

L'essai de pénétration au cône - CPT - et ses différentes applications

Alain PUECH
Fugro France

*Journée Louis Parez
CFMS, 14 Juin 2005, Paris*



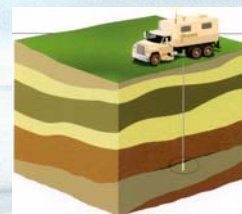
La technique CPT

Faire pénétrer des sondes de mesure dans le sol par poussée continue sur des tiges à la vitesse constante de 2cm/s

LES CÔNES FUGRO:

- Les cônes électriques "classiques": qc,fs,u
- Le cône sismique
- Le pressiocône
- Les cônes de logging
- Le cône magnétique
- Le cône video
- Les envirocônes:

- MIP (Membrane Interface Probe)
- ROST (Rapid Optical Screening Tool)
- Conductivité électrique
- Température
- BAT: Echantillonnage in-situ des eaux
- MOSTAB: Echantillonnage in-situ des sols



Sommaire



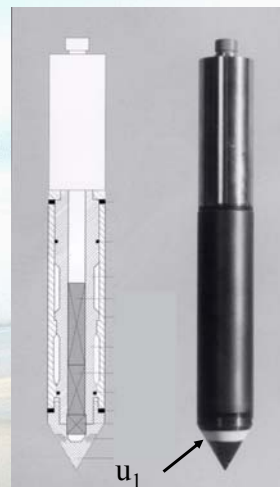
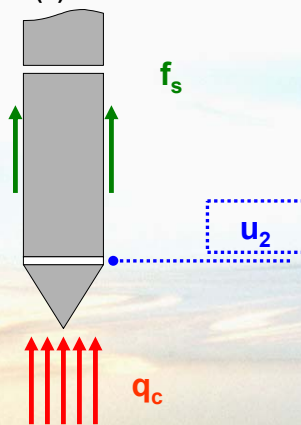
- Le cône électrique CPT / CPTU
 - principe
 - mise en œuvre (à terre, en mer)
- Quelques applications géotechniques particulières
 - identification des sols
 - liquéfaction des sols
 - capacité des pieux battus dans le sable
- Quelques cônes spécifiques
(cône sismique, pressiocône, cône gamma-ray
cône magnétique, vidéocône)
- Les cônes environnementaux

Le cône électrique



Mesure en continu:

- la résistance sur la pointe (q_c)
- le frottement local (f_s) sur manchon
- la pression interstitielle (u)
- l'inclinaison



Le cône électrique



Standardisé:
pointe de 10cm²

mais existe aussi en sections
de 1 à 33 cm² pour
applications particulières:

< 10 cm²: faibles réactions
disponibles, profilage
qualitatif (lithographie)

> 10 cm²: plus grande
précision dans sols très
mous

Mise en œuvre (à terre)

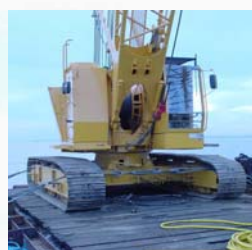


Mise en œuvre (à terre)



Camion CPT
(10 - 20T)

Mise en œuvre (en faibles profondeurs d'eau)



Système modulaire
ROSON



- jusqu'à 100m+ d'eau



- depuis plate-forme auto-élevatrice (< 30m d'eau)



Mise en œuvre (offshore, 1500m+)



Systèmes modulaires (mise en œuvre pendulaire)



Searobin
3m, 1.5T



Seasprite 5m, 5-10T

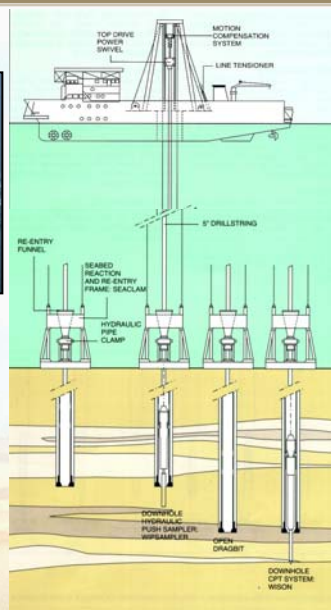


Penfeld (Ifremer), 30m

Mise en œuvre (offshore, 1500m)



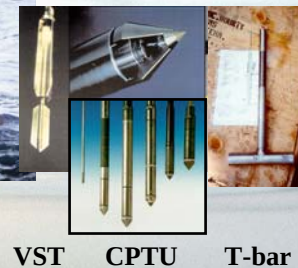
Mise en œuvre
au câble
à travers trou central
et bâti de fond
(150m+ par passes de
3m)



Mise en œuvre (offshore, 2000m)



Système modulaire
Seacalf descendu
par trou central
(40m, 10 - 20T)



VST CPTU T-bar

Identification des sols



Normalisation des données CPT

- Données brutes: résistance de pointe: q_c (MPa)
(mesurées) frottement sur manchon: f_s (kPa)
pression interstitielle: u_2 (MPa)
- Données corrigées: résistance de pointe: $q_t = q_c + (1-a) \cdot U_2$
- Résistance nette: $q_{net} = q_t - \sigma_{vo}$

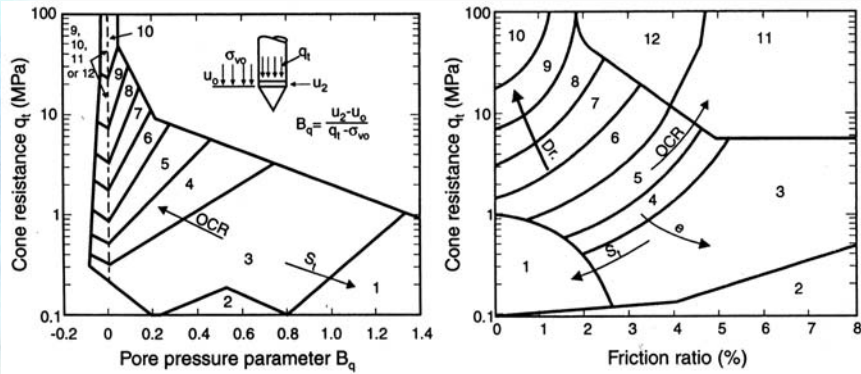
Rapport de frottement: $R_f = f_s / q_t$ (%)

Rapport de pression interstitielle: $B_q = (u_2 - u_0) / q_{net} = \Delta u / q_{net}$

Résistance de pointe normalisée: $Q = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$

Rapport de frottement normalisé: $Fr = f_s / (q_t - \sigma_{vo})$

Identification des sols

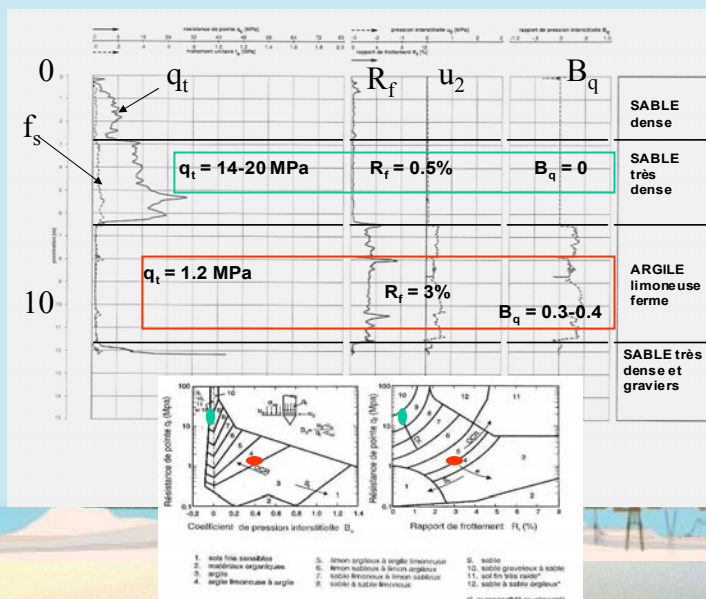


Zone: Soil Behaviour Type:

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 5. Clayey silt to silty clay | 9. Sand |
| 2. Organic material | 6. Sandy silt to clayey silt | 10. Gravelly sand to sand |
| 3. Clay | 7. Silty sand to sandy silt | 11. Very stiff fine grained* |
| 4. Silty clay to clay | 8. Sand to silty sand | 12. Sand to clayey sand* |
- * Overconsolidated or cemented.

Classification (Robertson, 1986)

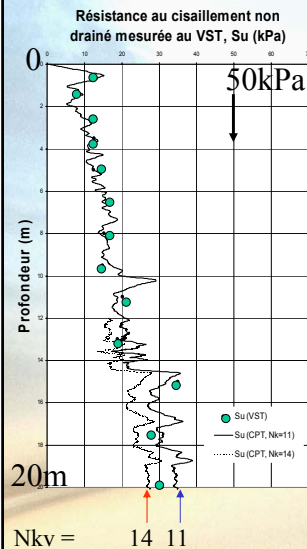
Identification des sols



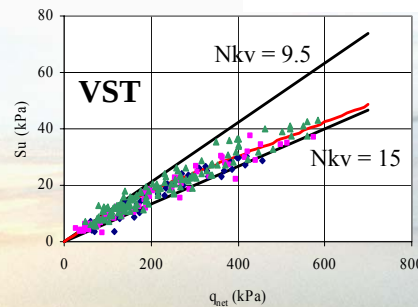
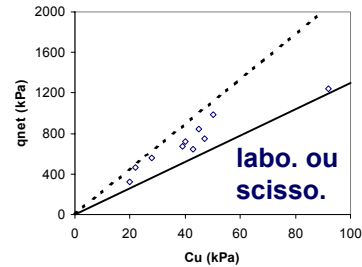
Résistance au cisaillement des argiles



Cohésion non drainée: $S_u = q_{net} / N_k$



corrélation usuelle
(essais de compression
triaxiale)
 $N_k = 15 \text{ à } 20$



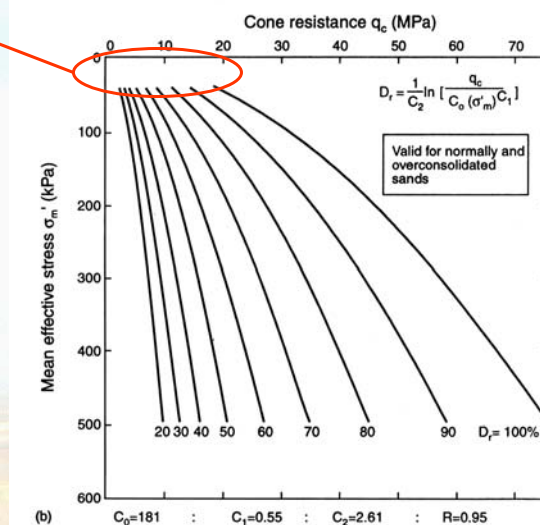
Densité relative des sables

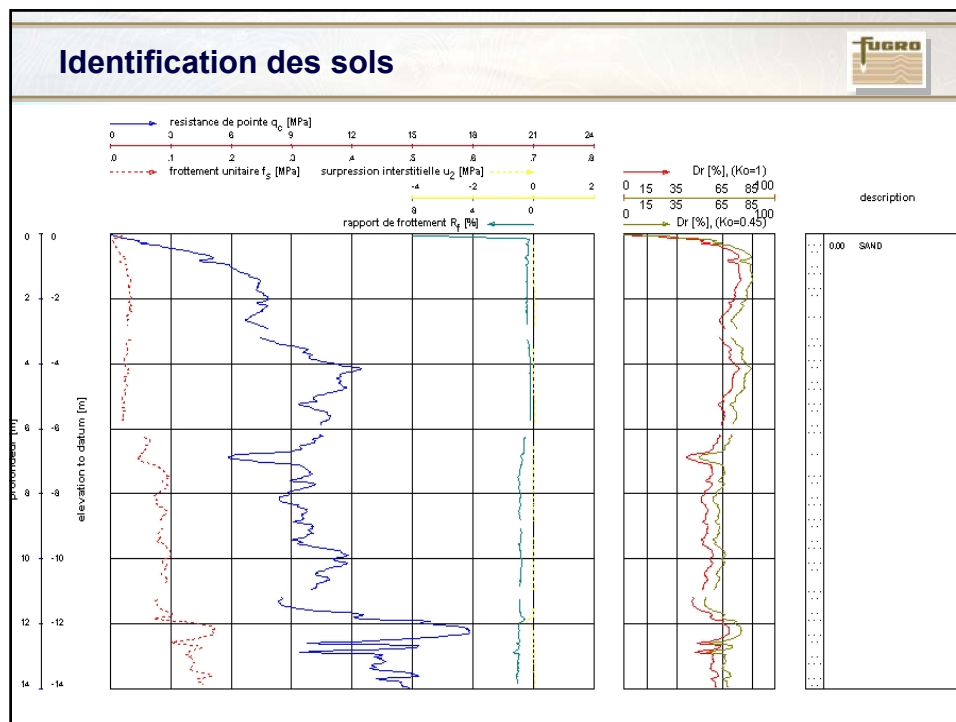


Attention: relation de Baldi
non valable à faible pénétration
($< 2-3m$);
Puech & Foray, OTC 14 275

Relations (D_r , q_c , σ'_v ou σ'_m)
calibrées par des essais
en centrifugeuses ou en
chambres de calibration

exemple (Baldi et al., 1986)





Liquéfaction des sols - Rappel



CFMS
Journée thématique du 5 Mai 2004

**Evaluation de la résistance à la
liquéfaction des sols
à partir du CPT**

Alain Puech
Denys Borel

Sur site CFMSF



Liquéfaction des sols - Rappel

Introduction

- Travaux sur la liquéfaction des sols sous séismes: années 70 (H.B. Seed et I. M. Idriss)
- Sols potentiellement "liquéfiabiles": fuseau granulométrique.
- Procédure simplifiée d'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols:
Principe: 1- estimation des contraintes induites par le séisme: CSR
2- estimation de la résistance à la liquéfaction: CRR
à partir du Standard Penetration Test (SPT)
3- $CSR < CRR$

Introduction

- NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research)
1996 - 1998: ateliers de 20 experts* pour faire le bilan de 30 années d'expérience et mettre à jour les procédures- Publication 2001
- Formalise: calcul du CRR à partir du SPT, du CPT, de V_s , (du BPT)
- Apporte précisions sur: CSR, facteur correctif de Magnitude (MSF), facteurs correctifs de profondeur (> 15-20m), de pendage, d'âge des sédiments.

Liquéfaction - Evaluation du CSR

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{vo}) = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) r_d$$

τ_{av} : contrainte moyenne de cisaillement horizontal
pendant le séisme

a_{max} : accélération horizontale de pic en surface

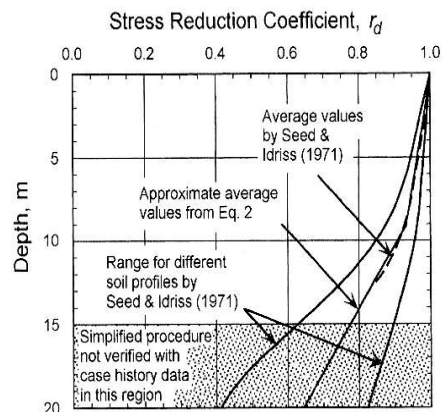
g : accélération de la gravité

σ_{vo} et σ'_{vo} : contraintes totales et effectives
dues au poids des terres

r_d : coefficient de réduction de contrainte
lié à la flexibilité de la colonne de sol

$$r_d = (1.000 - 0.4113 z^{0.5} + 0.04052 z + 0.001753 z^{1.5}) / (1.000 - 0.4177 z^{0.5} + 0.05729 z - 6.006205 z^{1.5} + 0.001210 z^2)$$

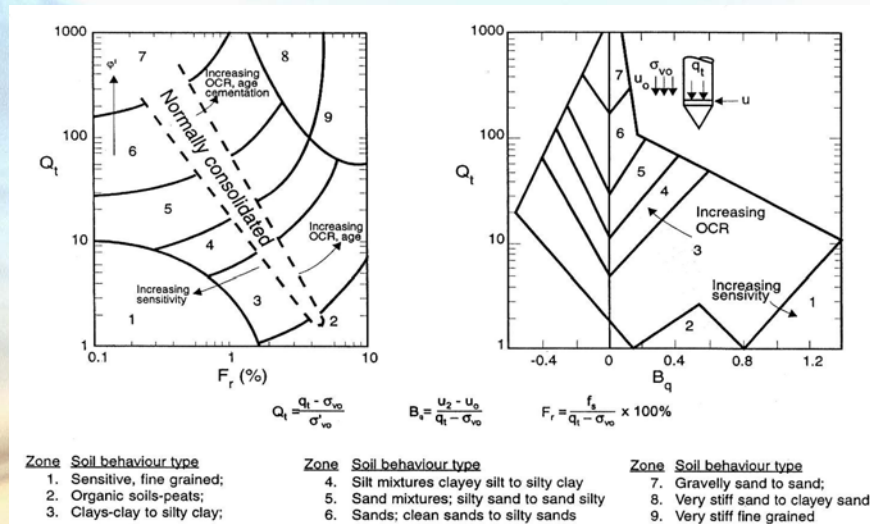
(Blake, 1996)



Liquéfaction - Evaluation du CRR à partir du CPT



Rappel sur la capacité du CPT / CPTU à identifier et classer les sols
(Robertson, 1990)



Liquéfaction - Evaluation du CRR à partir du CPT



CRR pour sables propres (FC<5%): études de cas; $M=7.5$

$(q_{c1N})_{cs}$ = résistance de pointe définissant la limite de liquéfaction en sable propre pour $(q_{c1N})_{cs} < 50$:

$$CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs} / 1.000] + 0.05$$

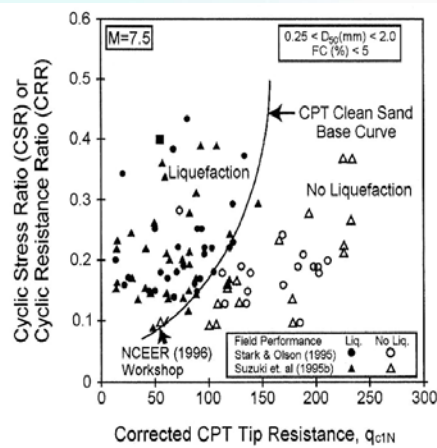
pour $50 < (q_{c1N})_{cs} < 160$:

$$CRR_{7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs} / 1.000]^3 + 0.08$$

q_{c1N} = résistance de pointe normalisée à 100kPa

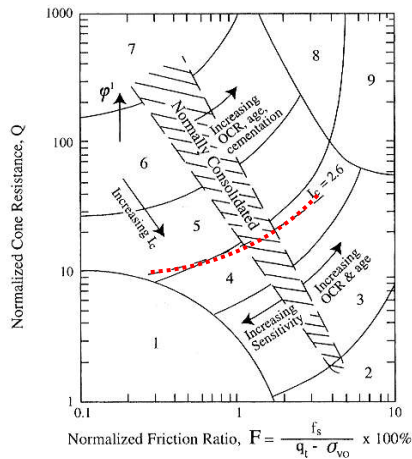
$$q_{c1N} = (q_c / Pa) \cdot C_q \text{ avec } C_q = (Pa / \sigma'_{vo})^n$$

$n=0.5$ (sable propre)



Robertson et Wride (1998)

Liquéfaction - Evaluation du CRR



- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Sensitive, fine grained | 6. Sands - clean sand to silty sand |
| 2. Organic soils - peats | 7. Gravely sand to dense sand |
| 3. Clays - silty clay to clay | 8. Very stiff sand to clayey sand* |
| 4. Silt mixtures - clayey silt to silty clay | 9. Very stiff, fine grained* |
| 5. Sand mixtures - silty sand to sandy silt | |
- *Heavily overconsolidated or cemented

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / Pa] [(Pa / \sigma'_{vo})^n]$$

n : varie avec type de sol

$n = 1$ pour sols argileux

$0.5 < n < 1$ pour silts et silts sableux

$n = 0.5$ pour sables propres

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] \times 100\%$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5}$$

pour $n = 1$: $Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}]$

(diagramme ci-contre)

$I_c (n=1) = 2.6$ séparation entre sols granulaires et sols cohésifs

Liquéfaction - Evaluation du CRR



Correction pour teneur en fines = correction de la résistance au cone normalisée q_{c1N} pour obtenir une "résistance équivalente sable propre" $(q_{c1N})_{cs}$

telle que:

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot q_{c1N}$$

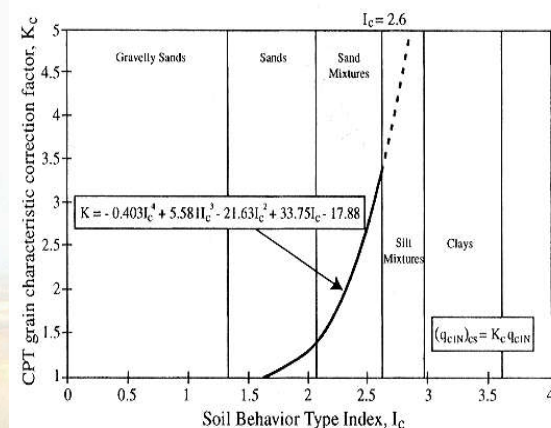
avec K_c :

facteur de correction

Si $I_c \leq 1.64$ $K_c = 1.0$

Si $I_c > 1.64$ $K_c = f(I_c)$

(voir graphe)



Liquéfaction - Simplicité d'application de la méthode CPT

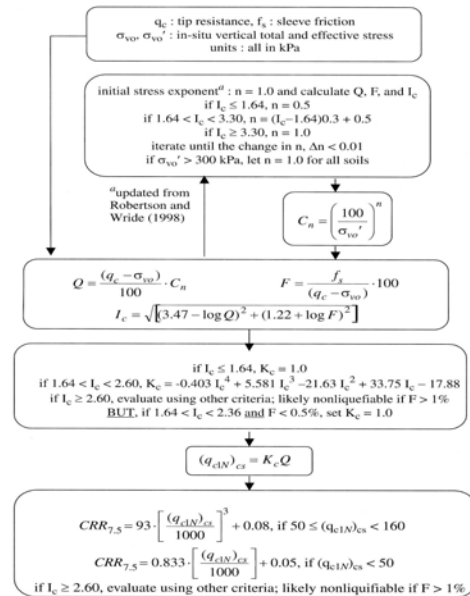


Méthode programmable

(avec variation continue

de l'exposant n)

Zhang, Robertson et Brachman, 2002



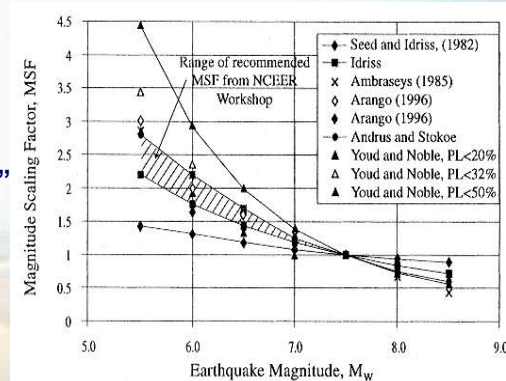
Liquéfaction - Evaluation de la sécurité

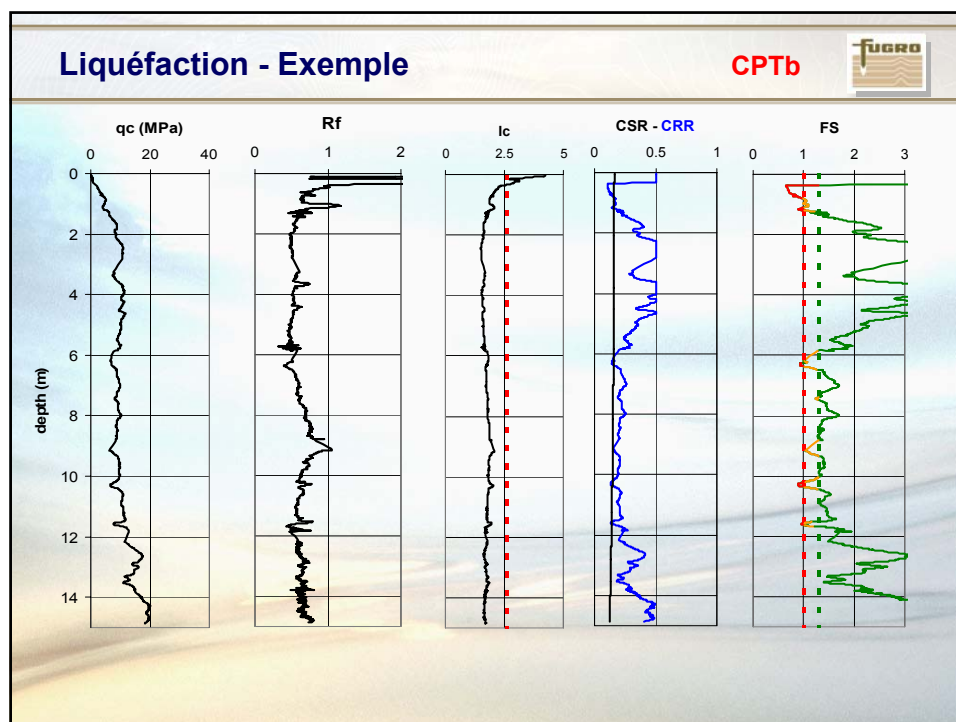
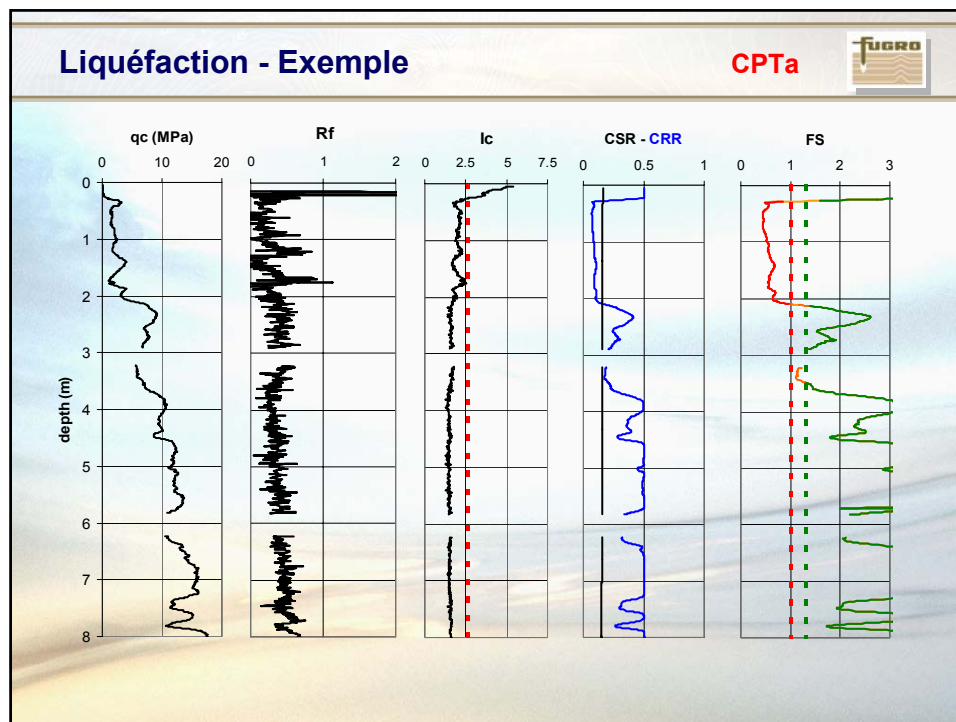


- $(q_{c1N})_{cs}$ permet d'obtenir $CRR_{7.5}$ (banque de données)
- pour un séisme de magnitude 7.5 : $FS = CRR_{7.5} / CSR$
- pour un séisme de magnitude # 7.5:

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) \times MSF$$

MSF: "magnitude scaling factor"

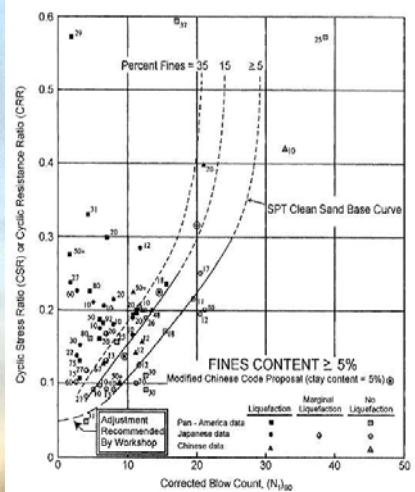




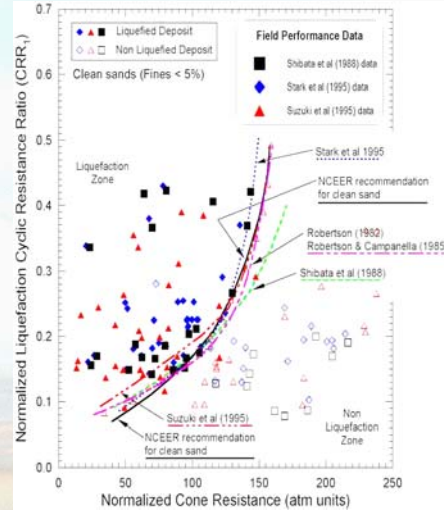
Liquéfaction - Robustesse de la méthode CPT



Banque de données SPT



Banque de données CPT



Liquéfaction - Robustesse de la méthode CPT



Pas de corrections en cascade comme dans la méthode SPT

SPT

CPT

Valeur mesurée

N

q_c

Normalisation / σ'_{vo}

N_1

q_{c1N}

Corrections propres au SPT

$(N_1)_{60} = N_1 \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S$

C_E : correction d'énergie

C_B : correction de diamètre de trou

C_R : correction de longueur de tiges

C_S : correction de type de carottier

Correction de fines

$(N_1)_{60cs}$

$(q_{c1N})_{cs}$

Liquéfaction - Comparaison des méthodes SPT / CPT



Critère	SPT	CPT
Banque de données (sites avec liquéfaction)	abondante	abondante
QC et répétabilité	faible à bon	très bon
Détection de la variabilité moyenne des sédiments	bonne si essais serrés	très bonne
Type de sol adapté	non graveleux	non graveleux
Recupération d'échantillon	oui	non
Type de mesure	index	index

Capacité des pieux battus dans les sables



- Méthodes semi-empiriques à partir d'essais in -situ (PMT, CPT) satisfaisantes pour pieux battus "courts" et de "faible" diamètre ex. Fascicule 62

- Pieux offshore calculés selon méthode API RP2A mais récents essais de pieux (ex: Euripides, Ras Tanajib, Jamuna,...) ont démontré:

- méthode non conservative en milieu lâche,
- méthode trop conservative en milieu très dense,
- phénomènes essentiels non pris en compte dans méthodes traditionnelles.

- Nécessité de développer une méthode plus fiable basée sur le CPT pour introduction dans les codes (API, ISO). Valable également pour pieux terrestres.



EURIPIDES

Capacité des pieux battus dans les sables



Décroissance du frottement en cours de battage ("friction fatigue")

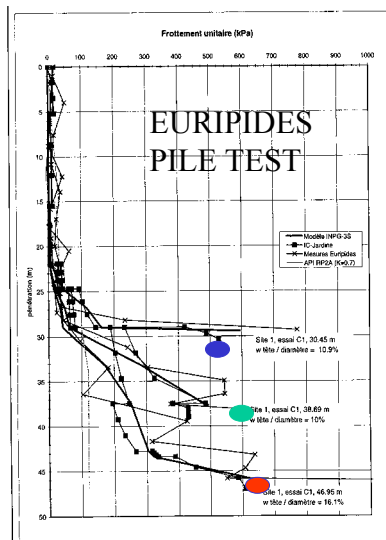
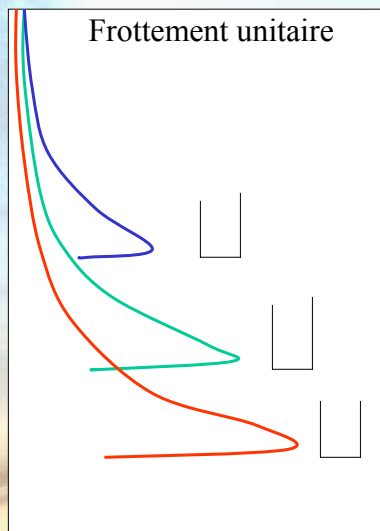
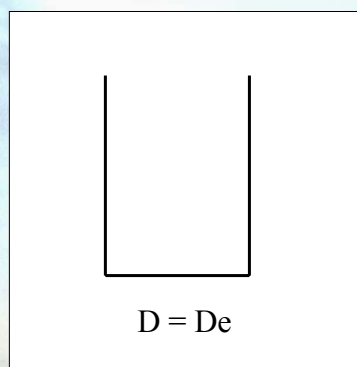


Figure 7
Frottement latéral unitaire - Pieu sollicité en compression
Euripides site 1

Capacité des pieux battus dans les sables

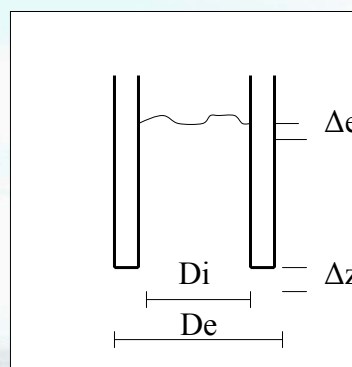


Bouché ou non bouché



Pieu fermé

$$IFR = \Delta e / \Delta z$$



Pieu ouvert

IFR = 1 pieu carottant

IFR = 0 pieu totalement bouché

Capacité des pieux battus dans les sables



Méthode UWA 05

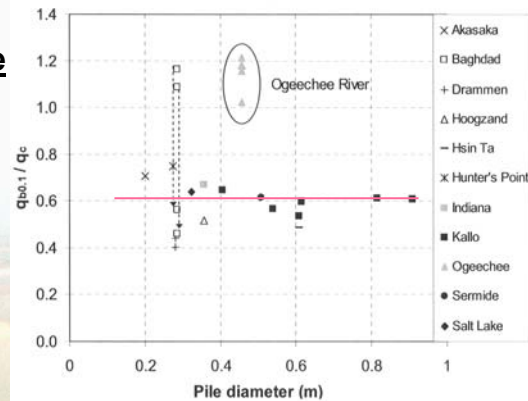
- capacité 10 jours après installation
- capacité à 10% du déplacement de la pointe
- $q_{c_{av}}$ selon méthode Hollandaise ou Fascicule 62

A - Résistance de pointe

$$Q_b = q_b \cdot \pi \cdot D_e^2 / 4$$

Pieu fermé

$$q_b = 0.6 q_{c_{av}}$$



Capacité des pieux battus dans les sables



Méthode UWA 05

A - Résistance de pointe

$$Q_b = q_b \cdot \pi \cdot D_e^2 / 4$$

Pieu ouvert: $q_b = 0.15 + 0.45 A_{rb}$

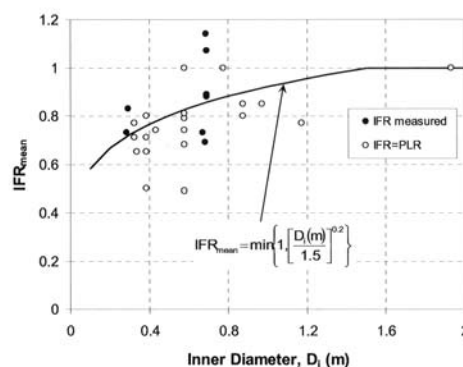
Rapport de surface effectif:

- Si IFR mesuré:

$A_{rb} = 1 - \text{IFR} (D_i^2 / D_e^2)$
(valeur de IFR sur les derniers mètres de battage)

- Si IFR inconnu:

$$\text{IFR} = \min [1, (D_i(m)/1.5m)^{0.2}]$$



Capacité des pieux battus dans les sables



Méthode UWA 05

B - Frottement

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \tau_f \cdot dz$$

$$\tau_f = \sigma'_{rf} \tan \delta_{cv}$$

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

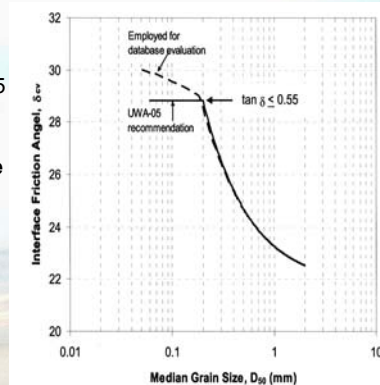
$$\sigma'_{rc} = 0.03 \cdot q_c \cdot A_{rs}^{0.3} \cdot [\max(h/D, 2)]^{-0.5}$$

$\Delta \sigma'_{rd}$ = accroissement de frottement dû à la dilataance, négligeable pour pieux de fort diamètre

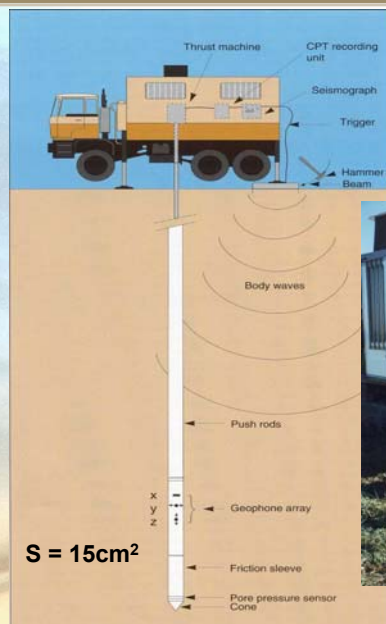
δ_{cv} = mesuré (boîte de cisaillement annulaire)
ou estimé en fonction de D_{50}

$$A_{rs} = 1 - IFR (D_i^2 / D_e^2)$$

- Si IFR mesuré: valeur moyenne de IFR
- Si IFR inconnu: $IFR = \max [1, (D_i(m)/1.5m)^{0.2}]$



Le cône sismique

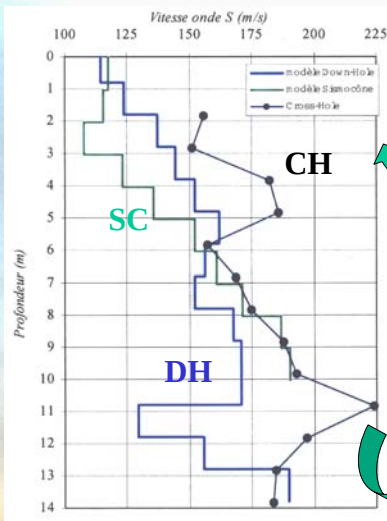


Pour déterminer la vitesse V_s (V_p) in-situ des ondes sismiques

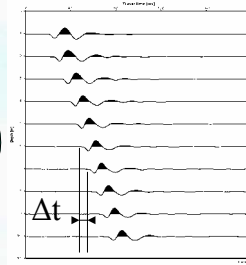
Mesure: q_c , f_s , u , + inclinaison,
+ sismomètres X, Y et (Z)



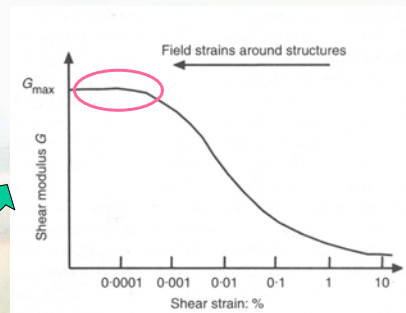
Le cône sismique



$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2$$



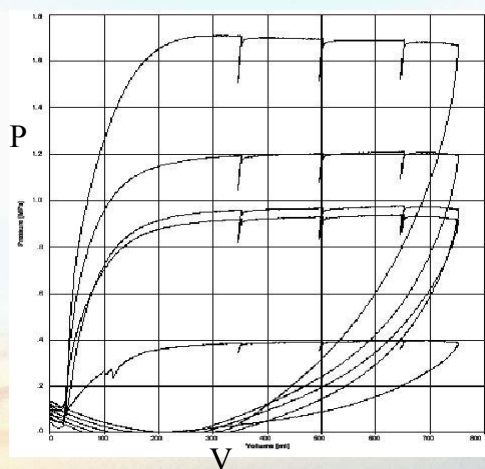
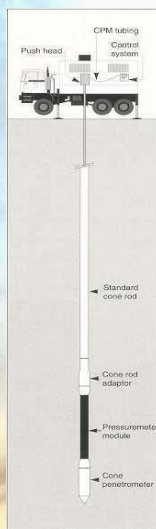
Piqué de la première arrivée des ondes de cisaillement



Le pressiocône



Combinaison d'un essai de pénétration CPT et d'un essai pressiométrique à volume contrôlé



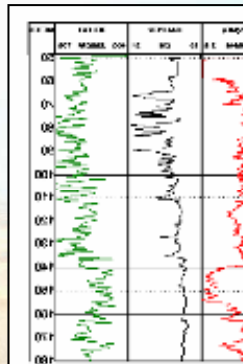
Exemple de courbes d'expansion

Les cônes de logging (profilage stratigraphique)

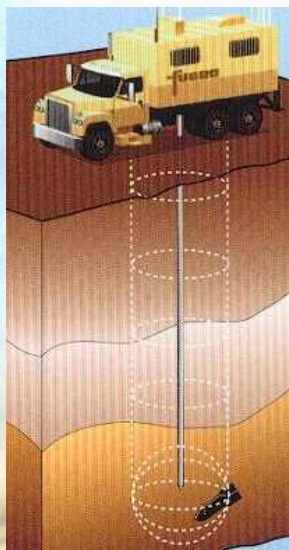


Mesure in situ de:

- la radiation gamma (γ) naturelle du sol
- la densité humide (sonde nucléaire au Cs 137)

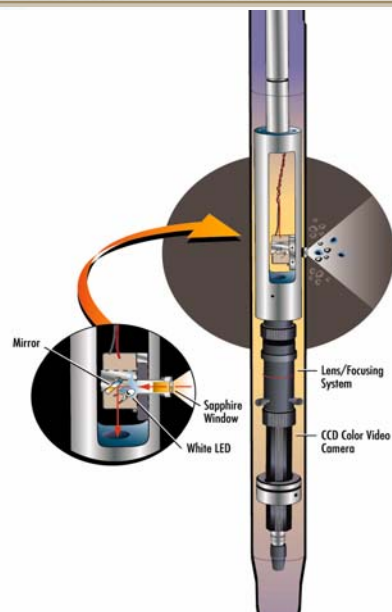


Le cône magnétique



Un système d'investigation intrusif avec un magnétomètre qui peut repérer des objets métalliques (bombes, engins de guerre,...)

Le videocône



Pour visualiser les sols avec une grande résolution.

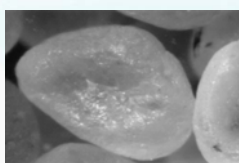


Le videocône

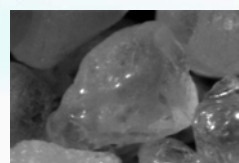


Différents grains de sable de rivière

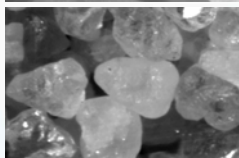
**710-850
microns**



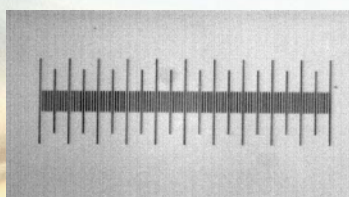
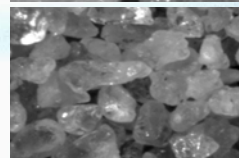
**500-710
microns**



**250-300
microns**



**106-250
microns**



Le videocône



Clip video d'un terrain de surface avec matière végétale



Le videocône



Clip video avec changement de minéralogie



Le videocône



Clip video de changement de lithologie
(sable silteux -> silt)



Le videocône



Clip video avec changement de la couleur



Le videocône



Clip video avec polluant



Les cônes environnementaux



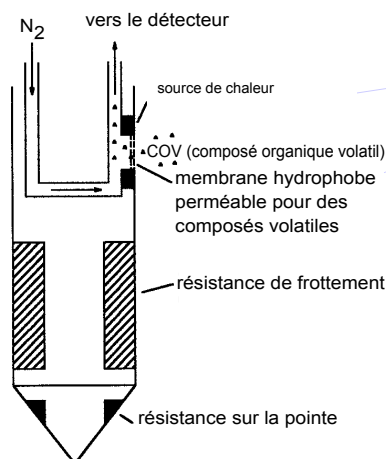
Différents cônes:

- MIP: Hydrocarbures halogènes volatils
- ROST: Hydrocarbures aromatiques polycycliques
- Conductivité: Détection d'ions/sels
- Température
- BAT: Echantillonnage in-situ des eaux
- MOSTAB: Echantillonnage in-situ des sols

Le MIP (Membrane Interface Probe) - Le cône



Technique basée sur la chaleur qui accélère le transport diffus des composants volatils à travers une membrane



Le MIP - Les détecteurs



Chromatographie phase gazeuse
avec des détecteurs spécifiques:

• PID (Photo Ionization Detector)

recherche des composés volatiles (potentiel d'ionisation < 10,6 eV) –
par exemple des hydrocarbures aromatiques – BTEX

• FID (Flame Ionization Detector)

recherche des hydrocarbures en général

• DELCD ou détecteur de Hall (Dry Electrolytic Conductivity Detector)

Utilisé principalement pour la recherche spécifique des
hydrocarbures halogénés (Cl, Br)

10.6 eV) -		•DÉTECTEUR		
•SUBSTANCE		•PID	•FID	•DELCD
•HYDROCARBURES ALIPHATIQUES HALOGENES				
•Tétrachloroéthylène	++++	+/+	++++	
•Trichloroéthylène	++++	+/+	+++	
•1,2-Dichloroéthylène (cis)	+++	+/+	++	
•1,2-Dichloroéthylène (trans)	+++	+/+	+	
•Chlorure de vinyle	++	+/+	++	
•Trichloroéthane	-	+/+	+++	
•HYDROCARBURES AROMATIQUES				
•Benzène	++++	++++	-	
•Toluène	++++	++++	-	
•Ethylbenzène	++++	++++	-	
•Xylènes	++++	++++	-	
•Sensibilité				
++++ très bien	+++ bien	++ satisfaisant	+/+ moyen	- faible

Le MIP - Acquisition et visualisation des données



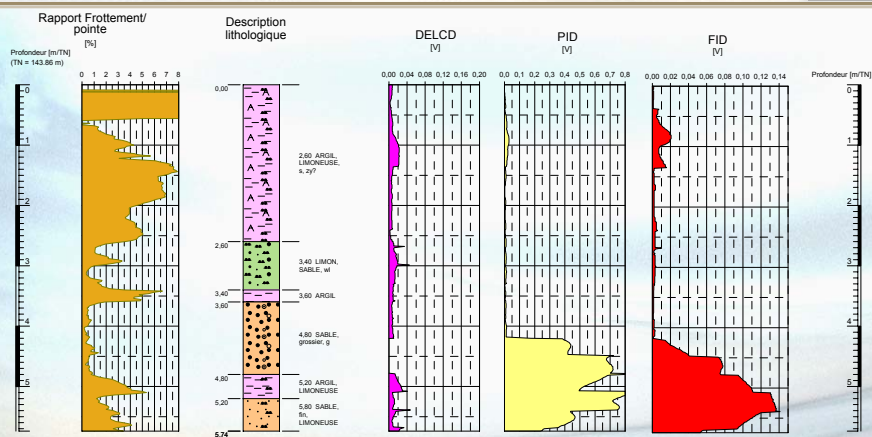
Chromatographie en phase gazeuse
avec des détecteurs spécifiques
(CPG)



Visualisation
des données sur site
avec un micro-ordinateur



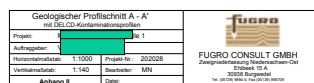
Le MIP - Pollution par hydrocarbures aromatiques (BTEX)



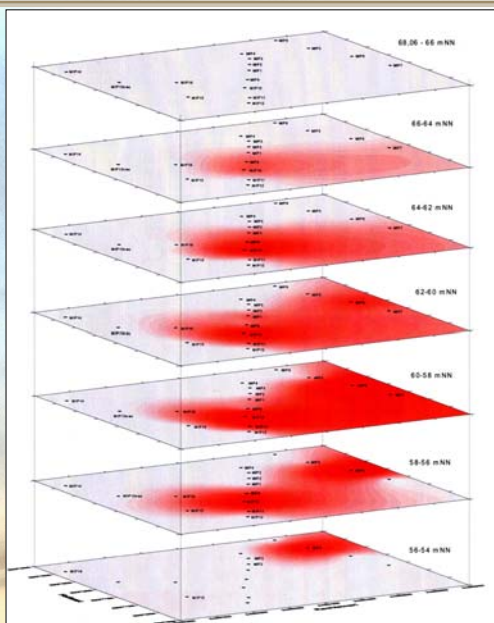
Présentation des données
avec logiciel GeoDIN

Visualisation des résultats MIP - MIP2			
Project:			
Donneur d'ordre:			
Date de la sond:	TN	0.00	
Echelle:	1:50	Pers. chargée:	MS
Annex II.1	Fichier:	ROST.GLO	





Le MIP

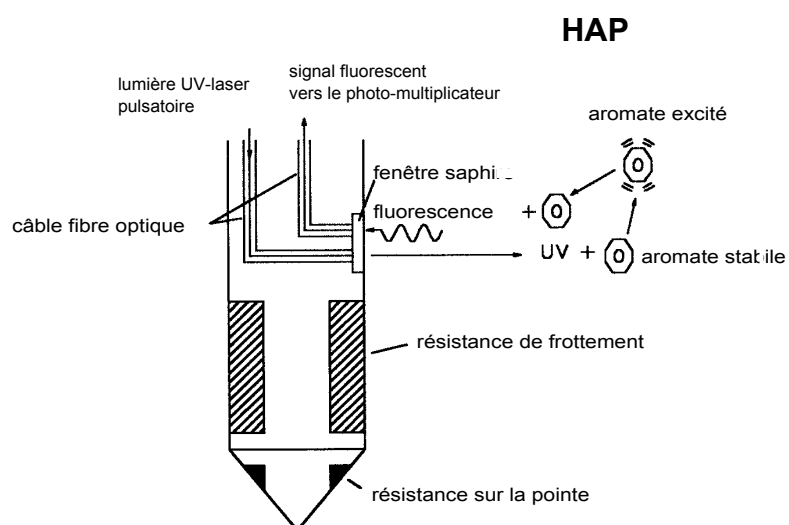


Délimitation
d'une contamination avec
Tétrachloroéthylène en
trois dimensions

Le ROST (Rapid Optical Screening Tool)



Le ROST utilise un laser pulsant pour générer la fluorescence

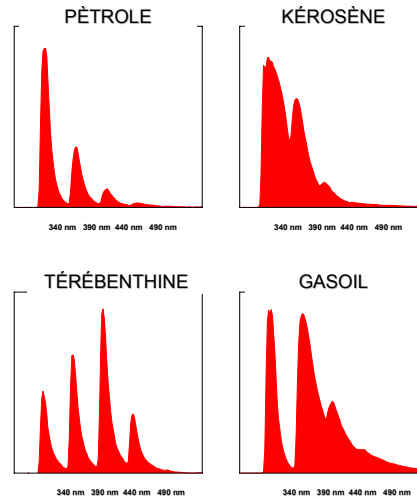


Le ROST



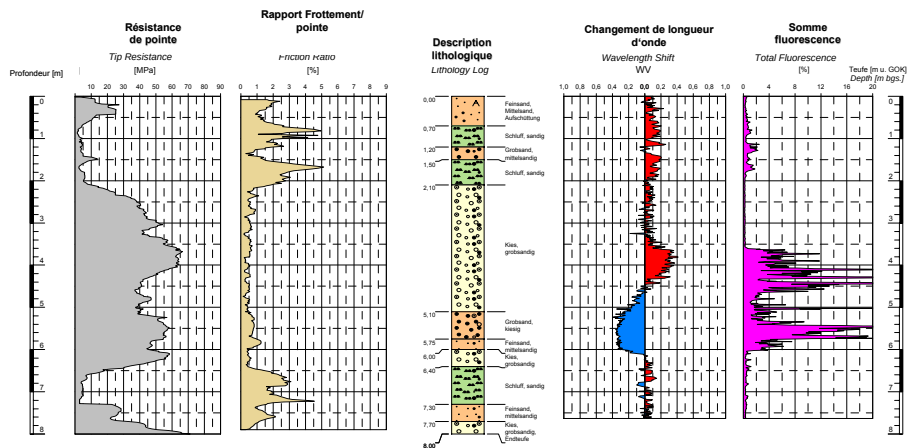
Mesure concentration:

- Terpentine
- Essence
- Gasoil
- Mazout
- Kérosène
- Pétrole
- Huile de moteur
- Liquide hydraulique
- Goudron
- Créosote



Distribution de longueur d'onde

Le ROST - Exemple de profil

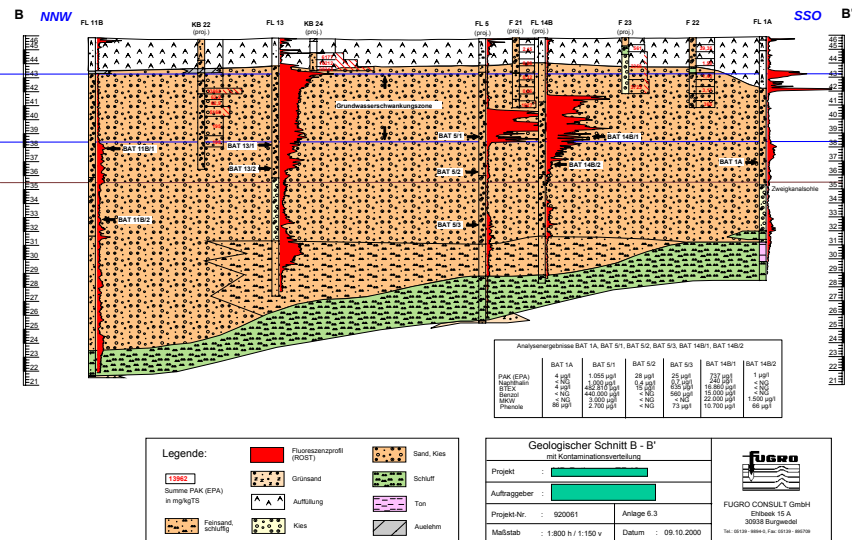


ROST Test Profile DS 4A-1

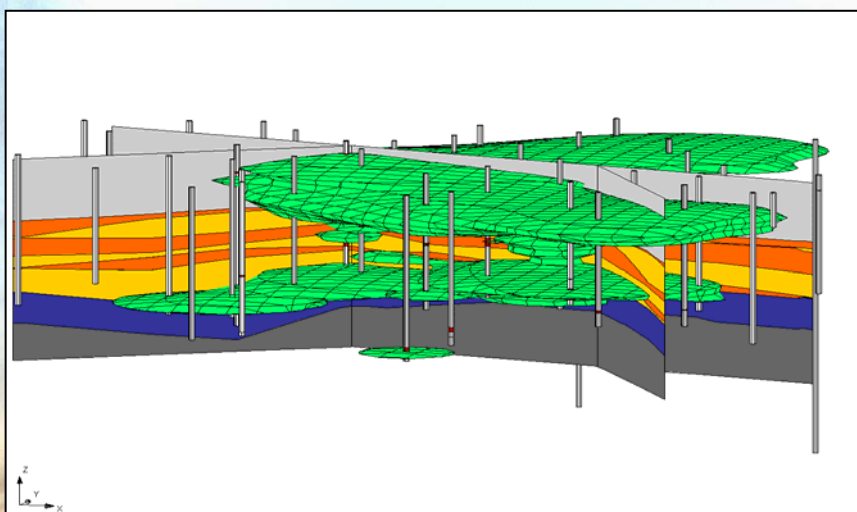
Projekt/Project:	
Auftraggeber/Client:	
Sondierdatum/Test Date:	Project No.:
Vertikalskala/Vertical Scale: 1:05	Bohrer/Autor: MN
Anhang/Appendix III	ROST_201025angl.GDF



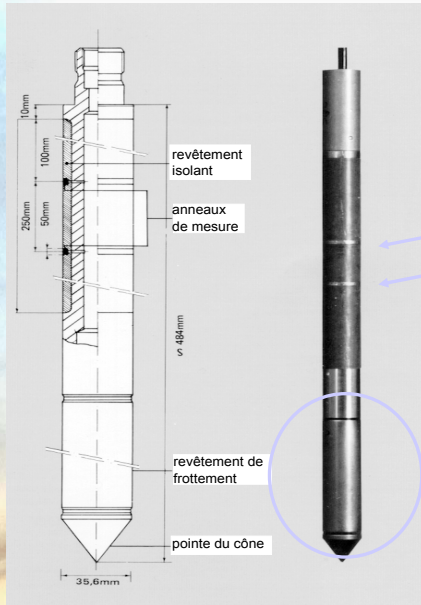
Le ROST - Coupe transversale au droit d'une usine à gaz



Le ROST - Représentation 3D d'une pollution



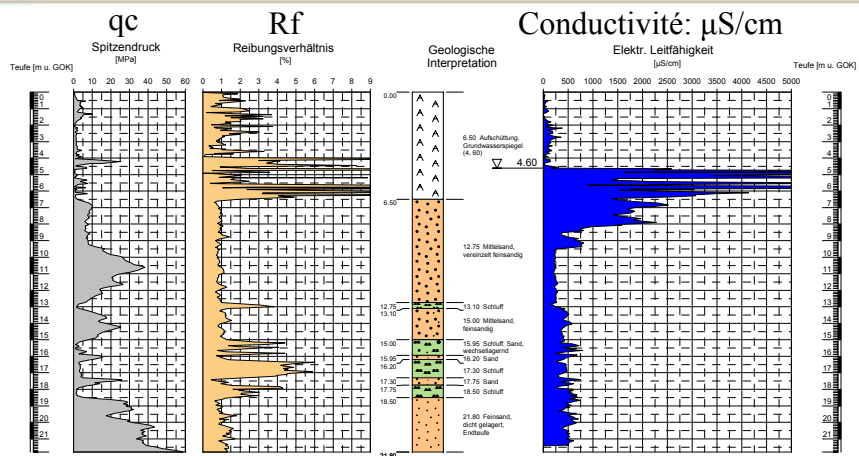
Le Cône de Conductivité



Électrodes de cuivre

Cône CPT Standard

Le Cône de Conductivité - Mesures sous une décharge sauvage



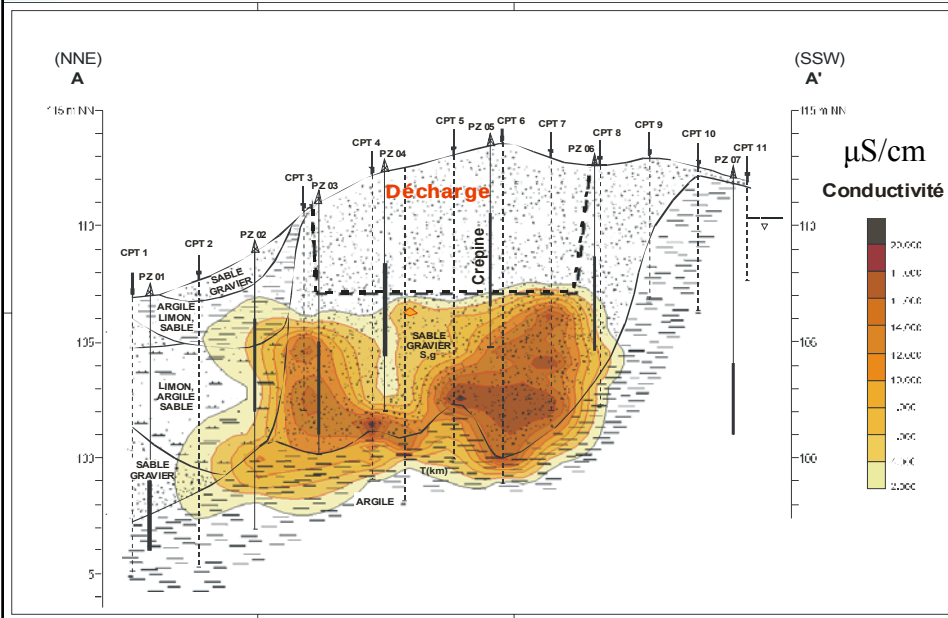
Sondierprofil LF2

Projekt:	
Auftraggeber:	
Sondierdatum:	Projekt-Nr.:
Höhenmaßstab: 1:180	Bearbeiter:
Anhang II	Datum:



FUGRO CONSULT GMBH
Zweig Niederlassung Niedersachsen-Ost
Einbeck 15 A
30538 Burgwedel
Tel. (051 34) 999-0 Fax (051 34) 999-200

Le Cône de Conductivité - Zone de lixiviation sous une décharge



Les cônes environnementaux - rappel



- **MIP (Membrane Interface Probe)**

Composé Organique Volatil (COV):

HYDROCARBURES AROMATIQUES

HYDROCARBURES ALIPHATIQUES HALOGENES

HYDROCARBURES AROMATIQUES HALOGENES

+ liquides en phase non aqueuse (LPNA)

- **ROST™ (Rapid Optical Screening Tool)**

HYDROCARBURES POLYCYCLIQUES AROMATIQUES (HPA):

CRÉOSOTE, ESSENCE, GASOIL, GOUDRON, HUILE MINÉRAL,

KÉROSÈNE, LIQUIDE HYDRAULIQUE, MAZOUT, PÉTROLE

(PRODUITS DE PÉTROLE), TÉRÉBENTHINE,

+ liquides en phase non aqueuse (LPNA)

- **Cône de Conductivité**

Salinité

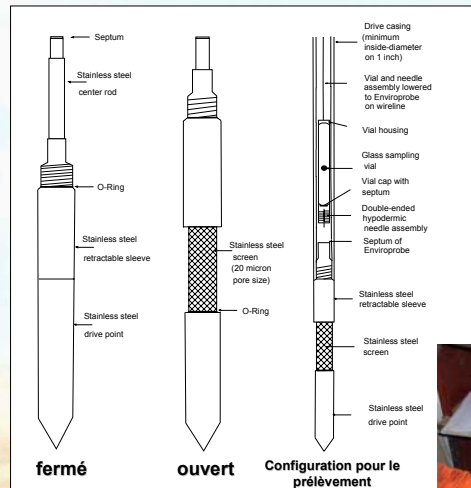
CPTU(Piezocône)

Pression interstitielle dynamique

La sonde BAT - Echantillonnage de fluide



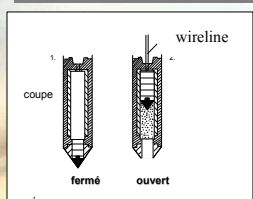
Schéma d'un collecteur de BAT pour prélever des échantillons de la nappe



Le MOSTAB - Echantillonnage de sol



Schéma d'un collecteur de MOSTAP pour prélever des échantillons du sol



Merci pour votre attention



Bienvenue dans le monde du CPT !

Welcome to CPT world !

