GUIDE AFPS/CFMS
« Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques »

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION

P. BERTHELOT – F. DURAND

Association régie par la loi du 1.07.1901

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

Dans le Guide Technique ce thème est traité :

-Dans le texte

- **§ 4.3.3 Evaluation du potentiel de liquéfaction**
  - **4.3.3.1 à partir du SPT**
  - **4.3.3.2 à partir du CPT**
  - **4.3.3.3 à partir du CPTU**
  - **4.3.3.4 utilisation de Vs**
  - **4.3.3.5 essais de laboratoire**

-Dans les Annexes

- **Annexe A - Essais de sols**
  - **A.2.7 Les essais au pénétromètre statique (CPT)**
  - **A.2.8 Les essais au piézocône (CPTU)**
- **Annexe E - Liquéfaction**
  - **E.1 Sols sableux**
  - **E.2 Sols fins argileux**
  - **E.3 Méthode découplée**

SOMMAIRE

- 1ère partie
  - Explication théorique essentiellement à partir du CPT et CPTU

- 2ième partie
  - Exemples d'application
    - Avec CPT
    - Avec CPTU

EXPLICATION THÉORIQUE

Essentiellement à partir des essais CPT et CPTU

Sols potentiellement liquéfiables

Eurocode 8 Partie 5 § 4.1.4

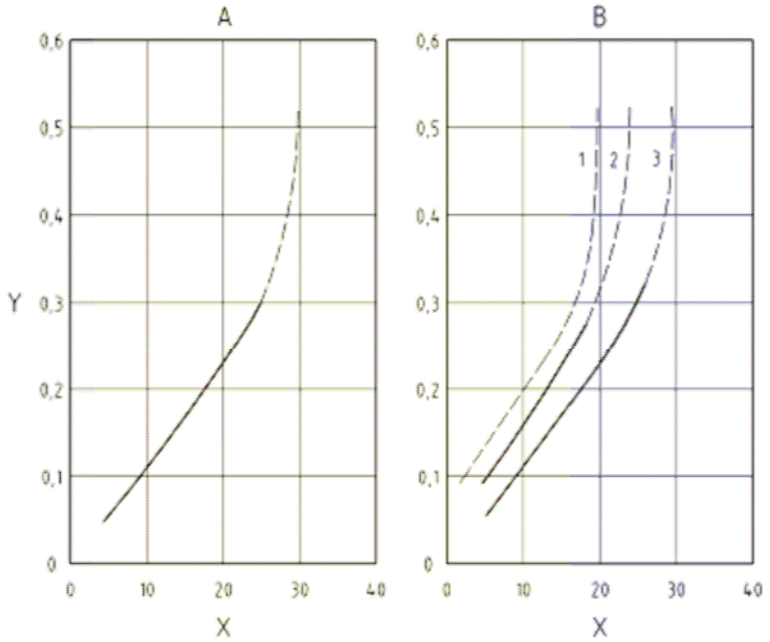
- CPT (très recommandé § 4.2.1); SPT ; courbes granulométriques
- **On néglige le risque de liquéfaction lorsque :**
- ✓ **a_g.S < 0,15.g et lorsque en même temps 1 au moins des conditions est remplie**
  - o **Sables + argile > 20% et IP > 10**
  - o **Sables + silts > 35% et $N_1(60)$ > 20** ***[soit qc1N > 30]***

    soit qc > 3 MPa (avec qc à 10 m de profondeur)
  - o **Sables propres avec $N_1(60)$ > 30** ***[soit qc1N > 150]***

    soit qc > 15 MPa (avec qc à 10 m de profondeur)

- **Si risque de liquéfaction ne peut être négligé, utiliser les diagrammes empiriques de liquéfaction EC8-5 Annexe B normative : SPT ; CPT ; Vs**

Diagrammes basés sur l'indice SPT (EC8-5 Annexe B.2)



Legende

τ_e/σ'_{vo} — contrainte de cisaillement cyclique normalisée

A — sables propres ;

B — sables silteux

courbe 1 : 35 % de fines

courbe 2 : 15 % de fines

courbe 3 : < 5 % de fines

Facteurs correctifs pour différentes Magnitudes

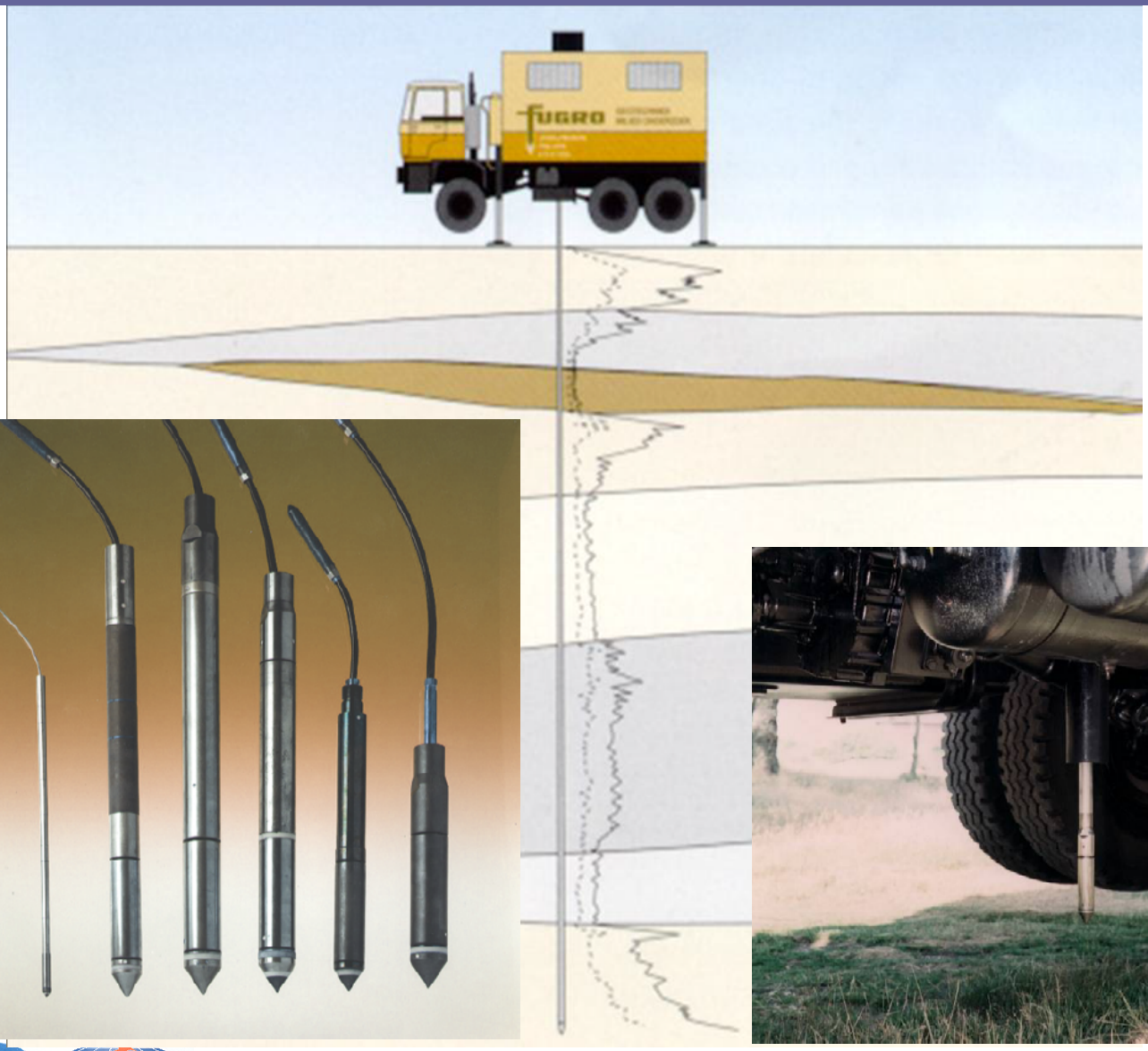
Tableau B.1 — Valeurs du facteur CM

M_s	CM
5,5	2,86
6,0	2,20
6,5	1,69
7,0	1,30
8,0	0,67

pour Ms = 7,5 CM = 1

[EC8-5 Annexe B]

$$Y = \tau_e/\sigma'_{vo} = CRR_{7.5} \qquad X = N_{1(60)}$$



Mesures au CPT

[Avec un camion]

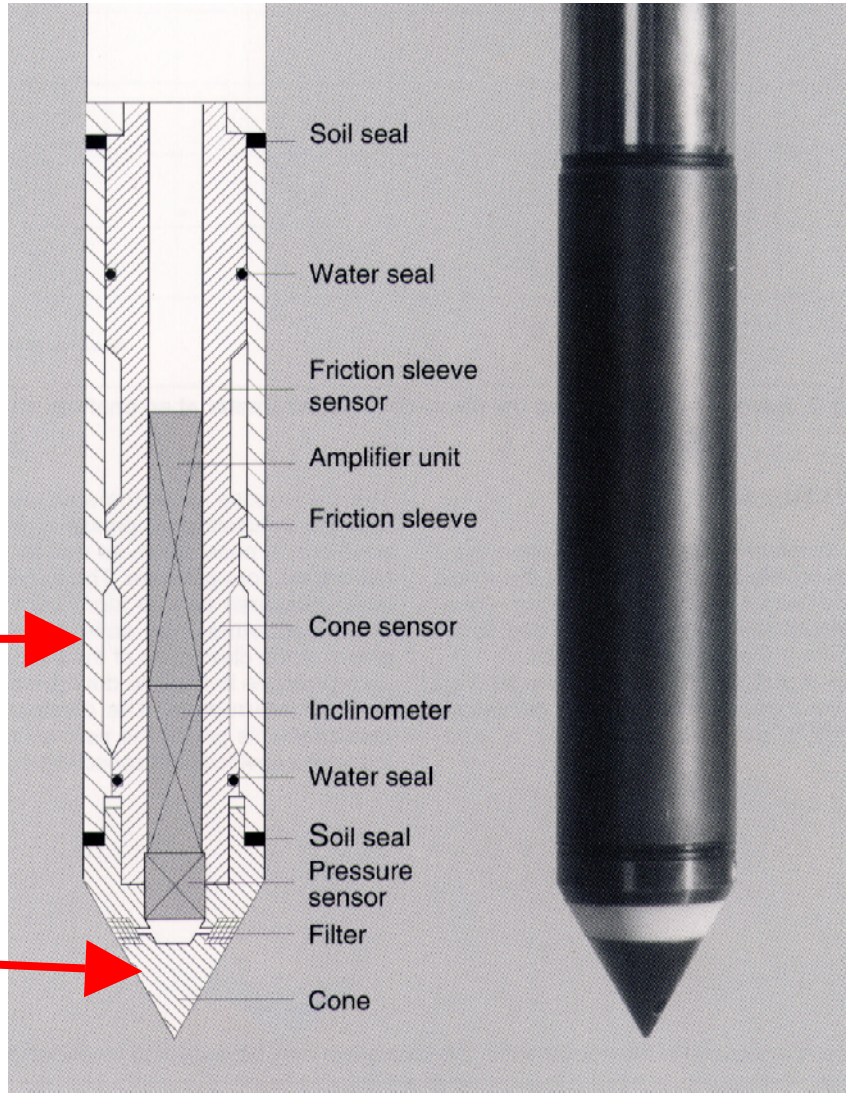
D'après Fugro

Les cônes du CPT

Pointe 10 cm^2 de section (35.7 mm diamètre)

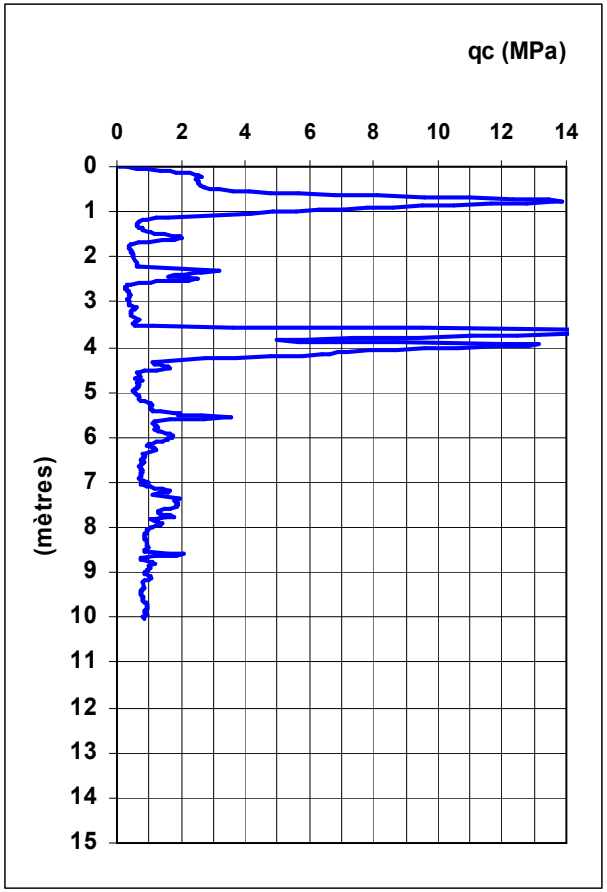
Frottement Latéral sur manchon

Résistance de pointe

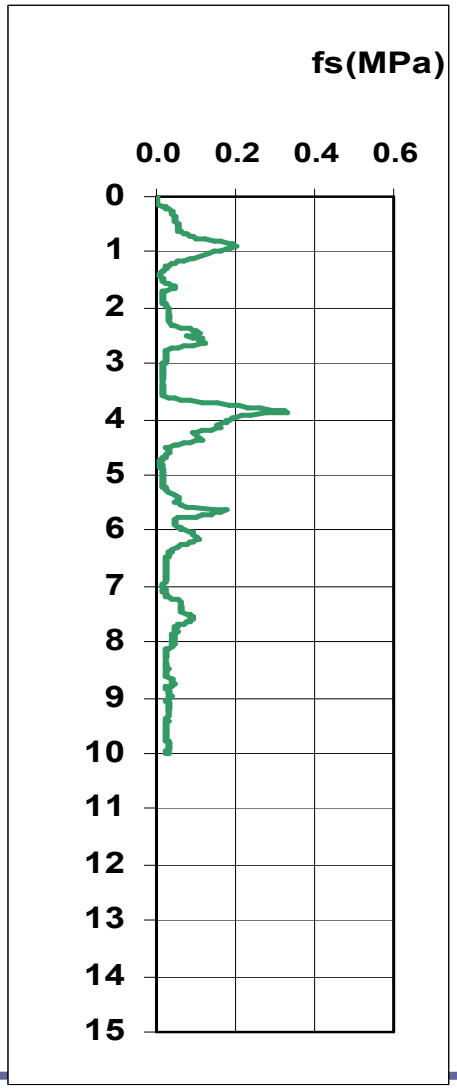


ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

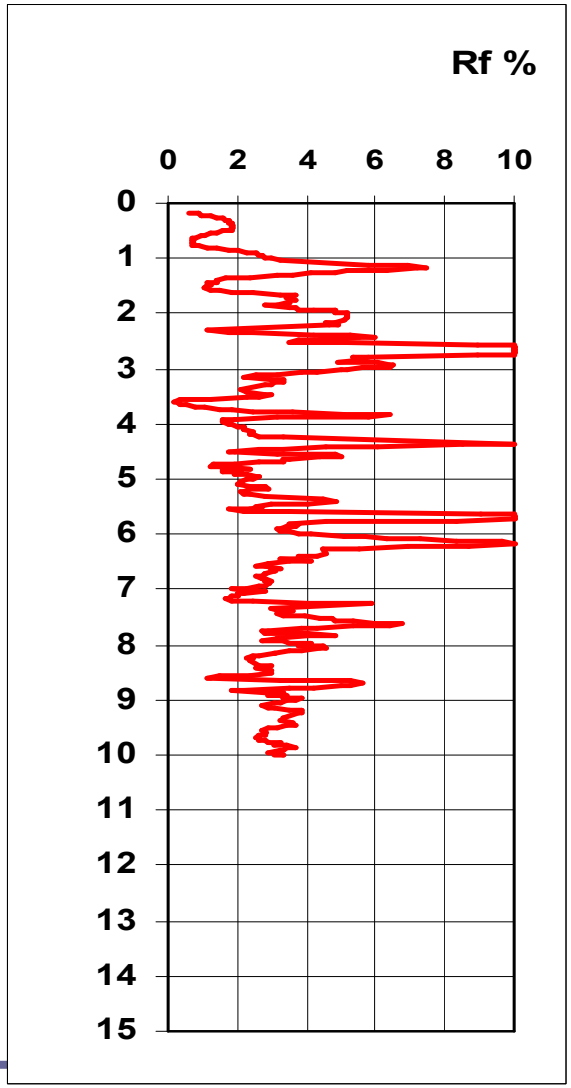
Réaction sur la pointe/section ponte



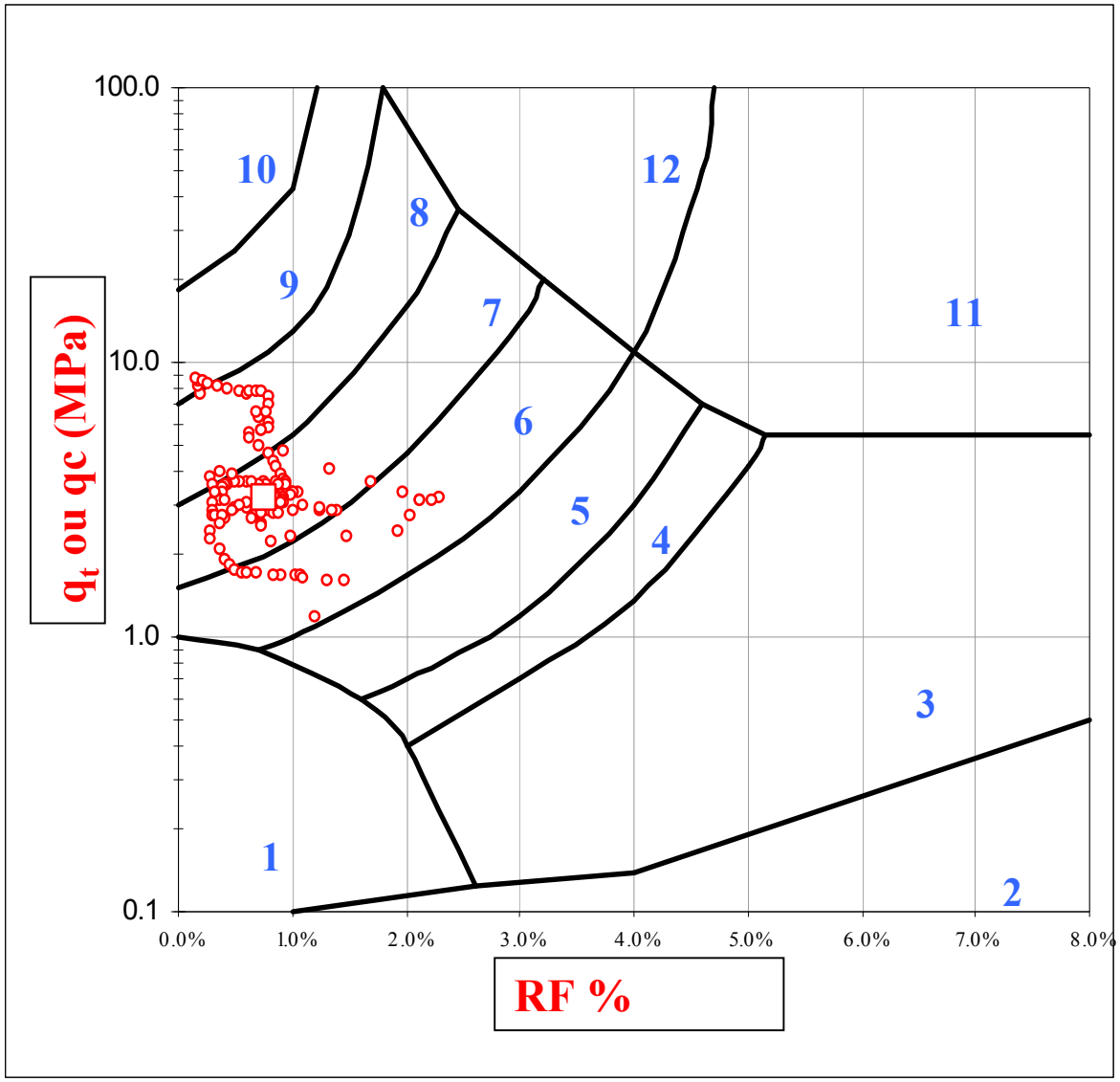
Frottement sur manchon/section manchon



Rapport RF= fs/qc



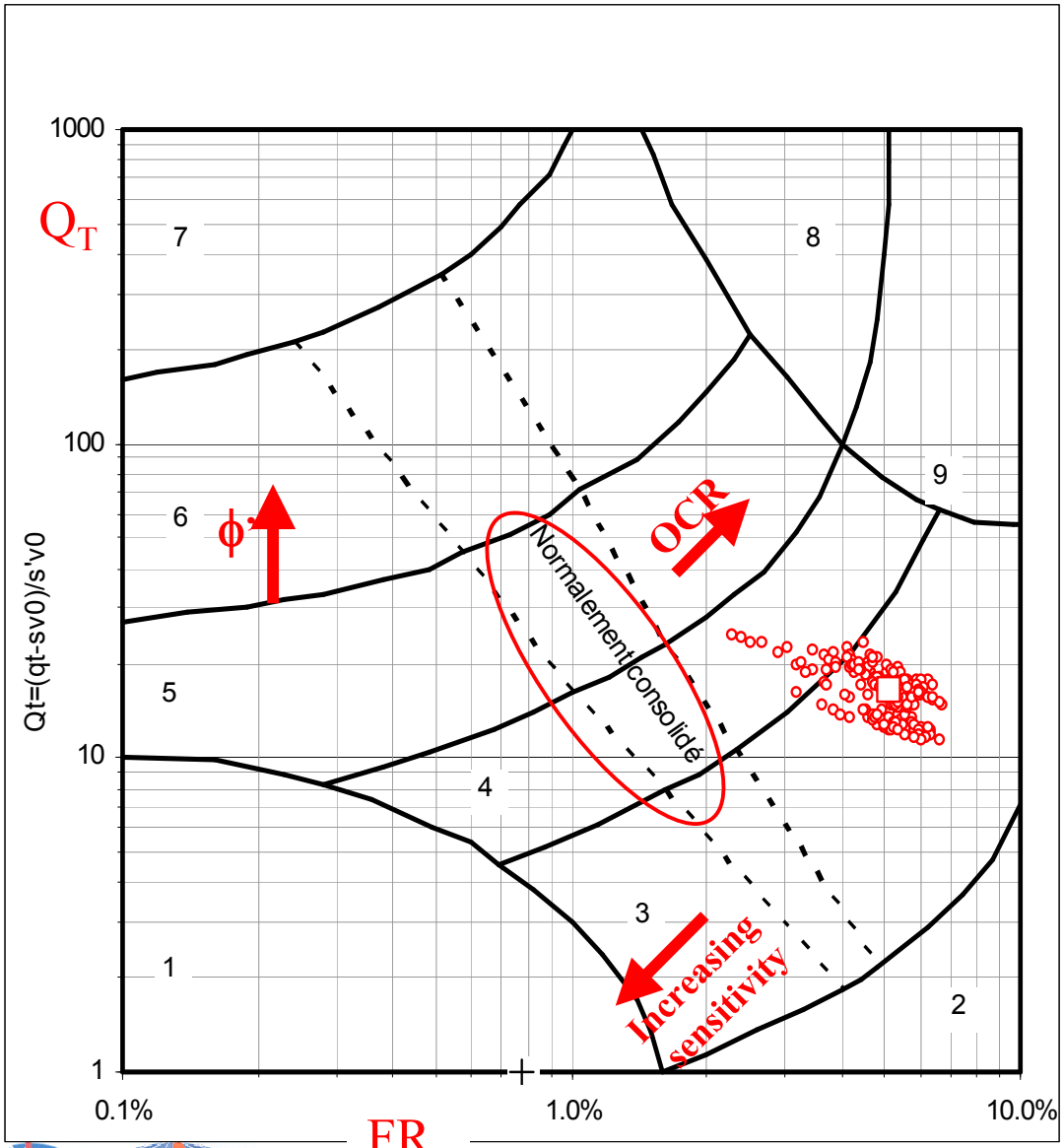
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :



Abaque de ROBERTSON (1986) q_t ou q_c fonction de RF

S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argile
S4	Argile silteuse à argile
S5	Silt argileux à argile silteuse
S6	Silt sablonneux à silt argileux
S7	Sable silteux à silt sablonneux
S8	Sable silteux à sable
S9	Sable
S10	Sable graveleux à sable
S11	Sols fins intermédiaires très raides
S12	Sables cimentés ou dilattants

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :



Abaque normalisé de ROBERTSON (2009)
Q_T fonction de FR

$Q_T = (q_T - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$
$FR = fs/(q_T - \sigma_{vo})$

S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argiles : argile à argile silteuse
S4	Silts : silts argileux à argile silteuse
S5	Sables : Sables silteux à silts sableux
S6	Sables : Sables propres à sables silteux
S7	Sables à sable graveleux
S8	Sols fins intermédiaires très raides
S9	Sables cimentés ou dilatants

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

Il faut toujours vérifier les caractéristiques et tolérances géométriques principales des pointes et des manchons :

a) ***Pointes électriques et pointes électriques piézocône 36mm :***

Diamètre du cône dc = 35.75 mm **35.4 ≤ dc ≤ 36.0 mm**
Diamètre du manchon ds = 36.1 mm **35.5 ≤ ds ≤ 36.1 mm**
Tolérance à vérifier au pied à coulisse : $dc \leq ds \leq dc + 0.35\ mm$
Angle au sommet $\alpha = 60° +/- 5°$

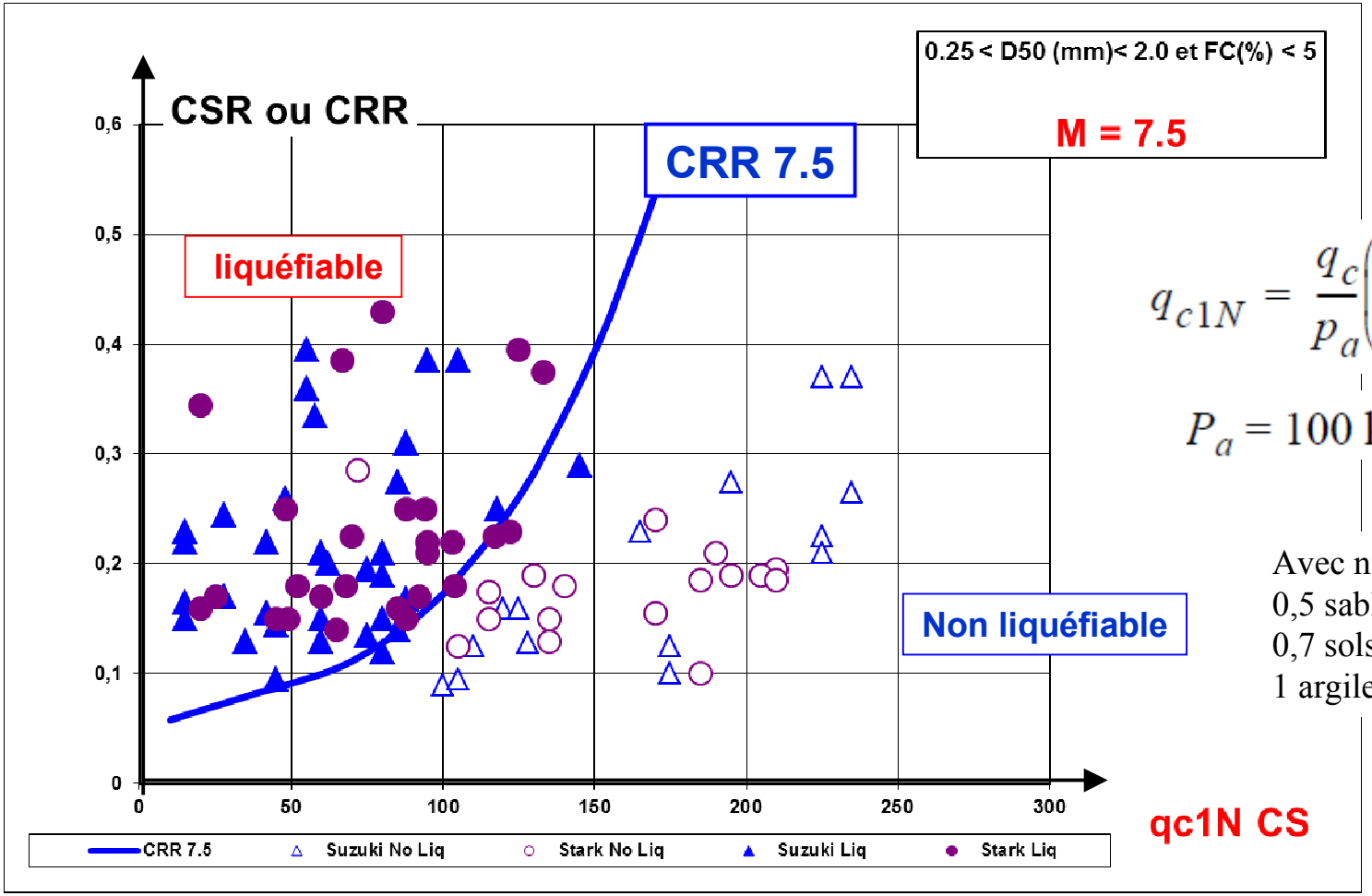
b) Pointes électriques et pointes électriques piézocône 44mm :

Diamètre du cône dc = 43.7 mm **43.2 ≤ dc ≤ 43.7 mm**
Diamètre du manchon ds = 43.9 mm **43.2 ≤ ds ≤ 43.9 mm**
Tolérance à vérifier au pied à coulisse : $dc \leq ds \leq dc + 0.35\ mm$
Angle au sommet $\alpha = 60° +/- 5°$

Attention : les manchons s'usent plus vite que les pointes; donc mauvaises lectures de f_s et donc mauvaises appréciations de RF et donc mauvais classement du sol.

Par exemple: un sol sableux limono argileux peut apparaitre « que » sableux et ainsi être classé « potentiellement liquéfiable ».

Diagramme basé sur la résistance CPT (EC8-5 annexe B; diagramme non fourni)



$$q_{c1N} = \frac{q_c}{p_a}\left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}}\right)^n$$

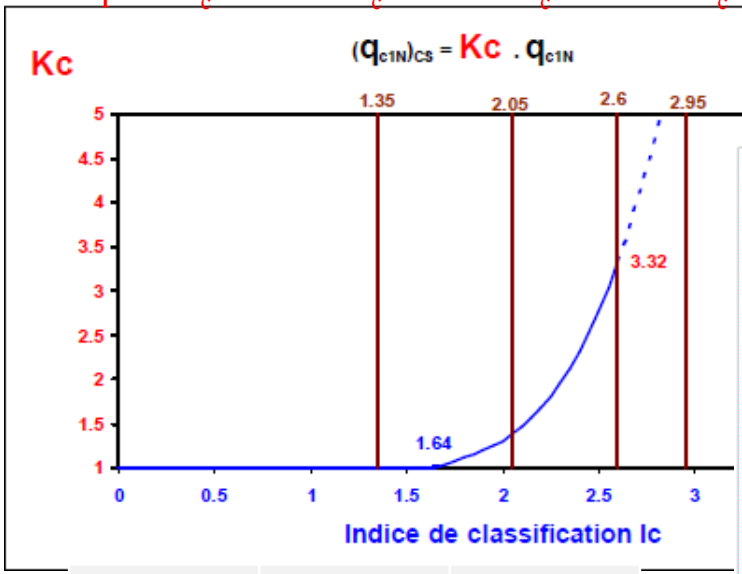
$$P_a = 100 \text{ kPa}$$

Avec n :
0,5 sables propres
0,7 sols intermédiaires
1 argiles

D'après NCEER, 2001

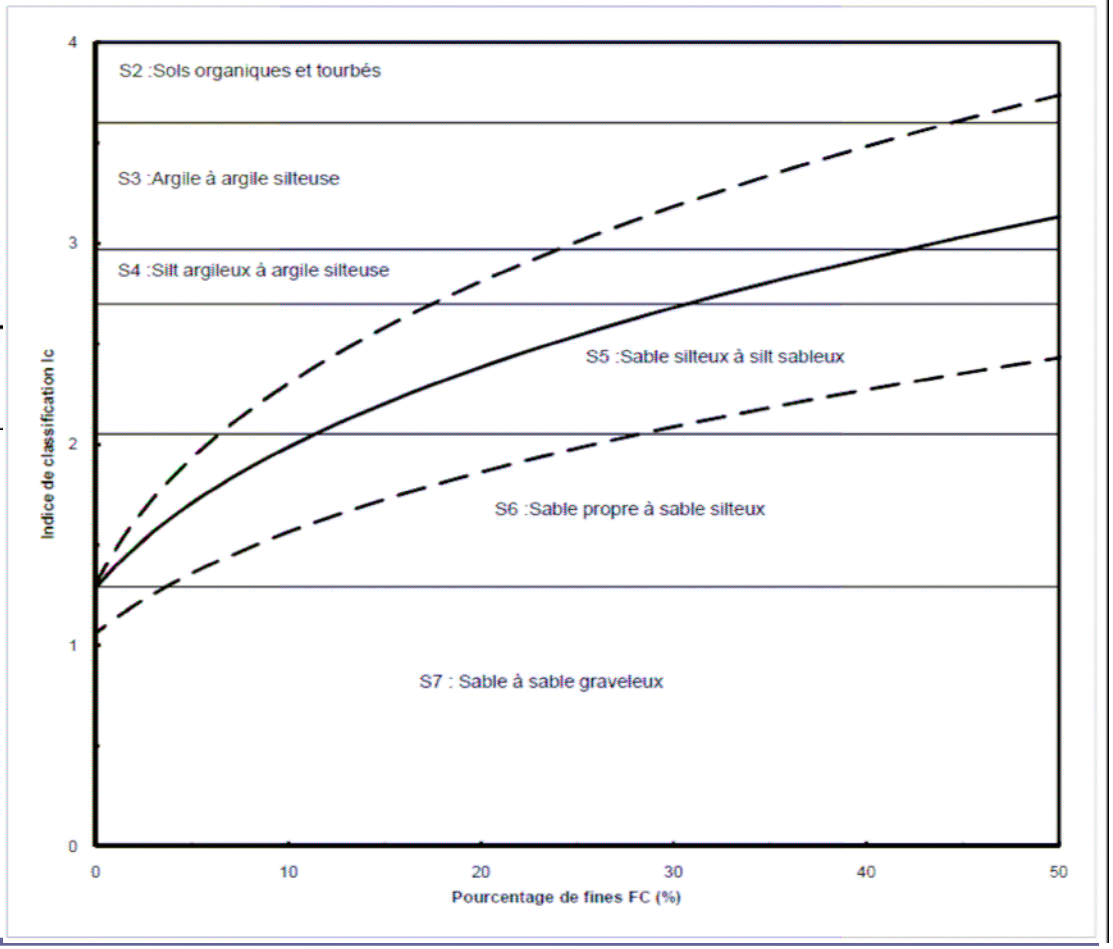
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

- pour $I_c \leq 1.64$ $K_c = 1.0$
- pour $I_c > 1.64$ $K_c = -0.403\ I_c^4 + 5.581\ I_c^3 - 21.631\ I_c^2 + 33.75\ I_c - 17.88$



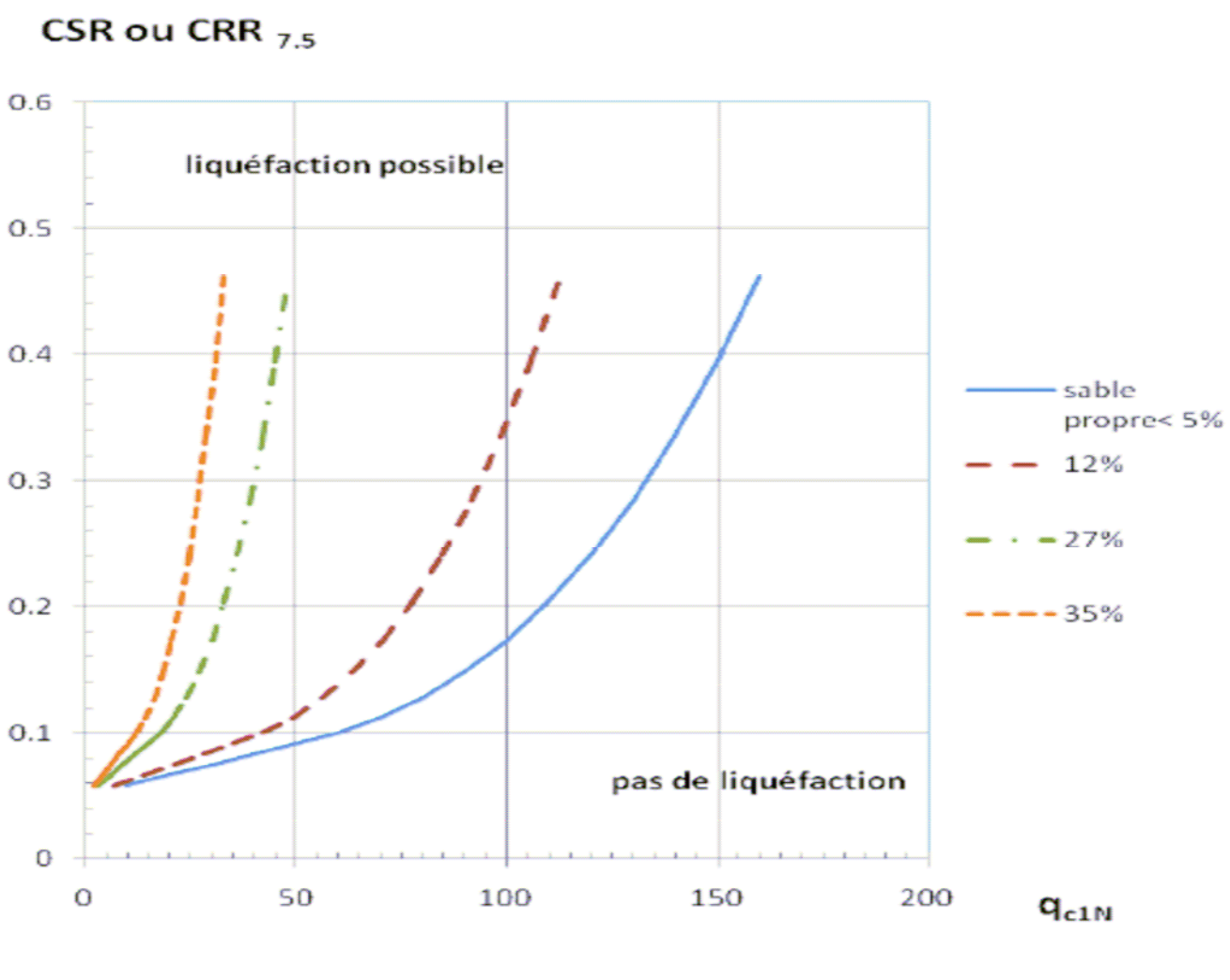
$$F_c(\%) = 1{,}75 \cdot I_c^3 - 3{,}7$$

Ic	Fc %	Kc
1,64	5%	1
2,05	12%	1,4
2,6	27%	3,32
2,7	35%	-



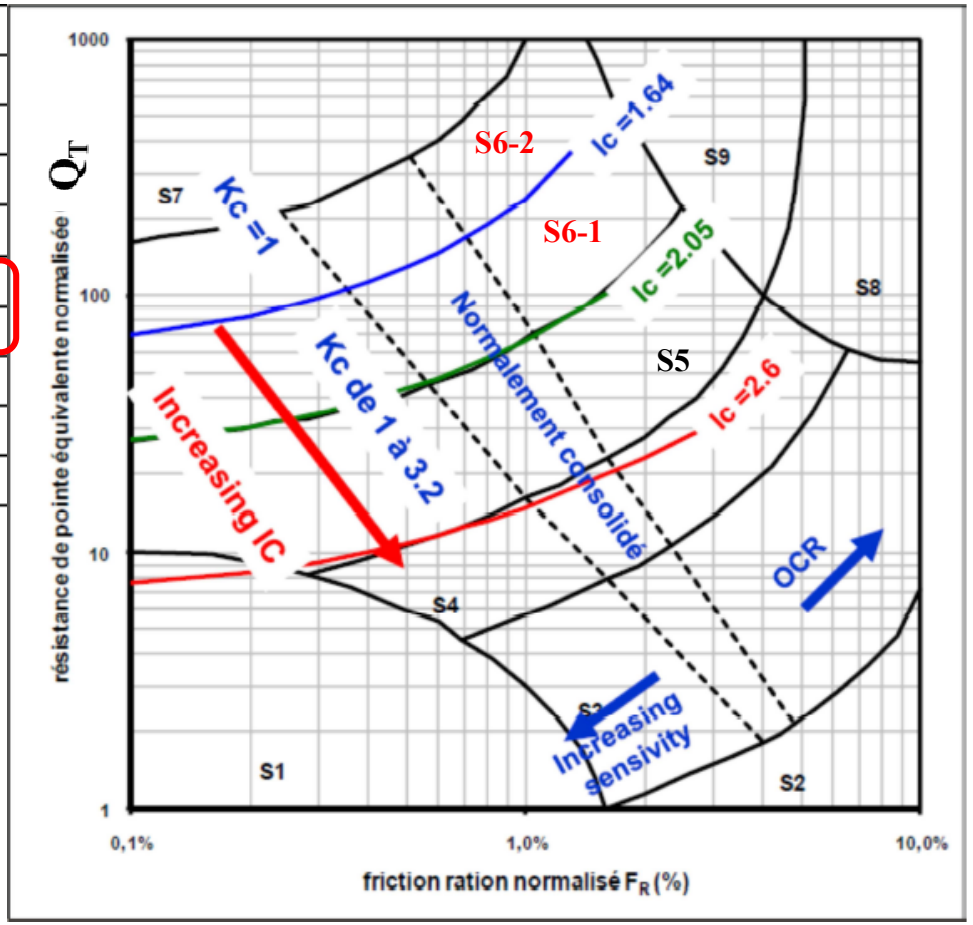
D'après Lunne, 1997

Diagramme basé sur la résistance CPT et sur % de fines



ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argiles : argile à argile silteuse
S4	Silts : silts argileux à argile silteuse
S5	Sables : Sables silteux à silts sableux
S6-1	Sables silteux (Fc > 5%)
S6-2	Sables (Fc < 5%)
S7	Sable à sable graveleux
S8	Sols fins intermédiaires très raides
S9	Sables cimentés ou dilatants



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

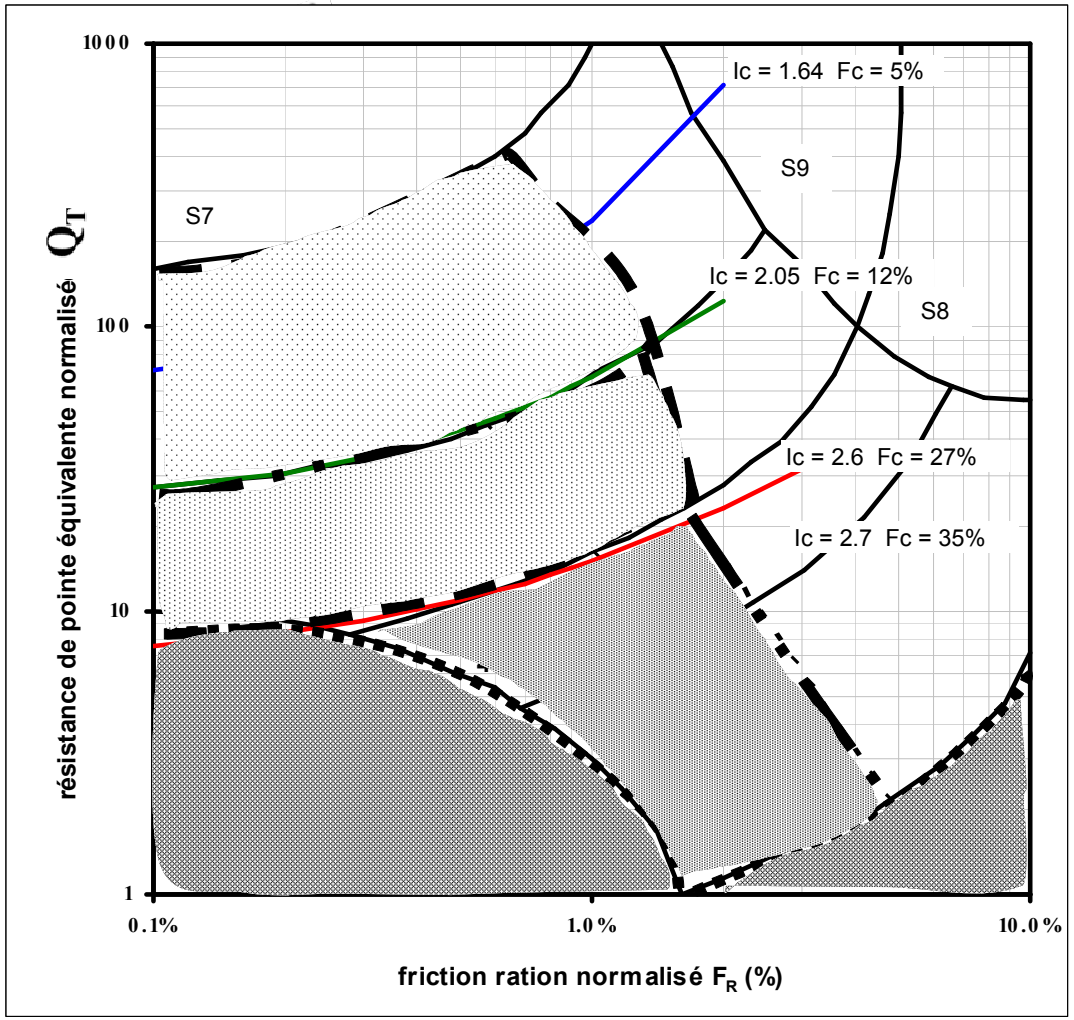
Avec :

- $Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / P_a [(P / \sigma'_{vo})^n]$
- $F = [f_z / q_c - \sigma_{vo})] \cdot 100\%$

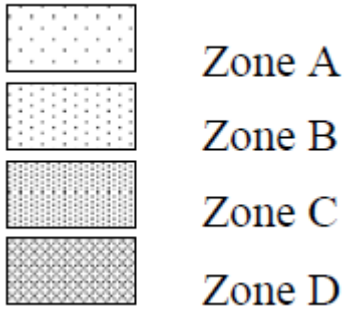
Avec n=1 on retrouve la valeur de Q_T habituelle

Q_T : résistance normalisée : $Q_T = (q_c - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$

F_R : rapport de frottement normalisé : $F_R = f_s/(q_c - \sigma_{v0})$



Abaque Robertson Q_T et FR , classification des sols et zones A B C et D



S1	Sol fin argile ou silt sensible
S2	Sols organiques et tourbes
S3	Argiles : argile à argile silteuse
S4	Silts : silts argileux à argile silteuse
S5	Sables : Sables silteux à silts sableux
S6-1	Sables silteux (Fc > 5%)
S6-2	Sables (Fc < 5%)
S7	Sables à sable graveleux
S8	Sols fins intermédiaires très raides
S9	Sables cimentés ou dilatants

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

			Utilisation du CPT électrique pointe + manchon			
Classification ROBERTSON	Zones	Description du sol	Ic	Fc	Kc	études complémentaires
S6-2	A	Sables propres	Ic < 1.64	< 5%	1	
S6-1		Sables silteux	1.64 < Ic < 2.05	5% < Fc < 12%	1 < Kc < 1.4	
S5	B	Sables silteux à silts sableux	2.05 < Ic < 2.6	12% < Fc < 27%	1.4 < Kc < 3.32	Utilisation du CPTU ou critère chinois
S4	C	Silt argileux à argiles silteuses	2.6 < Ic < 2.8	27% < Fc < 35%		Utilisation du CPTU ou critère Chinois
S3		Argiles silteuses à argiles	Ic > 2.8	Fc > 35 %		Utilisation du CPTU ou critère Chinois
S1 et S2	D	Sol fin sensible à Sols organiques	Voir Abaque de Robertson			étude spécifique en laboratoire de dégradation cyclique de leur résistance au cisaillement

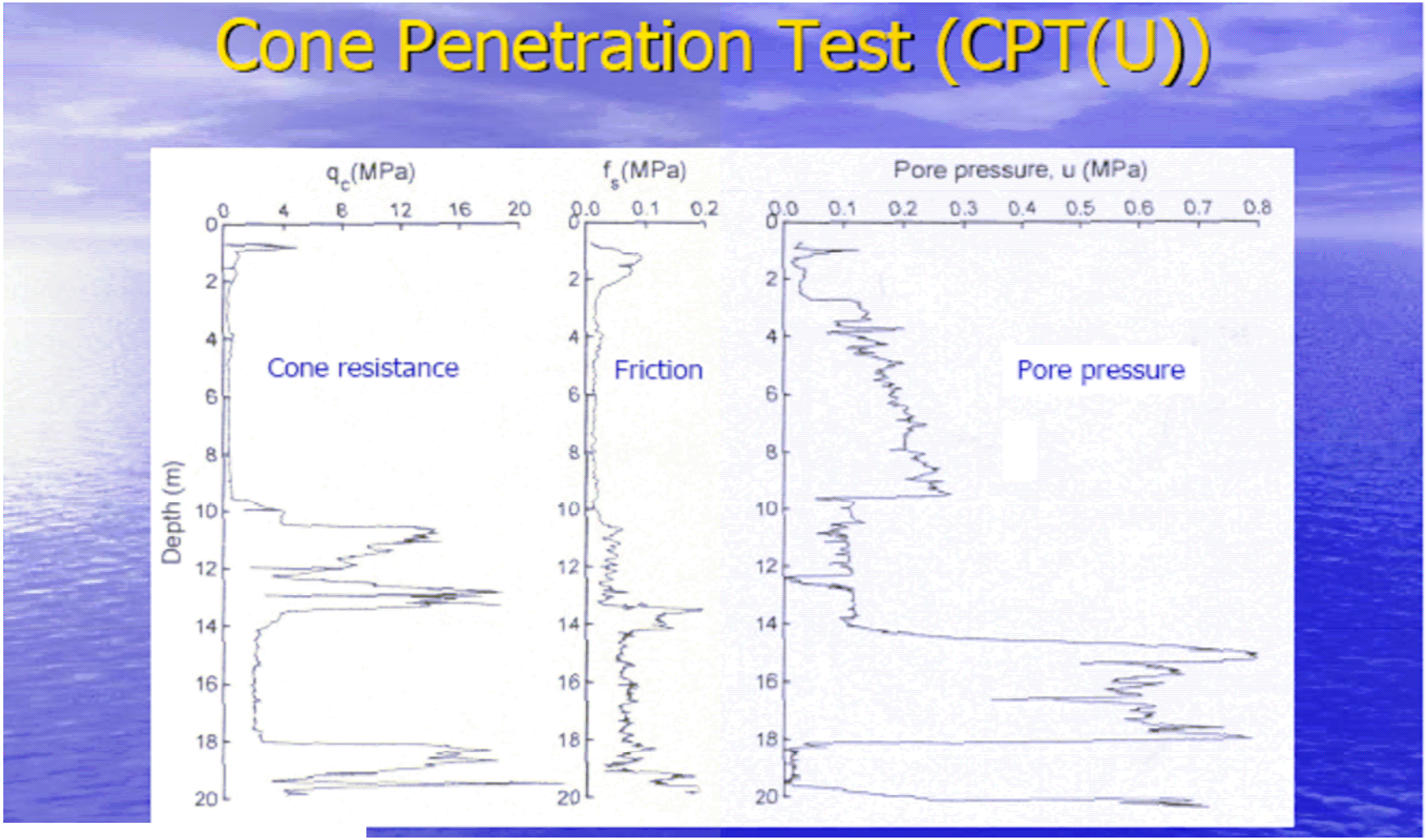
Correspondances entre Zones A, B, C, D, I_c, F_c, et K_c et utilisation du CPTU

Les cônes pour CPTU (ou piézocône)

à tout moment mesure de la pression interstitielle générée par l'enfoncement

+ essais de dissipation à l'arrêt de pénétration

Les différents types de cônes de 1 à 20 cm²

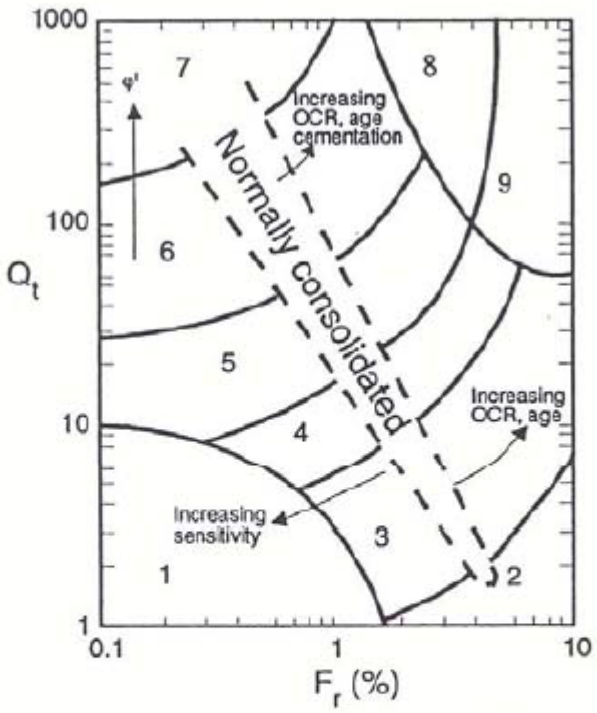


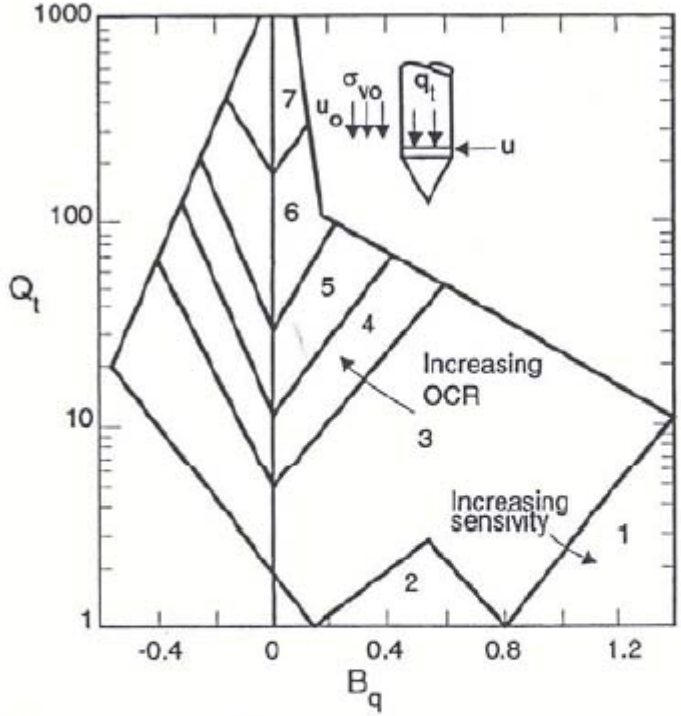
Bq = $(u-u_0/q_T-\sigma_{v0})$ complète FR

u =pression interstitielle mesurée u0 =pression d'eau ambiante

q_T =résistance de pointe corrigée σ_{v0} =pression totale poids des terres

Abaque de ROBERTSON (janvier 2009)

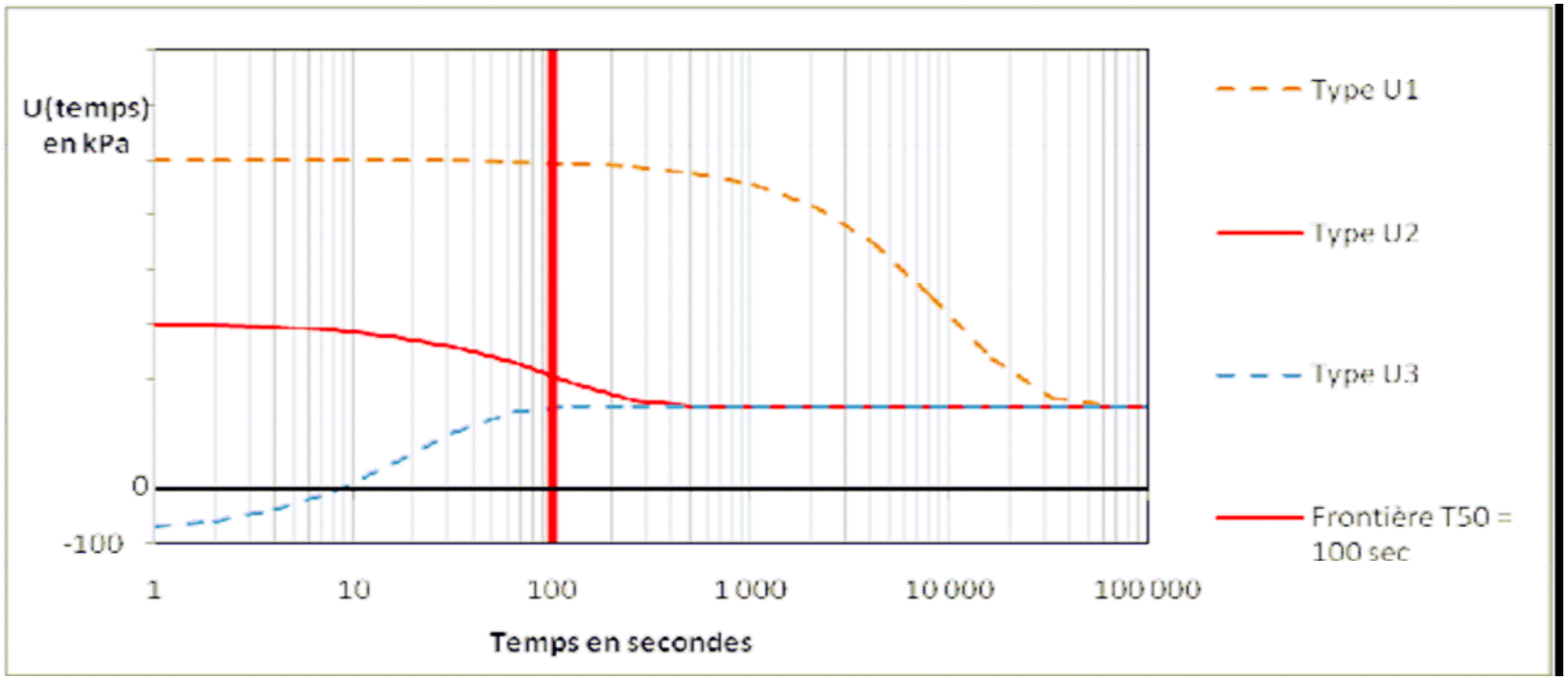




$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \qquad B_q = \frac{u_2 - u_o}{q_t - \sigma_{vo}} \qquad F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

Zone	Soil behaviour type
1.	Sensitive, fine grained;
2.	Organic soils-peats;
3.	Clays-clay to silty clay;
4.	Silt mixtures clayey silt to silty clay
5.	Sand mixtures; silty sand to sand silty
6.	Sands: clean sands to silty sands
7.	Gravelly sand to sand;
8.	Very stiff sand to clayey sand
9.	Very stiff fine grained

Piézocône – Essais de dissipation



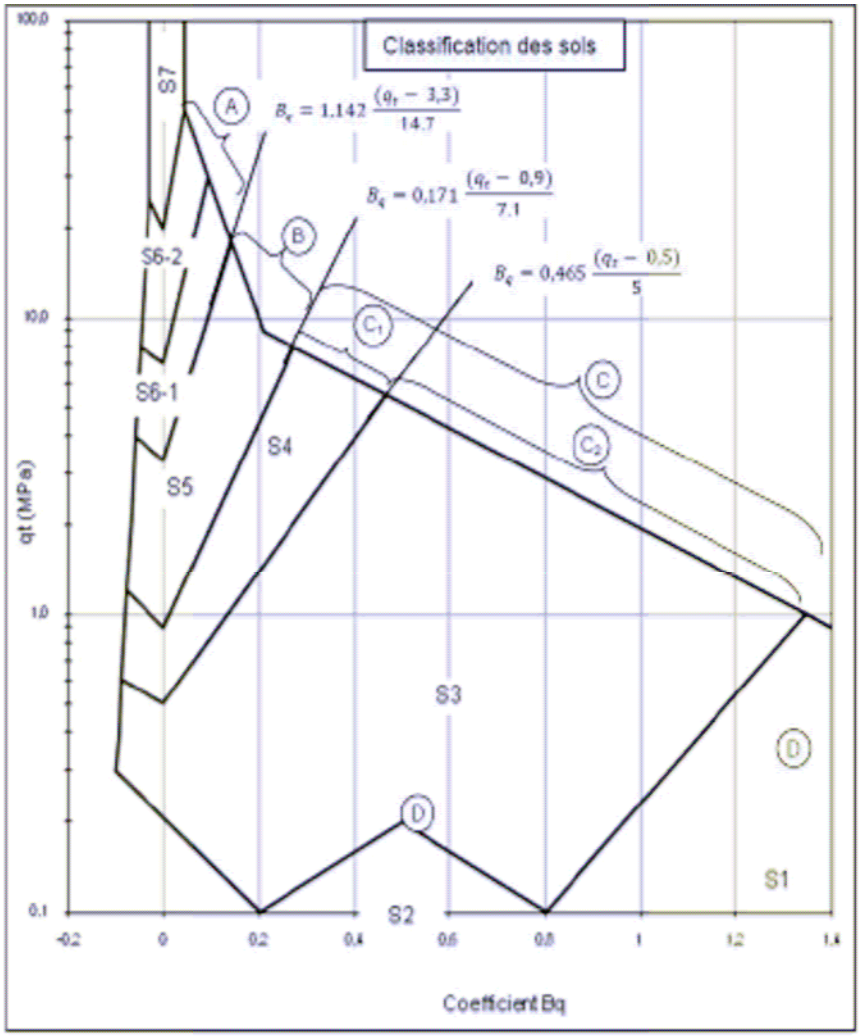
Type U1 courbe d'un silt contractant à une argile contractante — $\Delta u>0$ et t_{50} >1000 secondes

Type U2 courbe d'un sable à un silt contractant — **$\Delta u>0$ et t_{50} < 100 secondes**

Type U3 courbe d'un sable à un silt sableux dilatant — $\Delta u<0$ et t_{50} < 100 secondes

t_{50} = 100 s correspond approximativement à D15 = 5µm

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :



Synthèse à partir du CPTU (Bq et qt)

Zone A

Bq<1.142(qt-3.3)/14.7

analyse basée sur critères CPT

Zones B et C1

1.142(qt-3.3)/14.7<Bq<0.465(qt-0.5)/5

et si t50 >100 sec et critère Chinois

=> pas de risque de liquéfaction

Zone C2

Bq>0.465(qt-0.5)/5

=> risque de liquéfaction négligeable

Zone D

pas de risque de liquéfaction
mais dégradation cyclique de la résistance au cisaillement du sol

=> étude spécifique en laboratoire

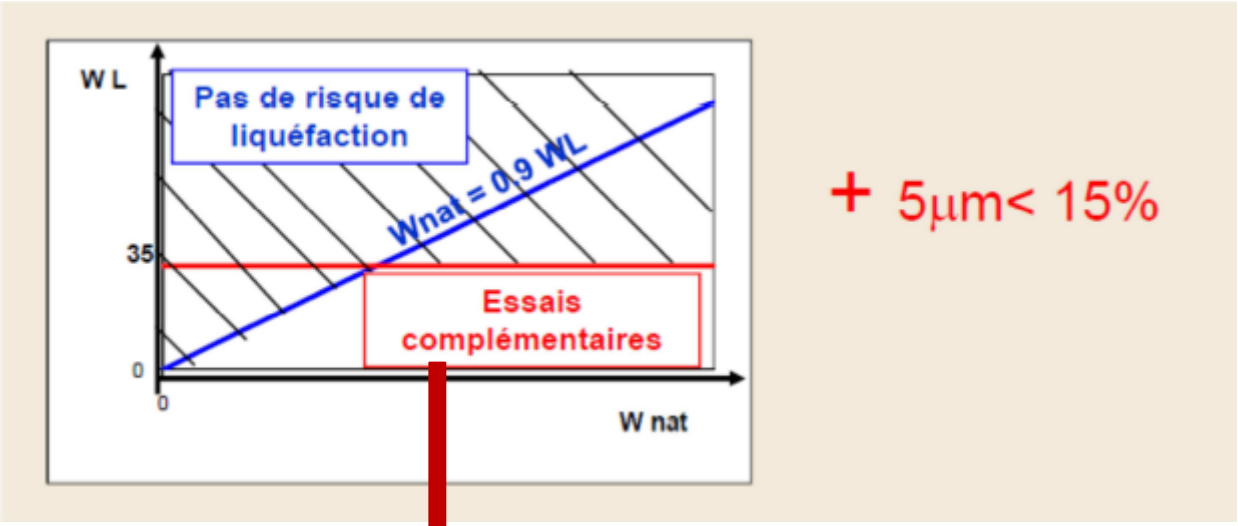
Dans Zones B et C1 : utilisation du critère Chinois

Si 1 des 3 conditions n'est pas remplie, le risque de liquéfaction peut être écarté :

-Particules 5 µm < 15% et

-Limite de liquidité WL < 35% et

-Teneur en eau naturelle Wnat > 0,9.WL



Essais triaxiaux cycliques de préférence

Diagramme basé sur la vitesse Vs (EC8-5 Annexe B.4; évoqué mais non fourni)

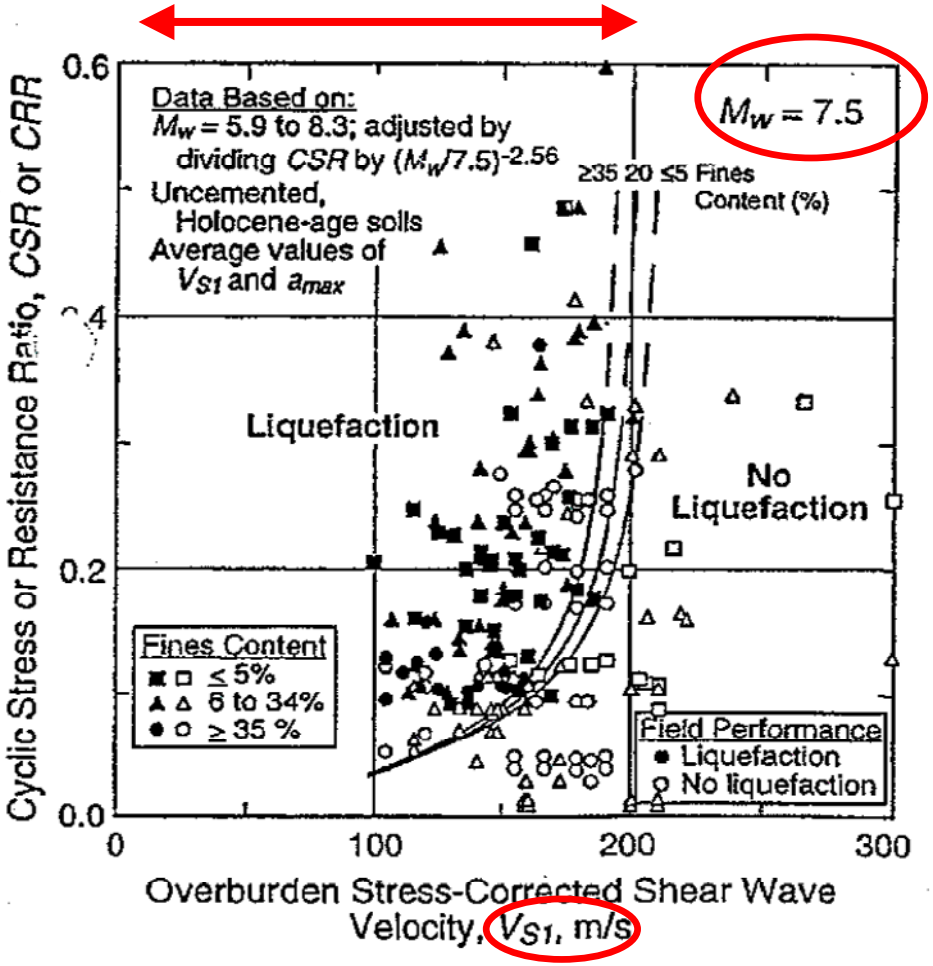


FIG. 9. Liquefaction Relationship Recommended for Clean, Uncemented Soils with Liquefaction Data from Compiled Case Histories (Reproduced from Andrus and Stokoe 2000)

Correction pourcentage de fines:

≤ 5%

20%

≥ 35%

$$V_{s1} = V_s \cdot [Pa/\sigma'_{vo}]^{0.25}$$

A chaque profondeur on calcule :

$$FS = [CRR_{7.5} / CSR] \, . \, CM$$

En fait la correction devrait être appliquée au CSR et non au CRR alors $CSR = CSR_{7.5} / CM$

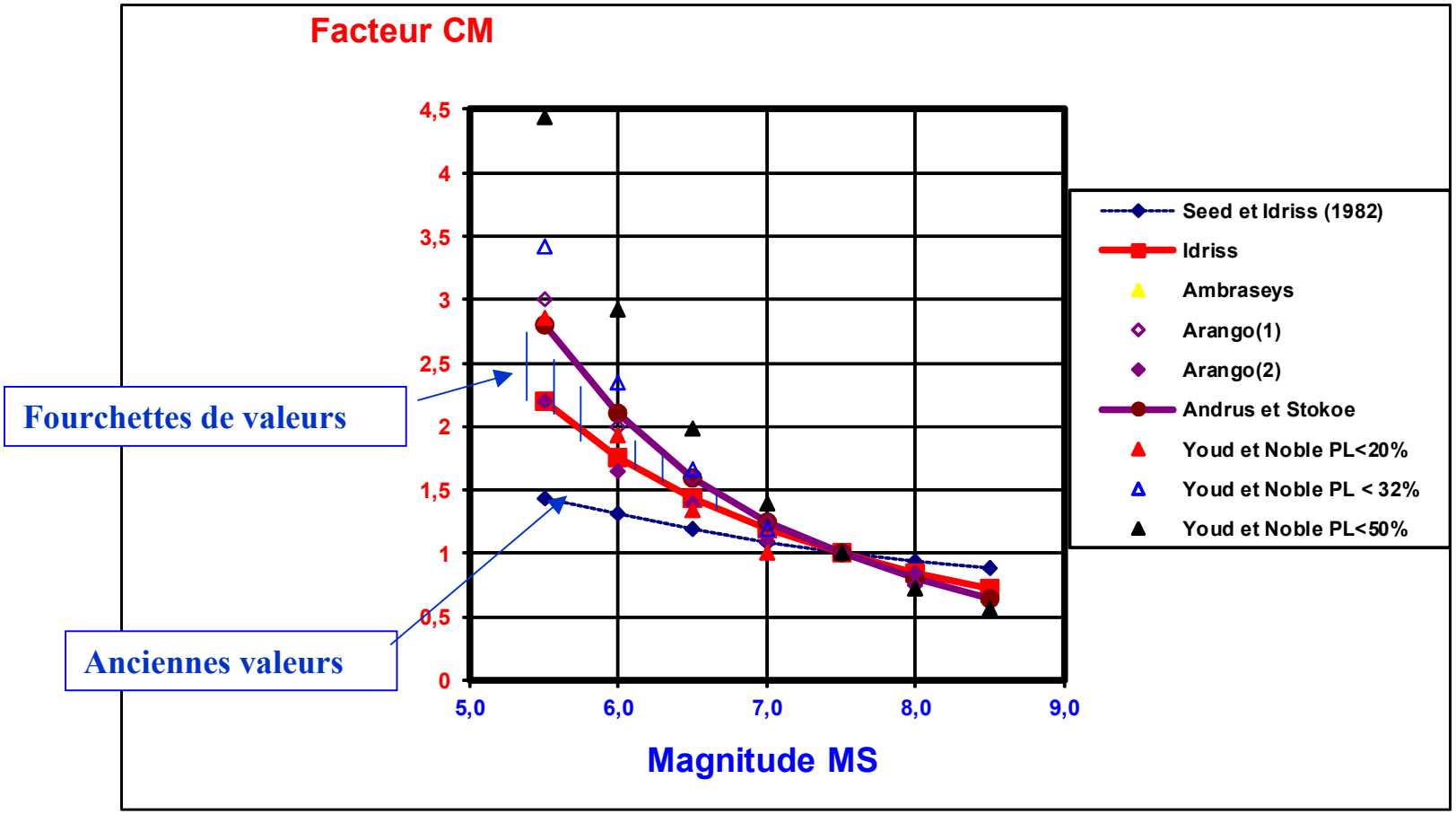
Avec CM coefficient correcteur qui ne dépend que de la magnitude MS (EC8-5 Annexe B) :

MS	CM d'après Eurocode 8-5	CM d'après NCEER
5,5	2,86	2,20
6	2,20	1,76
6,5	1,69	1,44
7	1,30	1,19
7,5	1,00	1,00
8	0,67	0,84

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

$FS = (CRR_{7.5}/CSR) \cdot CM$

FS coefficient de sécurité pour un séisme de magnitude MS



EXEMPLES D'APPLICATION

Centre Commercial

Sud-Ouest de la France

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

Hypothèses Mg = 5.5 et a_N = 2.1 m/s²

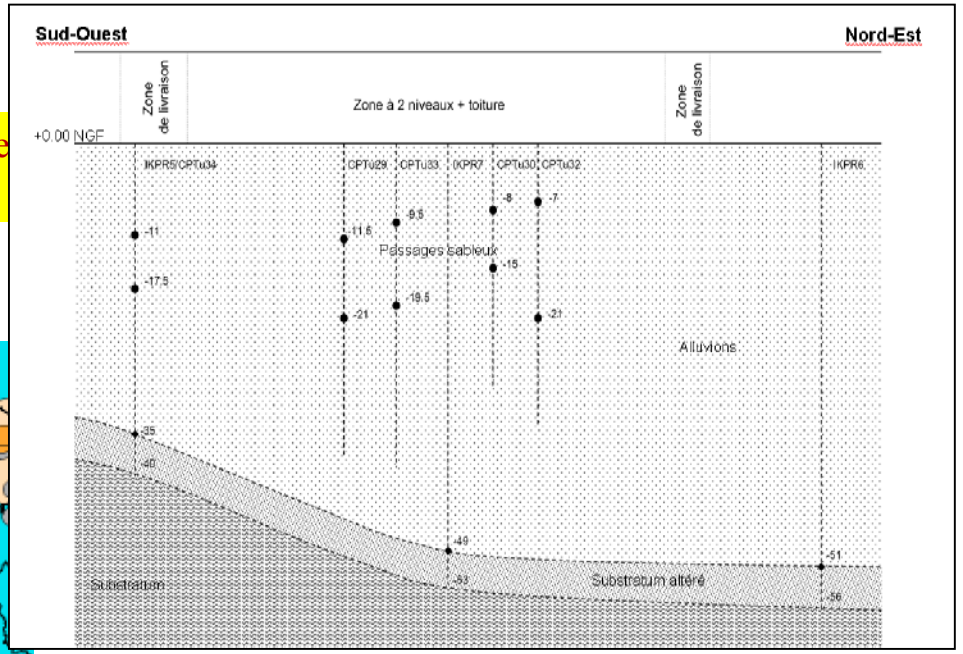
Les PS 92

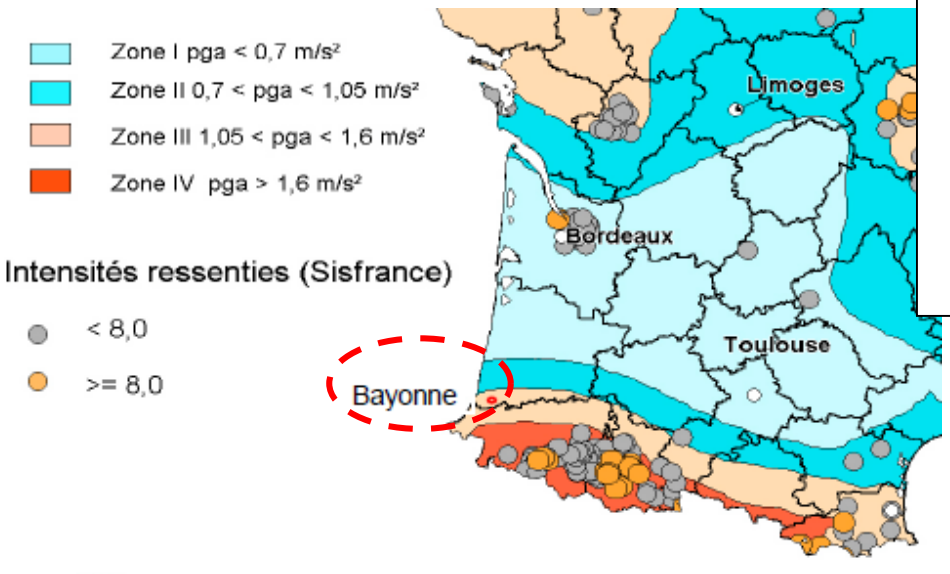
CM = 2.2 et F = 1.33

Les Eurocodes 8

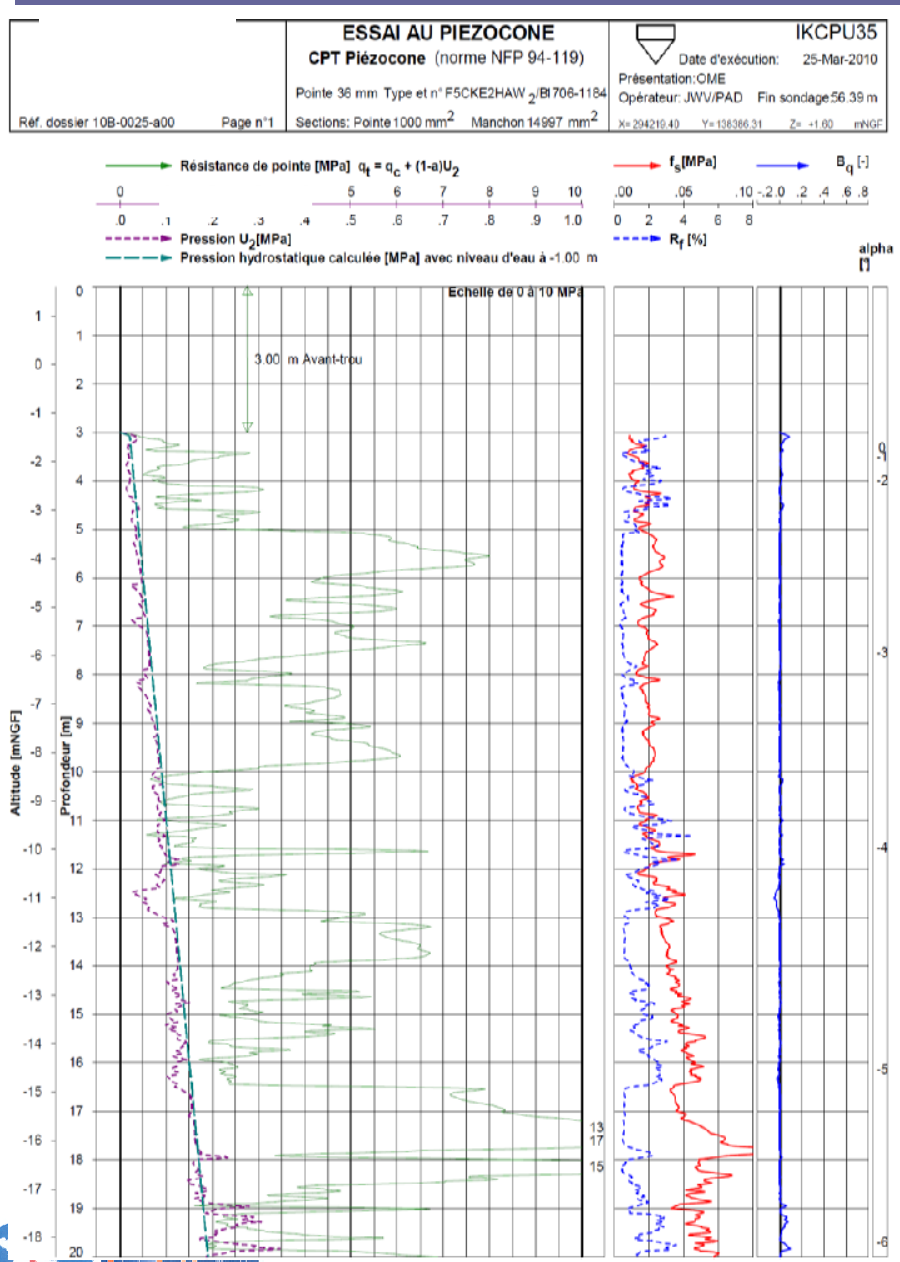
CM = 2.86 et F = 1.25

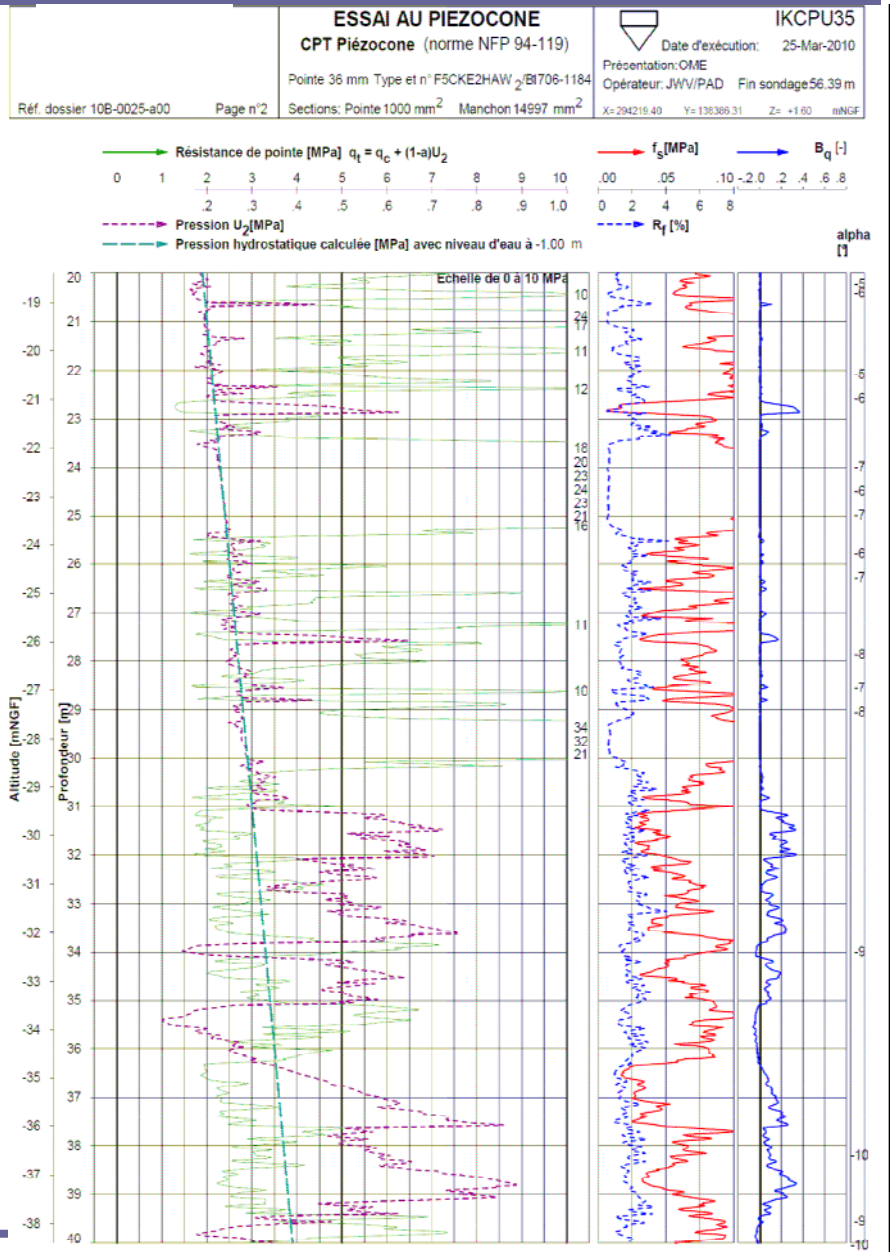
Gain total pour cette magnitude de 1.22



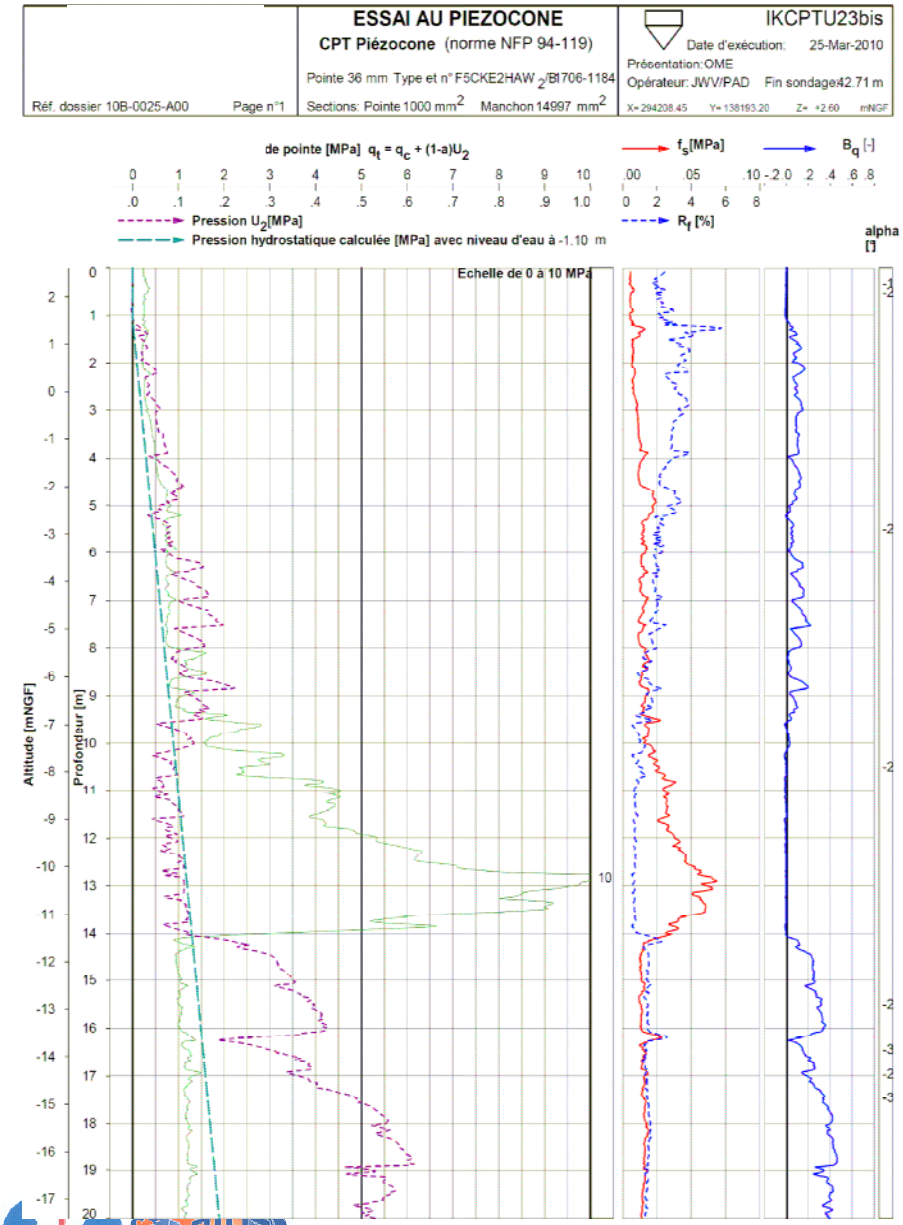


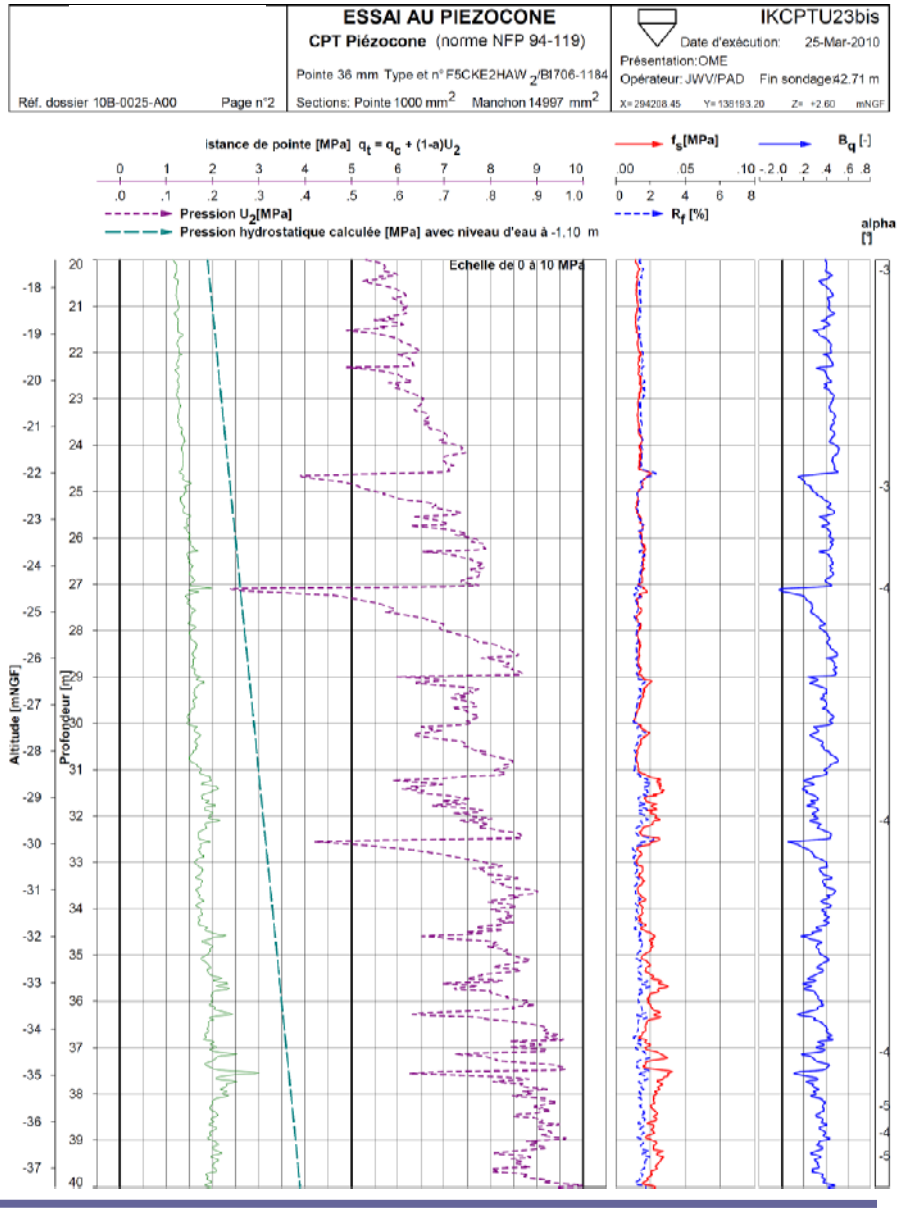
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :



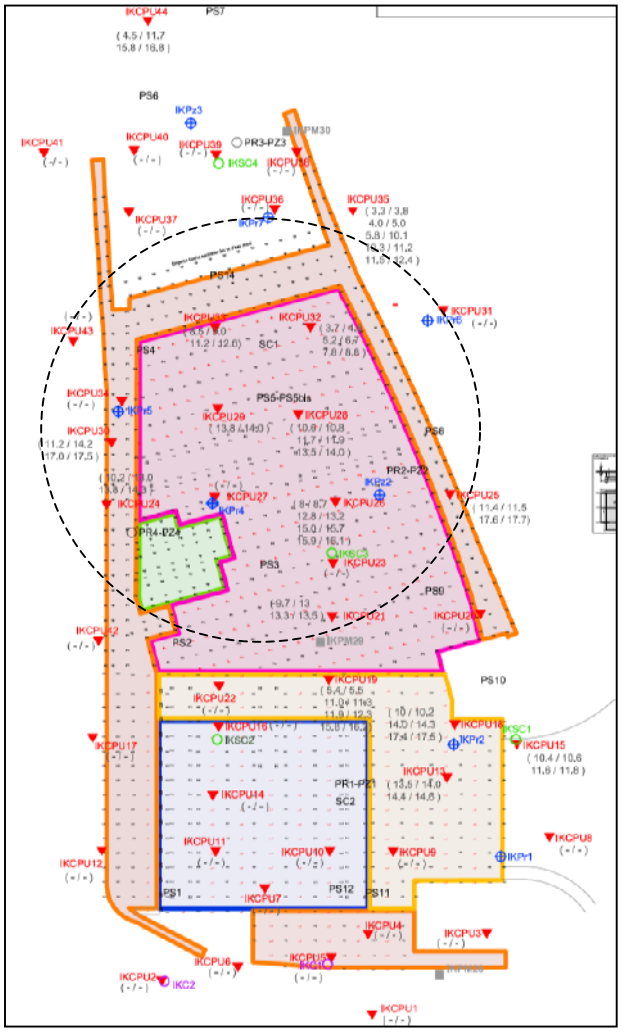


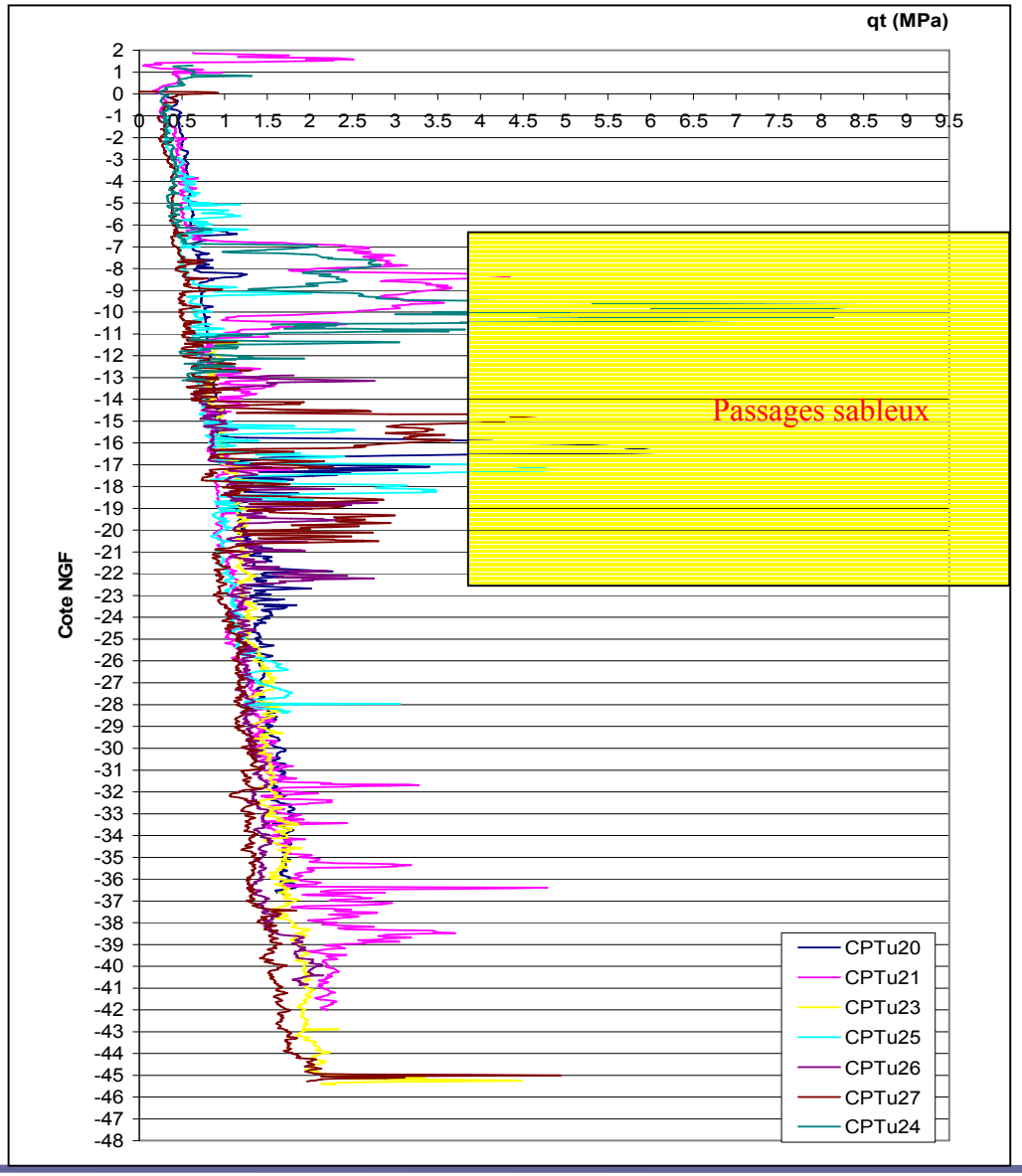
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :





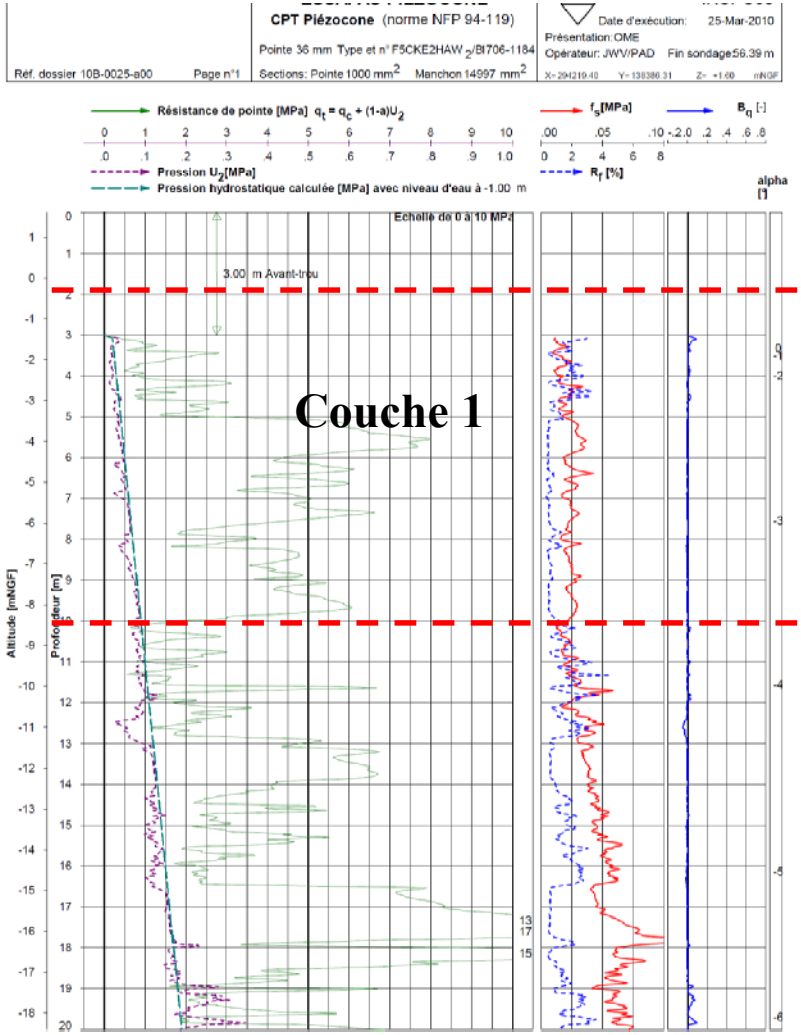
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

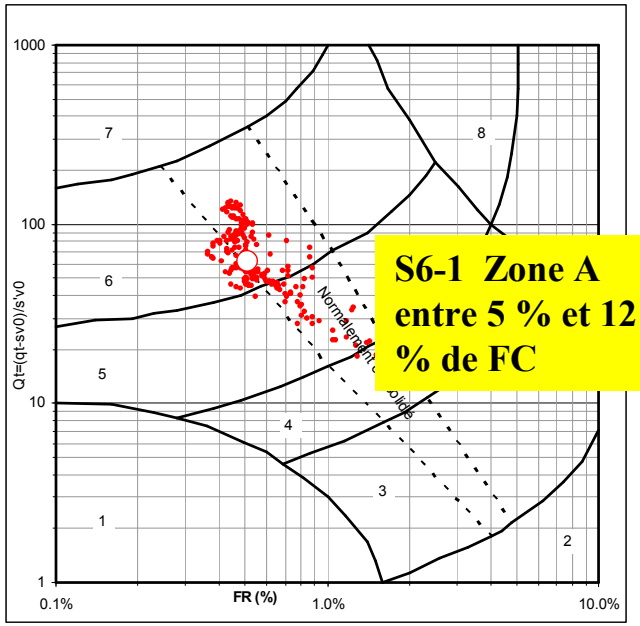




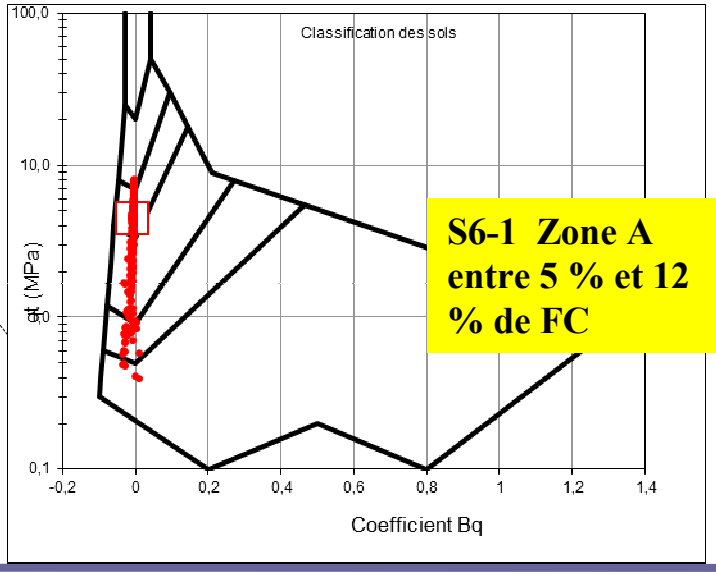
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

CPT35 couche 1 entre 2 et 10m de profondeur



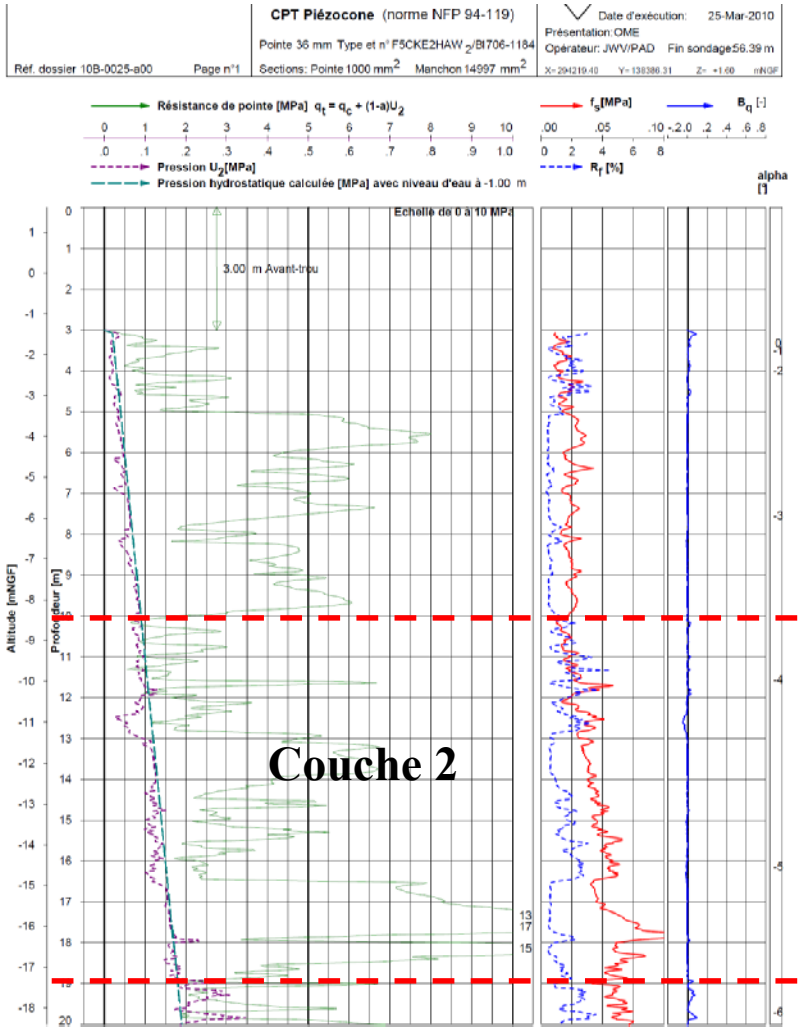


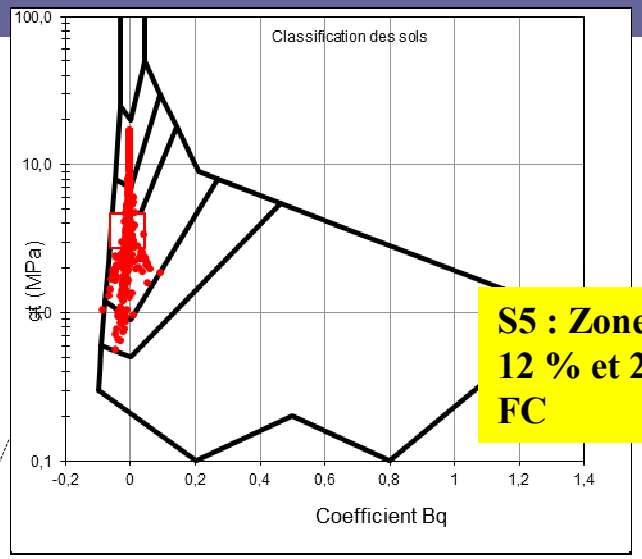
S6-1 Zone A entre 5 % et 12 % de FC



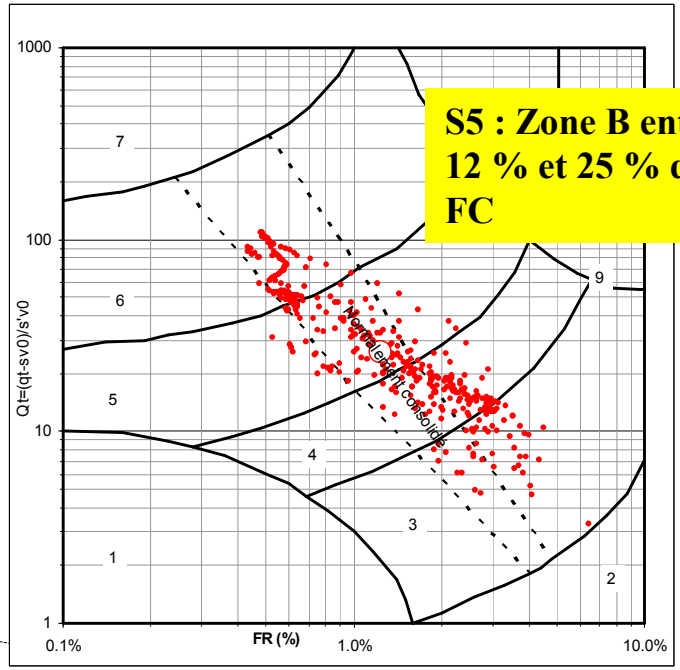
S6-1 Zone A entre 5 % et 12 % de FC

CPT35 couche 2 entre 10 et 19 m de profondeur





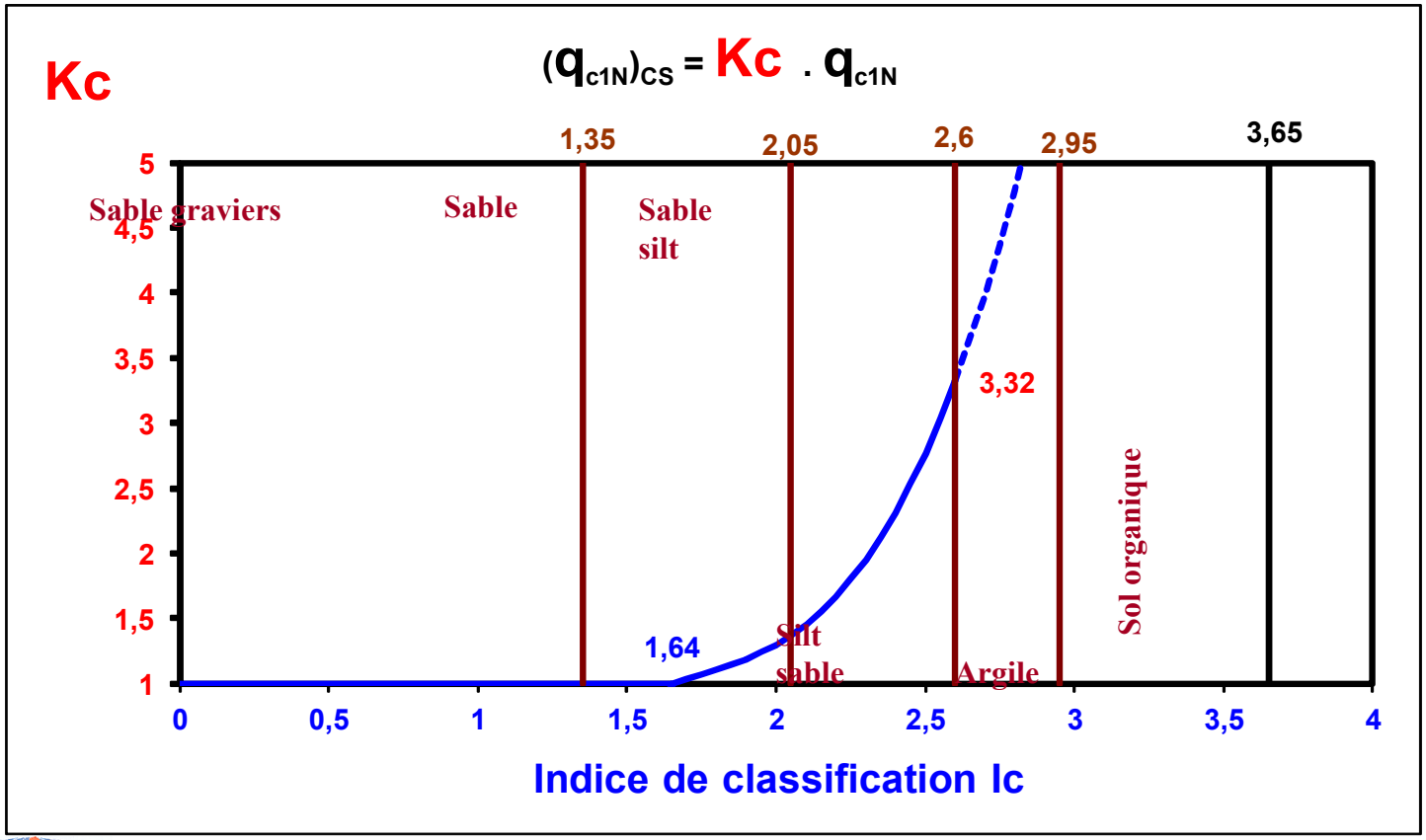
S5 : Zone B entre 12 % et 25 % de FC



S5 : Zone B entre 12 % et 25 % de FC

$(q_{c1N})_{cs}$ Résistance de pointe normalisée d'un sable propre équivalent

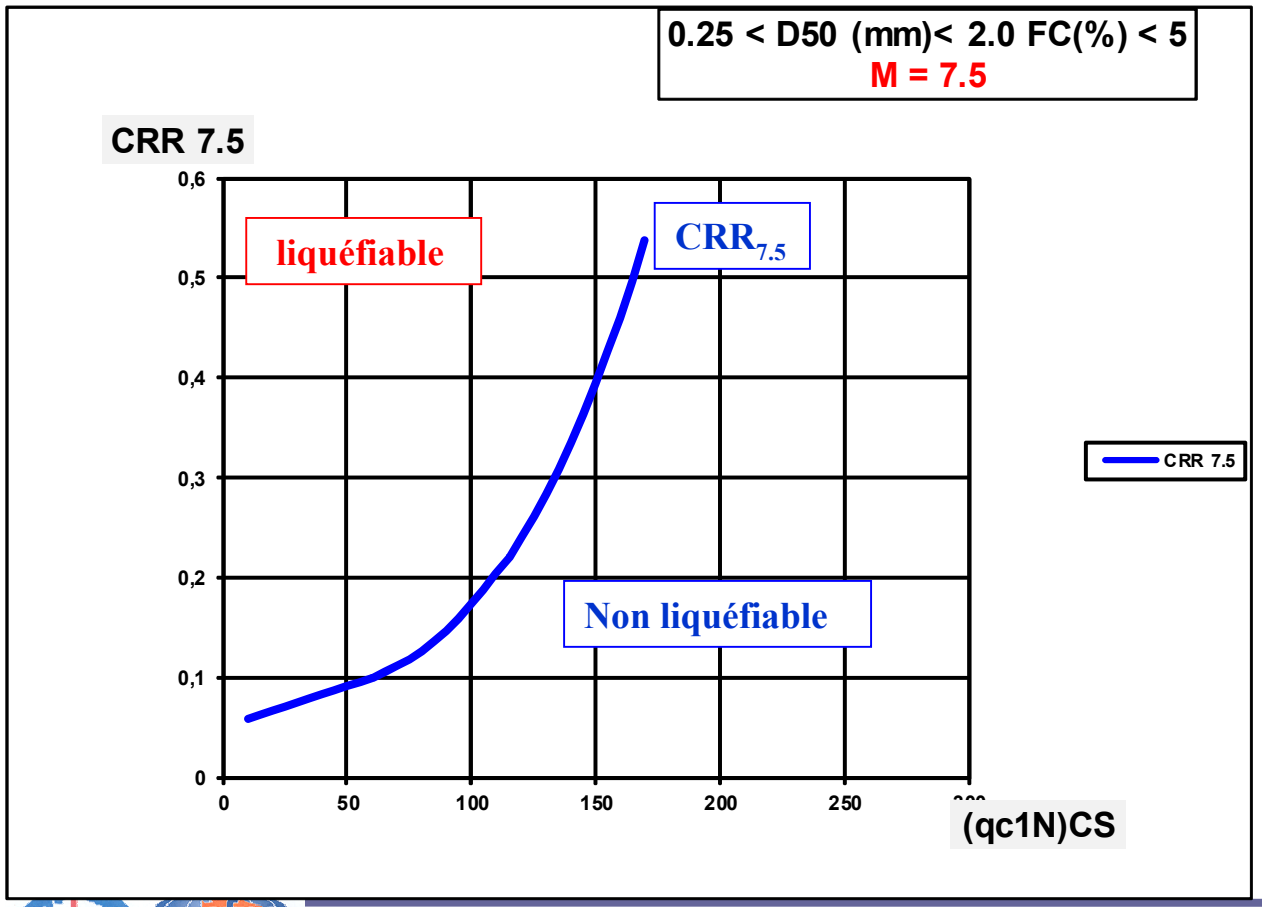
- pour $I_c \leq 1.64$ $K_c = 1.0$
- pour $I_c > 1.64$ $K_c = -0.403\ I_c^4 + 5.581\ I_c^3 - 21.631\ I_c^2 + 33.75\ I_c - 17.88$



ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

Si $(q_{c1N})_{cs} < 50$ alors $CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs}/1000] + 0.05$

Si $50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160$ alors $CRR_{7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs}/1000]^3 + 0.08$



$CRR_{7.5}$ déduit de

(qc1N)cs

Résistance normalisée pour un sable propre (Clean Sand)

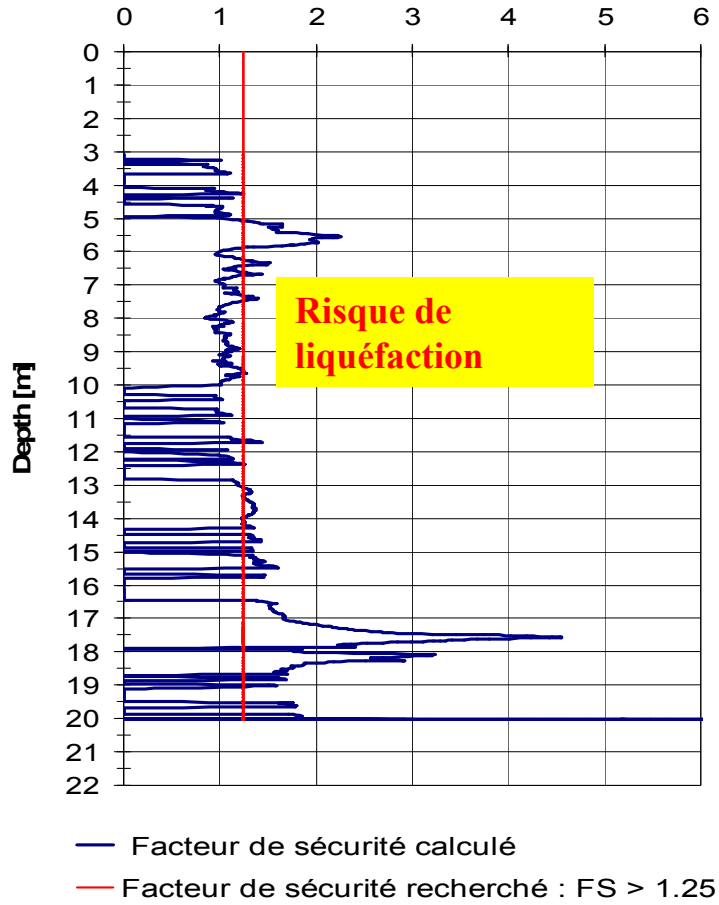
NCEER (2001)

ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

$$FS = [CRR_{7.5} / CSR] \,.\, CM$$

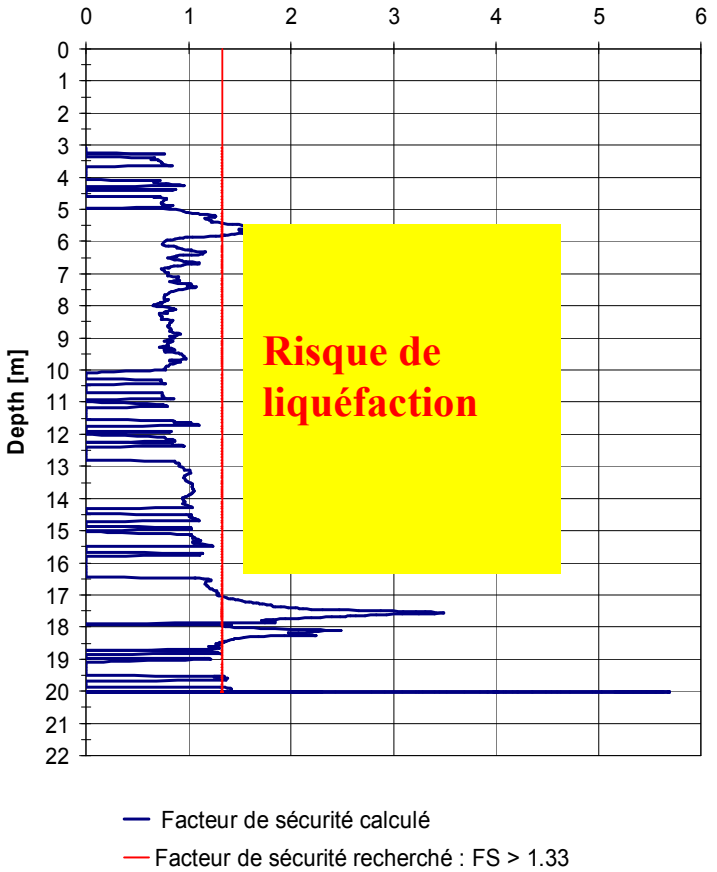
Eurocode 8 Comparaison

Mg : 5.5 CM = 2.86 F = 1.25

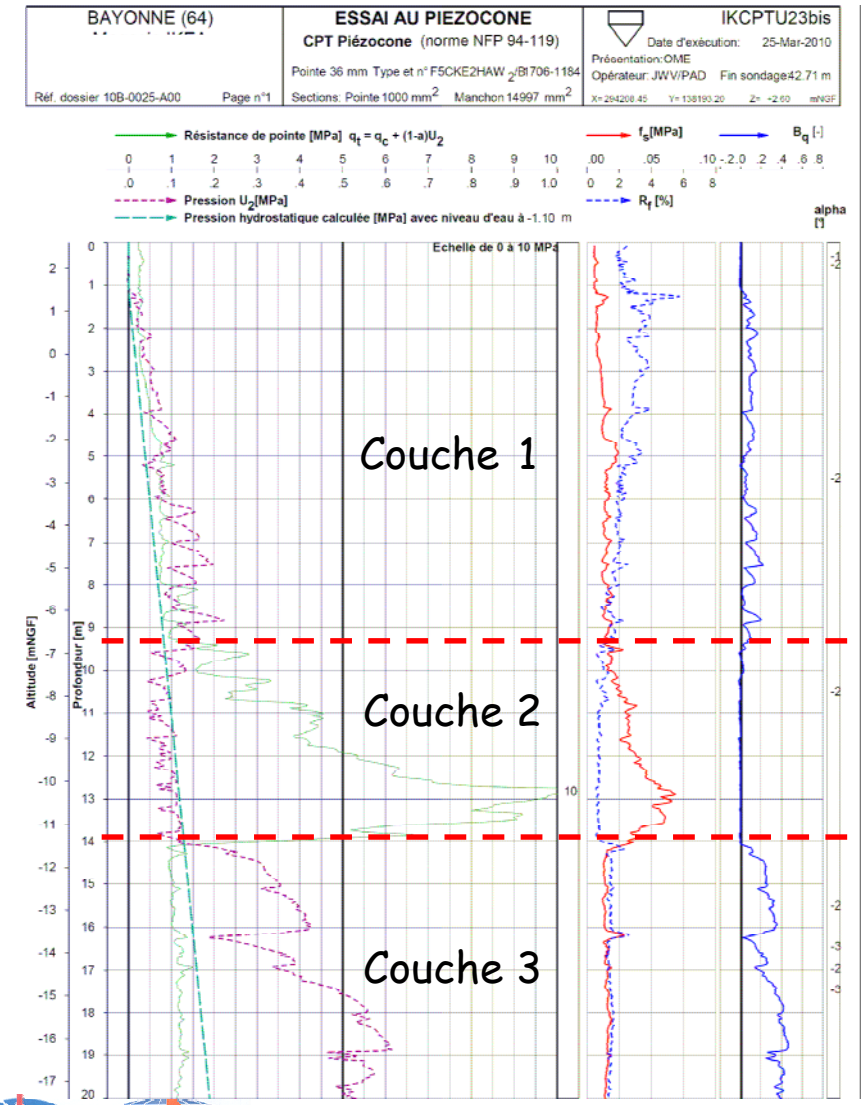


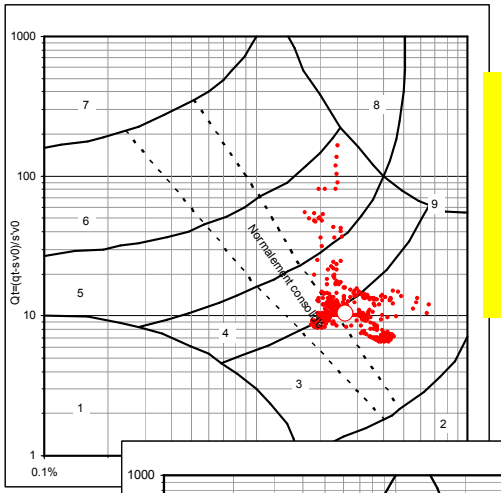
PS 92

Mg : 5.5 CM = 2.2 F = 1.33

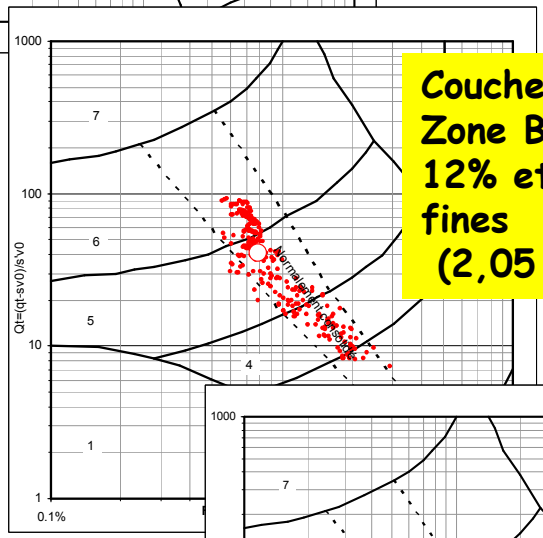


ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

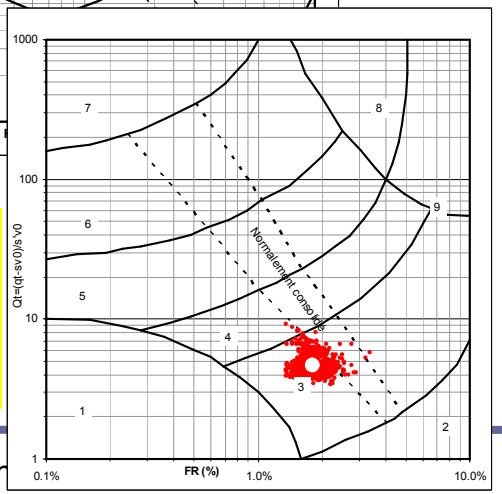




Couche 1
Zone C entre 27% et 35% de fines
(2,6<Ic < 2,8)



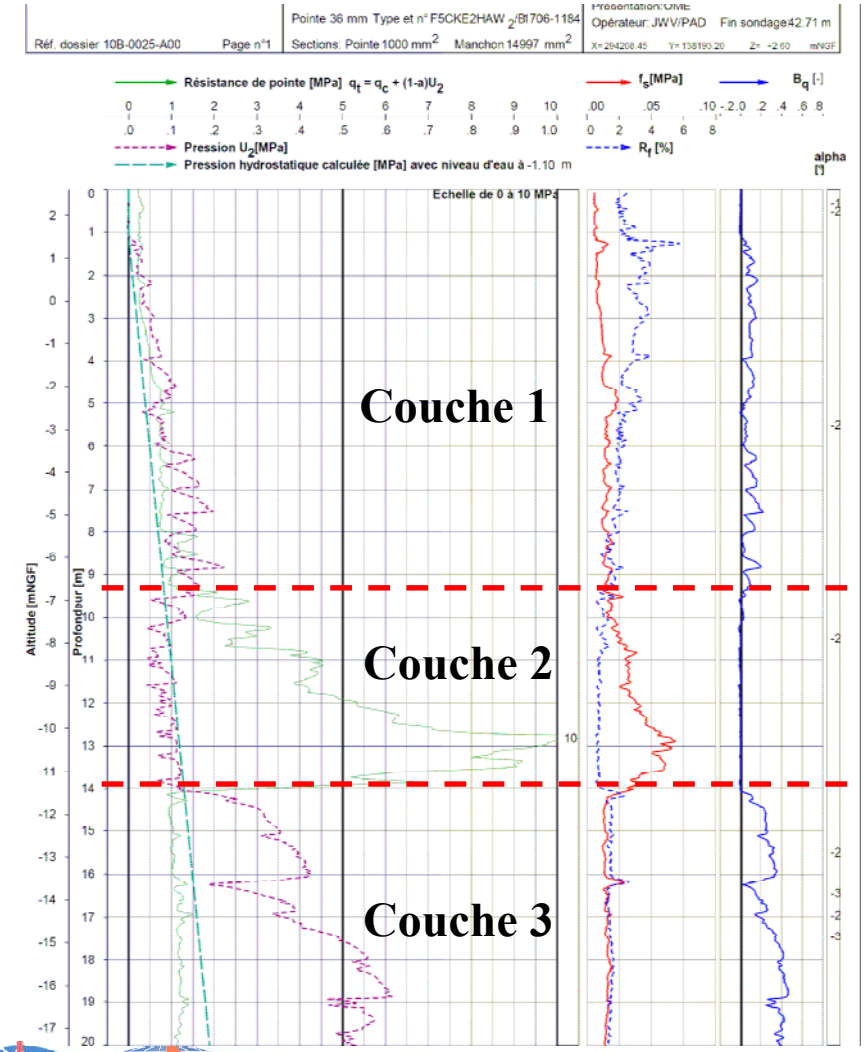
Couche 2
Zone B entre 12% et 27% de fines
(2,05 <Ic < 2,6

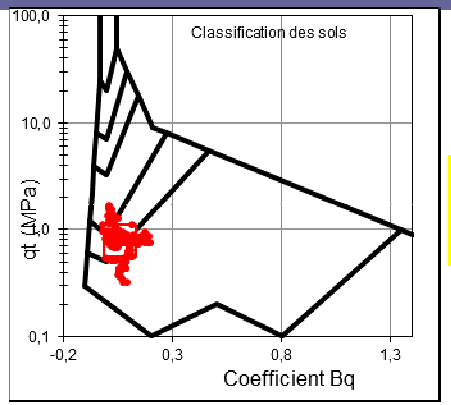


Couche 3
Zone C > 35% de fines
Ic > 2,8

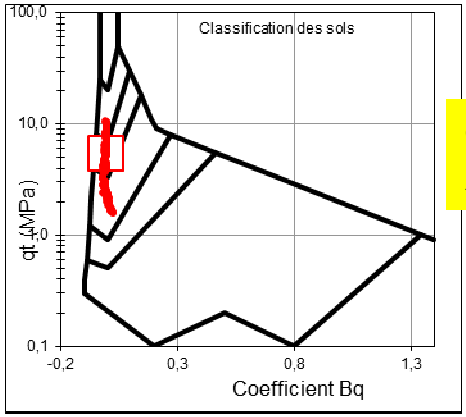
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

CPTU 23 bis entre 0 et 20 m de profondeur

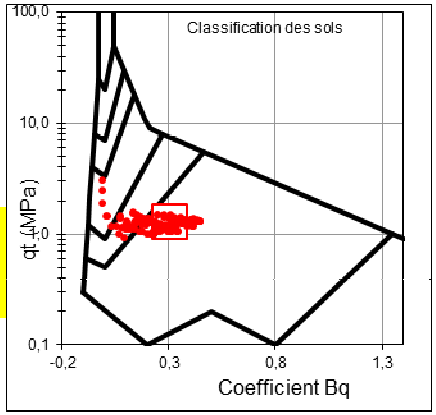




Couche 1
Zone C1 (C2)



Couche 2
Zone B

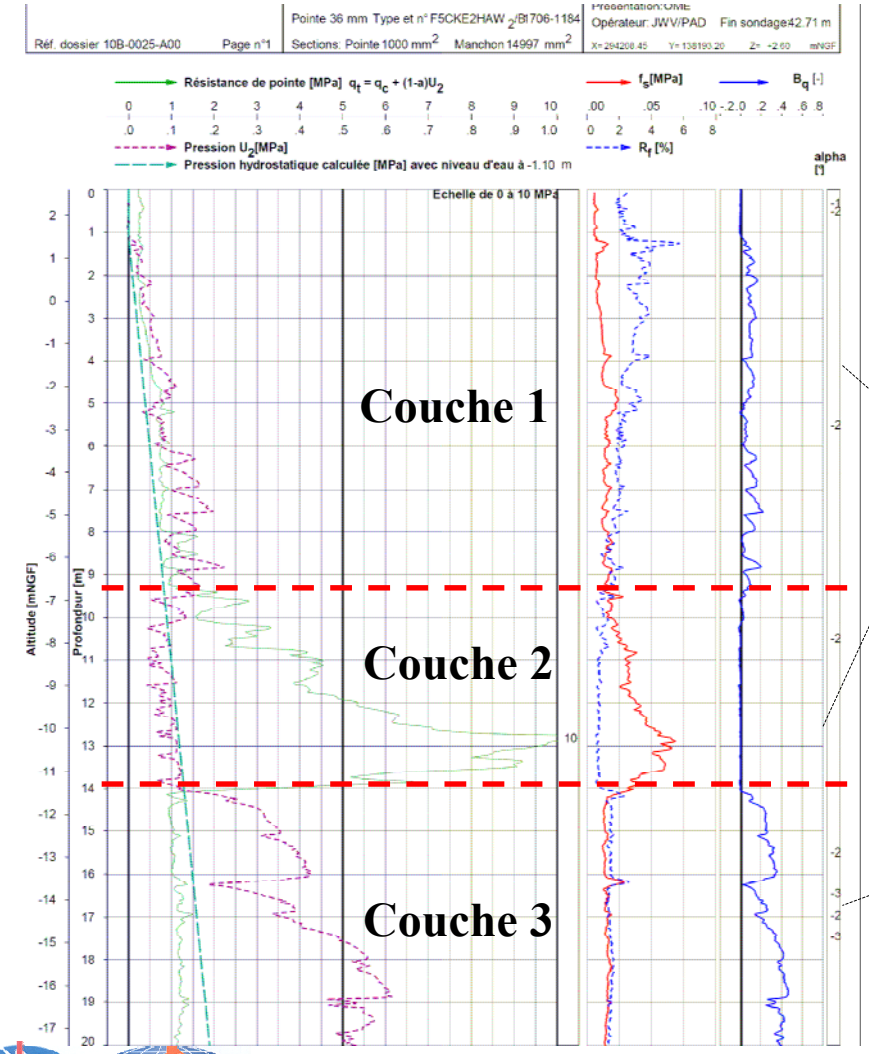


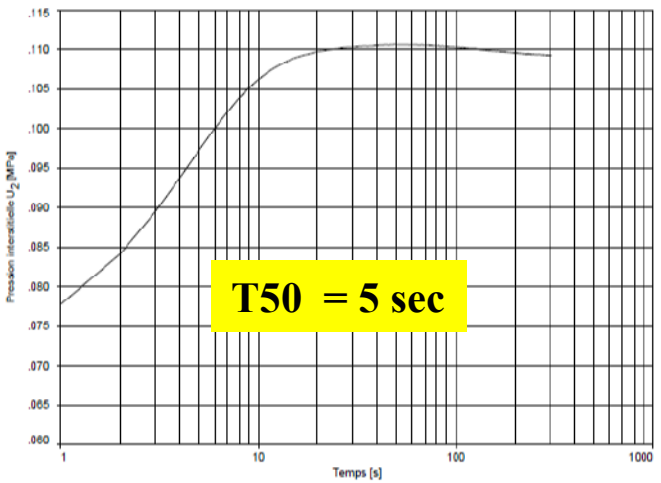
Couche 3
Zone C2

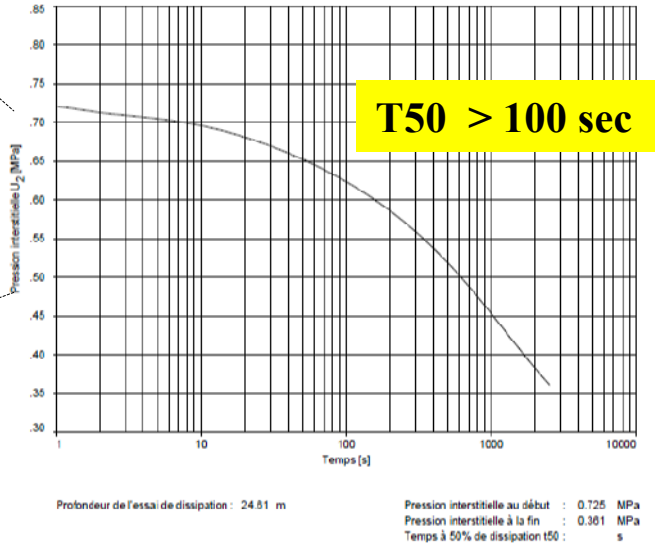
ANALYSE DU RISQUE DE LIQUÉFACTION :

Zones B et C2

CPTU 23 bis entre 9 et 20 m de profondeur



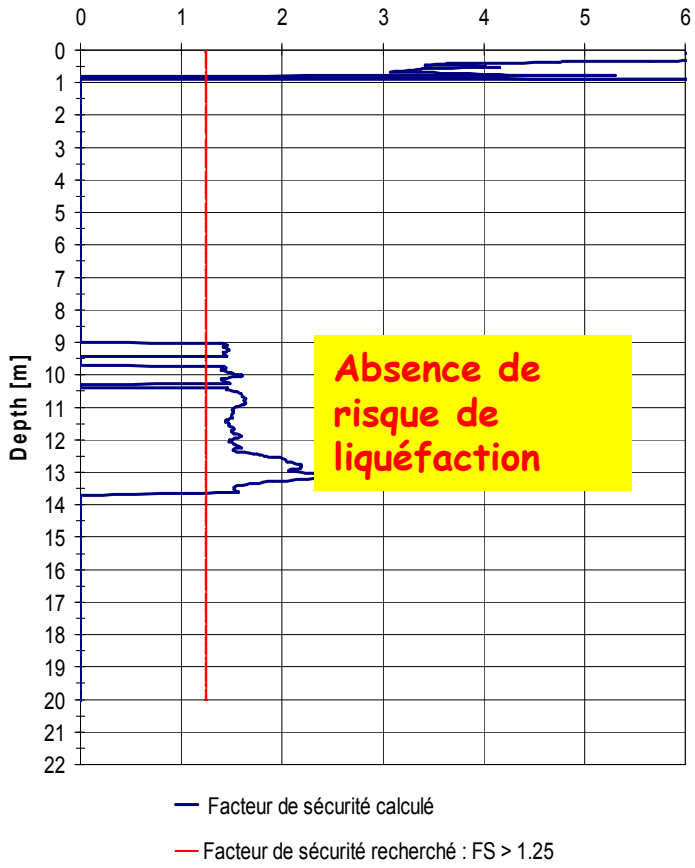




Couche 2 : Zone B

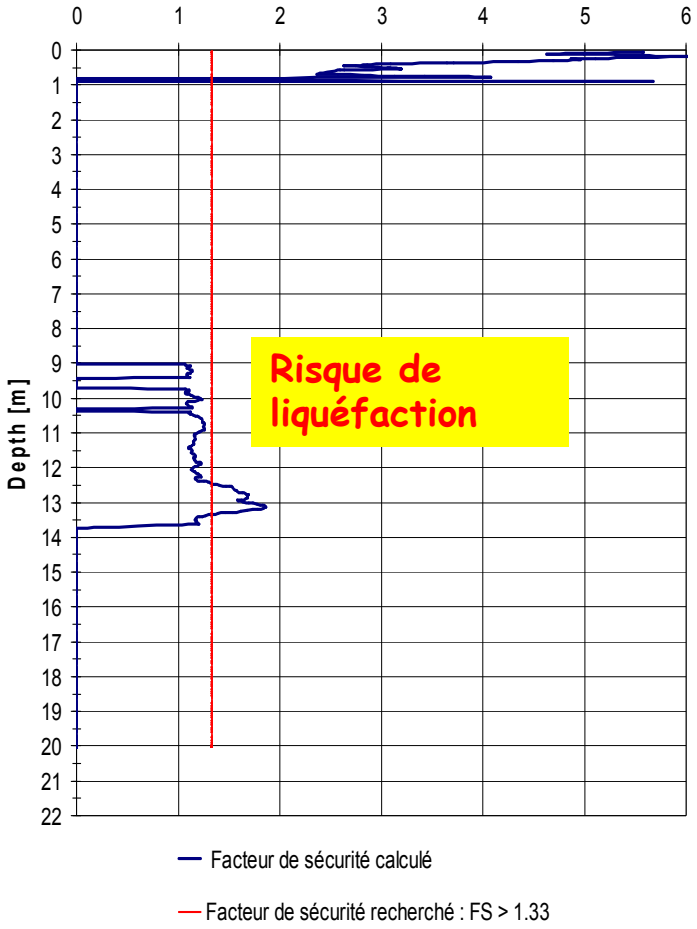
Eurocode 8 Comparaison

Mg : 5.5 CM = 2.86 F = 1.25



PS 92

Mg : 5.5 CM = 2.2 F = 1.33



EXEMPLES D'APPLICATION

- **1 avec CPT (CPT 35)**
  - **Zone A entre 2 et 10 m**
  - **Zone B entre 10 et 20 m**

Avec Mg = 5,5 et FS = 1,25 (EC8-5)

Seul Zone A est potentiellement liquéfiable

- **1 avec CPTU (CPTU 23 bis)**
  - **Grâce aux essais de dissipation**

Couches 1 et 3 [Zone C] non liquéfiables

Avec Mg = 5,5 et FS = 1,25 (EC8-5)

Couche 2 [Zone B] non liquéfiable

Merci de votre attention

Association régie par la loi
du 1.07.1901