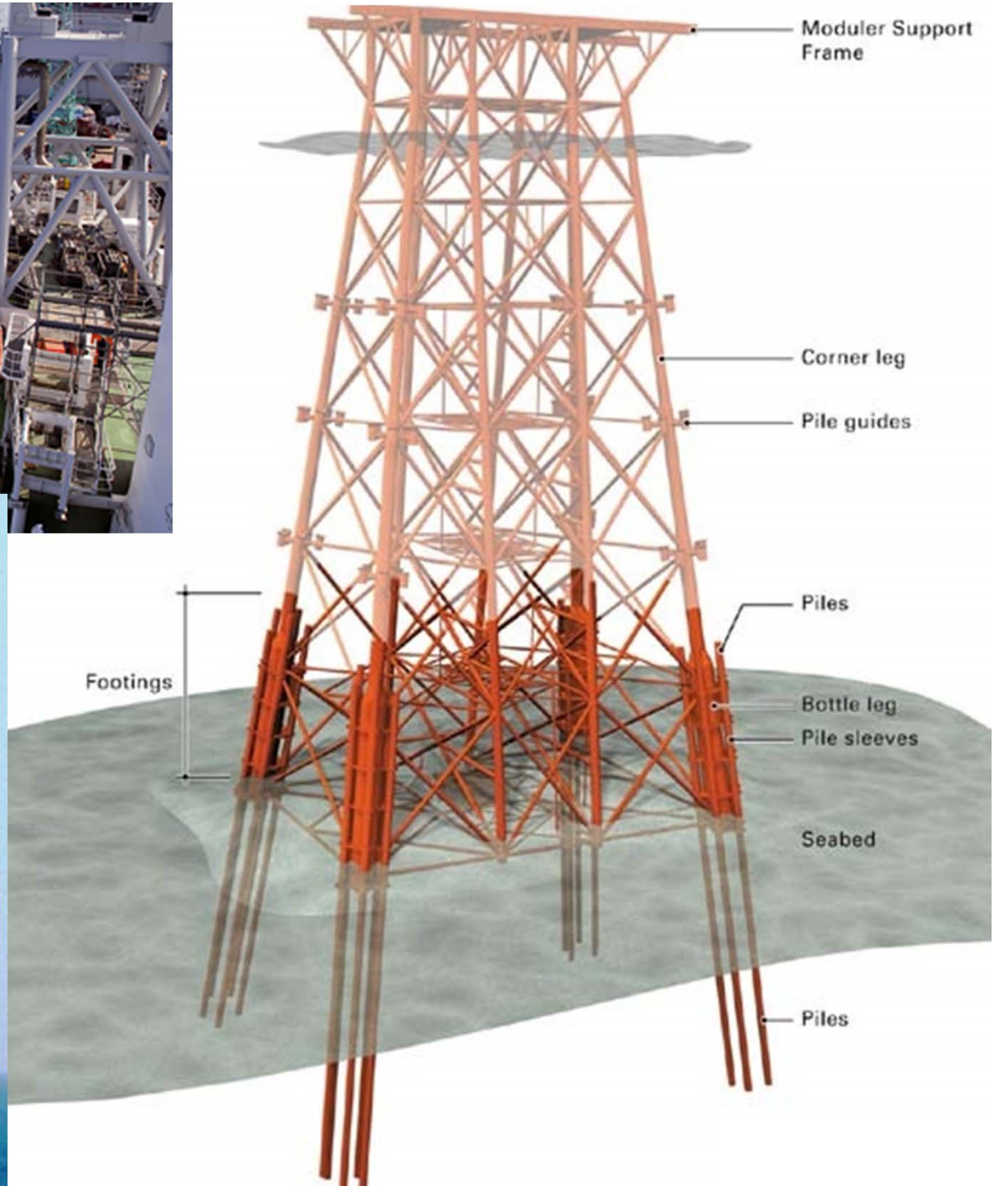
***Sols et fondations
sous sollicitations statiques, cycliques et dynamiques***

Hommage au Professeur Pierre FORAY

CFMS,

Paris 27 janvier 2015





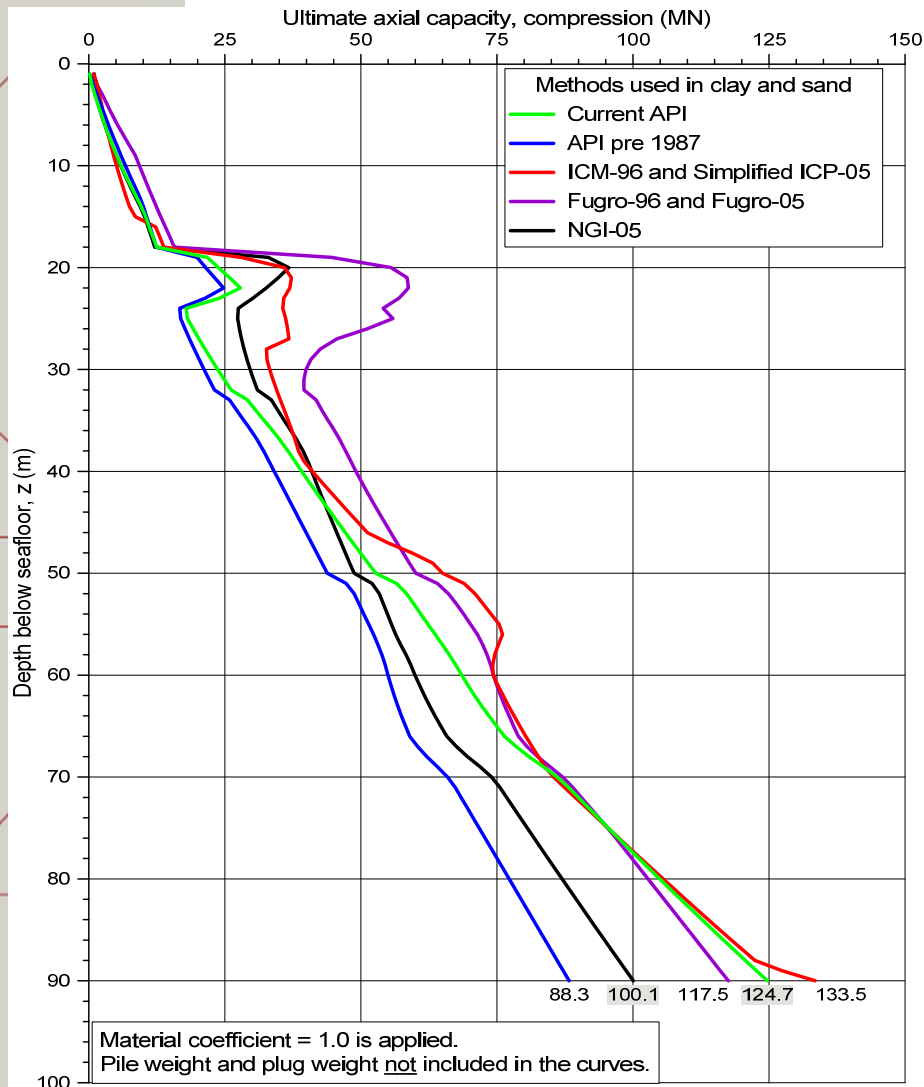
Calibrage des facteurs de sécurité partiels

Plan de la présentation

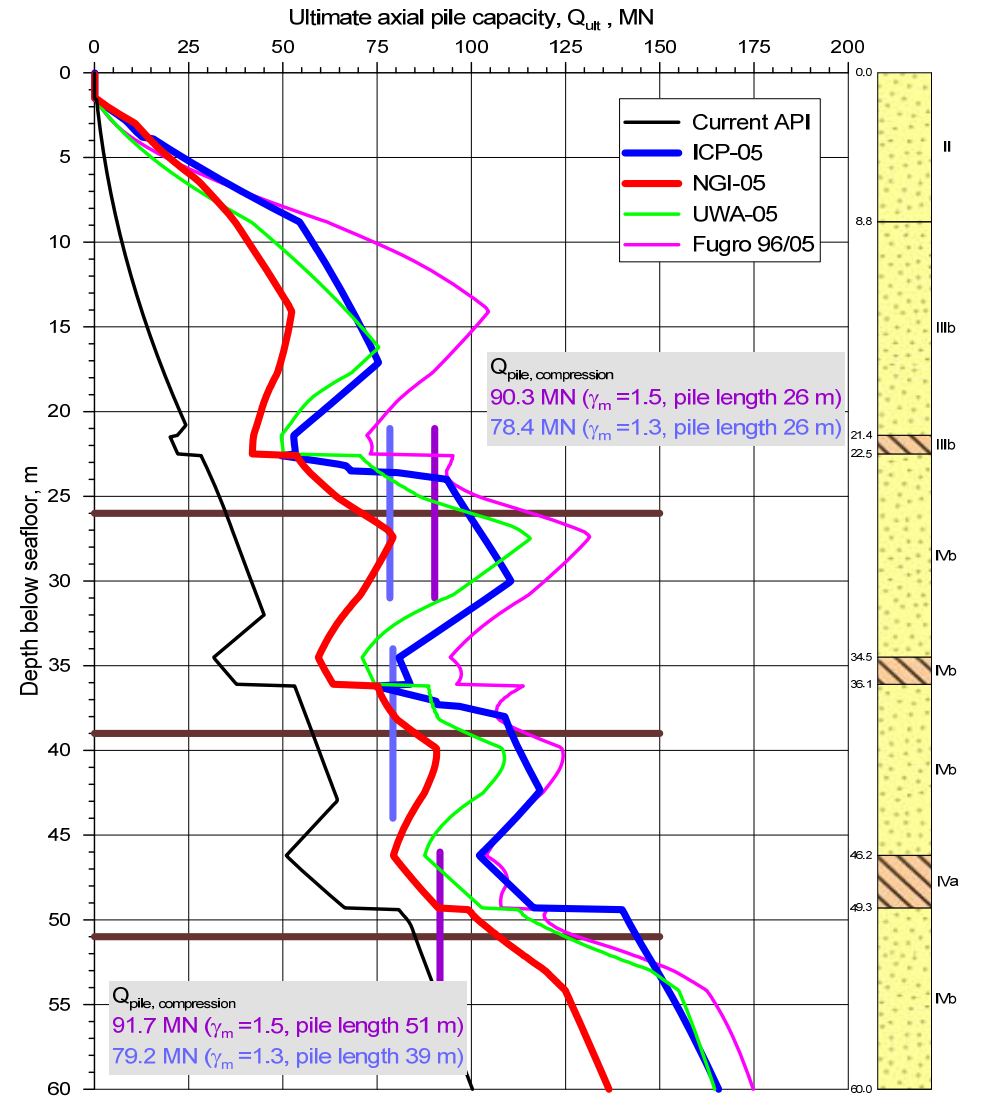
- Motivation pour ce travail
- Méthodes de dimensionnement; 3 jackets
- Approche adoptée
- Paramètres: sols, chargement, incertitude des modèles
- "Calibrage", facteurs de résistance et de chargement
- Simulation analytique
- Conséquences pour la pénétration des pieux
- Recommandations

Capacité ultime des pieux, Q_{ult} , paramètres “caractéristiques”

Site argileux



Site sableux



Motivation

- Règles de dimensionnement exigent le même niveau de sécurité pour les nouvelles méthodes de calculs (méthodes CPT) que pour la méthode API.
- L'ingénieur doit lui-même le facteur de sécurité "approprié" pour les méthodes CPT.
- On peut choisir d'être conservatif et appliquer un facteur de sécurité élevé, ou on peut documenter the niveau de sécurité ("probabilité de rupture") et "calibrer" les facteurs de sécurité requis pour assurer niveau de sécurité ciblé.

Facteurs de résistance et de chargement

Critère de dimensionnement

$$[\gamma_{l\ stat} \cdot P_{stat} + \gamma_{l\ env} \cdot P_{env}^{100\text{-yr}}] \leq Q_{ult\ char} / \gamma_m$$

$\gamma_{l\ stat}$ = Facteur de chargement, charge statique

P_{stat} = Charge statique caractéristique

$\gamma_{l\ env}$ = Facteur sur chargement dynamique/cyclique

$P_{env}^{100\text{-yr}}$ = Charge cyclique caractéristique (T=100 ans) $P_{env}^{100\text{-yr}}$

$Q_{ult\ char}$ = Résistance ultime caractéristique du pieu

γ_m = Facteur sur capacité axiale

Méthodes de dimensionnement étudiées

Méthode	Pieux dans l'argile	Pieux dans le sable
API	API-RP2A 20 th ed. 1993	API-RP2A 20 th ed. 1993
NGI-05	Karlsrud et al 2005	Clausen et al (2005)
ICP-05	Jardine et al 2005	Jardine et al 2005; API 2011; 2007
Fugro-96/05	Kolk and v.d. Velde 1996	Kolk et al 2005a
UWA-05	---	Lehane et al 2005a; b; Schneider et al 2008

Calibrage des facteurs de sécurité partiels

- 3 sites (100 m H₂O)
- Pieux acier (“pipe piles”)
 - 2.5 m dia; t= 90-100 mm
- Mode critique: pieu en compression
- "Calibrage"
 - **Cible: $P_f < 10^{-4}$ /année (annuel)**

Avant le calibrage, le client (“Statoil Management”) imposait un facteur de sécurité sur la résistance

$$\gamma_m = 1.5$$



Calibrage des facteurs de sécurité partiels

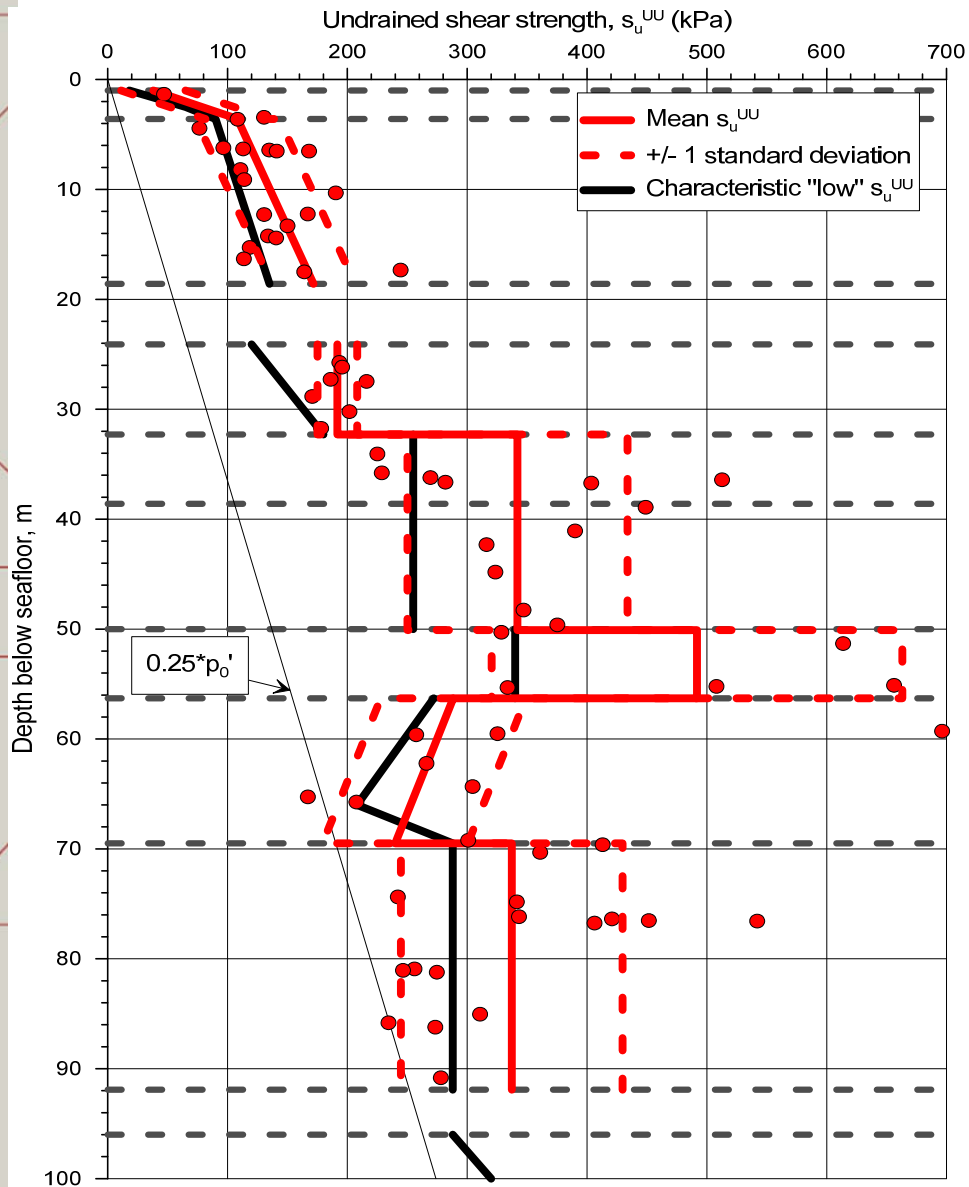
Approche adoptée

$$\underline{\text{ULS}}: [\gamma_{I \text{ stat}} \cdot P_{\text{stat}} + \gamma_{I \text{ env}} \cdot P_{\text{env}}^{100\text{-yr}}] = Q_{\text{ult}} / \gamma_m$$

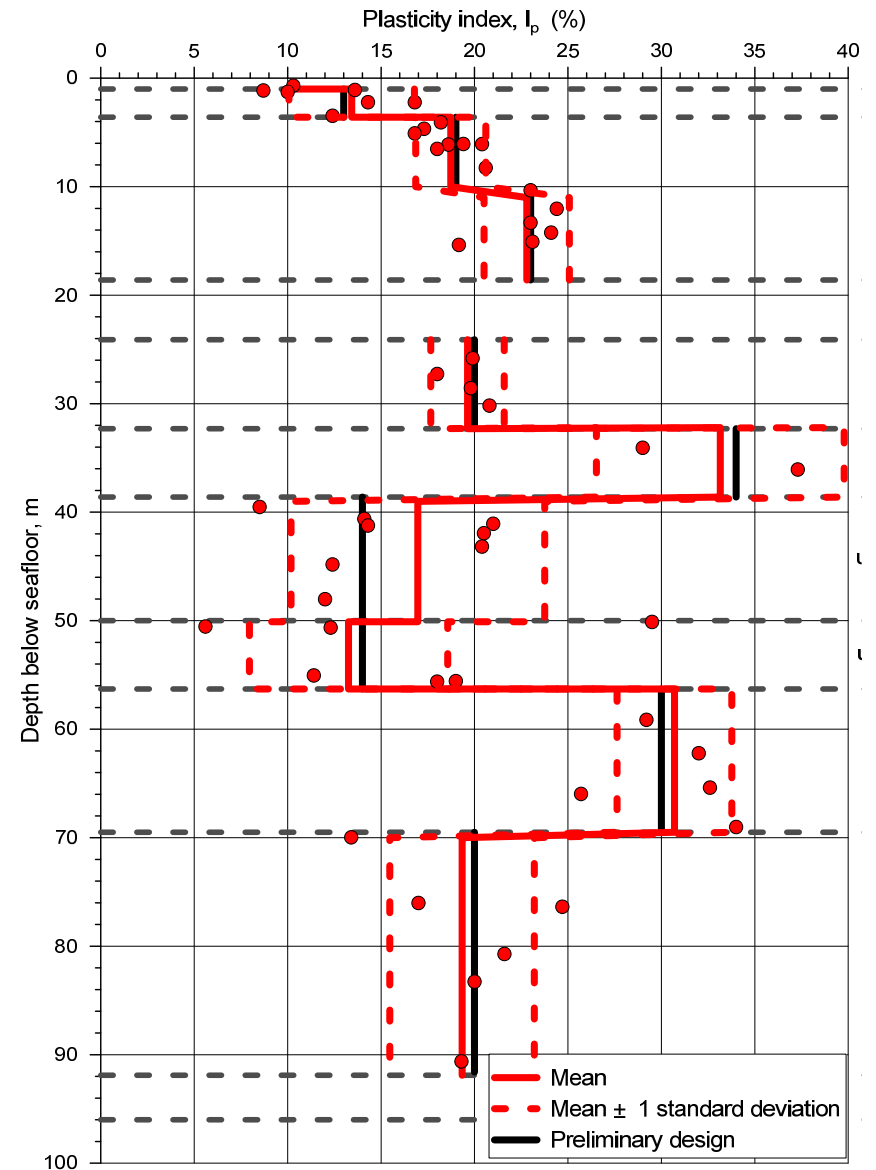
- Statistiques des paramètres de sols (lab, in situ, corr.).
- Incertitudes de modèles pour chaque méthode.
- Effet du chargement cyclique sur Q_{ult} (compr/tension).
- Statistiques des charges statiques et environnementales.
- Analyse déterministe du Q_{ult} , avec paramètres “caractéristiques” et valeur moyenne
- Analyse probabiliste Q_{ult} (μ , SD et PDF du Q_{ult}).
- P_f annuel des distributions P_{stat} , P_{env} et Q_{ult} .
- Calibrage des facteurs γ_m et $\gamma_{I \text{ env}}$ pour $P_f = 10^{-4}$ (annuel)

Site argileux

Résistance au cisail'nt non-drainée

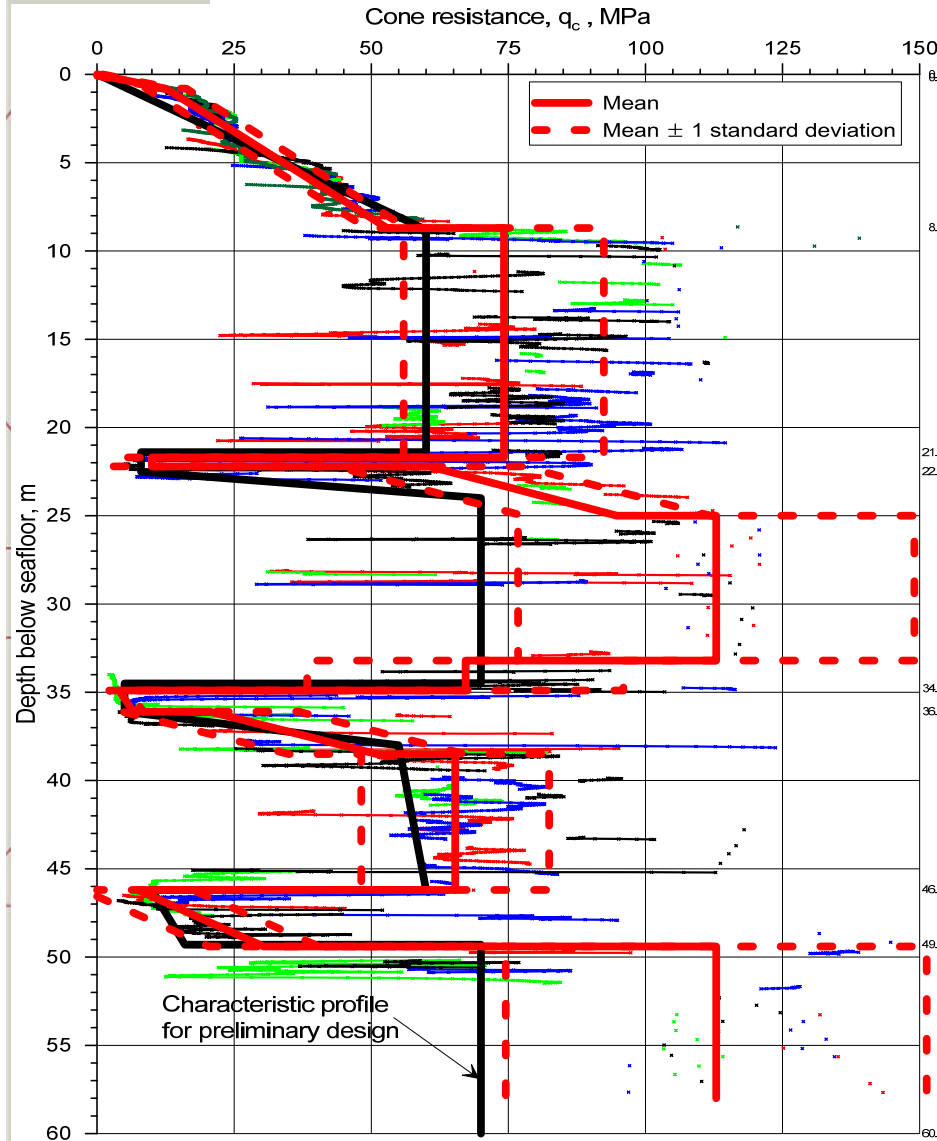


Indice de plasticité

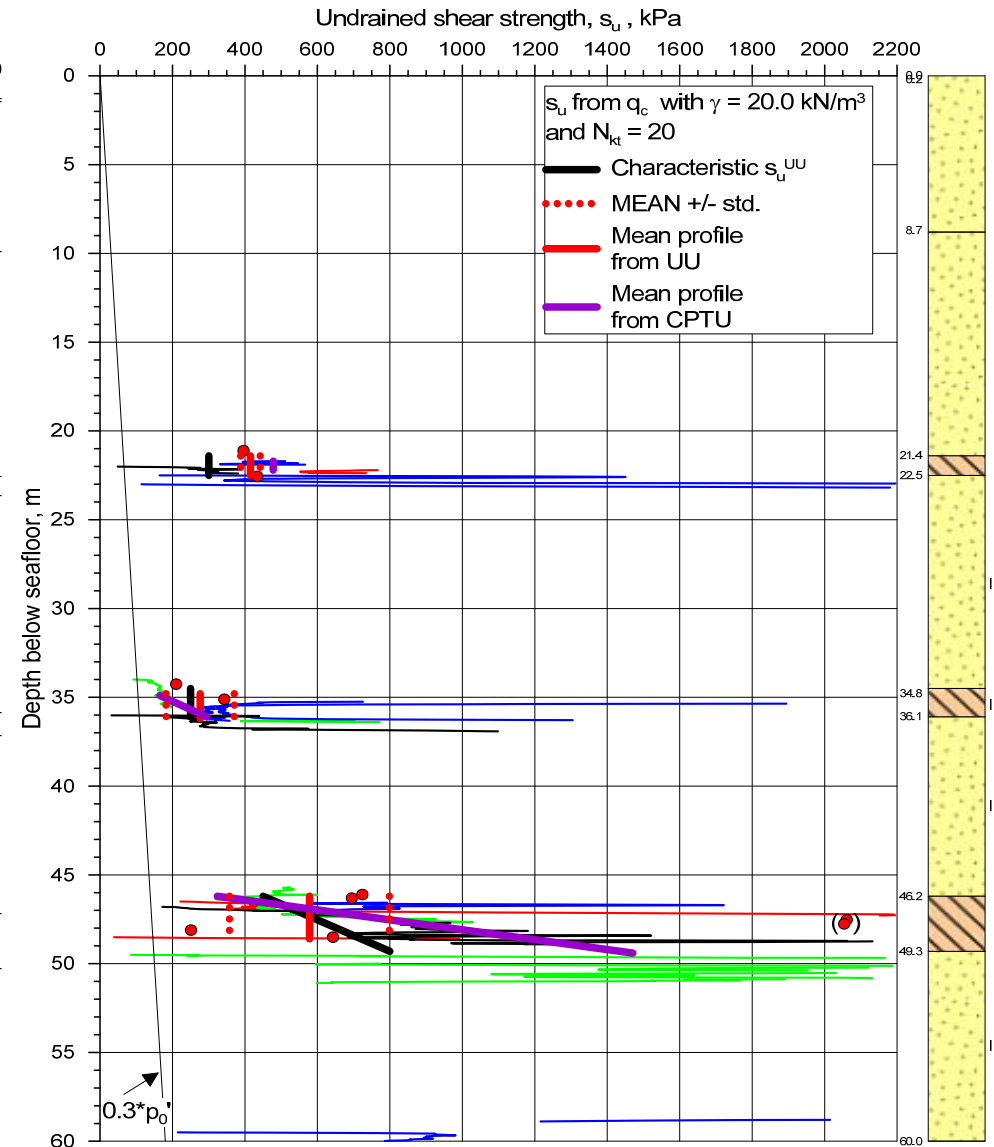


Site sableux

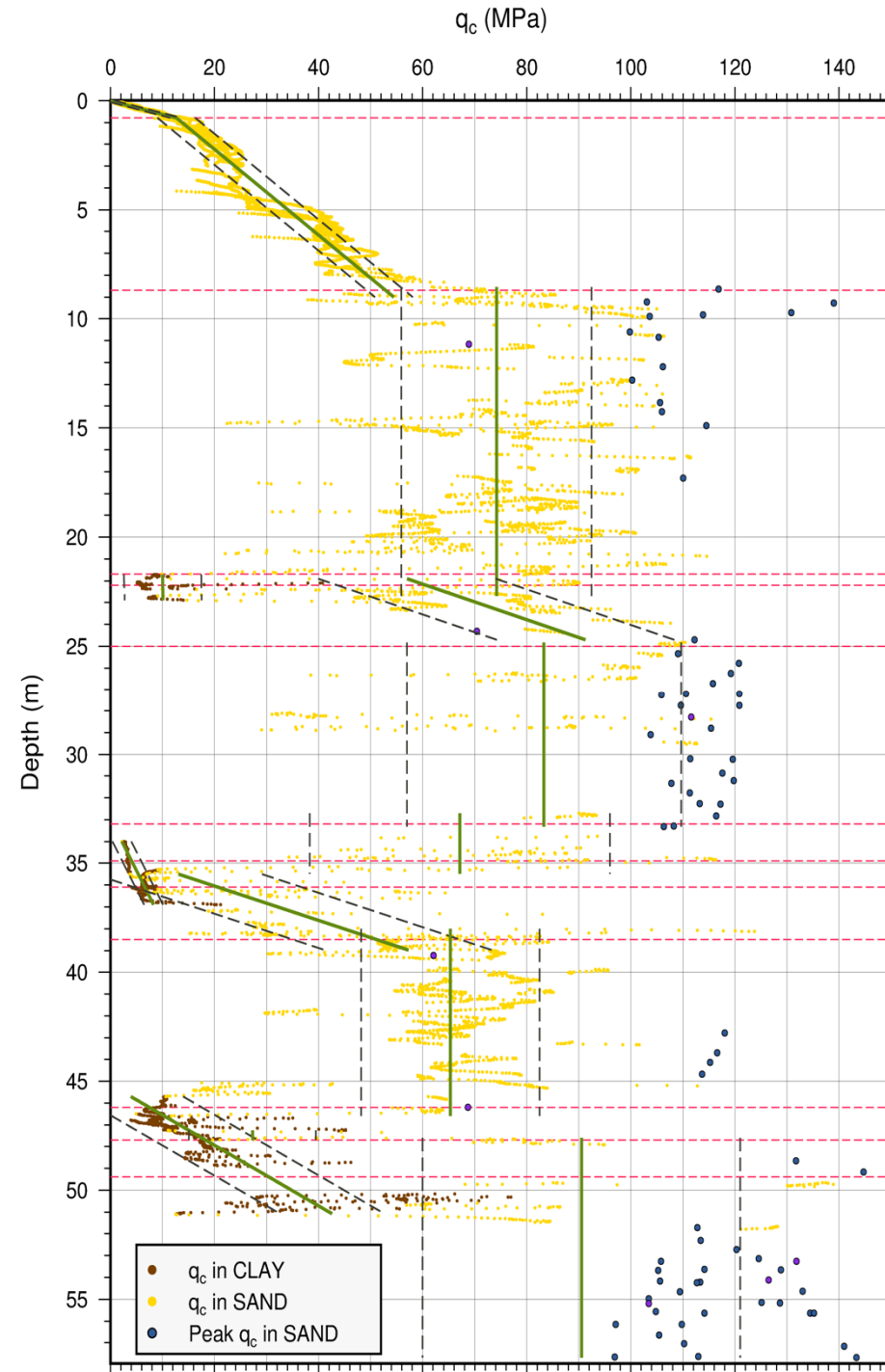
Résistance CPT, q_c



Couches argile

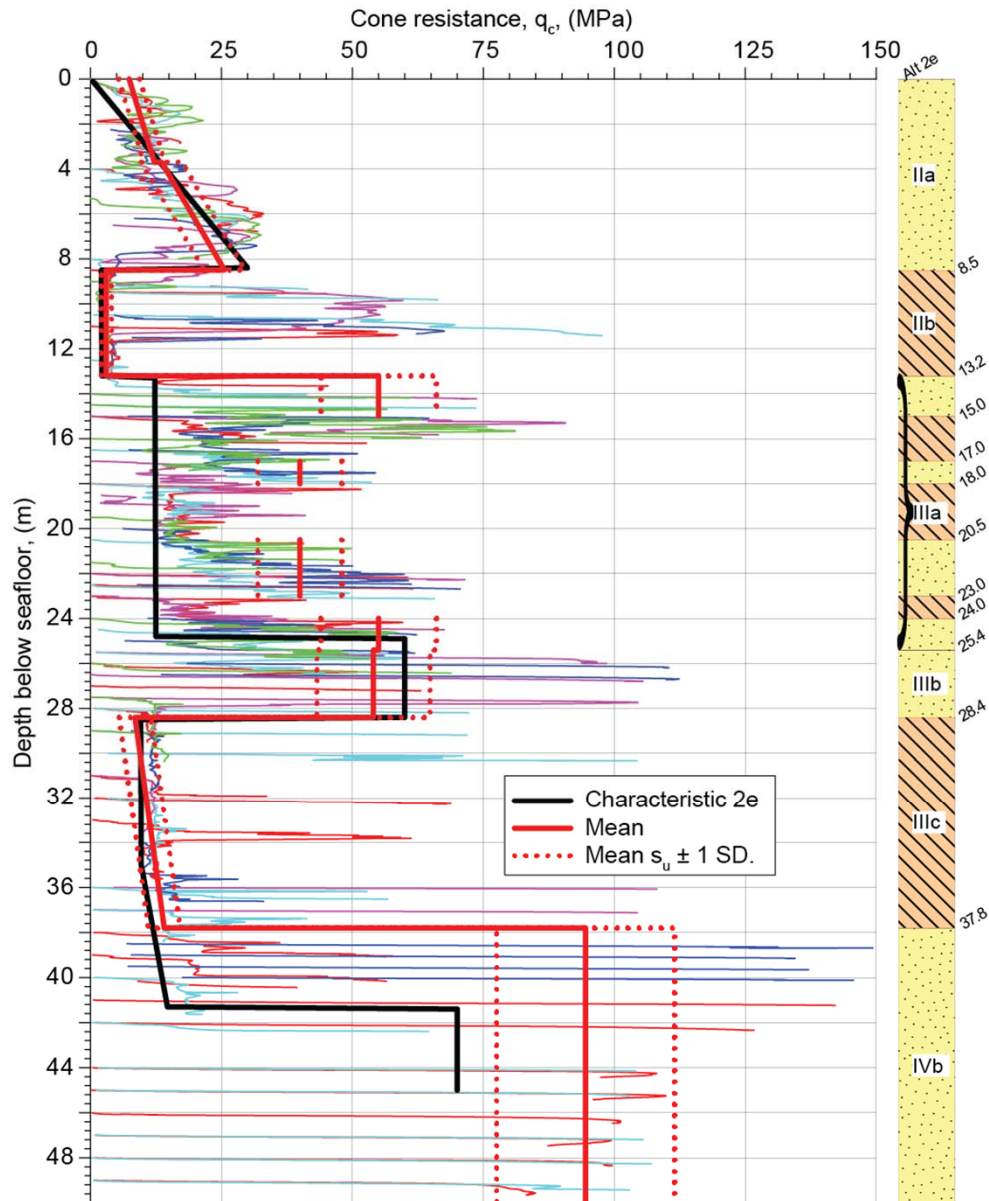


Analyse statistique des résultats CPT/CPTU

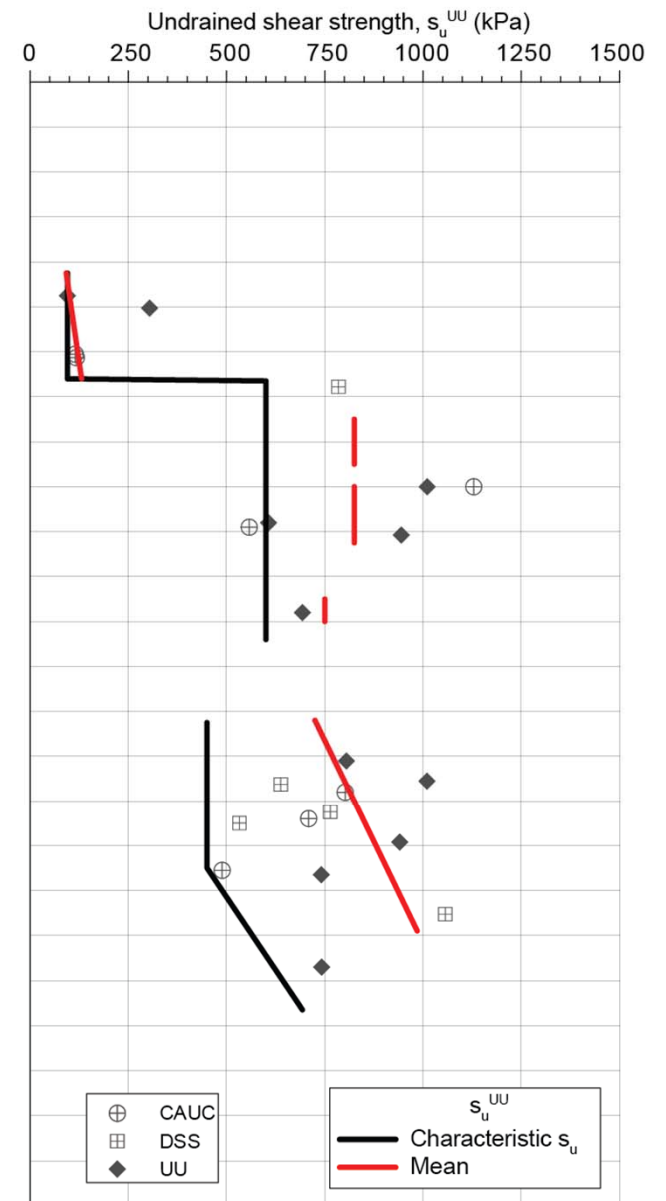


Site sable et argile

Résistance CPT, q_c



Couches argile

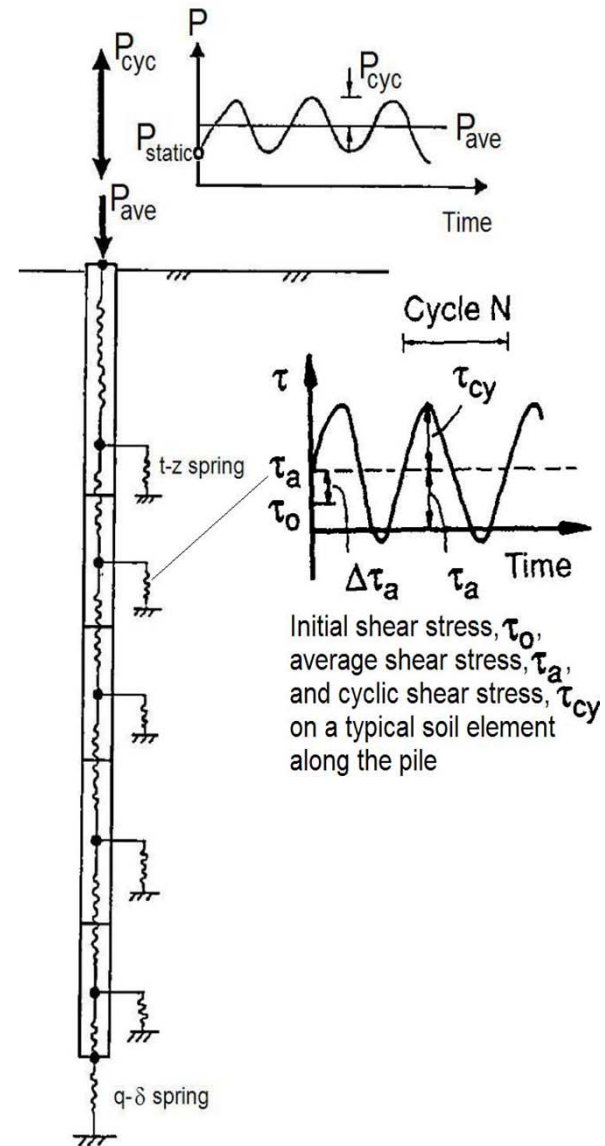
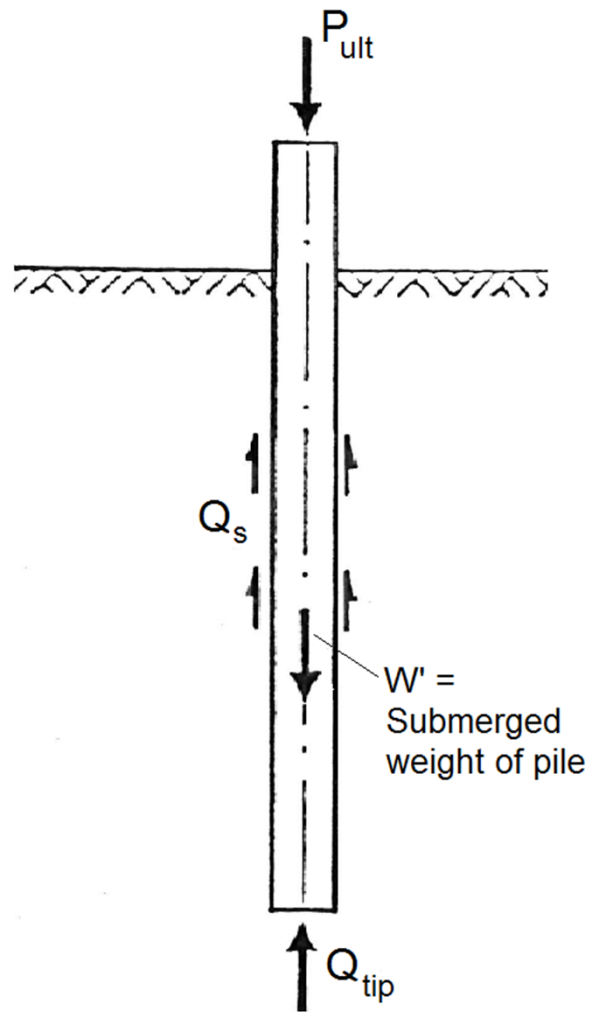


Calibrage des facteurs de sécurité partiels

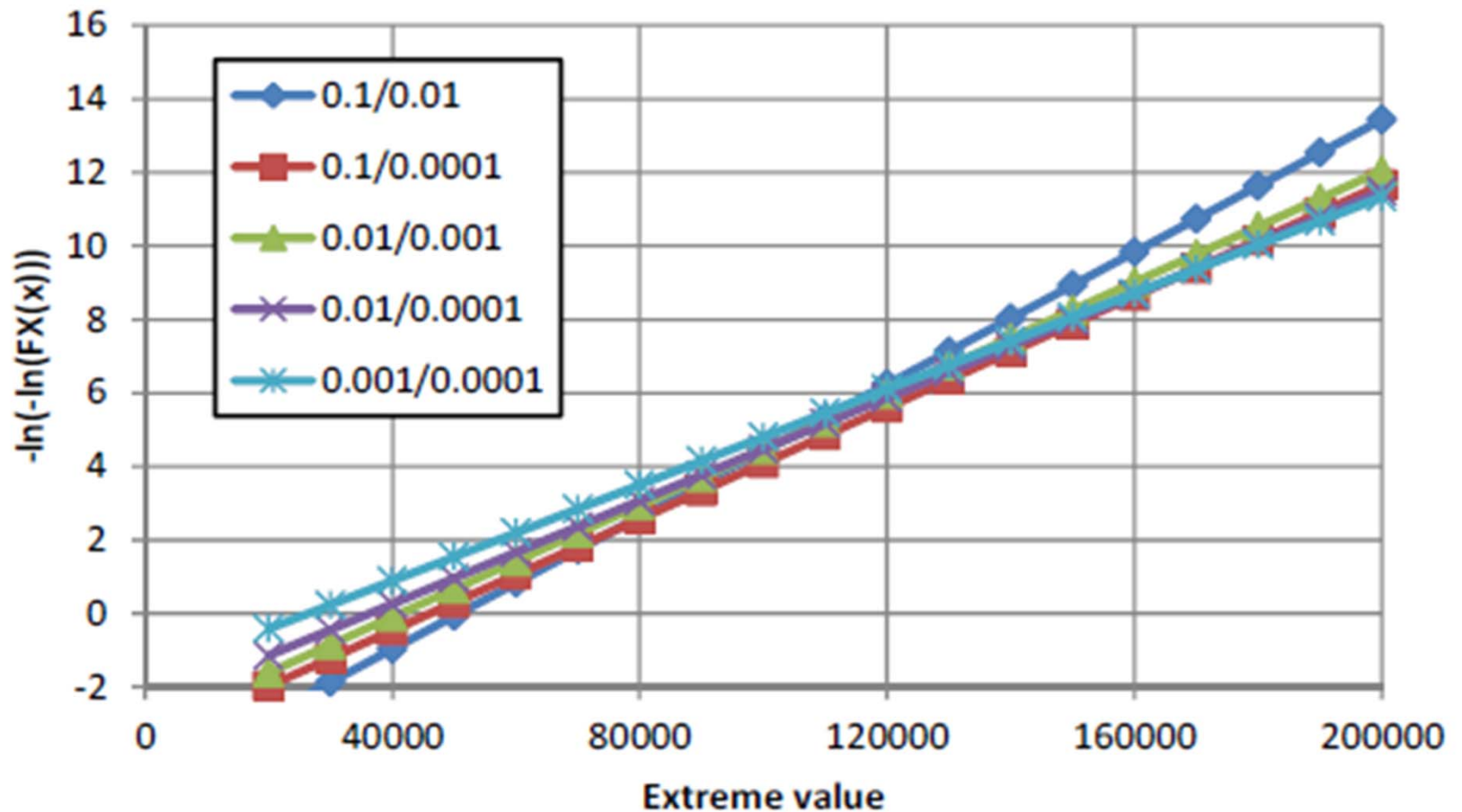
Plan de la présentation

- Motivation pour ce travail
- Méthodes de dimensionnement; 3 jackets
- Approche adoptée
- Paramètres: sols, chargement, incertitude des modèles
- "Calibrage", facteurs de résistance et de chargement
- Simulation analytique
- Conséquences pour la pénétration des pieux
- Recommandations

Chargement typique sur un pieu offshore



Incertitudes dans les charges cycliques

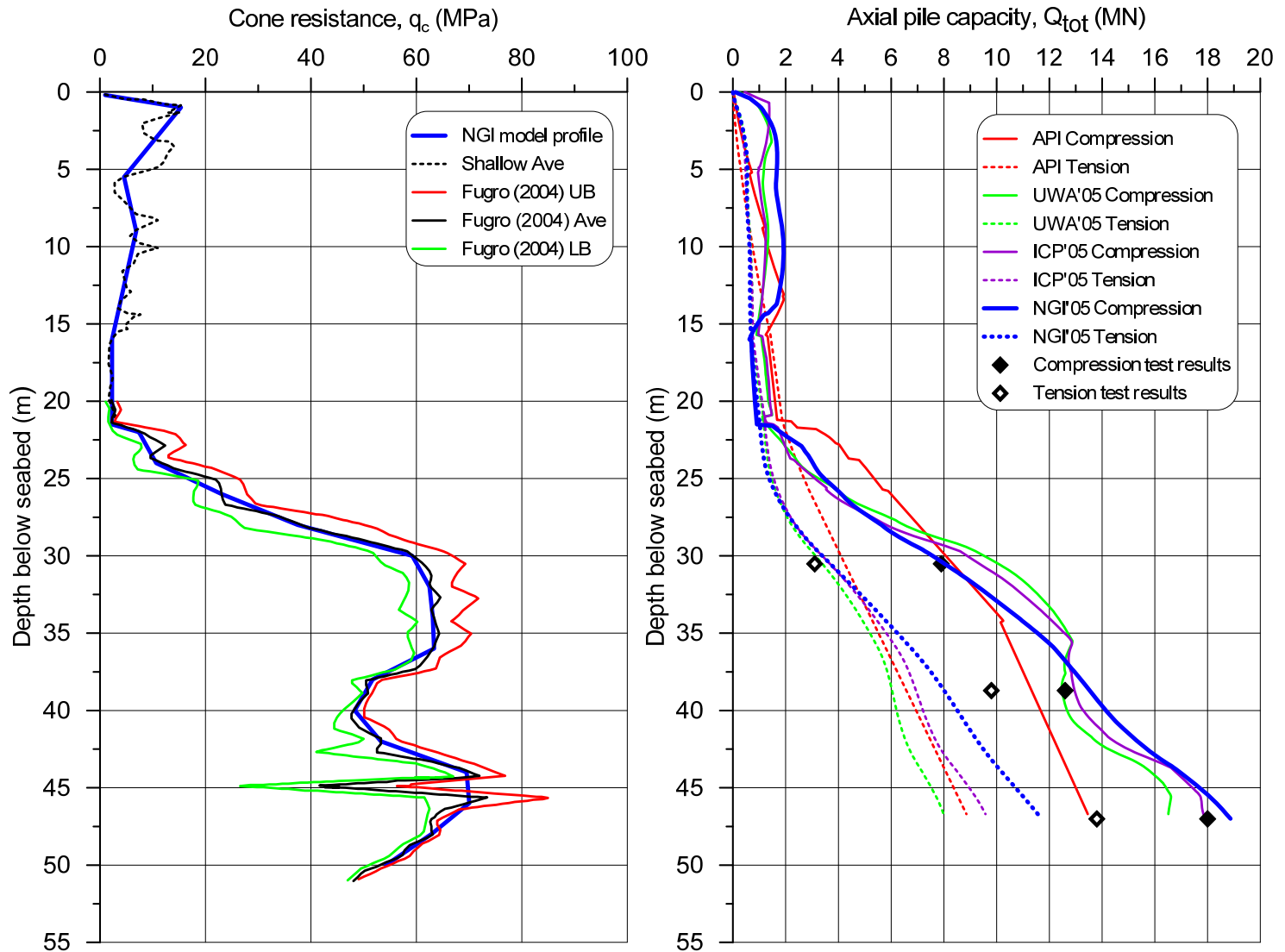


**Distribution de Gumbel charges environnementales
(CoV = 10-15%)**

Incertitudes de modèles

Capacités calculées et mesurées

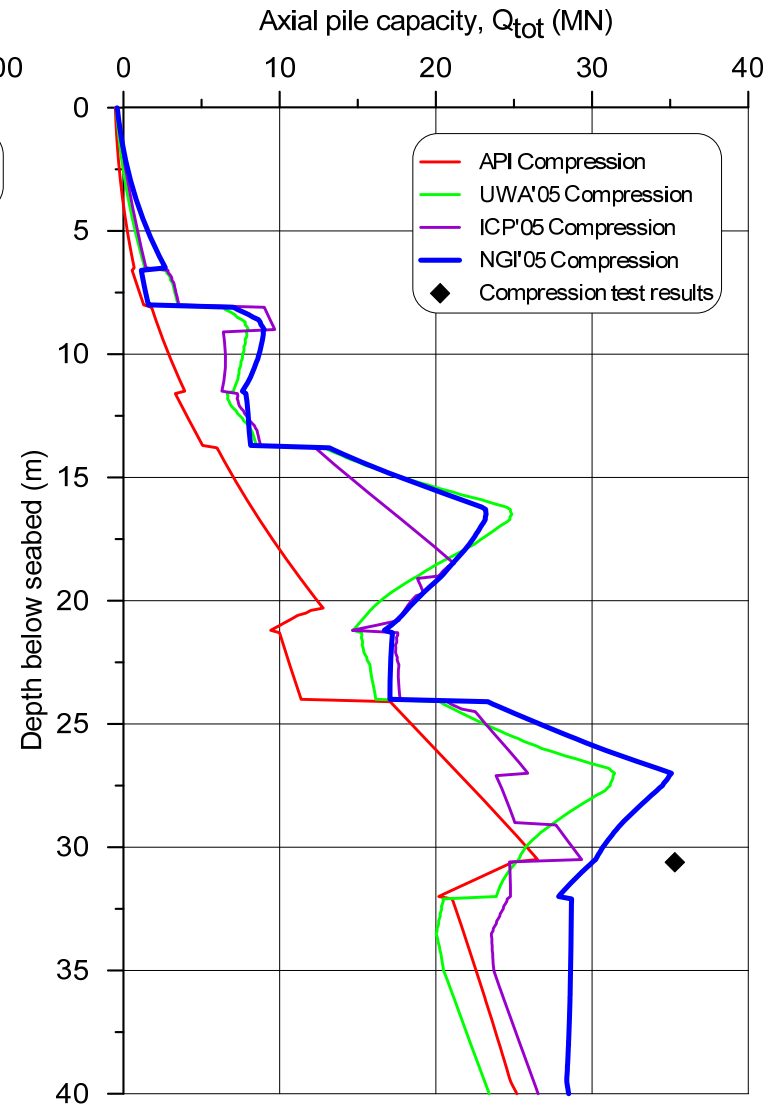
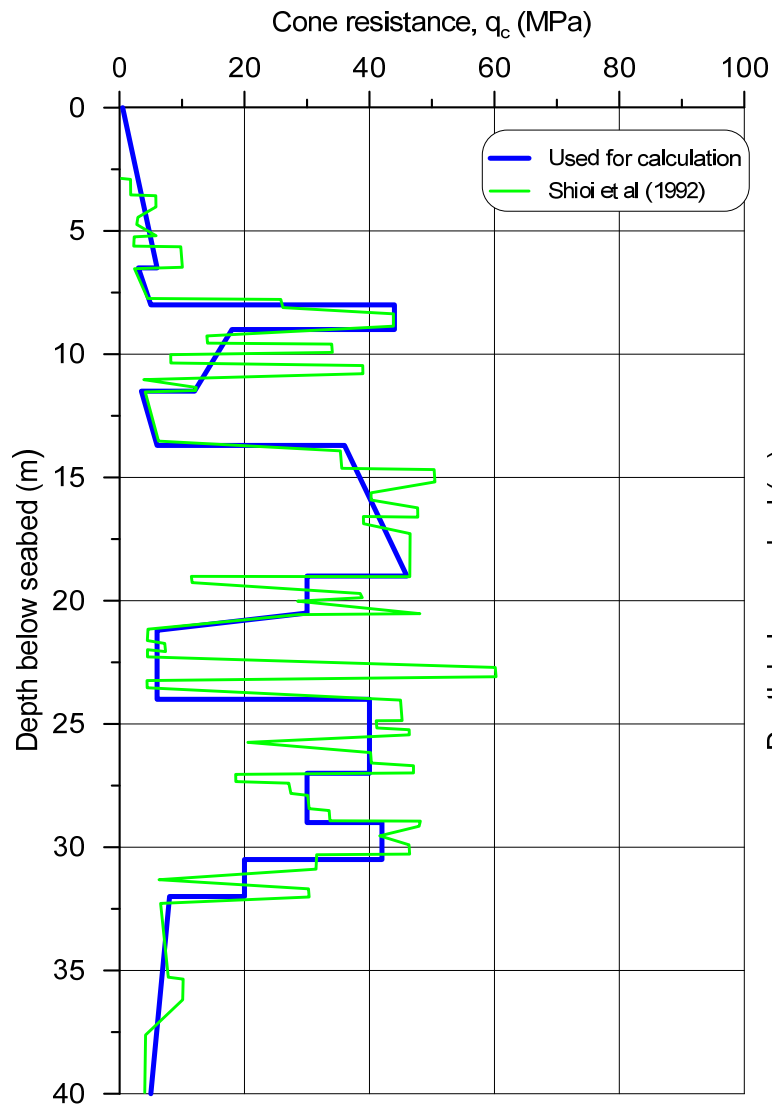
Euripides (dia= 0.76 m)



Incertitudes de modèles

Capacités calculées et mesurées

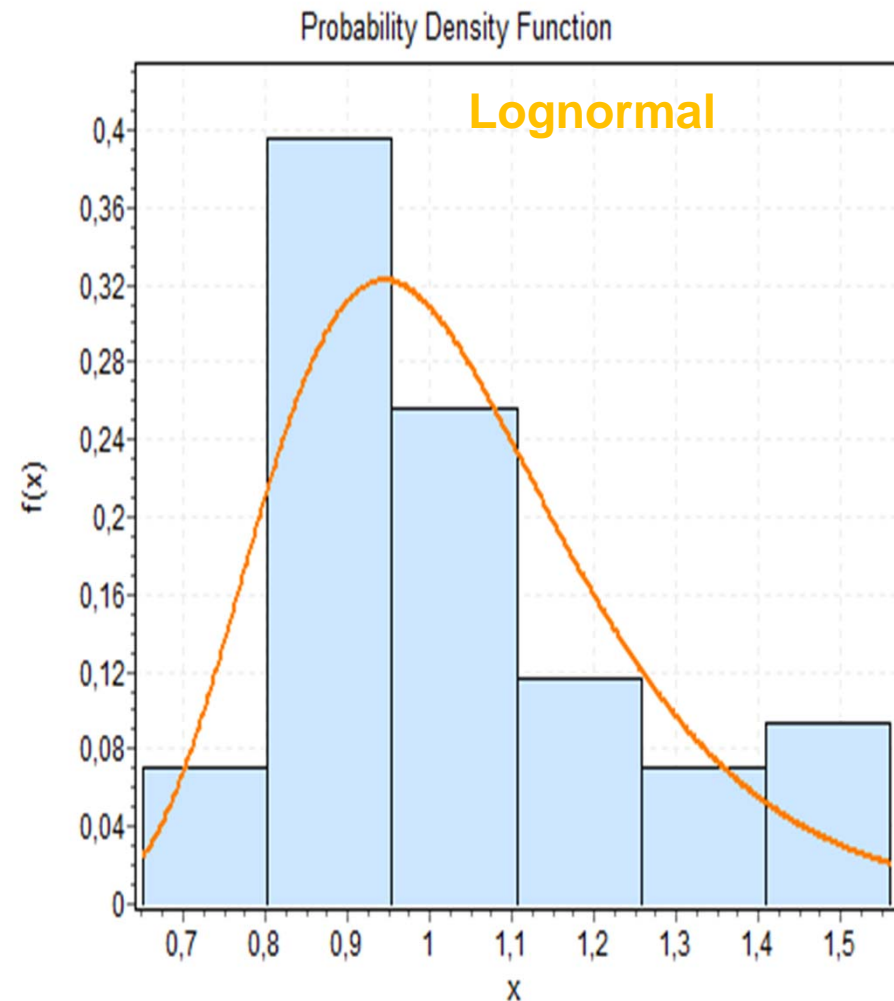
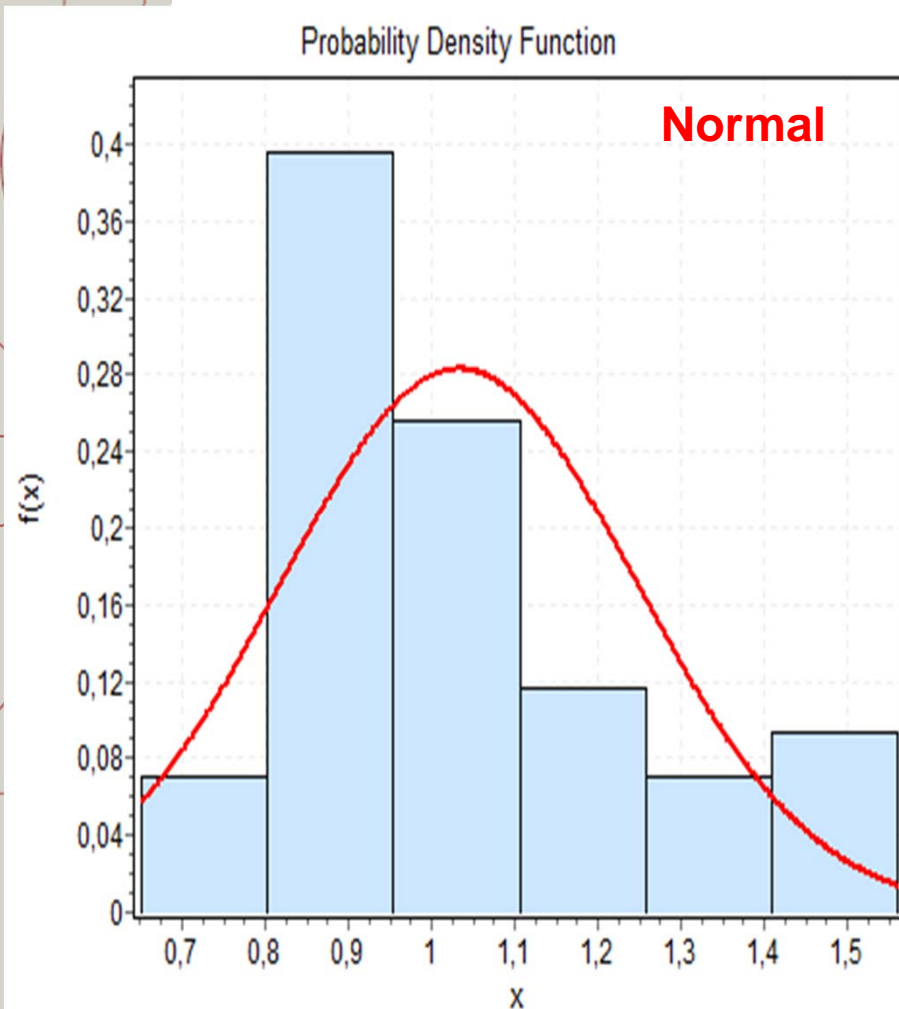
Tokyo Bay (dia= 2 m)



Incertitude de modèle, frottement latéral

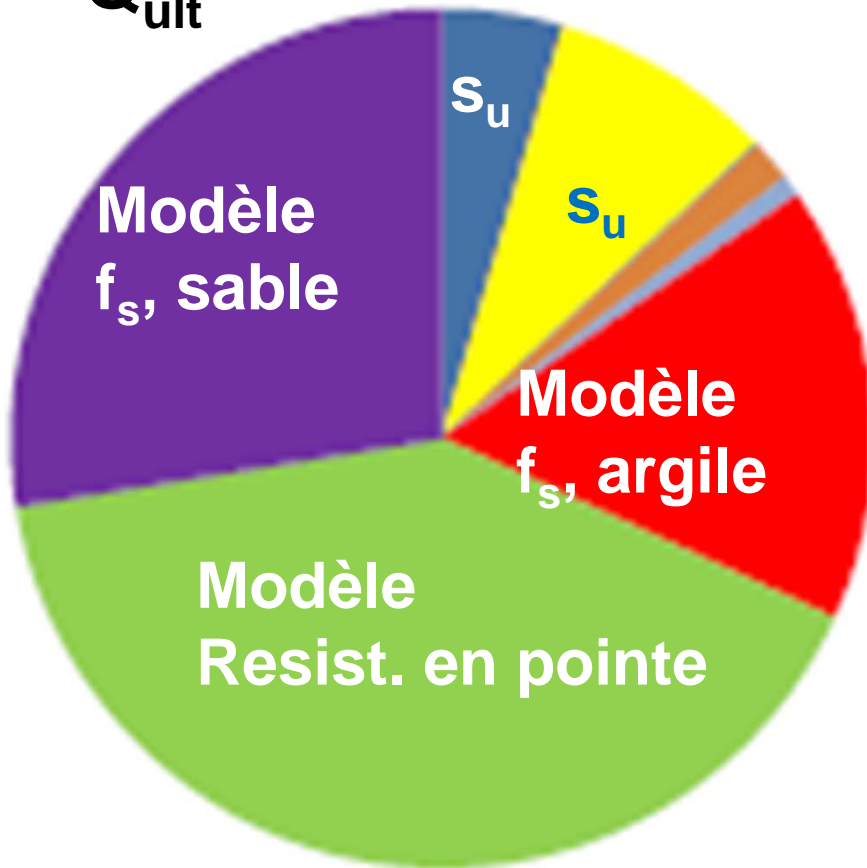
Sable Q_m/Q_c [$\mu=1.05$, $SD=0.20$ ($CoV=19\%$)]

(Méthode CPT NGI-05)



Importance de l'incertitude des modèles (Site: sable et argile)

Q_{ult}



P_f



Calibrage des facteurs de sécurité partiels

Plan de la présentation

- Motivation pour ce travail
- Méthodes de dimensionnement; 3 jackets
- Approche adoptée
- Paramètres: sols, chargement, incertitude des modèles
- "Calibrage", facteurs de résistance et de chargement
- Simulation analytique
- Conséquences pour la pénétration des pieux
- Recommandations

Q_{ult} et P_f annuel

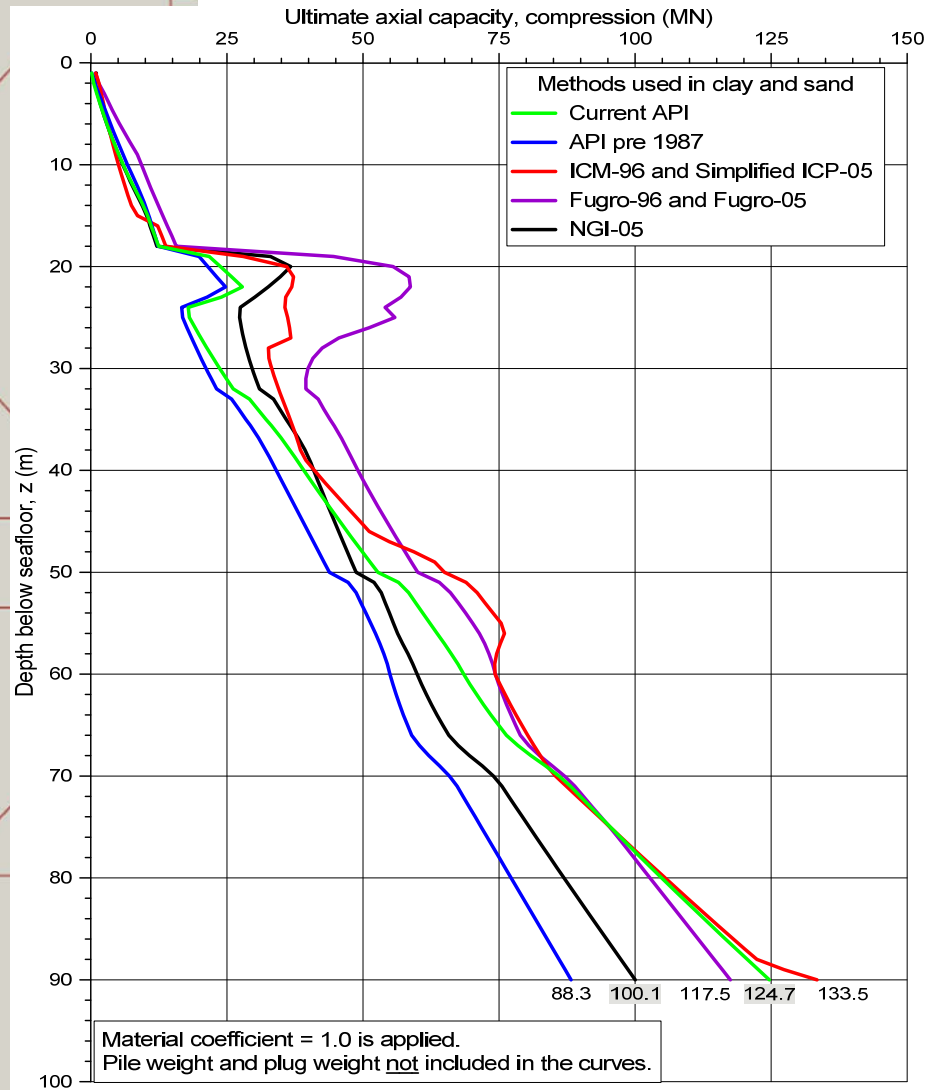
	Pieu	Q _{ult} car (MN)	Q _{ult} moyenne (MN)	P _f annuel FORM, Q _{LN}
Site argile (NGI-05)	75 m	78	976	2.1·10 ⁻⁵
	80 m	84	104	2.3·10 ⁻⁵
	90 m	97	119	1.2·10 ⁻⁶
Site sable				

Méthode	Q _{ult} (MN) Moy /CoV	Q _{ult} (car) (MN)	P _f annuel	Contribution relative à P _f	
				P _{env}	Résistance (Modèle)
API (51-m)	107 ± 35%	83	1.3·10 ⁻²	--	---
NGI-05 (26-m)	84 ± 14%	81	5.8·10 ⁻⁶	45 %	55% (45%)
ICP-05 (26-m)	162 ± 18%	148	2.7·10 ⁻¹¹	28 %	72% (58%)
Fugro 96/05 (26-m)	161 ± 21%	155	5.6·10 ⁻⁹	15 %	85% (70%)

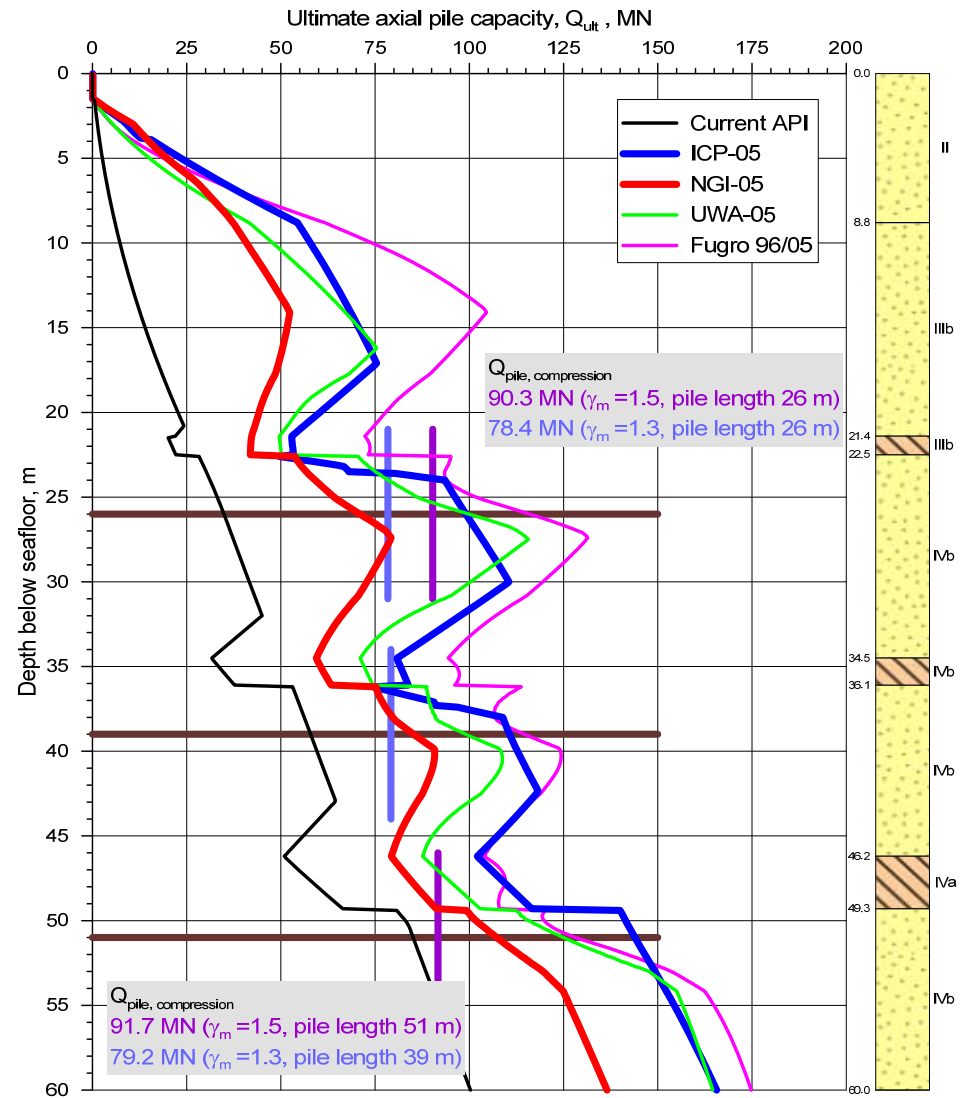


Q_{ult} déterministe (valeurs caractéristiques)

Site argileux

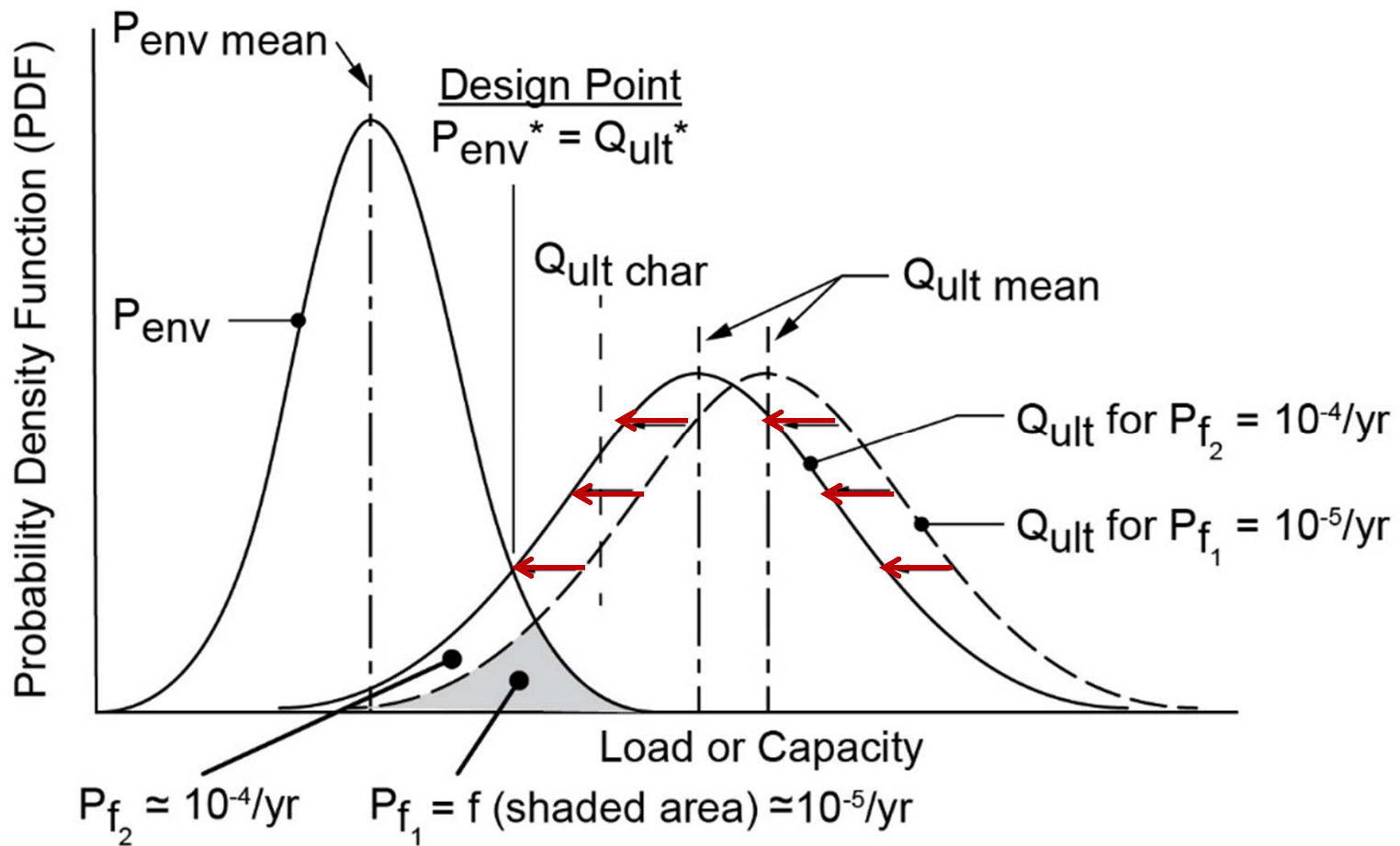


Site sableux



Calibrage des facteurs partiels de sécurité

$$[\gamma_{I\ stat} \cdot P_{stat} + \gamma_{I\ env} \cdot P_{env}^{100\text{-yr}}] = Q_{ult} / \gamma_m$$



Facteur sur la résistance, γ_m
relatif à $Q_{ult\ car}$
requis pour $P_f < 10^{-4}/an$ ($\gamma_{I\ env}=1.3$)

Méthode de dimensionnement	Facteur de résistance, γ_m		
	Site A (argile)	Site B (sable)	Site C (sable et argile)
NGI-05	1.23	1.35	1.20
ICP-05	1.52	1.45	1.32
Fugro-05	1.31	1.72	1.55
UWA-05	---	1.55	1.50
API	1.35	2.36	1.93

Simulation analytique

Facteurs de sécurité obtenus avec un modèle analytique, cible $P_f = 10^{-4}/\text{an}$ ($\gamma_{l\text{ env}}=1.3$)

$P_{d-10.000\text{yr}}/P_{d-100\text{yr}}$	P_s/P_{max}	CoV (Q_{ult})	Calculé		Calibrage γ_m $P_f=10^{-4}/\text{yr}$	
			P_f	β	Generic model	Jackets Mer du Nord
1.64	0.53	0.17	7.42E-04	3.18	1.53	1.50
1.64	0.69	0.14	4.58E-04	3.32	1.48	1.43
1.52	0.65	0.14	4.10E-04	3.35	1.51	1.60

Simulation analytique

Facteurs requis par 3 codes récents

Standard	Charges γ_{Stat}	Charges γ_{env}	Resistance γ_m	Cas
API, LRFD (2003)	1.1	1.35	1.25	Extrême
	1.3	1.5	1.5	Opération
ISO 19902 (2007)	1.1	1.35	1.25	Extrême
	1.3	1.25	1.5	Opération
NORSOK (2004)	1.0	1.3	1.3	ULS
	1.3	0.7	1.3	ULS

Conclusion: les fondations offshore ont en réalité un niveau de sécurité variant d'un cas à l'autre. Une approche probabiliste fait en sorte que le niveau de sécurité devienne uniforme.

Calibrage des facteurs de sécurité partiels

Plan de la présentation

- Motivation pour ce travail
- Méthodes de dimensionnement; 3 jackets
- Approche adoptée
- Paramètres: sols, chargement, incertitude des modèles
- "Calibrage", facteurs de résistance et de chargement
- Simulation analytique
- Conséquences pour la pénétration des pieux
- Recommandations

Conséquence quant à la pénétration ds pieux requise

3 jackets actuels, ~100m H₂O (UK et Norvège)

<u>Méthode</u>	Pénétration des pieux		
	<u>Site A</u> (argile)	<u>Site B</u> (sable)	<u>Site C</u> (sable et argile)
NGI-05	90m à 75m*	51m à 27m*	45m à 35m*

* Réduction, cible $P_f \leq 10^{-4}/\text{an}$ (méthode NGI-05 CPT)

Economies considérables, millions USD\$

Parce qu'il a été possible de documenter $P_f < 10^{-4}/\text{an}$

Recommandations pratiques (1/2)

- Les résultats dépendent fortement des incertitudes de modèle, particulièrement pour les sables.
- Les facteurs de sécurité obtenus ne s'appliquent qu'aux sites étudiés. Une généralisation demande une étude sur nombre de cas (15-20 sites, en cours).
- Un dimensionnement probabiliste, en complément avec le dimensionnement déterministe, permet de faire de très grandes économies.
- Les codes de dimensionnement devraient dans le futur avoir un objectif de niveau de sécurité uniforme (une P_f cible, par exemple).

Recommandations pratiques (2/2)

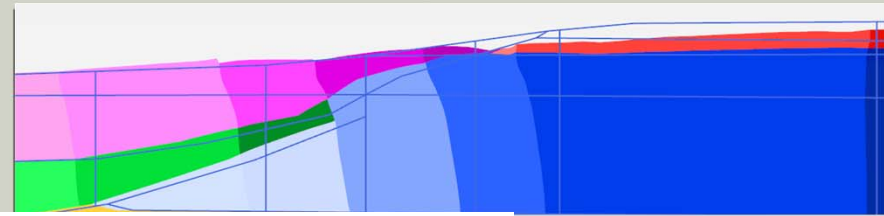
Observations des analyses:

- La sélection des valeurs caractéristiques varie grandement d'un ingénieur à l'autre. Il est urgent de définir/sélectionner les valeurs «caractéristiques» à utiliser en dimensionnement de manière «unique».
- On doit prendre en compte les effets du chargement cyclique sur la résistance des sols, à la fois pour les pieux en compression et les pieux en tension.
- On peut tirer avantage de l'effet du temps sur la résistance des pieux, pour sables et argiles.

Dans la pratique offshore et à terre, on voit une grande augmentation dans la demande pour des analyses de fiabilité et quantification de la probabilité de rupture, durant le dimensionnement (ou par après).



NGI



Merci pour votre attention



Laboratoire NGI

