

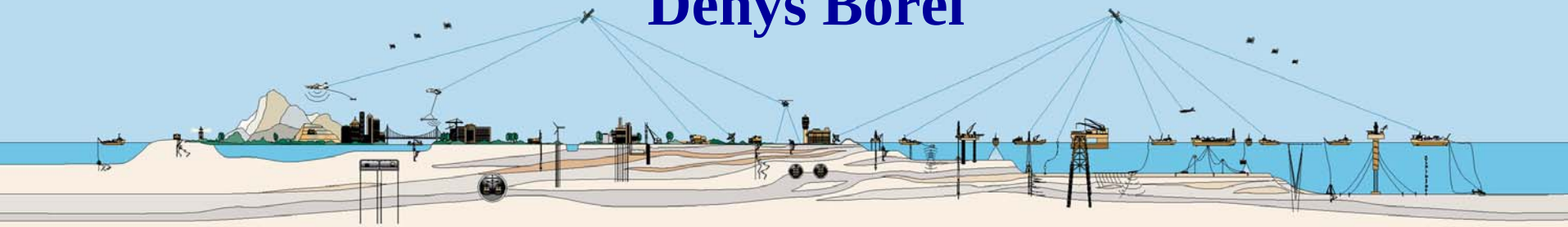
CFMS

Journée thématique du 5 Mai 2004



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

Alain Puech
Denys Borel



Plan



- Introduction : rappels / historique
- Evaluation de la contrainte cyclique induite par le séisme (CSR)
- Evaluation de la résistance à la liquéfaction (CRR) à partir du CPT
- Sécurité à la liquéfaction / présentation des résultats
- Tassements induits par la liquéfaction
- Couplage CPT / cone sismique (V_s)
- Comparaison CPT / SPT / V_s
- Exemples d'application
- Conclusion: stratégie de reconnaissance



Introduction



- Travaux sur la liquéfaction des sols sous séismes: années 70 (H.B. Seed et I. M. Idriss)

- Sols potentiellement “liquéfiables”: 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 Vs, (du BPT)
 - Apporte précisions sur: CSR, facteur correctif de Magnitude (MSF), facteurs correctifs de profondeur (> 15-20m), de pendage, d'âge des sédiments.
- * T.L. Youd, I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian, R. Dobry, W.D. Liam Finn, L.F. Harder, M.E. Hynes, K. Ishihara, J.P. Koester, S.S.C. Liao, W.F. Marcuson, G.R.Martin, J.K. Mitchell, Y. Moriwaki, M.S. Power, P.K. Robertson, R.B. Seed, K.H. Stokoe.



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} : acceleration horizontale de pic en surface

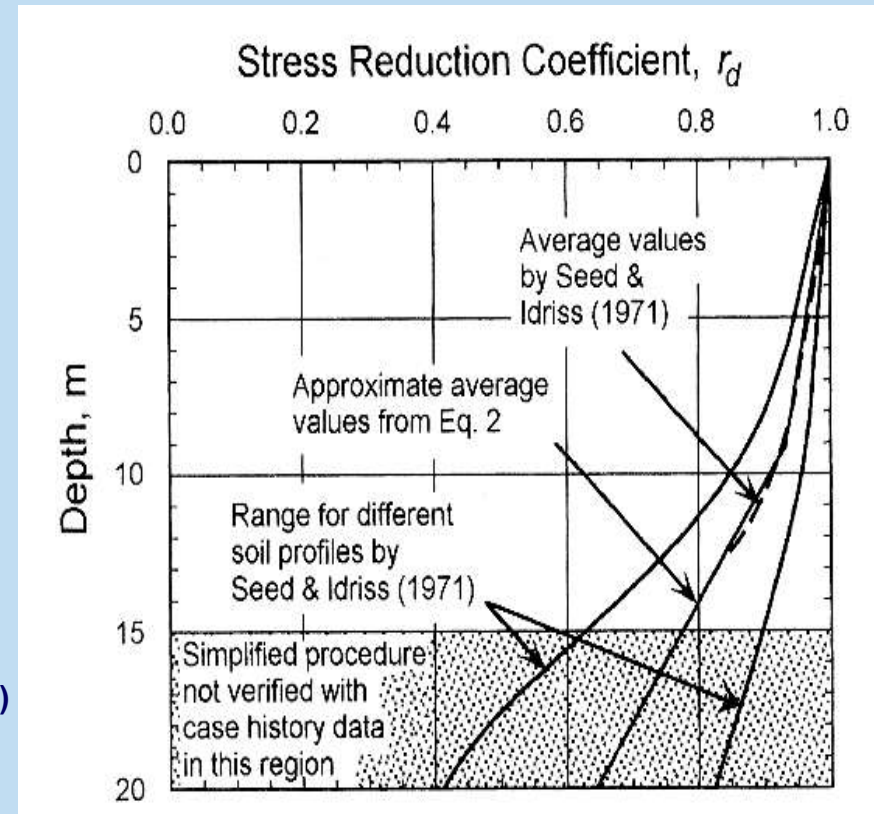
g : acceleration de la gravité

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

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

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113 z^{0.5} + 0.04052 z + 0.001753 z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177 z^{0.5} + 0.05729 z - 6.0006205 z^{1.5} + 0.001210 z^2)}$$

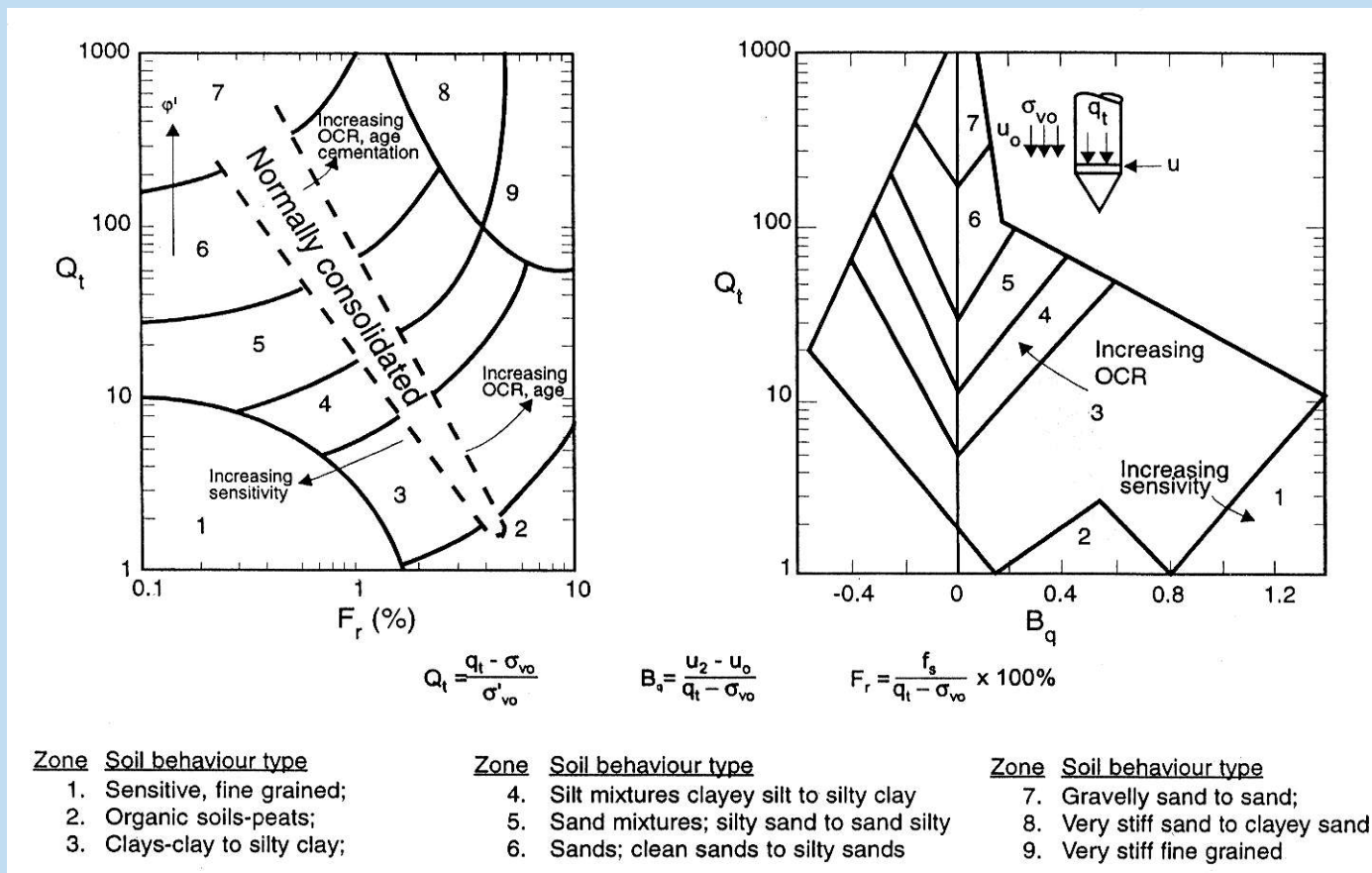
(Blake, 1996)



Evaluation du CRR à partir du CPT



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



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

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

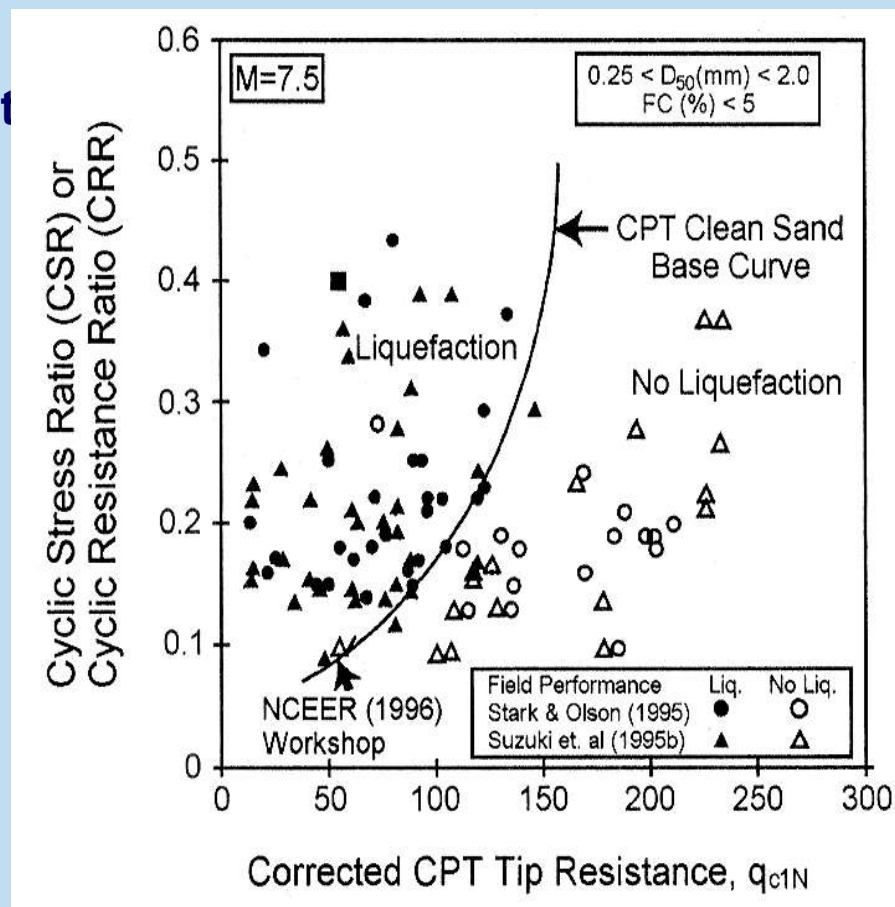
pour $50 < (q_{c1N})_{cs} < 160$:

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

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

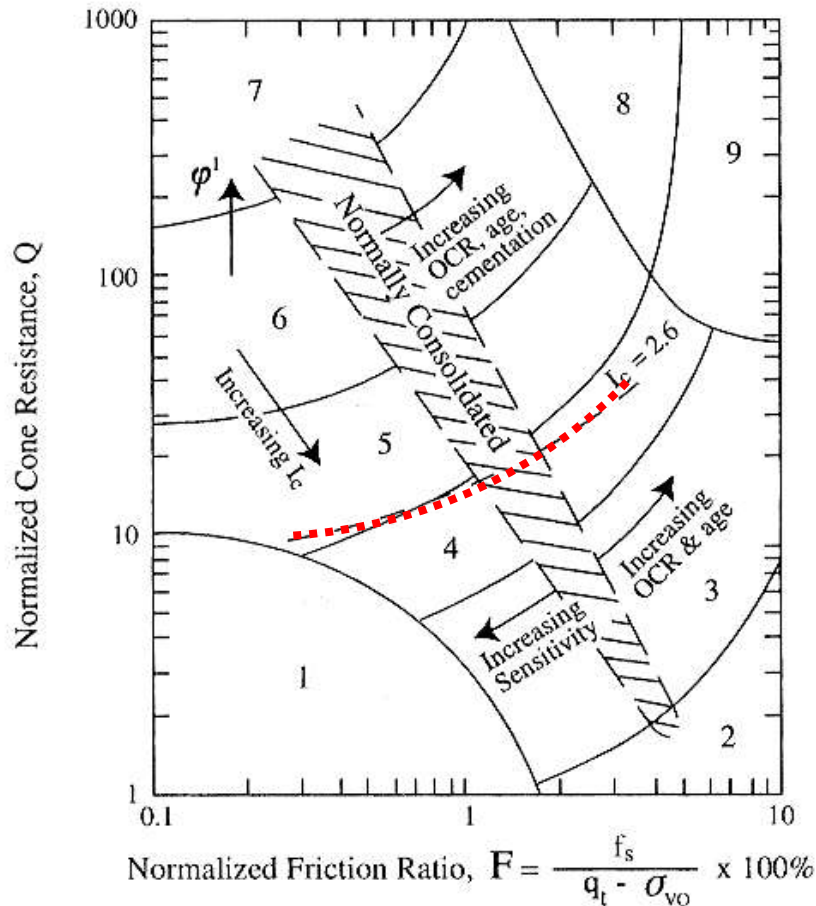
$$q_{c1N} = (q_c / Pa) \cdot C_q \text{ avec } C_q = (Pa / \sigma'_{vo})^n$$

$n=0.5$ (sable propre)



Robertson et Wride (1998)

Evaluation du CRR



- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. Sensitive, fine grained | 6. Sands - clean sand to silty sand |
| 2. Organic soils - peats | 7. Gravelly 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

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

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

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

(diagramme ci-contre)

$Ic_{(n=1)} = 2.6$ separation entre sols granulaires et sols cohésifs



Evaluation du CRR



avec $n=1.0$ (argile)
calcul de Q et I_c

si $I_c < 2.6$

sol supposé granulaire
Recalculer Q et I_c avec $n = 0.5$

si $I_c > 2.6$

sol argileux non liquéfiable sauf
critère Chinois à vérifier (Seed et
Idriss, 1975)

Fraction argileuse $< 15\%$

$LL < 35\%$

$w > 0.9 \times LL$

si $I_c < 2.6$

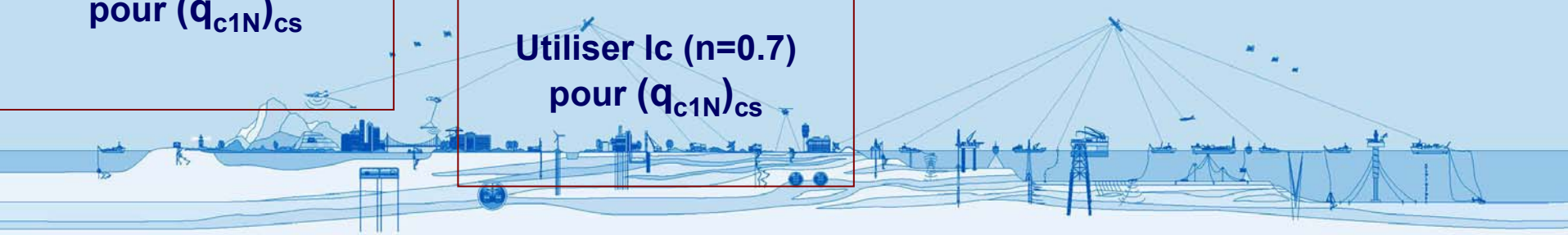
sol non plastique
granulaire

Utiliser I_c ($n=0.5$)
pour $(q_{c1N})_{cs}$

si $I_c > 2.6$ sol très
silteux possiblement
plastique

Recalculer Q et I_c
avec $n = 0.7$

Utiliser I_c ($n=0.7$)
pour $(q_{c1N})_{cs}$



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:

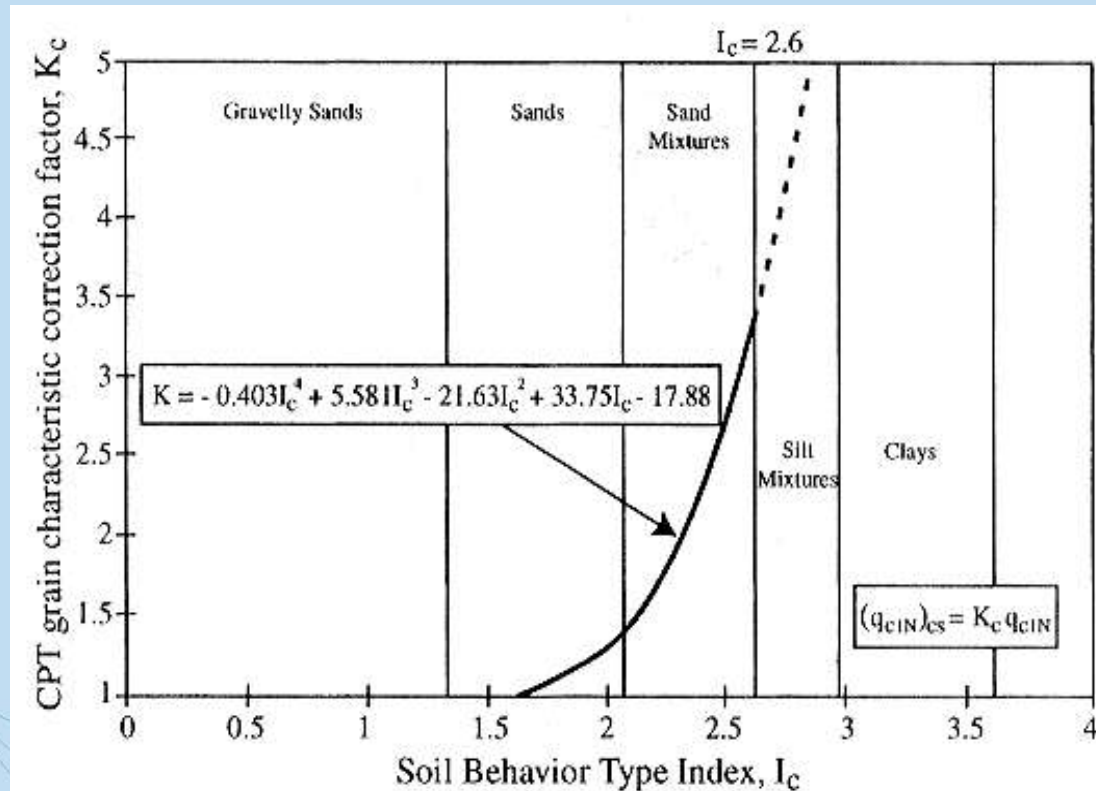
$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot q_{c1N}$$

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)



Evaluation de la sécurité à la liquéfaction

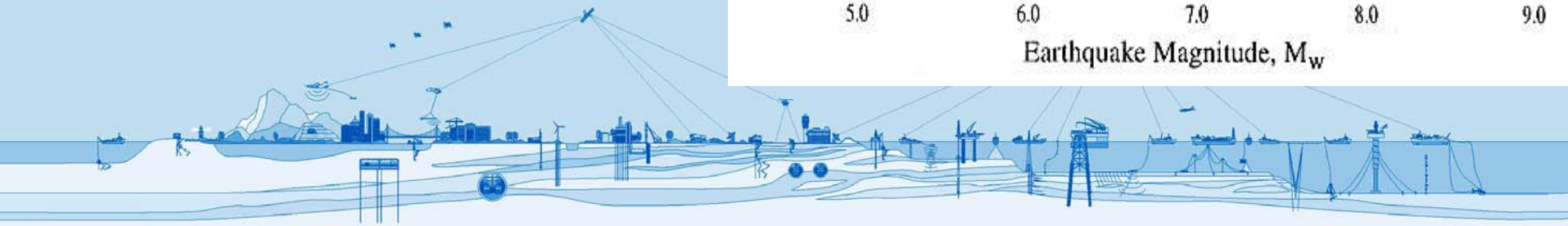
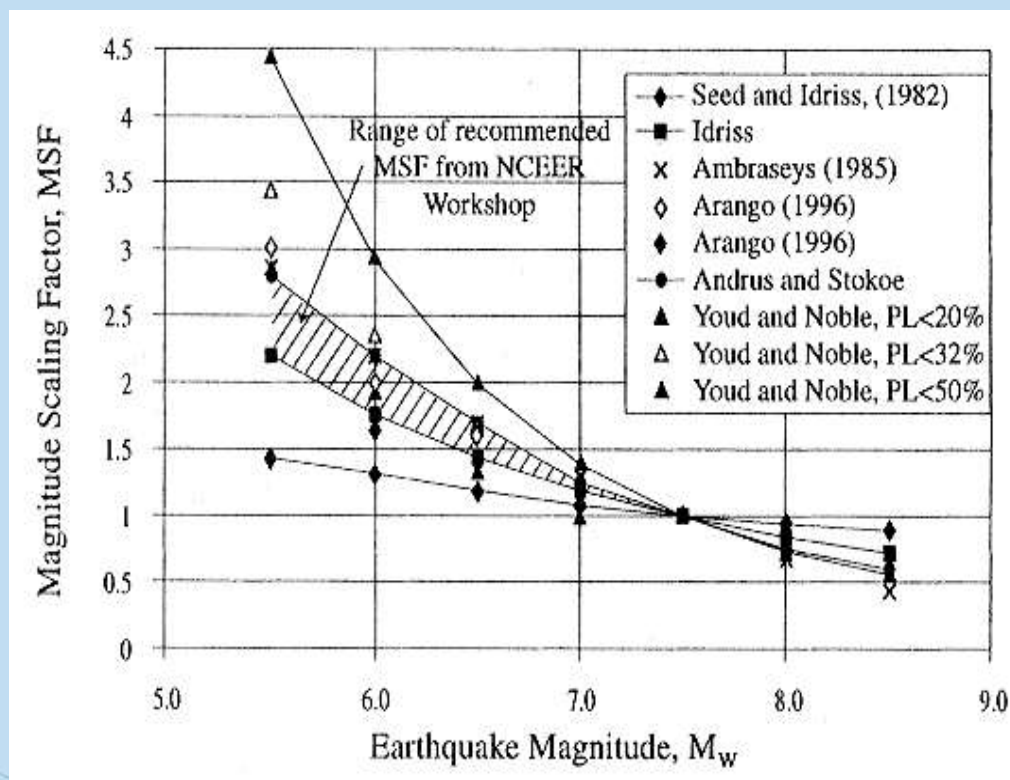


- $(q_{c1N})_{CS}$ permet d'obtenir $CRR_{7.5}$ (banque de données)
- pour un séisme de magnitude 7.5 : $FS = CRR_{7.5} / CSR$
- pour un séisme de magnitude

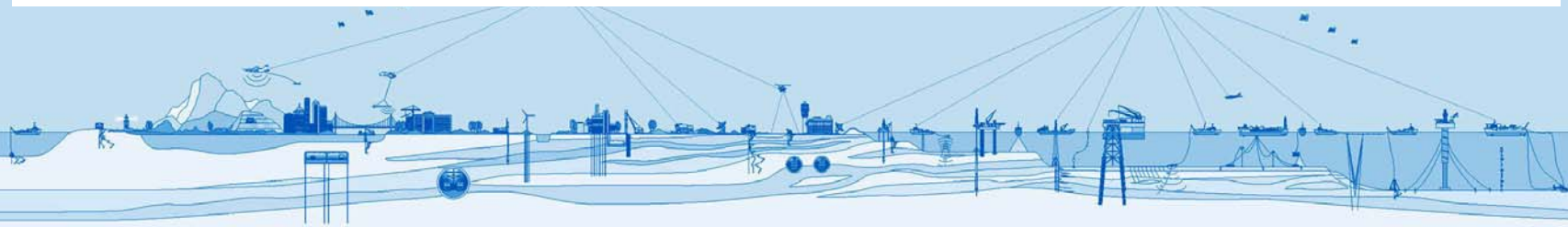
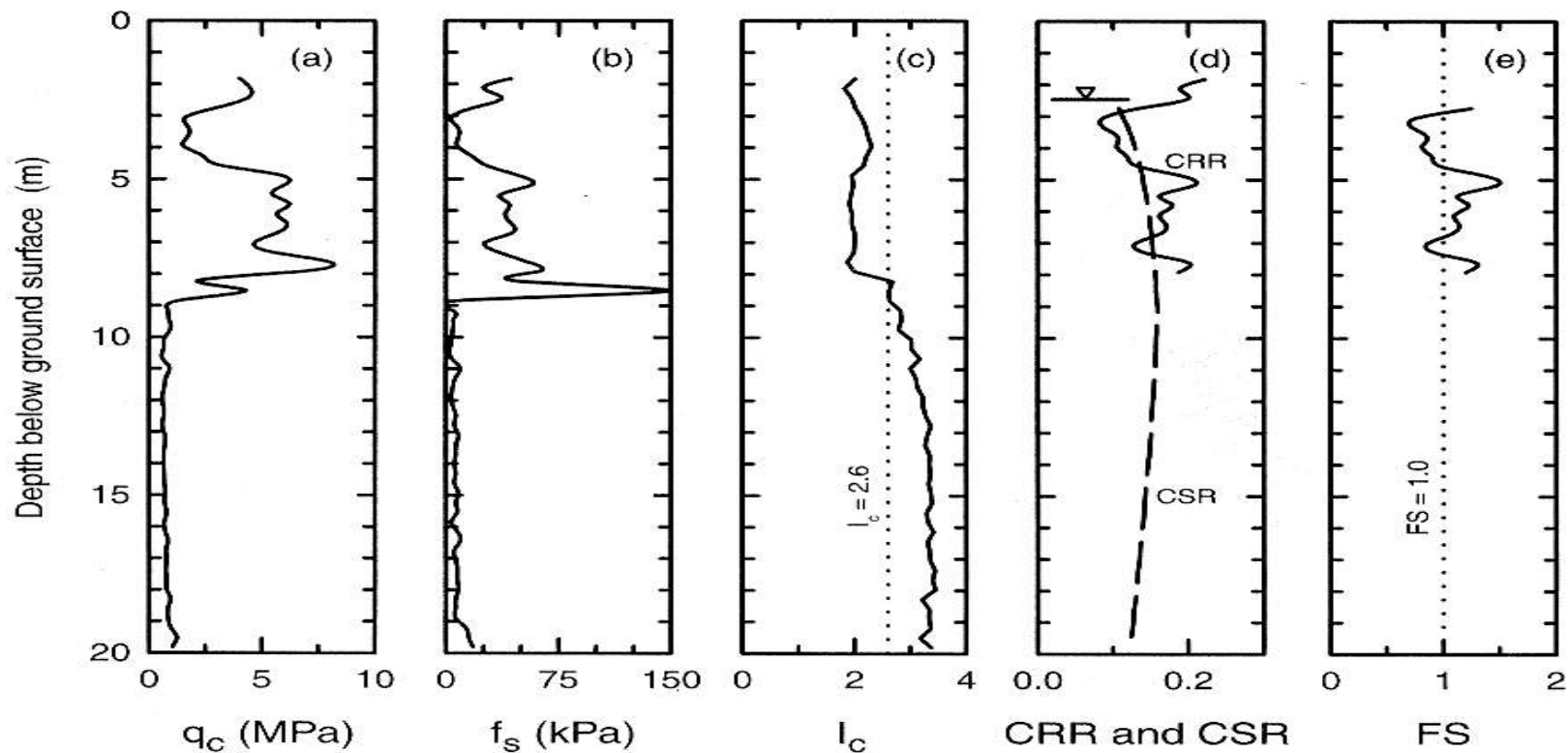
7.5:

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

MSF: "magnitude scaling factor"



Présentation des résultats

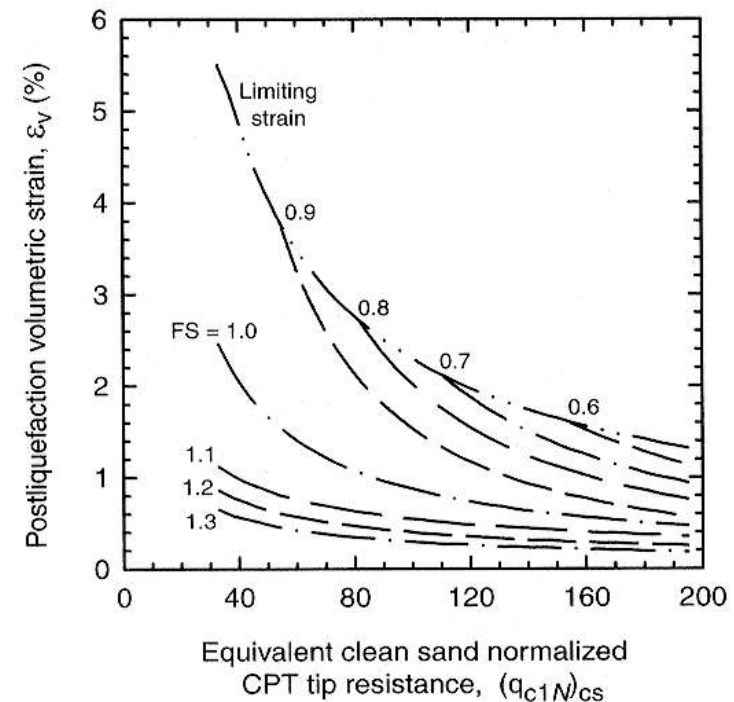
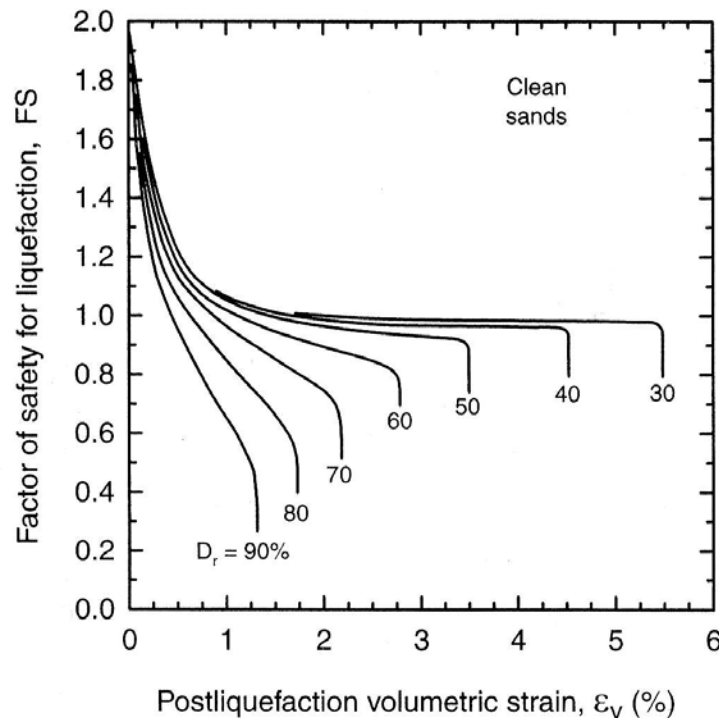


Tassements induits par la liquéfaction



Zhang, Robertson et Brachman, 2002

$$S = \sum \varepsilon_{vi} \Delta z_i$$



Essais de laboratoire (Ishihara et Yoshimine, 1992)
Déformation volumétrique postliquéfaction
en fonction de D_r et FS

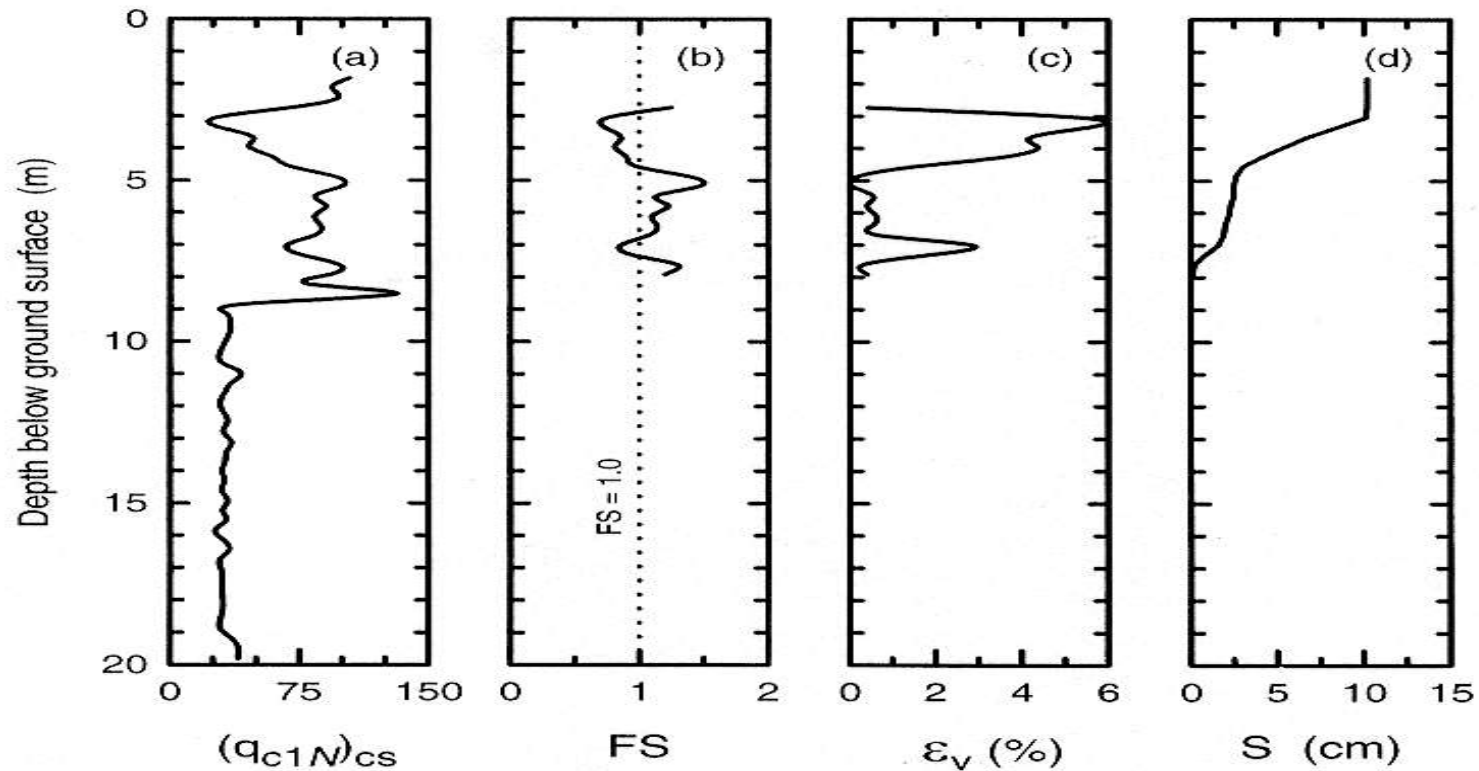
Détermination de la déformation
volumétrique postliquéfaction en fonction
de $(q_{c1N})_{cs}$ et FS



Tassements induits par la liquéfaction



Etapes de la procédure et présentation des résultats



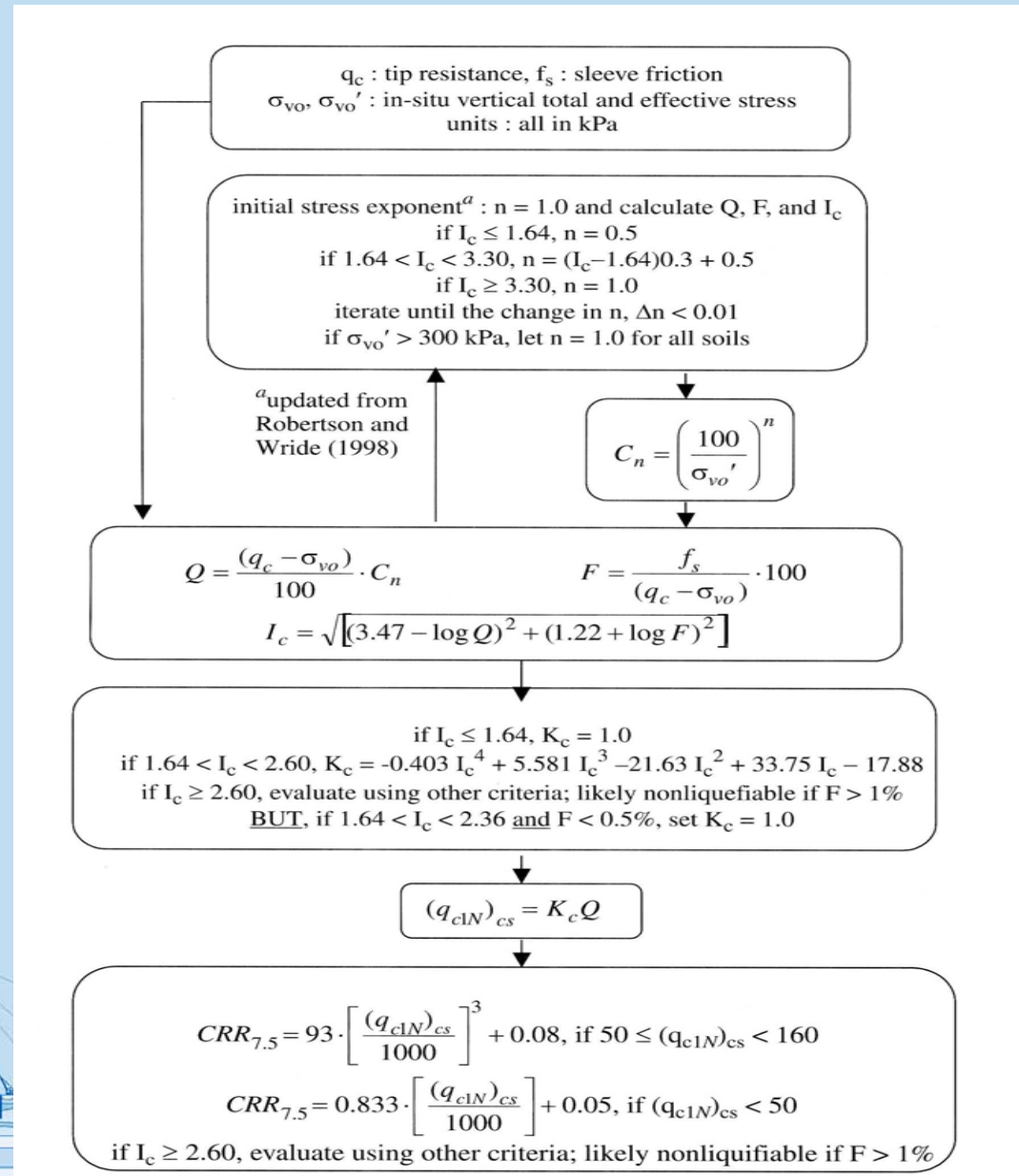
Simplicité d'application de la méthode CPT



Méthode programmable

(avec variation continue
de l'exposant n)

Zhang, Robertson et Brachman, 2002



Couplage avec cône sismique



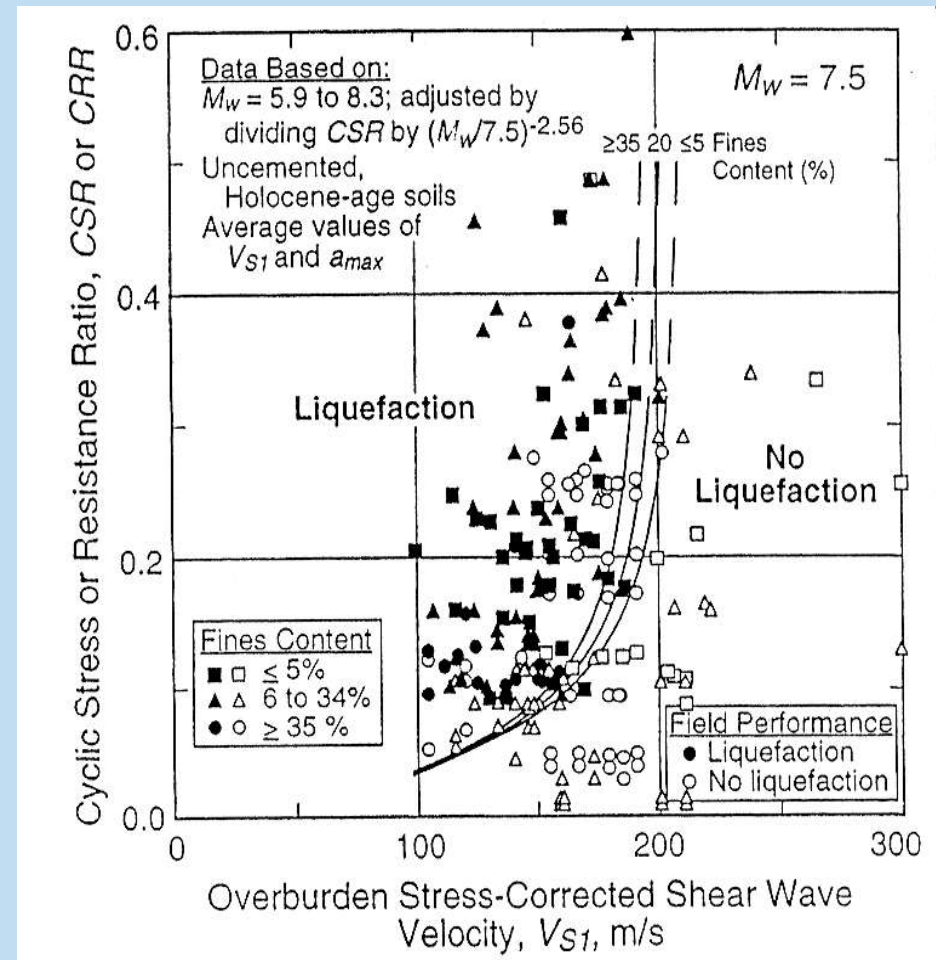
- cône sismique mesure V_s

- normalisation de V_s :

$$V_{s1} = V_s (\text{Pa} / \sigma'_{vo})^{0.25}$$

- obtention de $\text{CRR}_{7.5}$

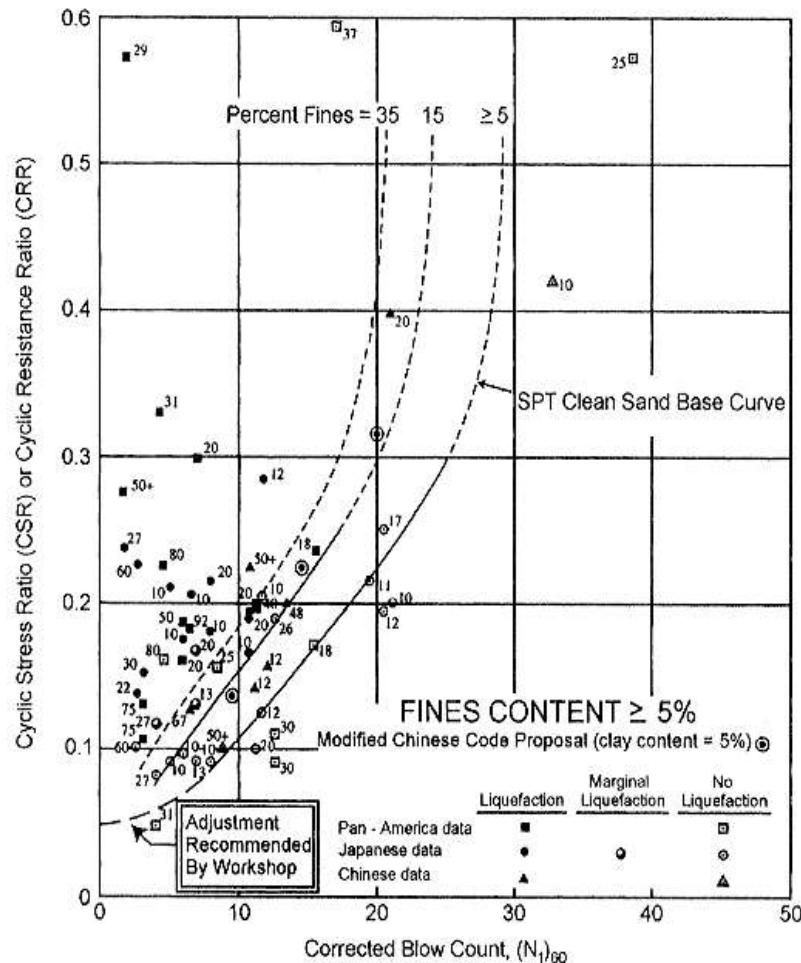
(Andrus et Stokoe, 2000)



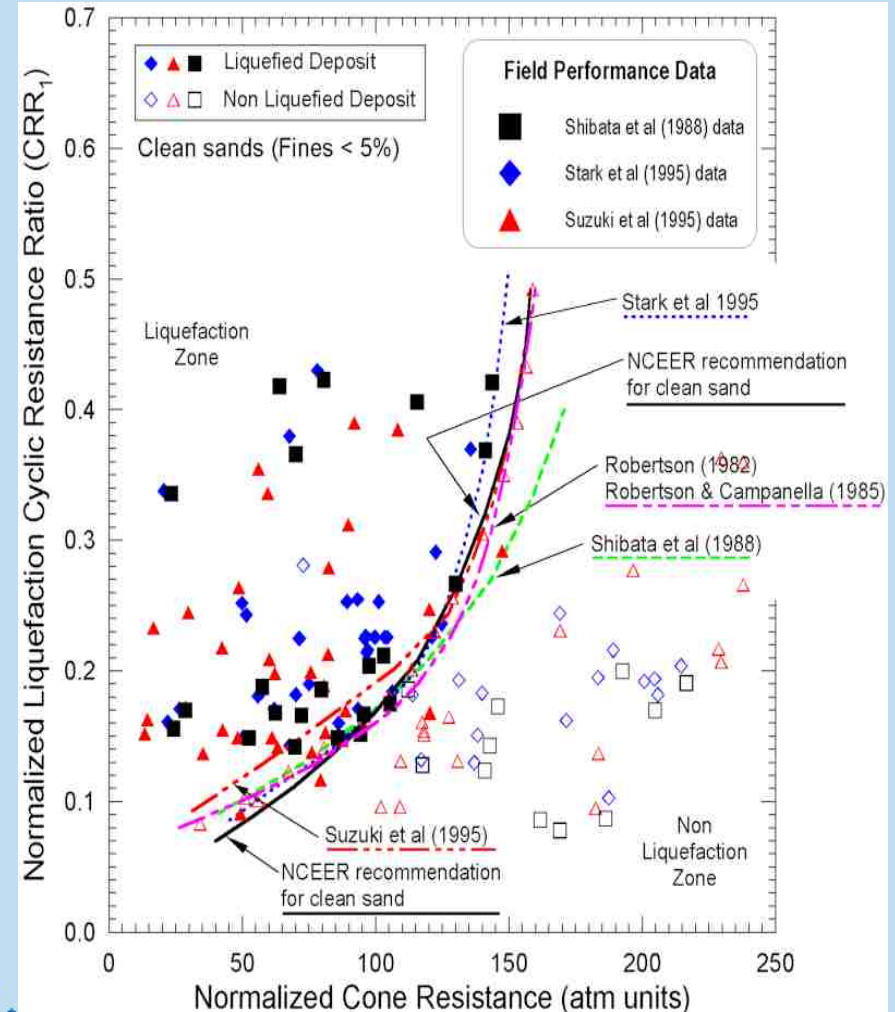
Robustesse de la méthode CPT



Banque de données SPT



Banque de données CPT



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}

N1

q_{c1N}

Corrections propres au SPT

$$(N1)_{60} = N1 \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S$$

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

$(N1)_{60cs}$

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



Comparaison des différentes méthodes



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



EXEMPLE N°1



Avant port en eau profonde

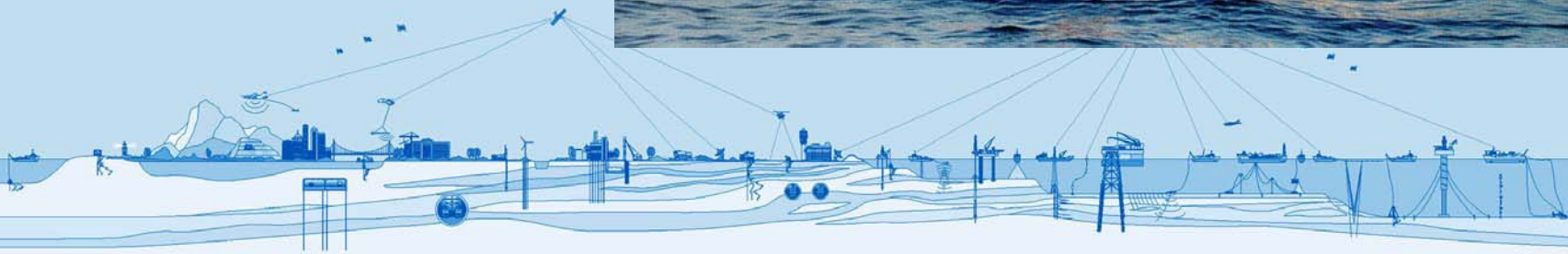
Seisme: $M = 8.5$ $a_{\max} = 0.09g$

15 à 25m de Sables fin à moyens

Dr moyenne = 65%

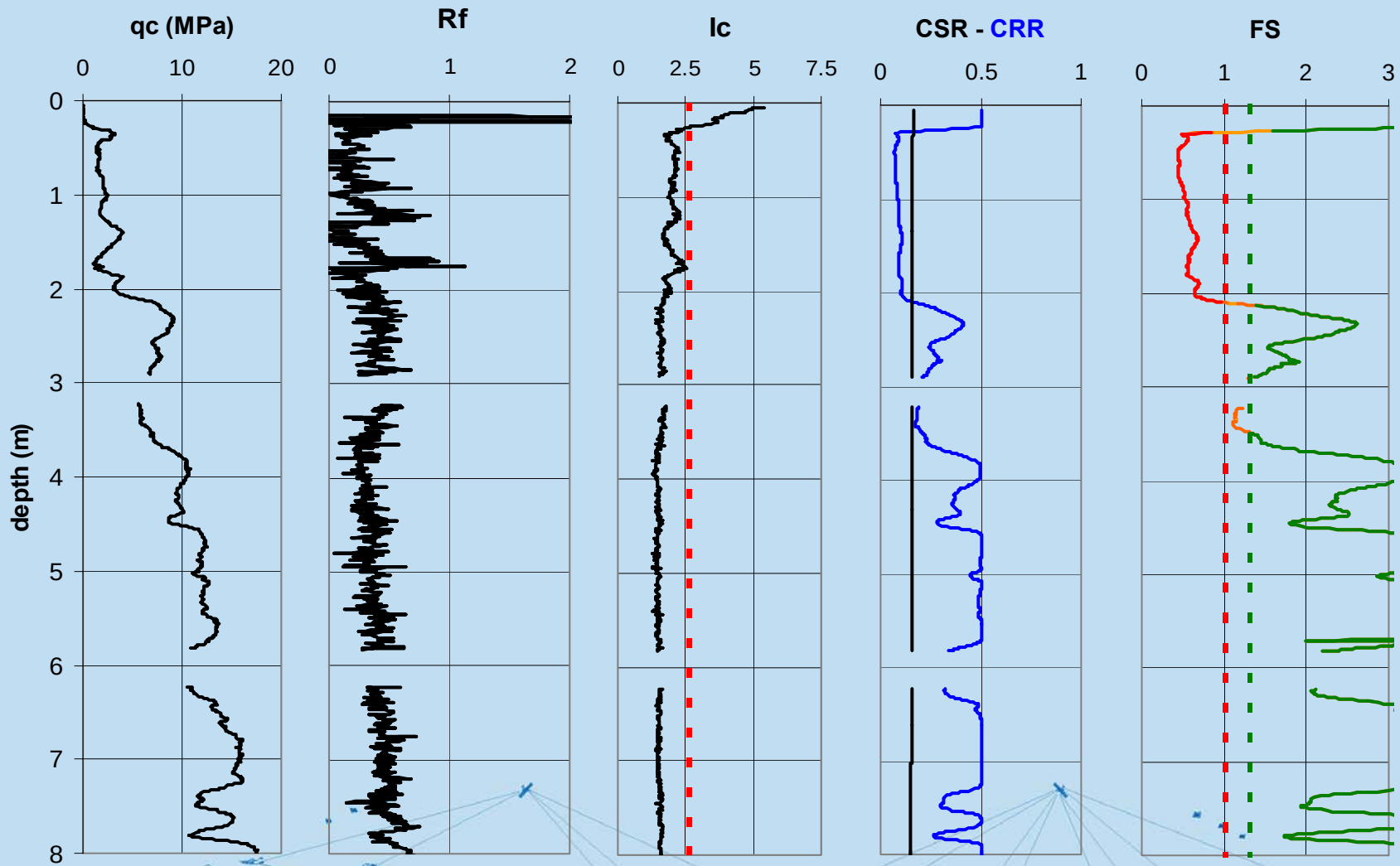
Campagne préliminaire:

définir risque et premier zonage:



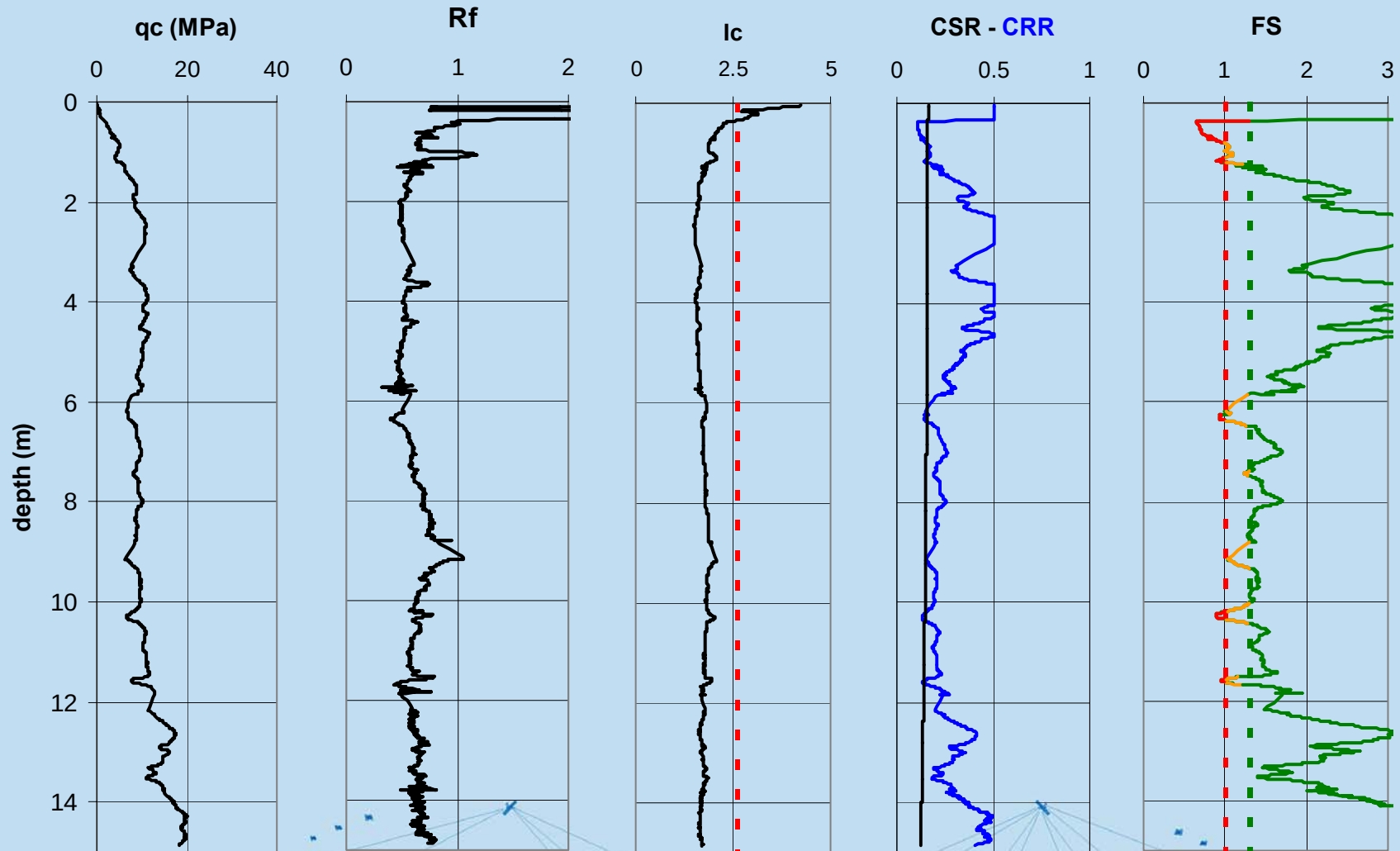
Exemple 1:

CPTa



Exemple 1:

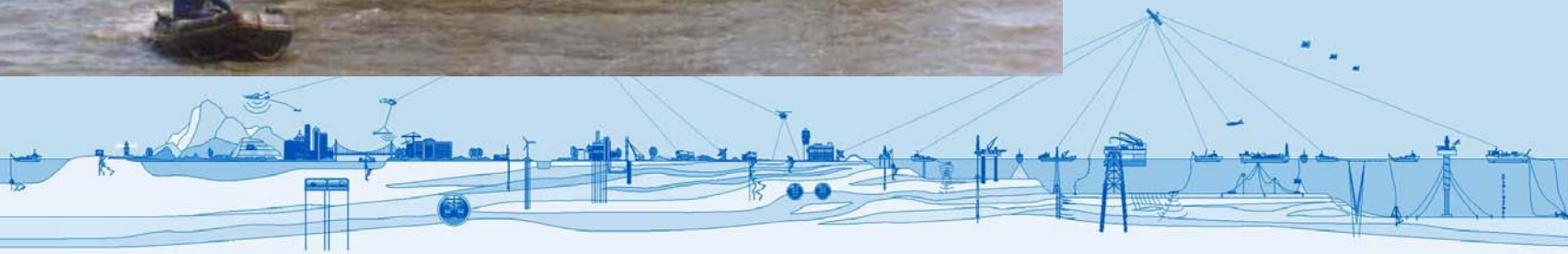
CPTb



Exemple N°2:

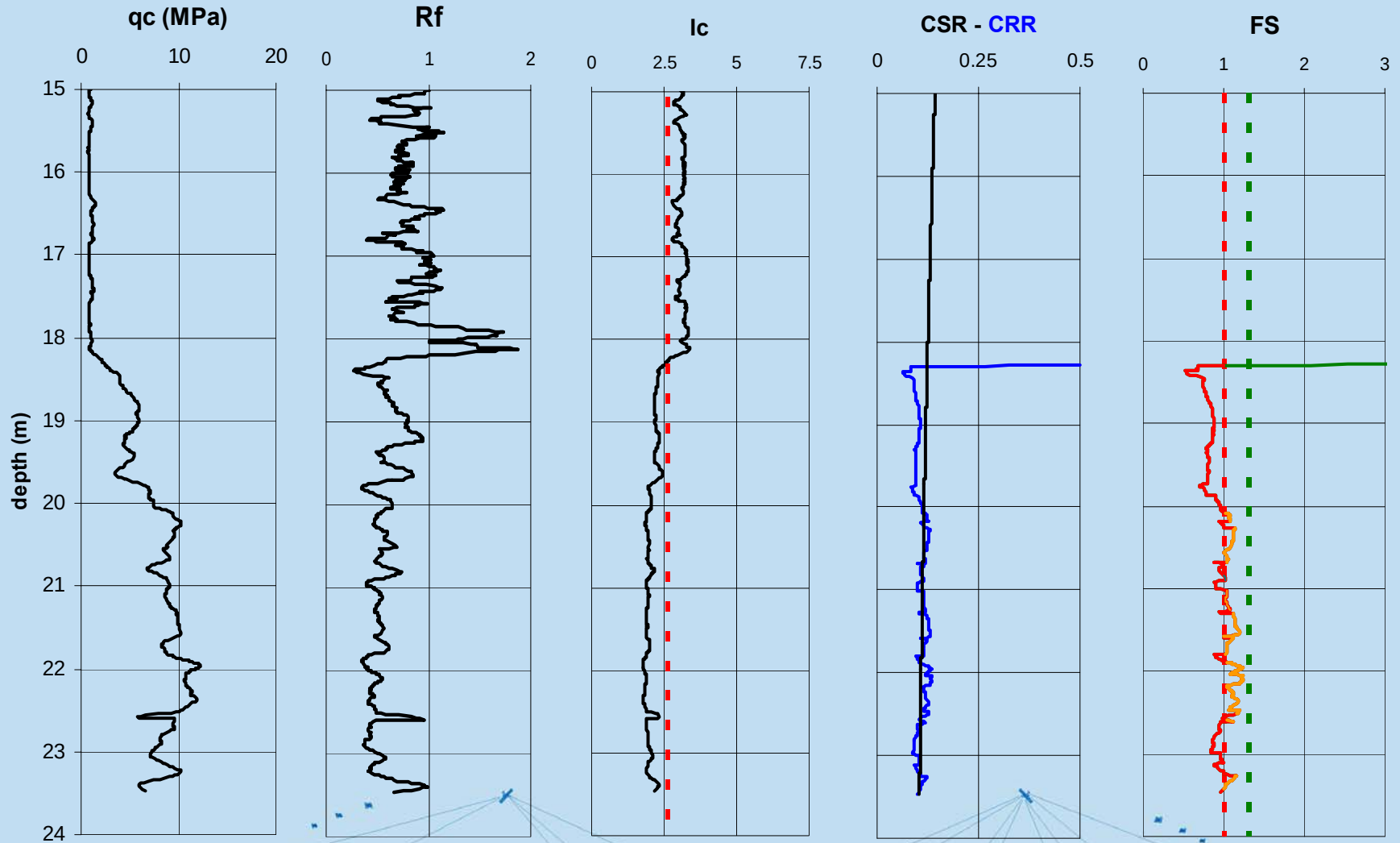


- Port
- Stabilité
digue
existante
- CPTs depuis
plate-forme
autoélévatrice



Exemple N°2 -

Méthode CPT



- Séisme:

- ↓ Magnitude = 7

- ↓ $\tau_{eq}/\sigma'_v = 0.23$

- Tests:

- ↓ échantillon de sable légèrement limoneux

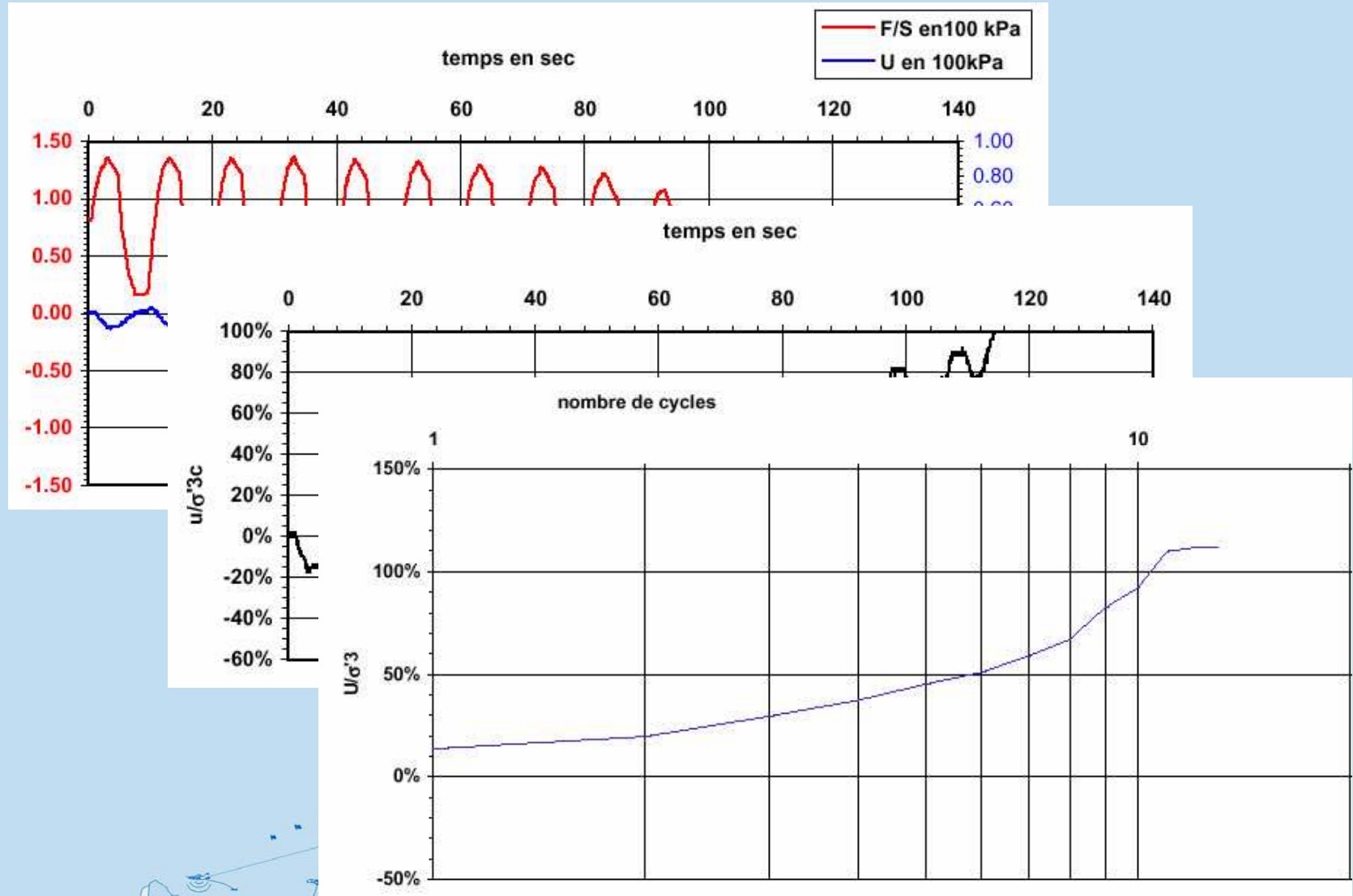
- ↓ densité relative de 35%

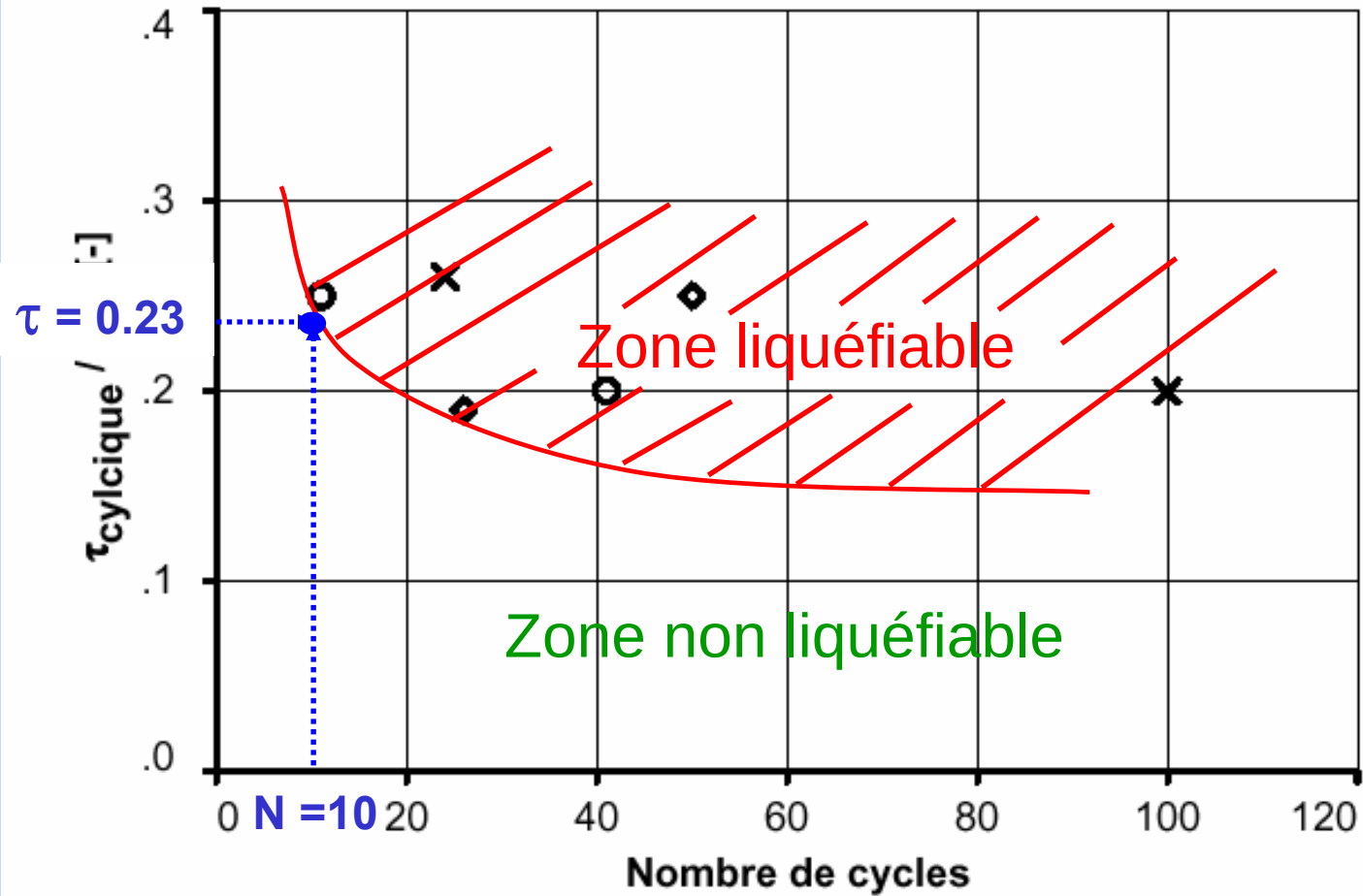
- ↓ profondeurs simulées: 10, 15 et 20m

- ↓ τ_{cycl}/σ'_v de 0.2 et 0.25



Ex. N° 2 - Essais triaxiaux $\tau_{cycl}/\sigma'_v=0.25$





Stratégie de reconnaissance



1) campagne d'essais préliminaire à base de CPT/CPTU (20m +)

- identification des sols
- repérage des couches de sables et silts potentiellement liquéfiables ($I_c < 2.6$)
- repérage des couches de sols cohésifs nécessitant contrôles ($I_c > 2.4$)

2) prise d'échantillons dans les niveaux critiques pour étude détaillée

- sables et silts: pour essais de liquéfaction en laboratoire
- sols argileux: vérification du critère chinois ou/et essais de liquéfaction

3) campagne systématique à base de CPT / CPTU

- définition de l'extension géographique des zones liquéfiables



CONCLUSION



METHODE FACILE D'UTILISATION et PROGRAMMABLE

ESSAI DE PENETRATION STATIQUE ADAPTE AUX SOLS LIQUEFIABLES

SABLES ET SILT LACHES A MOYENNEMENT DENSES

ESSAIS CPT sur MAILLAGE SERRE à COUT RAISONNABLE

**NE REMPLACE PAS DES ETUDES DETAILLEES et les ESSAIS CYCLIQUES DE
LABORATOIRE**



