Réunion technique du C.F.M.S. du 24 avril 2002

Recommandations sur la consistance des investigations géotechniques

Cas des améliorations de sols

****

Philippe LIAUSU

MENARD SOLTRAITEMENT

Le succès d'une opération d'amélioration de sol repose sur l'adéquation entre:

- Les caractéristiques du sol à traiter,
- La méthode d'amélioration choisie,
- Les spécifications de portance ou de tassement requises pour l'ouvrage à fonder.

- Les investigations doivent suivre les recommandations générales relatives au cas des fondations, notamment pour la maille de reconnaissance,
- Il est au moins nécessaire de connaître la nature et l'épaisseur du mauvais sol à traiter, ainsi que ses caractéristiques mécaniques initiales mesurées par un essai en place,
- d'autres paramètres particuliers devront être mesurés suivant la méthode de traitement envisagée,
- il faudra refaire une étude de sol après travaux pour vérifier l'amélioration obtenue *(contrats à garantie de résultats)*

CONSOLIDATION DE SOL SANS APPORT DE MATERIAUX

Statiques
(sols fins)

- **Préchargement de remblai**
(avec drains verticaux)

- **Préchargement par le vide**
(avec drains verticaux)

Dynamiques
(sols grenus)

- **compactage dynamique (pilonnage intensif)**

- **vibroflotation (aiguille vibrante)**

RENFORCEMENT DE SOL AVEC APPORT DE MATERIAUX

Inclusions souples
(granulaires sans liant)

- **Plots ballastés pilonnés (matériel de compactage dynamique)**
- **Colonnes ballastées vibrofoncées (matériel de vibroflotation)**

Inclusions rigides
(avec liant)

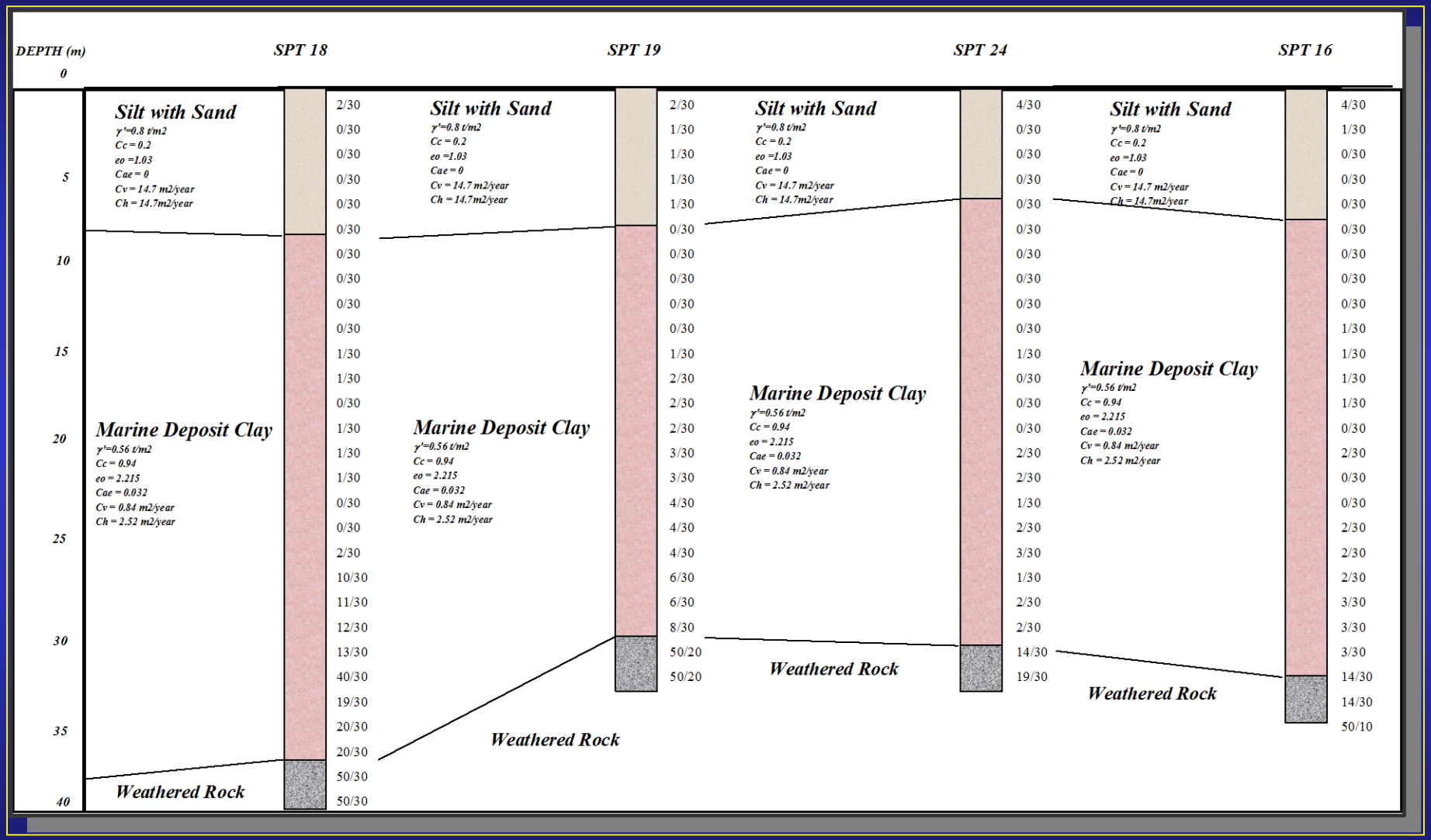
- **colonnes à module contrôlé**
- **colonnes ballastées injectées**
- **colonnes de jet-grouting**
- **injection solide**

TYPES DE SOL	Argiles très molles vases – tourbes	Argiles – limons compressibles	Remblais fins	Sables / graviers	Cailloux Remblais à blocs
METHODES DE TRAITEMENT	PRECHARGEMENT + DRAINAGE				
		COLONNES BALLASTEES			
	PLOTS BALLASTES PILONNES (si épaisseur < 7 m)				
			COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				VIBROFLOT.	
	INCLUSIONS RIGIDES (CMC)				

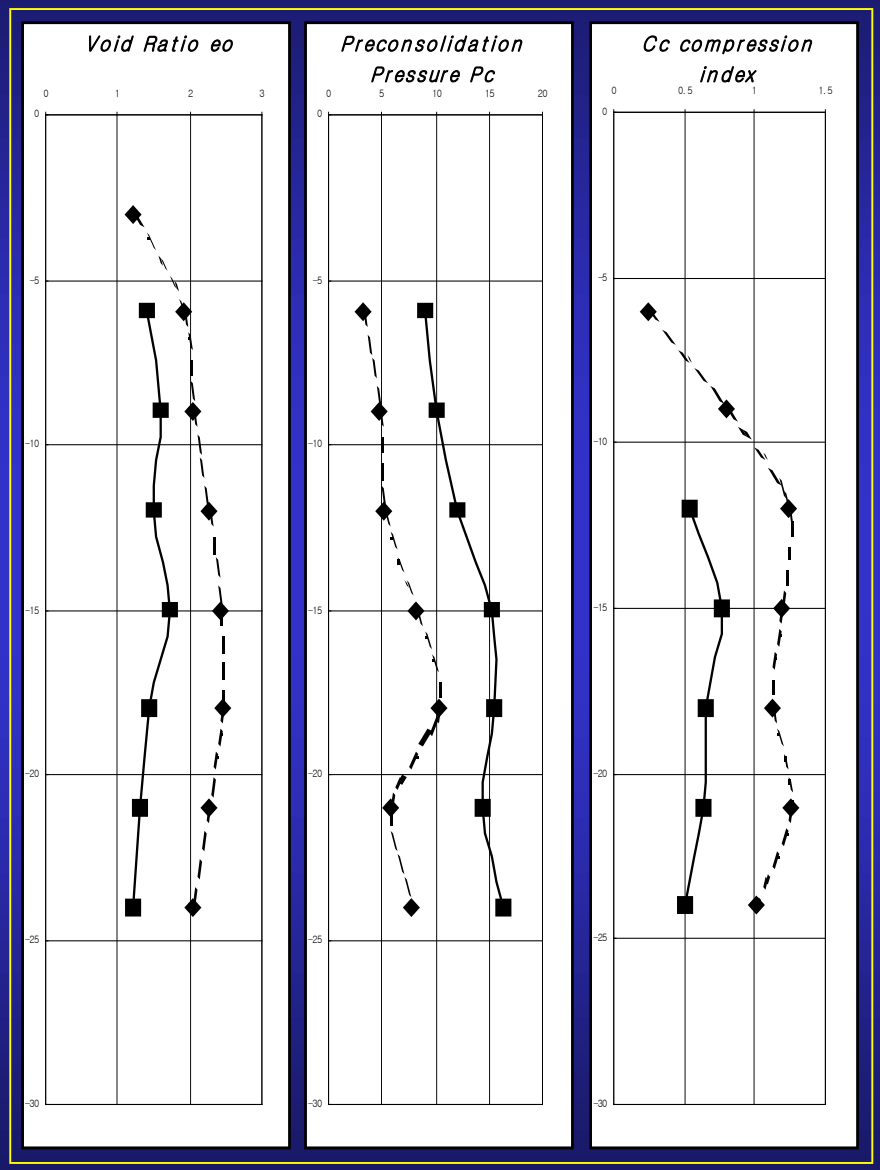
Méthodes en fonction de la nature du sol

Investigations géotechniques pour l'étude d'une solution de consolidation statique de sols fins par préchargement et drainage :

- essais en place pour détermination de l'épaisseur de sol mou et mesure de Cu par scissomètre
- prélèvement d'échantillons pour réalisation :
  - d'essais d'identification
  - d'essais oedométriques (mesure de Cc, Cv, Ch et $C\alpha e$)
  - d'essais triaxiaux (mesure de Cu, C',ϕ')



KIMHAE STP / South Korea: profil géotechnique pour solution de consolidation atmosphérique



Amélioration des caractéristiques mécaniques d'une argile molle après consolidation atmosphérique

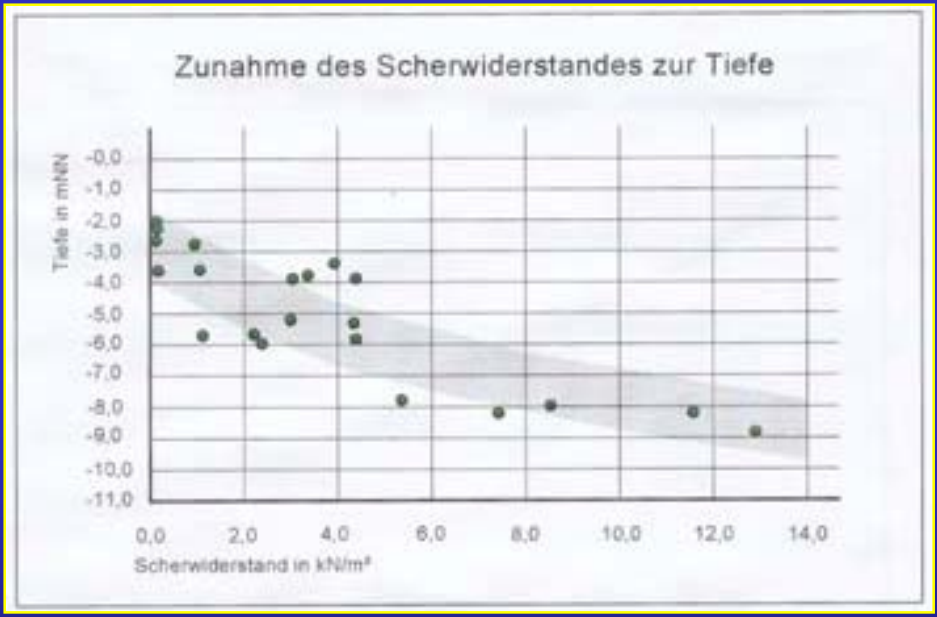
KIMHAE STP / South Korea

Organisches Baggergutmaterial:

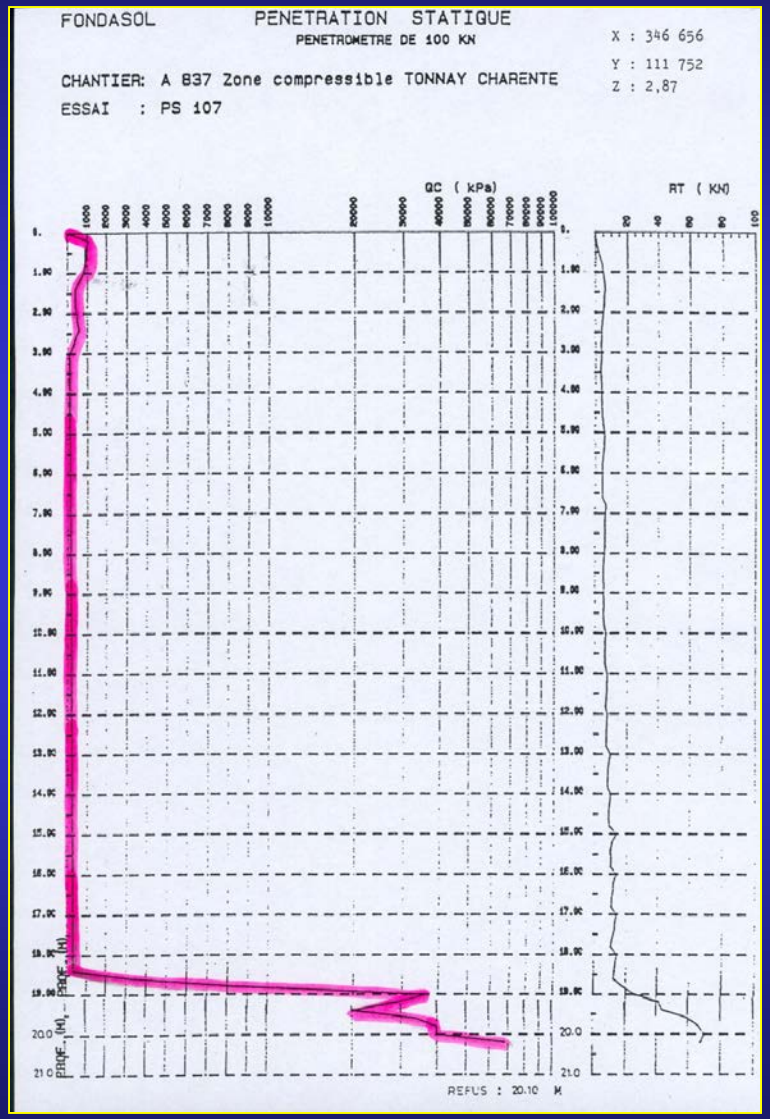
	Wassergehalt w [%]	Glühverlust g [%]	Feuchtwichte γ_f [kN/m³]	Trockenwichte γ_d [kN/m³]	Porenzahl e [1]	Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]
Versuche	3	3	3	3	3	1
min.	198,5	14,2	11,6	3,1	4,477	-/-
max.	276,3	19,8	13,1	6,2	6,765	-/-
Mittelwert	231,0	17,7	12,3	4,6	5,537	$4 \cdot 10^{-9}$

Zustandsgrenze nach DIN 18122:	Konsistenszahl I_C = -0,7, d. h. die Zustandsform ist flüssig

Korngrößenverteilung:	Tonanteil [%]	Schluffanteil [%]	Sandanteil [%]	Kiesanteil [%]
Massenanteile der Korngruppe in % (Mittelwert aus 2 Versuchen):	5	65	30	0



Lubeck: caractérisation géotechnique des boues de dragage pour consolidation atmosphérique



Autoroute A837

Consolidation atmosphérique

Remblai sur sol compressible

Pénétromètre préliminaire

DONNEES GEOTECHNIQUES POUR LES TASSEMENTS

n°	h (cm)	σ'_o (kPa)	σ'_p (kPa)	e_o	C_s	C_c	$C_{\alpha\varepsilon}$	C_v cm²/s	C_H cm²/s
1	150	11	21	1,14	0,035	0,37	0,020	10^{-3}	7.10^{-3}
2	500	31	41	1,99	0,079	1,24	0,068	10^{-3}	7.10^{-3}
3	600	65	75	1,32	0,043	0,50	0,028	10^{-3}	7.10^{-3}
4	650	103	113	1,18	0,039	0,48	0,026	10^{-3}	7.10^{-3}
5									

DONNEES GEOTECHNIQUES POUR LA STABILITE

	C_u (kPa)	$\phi°_u$	tg ϕ_{cu}
0			
	25	0	0,25
1,5			
	17	0	0,25
6,5			
	26	0	0,25
10,5			
	36	0	0,25
12,5			
	53	0	0,25
17			
	76	0	0,25
19			

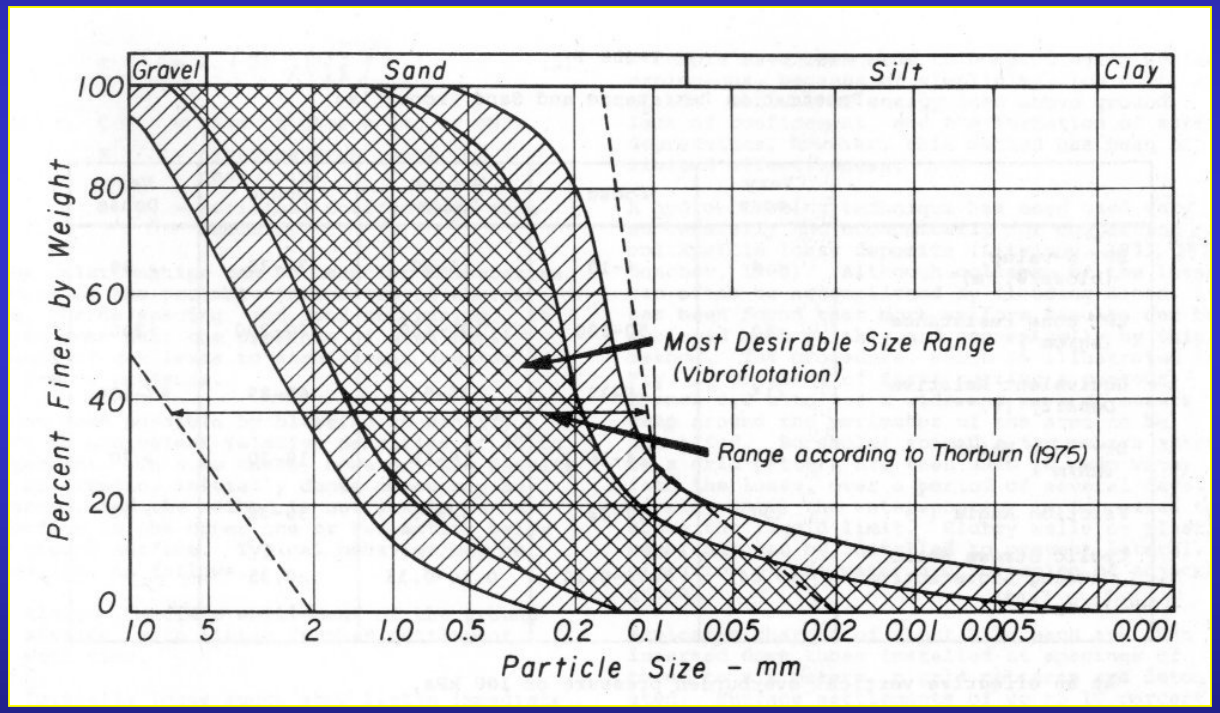
ASF - SCETAUROUTE	RD 911	25 mai 1993
A 837 SAINTES ROCHEFORT - MARAIS DE TONNAY- CHARENTE		

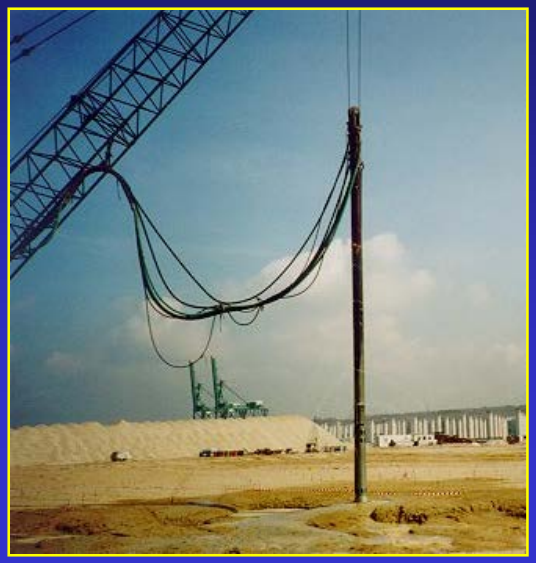
Autoroute A837:

Données géotechniques nécessaires au dimensionnement complet d'une consolidation atmosphérique

Paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement d'une solution de renforcement par compactage:

- nature et granulométrie du sol,
- vérification de la présence éventuelle de matériaux évolutifs,
- caractéristiques mécaniques initiales mesurées par essai in situ (pressiomètre ou pénétromètre)





Fuseau granulométrique des sols traitables par vibroflotation

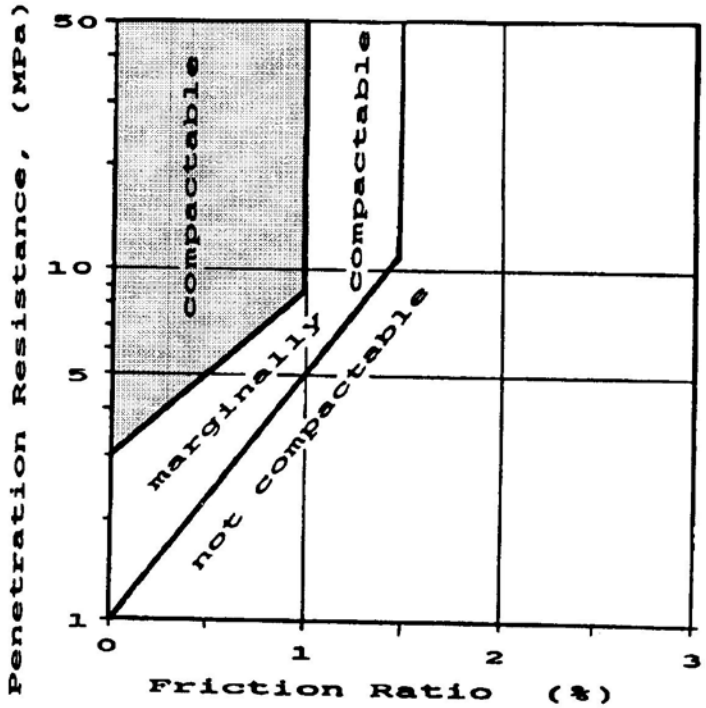


Figure 1 Suitability of Soils with Respect to Vibratory Compaction, Based on Electric Cone Penetration Tests with Friction Sleeve Measurements, Massarsch and Heppel (1991).

Utilisation du pénétromètre statique pour vérification de la possibilité de vibrocompactage des sols

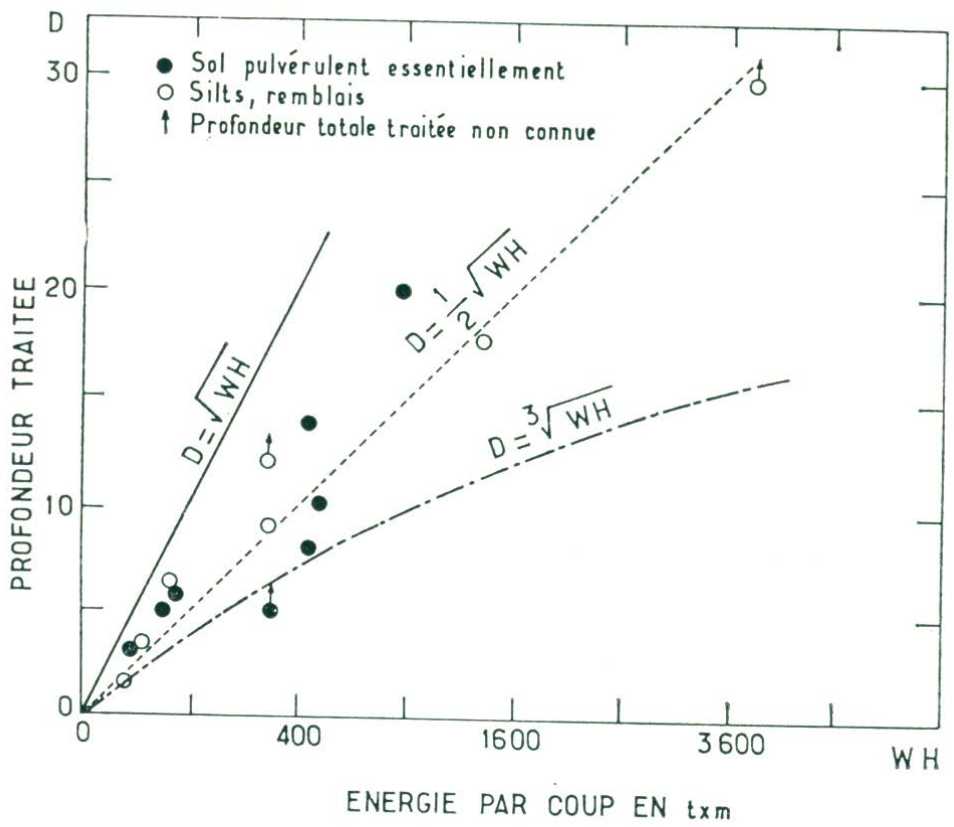
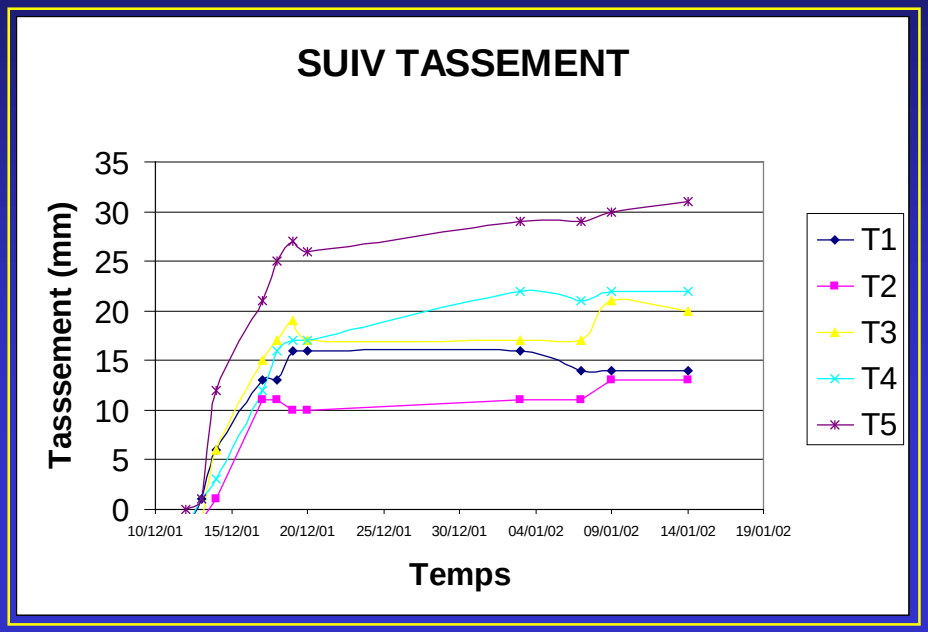


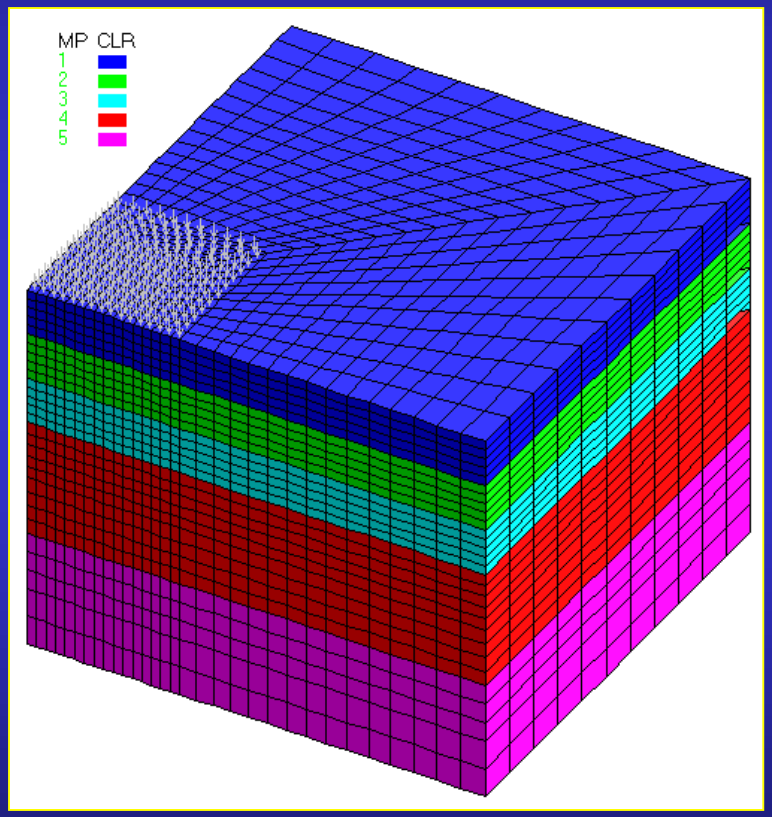
Fig. 9. — **Relation entre énergie de l'impact et profondeur traitée** (d'après J.K. Mitchell).

Relations empiriques profondeur traitée en fonction de l'énergie de compactage dynamique

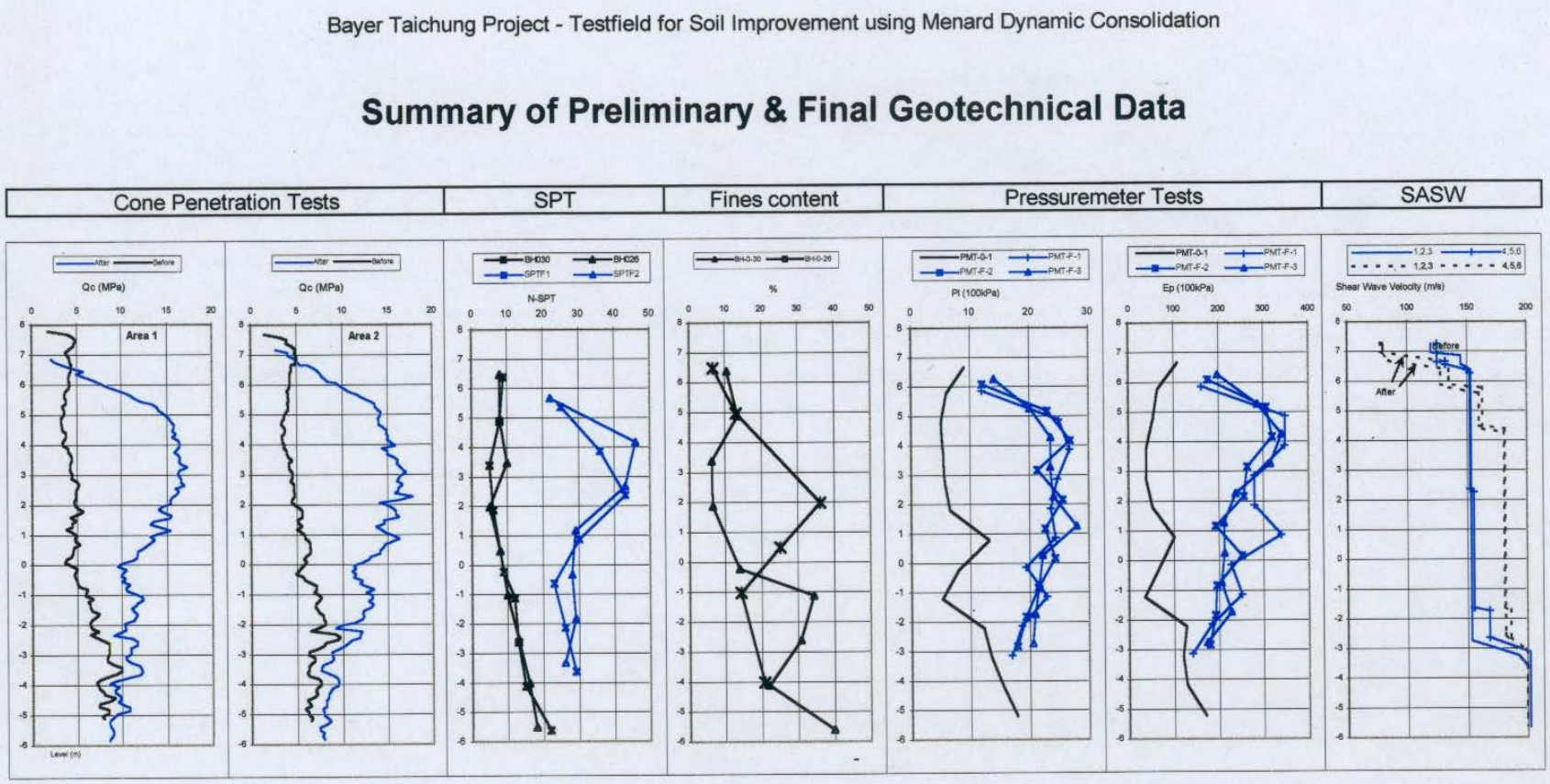
Corbas: Contrôle de compactage dynamique de remblais par essais pressiométriques

Corbas: essai de chargement (9 t/m²)pour validation des modules pressiométriques mesurés

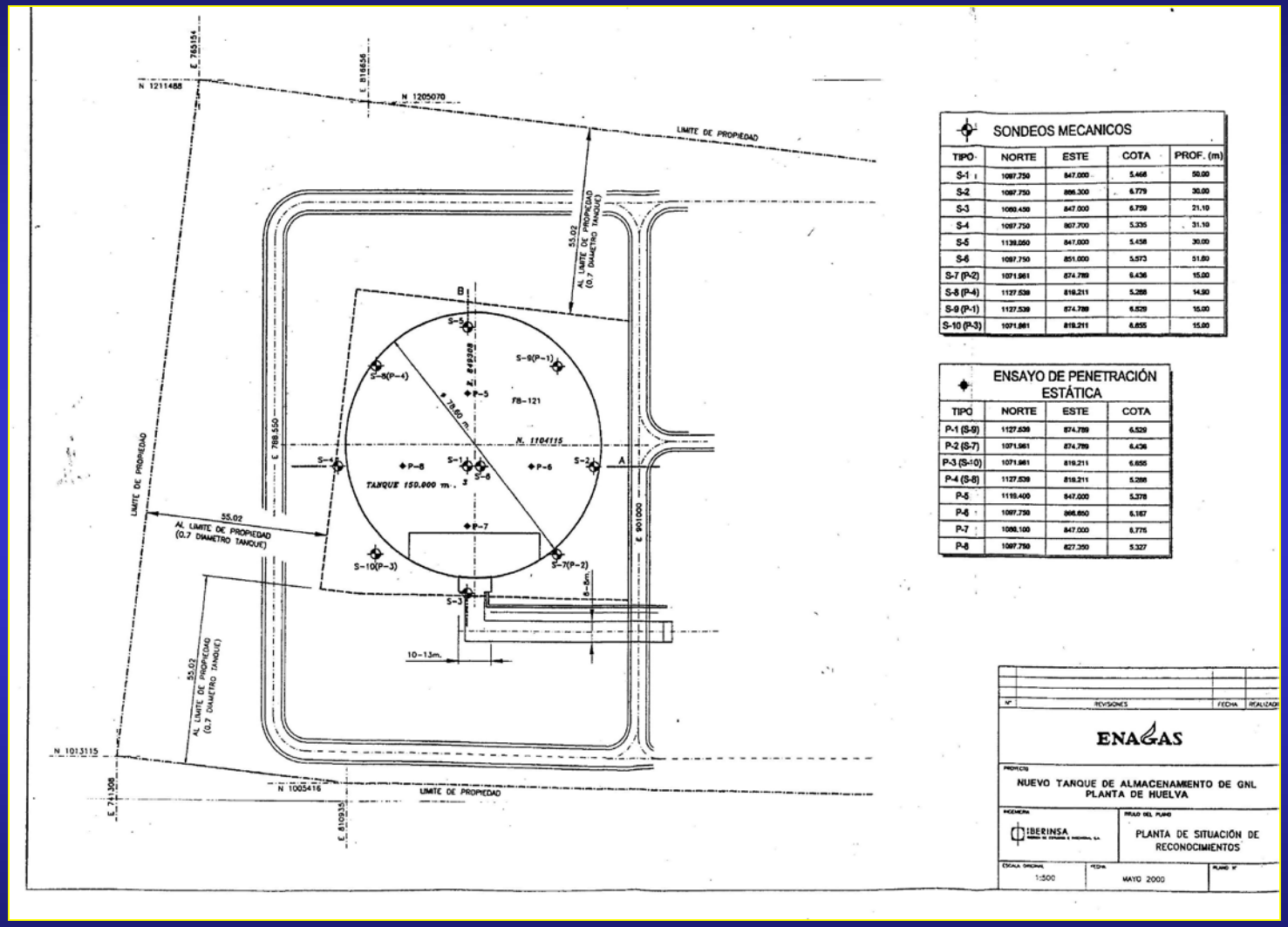




Corbas : Résultats et modélisation aux éléments finis de l'essai de chargement



Exemple de reconnaissance géotechnique pour traitement de compactage dynamique anti-sismique à Taiwan



SONDEOS MECANICOS

TIPO	NORTE	ESTE	COTA	PROF. (m)
S-1	1097.750	847.000	5.468	50.00
S-2	1097.750	866.300	6.779	30.00
S-3	1093.450	847.000	6.759	21.10
S-4	1097.750	807.700	5.335	31.10
S-5	1139.050	847.000	5.458	30.00
S-6	1097.750	851.000	5.573	51.80
S-7 (P-2)	1071.961	874.789	6.436	15.00
S-8 (P-4)	1127.539	819.211	5.288	14.90
S-9 (P-1)	1127.539	874.789	6.529	15.00
S-10 (P-3)	1071.961	819.211	6.655	15.00

ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁTICA

TIPO	NORTE	ESTE	COTA
P-1 (S-9)	1127.539	874.789	6.529
P-2 (S-7)	1071.961	874.789	6.436
P-3 (S-10)	1071.961	819.211	6.655
P-4 (S-8)	1127.539	819.211	5.288
P-5	1119.400	847.000	5.378
P-6	1097.750	866.850	6.167
P-7	1093.100	847.000	6.775
P-8	1097.750	827.350	5.327

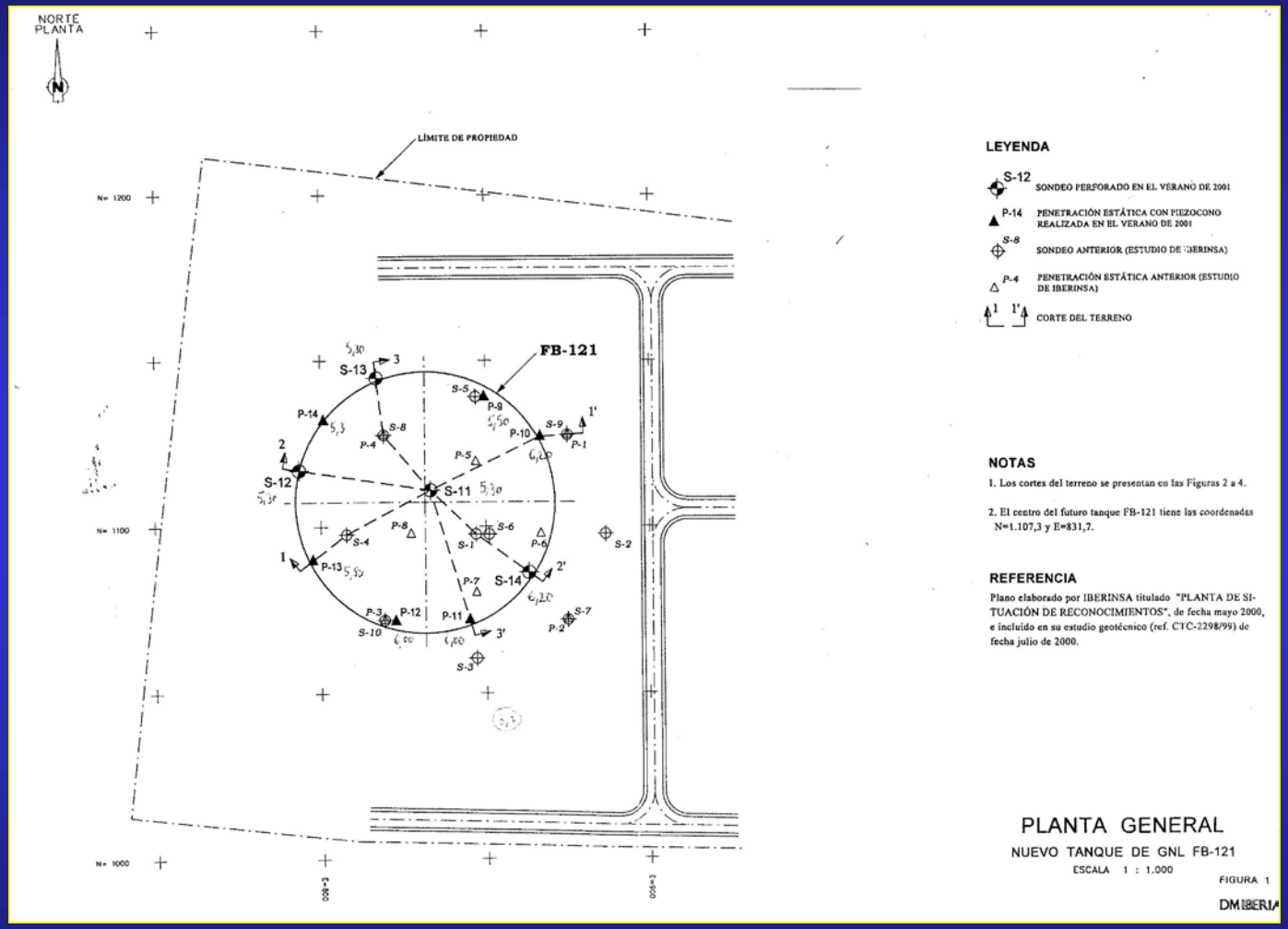
Espagne - Bac GNL :Reconnaissance géotechnique préliminaire

VALORES DEL SPT EN SONDEOS

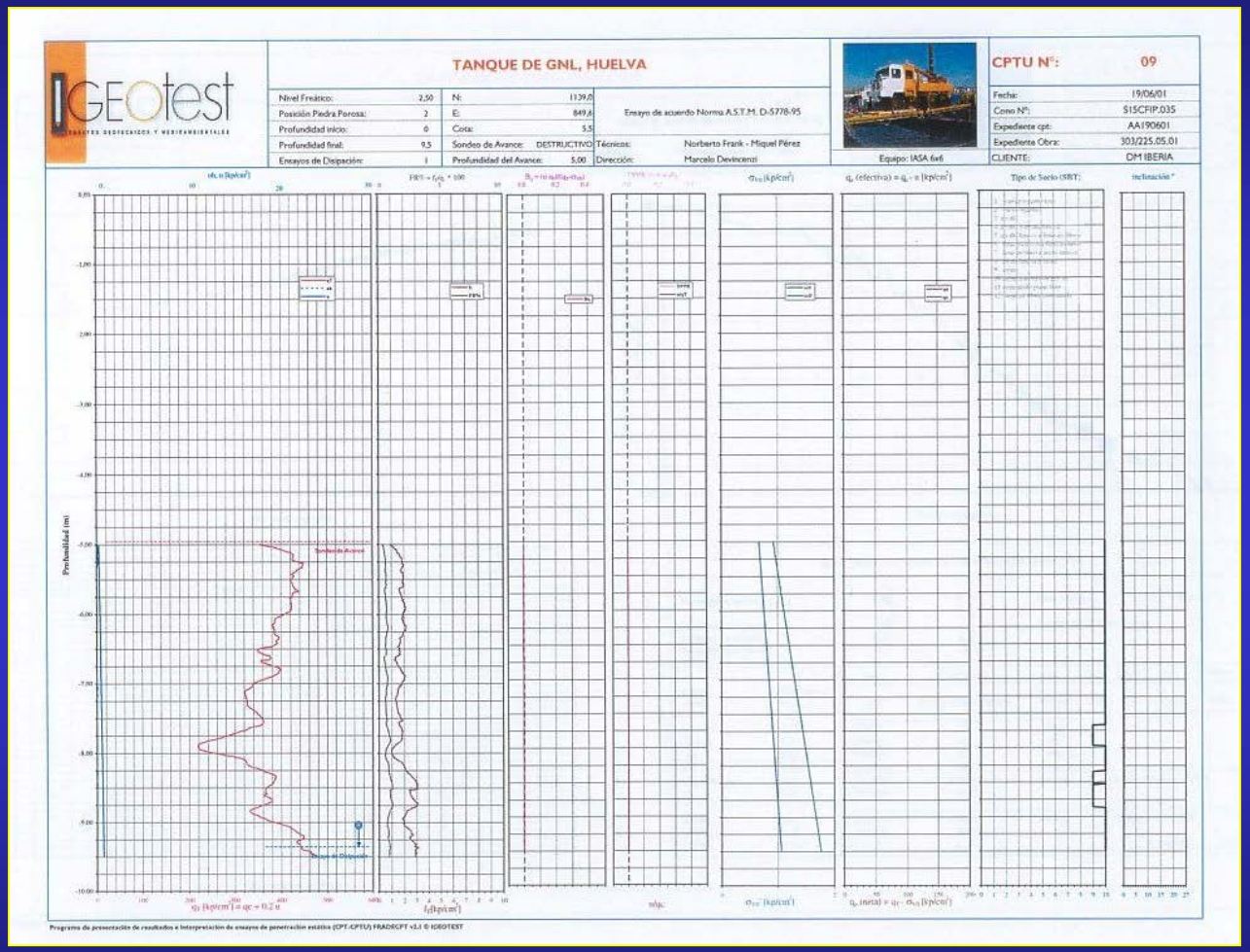
SONDEO	PROFUNDIDAD DE	PROFUNDIDAD A	NIVEL	FINOS %	MUESTRA	N_{SPT}	σ_v t/m²	σ_v' t/m²	C	$(N_1)_{60}$
S-6	N.F.:	4.60	γ=	2.00			F1 =	1.33		
	2.20	2.80	3A	12.4	SPT	11	4.4	4.40	1.51	22
	5.20	5.80	3A		SPT	39	10.4	9.80	1.01	53
	8.60	9.20	3B	6.2	SPT	14	17.2	13.20	0.87	16
	11.00	11.60	3A	7.5	SPT	88	22.0	15.60	0.80	94
	14.00	14.60	3C		SPT	42	28.0	18.60	0.73	41
	17.00	17.60	3C	30.9	SPT	47	34.0	21.60	0.68	43
	20.00	20.30	3D		SPT	100	40.0	24.60	0.64	85
	24.00	24.60	4		SPT	47	48.0	28.60	0.59	37
	27.00	27.60	4		SPT	58	54.0	31.60	0.56	44
	30.00	30.60	4		SPT	41	60.0	34.60	0.54	29
	33.00	33.60	4		SPT	55	66.0	37.60	0.52	38
	36.00	36.60	4	76.1	SPT	41	72.0	40.60	0.50	27
	39.00	39.60	4		SPT	46	78.0	43.60	0.50	31
	42.00	42.60	4		SPT	49	84.0	46.60	0.50	33
	45.00	45.60	4	67.8	SPT	60	90.0	49.60	0.50	40
	48.00	48.60	4		SPT	48	96.0	52.60	0.50	32
	51.00	51.60	4		SPT	44	102.0	55.60	0.50	29
S-7	N.F.:	3.20	γ=	2.00			F1 =	1.33		
	3.00	3.60	3A	1.9	SPT	12	6.0	6.00	1.29	21
	6.00	6.60	3A	6.5	SPT	33	12.0	9.20	1.04	46
	8.10	8.70	3B	2.6	SPT	25	16.2	11.30	0.94	31
	8.70	9.30	3B	2.5	SPT	17	17.4	11.90	0.92	21
	9.30	9.90	3B		SPT	24	18.6	12.50	0.89	29
	11.60	12.20	3A	16.9	SPT	36	23.2	14.80	0.82	39
	14.40	15.00	3A		SPT	45	28.8	17.60	0.75	45
S-8	N.F.:	2.10	γ=	2.00			F1 =	1.33		
	3.10	3.70	3A	4.8	SPT	22	6.2	5.20	1.39	41
	5.80	6.40	3A	7.1	SPT	52	11.6	7.90	1.13	78
	7.90	8.50	3A	12.0	SPT	39	15.8	10.00	1.00	52
	8.50	9.10	3A		SPT	79	17.0	10.60	0.97	102
	12.10	12.70	3A		SPT	46	24.2	14.20	0.84	51
	14.30	15.00	3A		SPT	28	28.6	16.40	0.78	29

Espagne - Bac GNL

Reconnaissance géotechnique pour étude du potentiel de liquéfaction

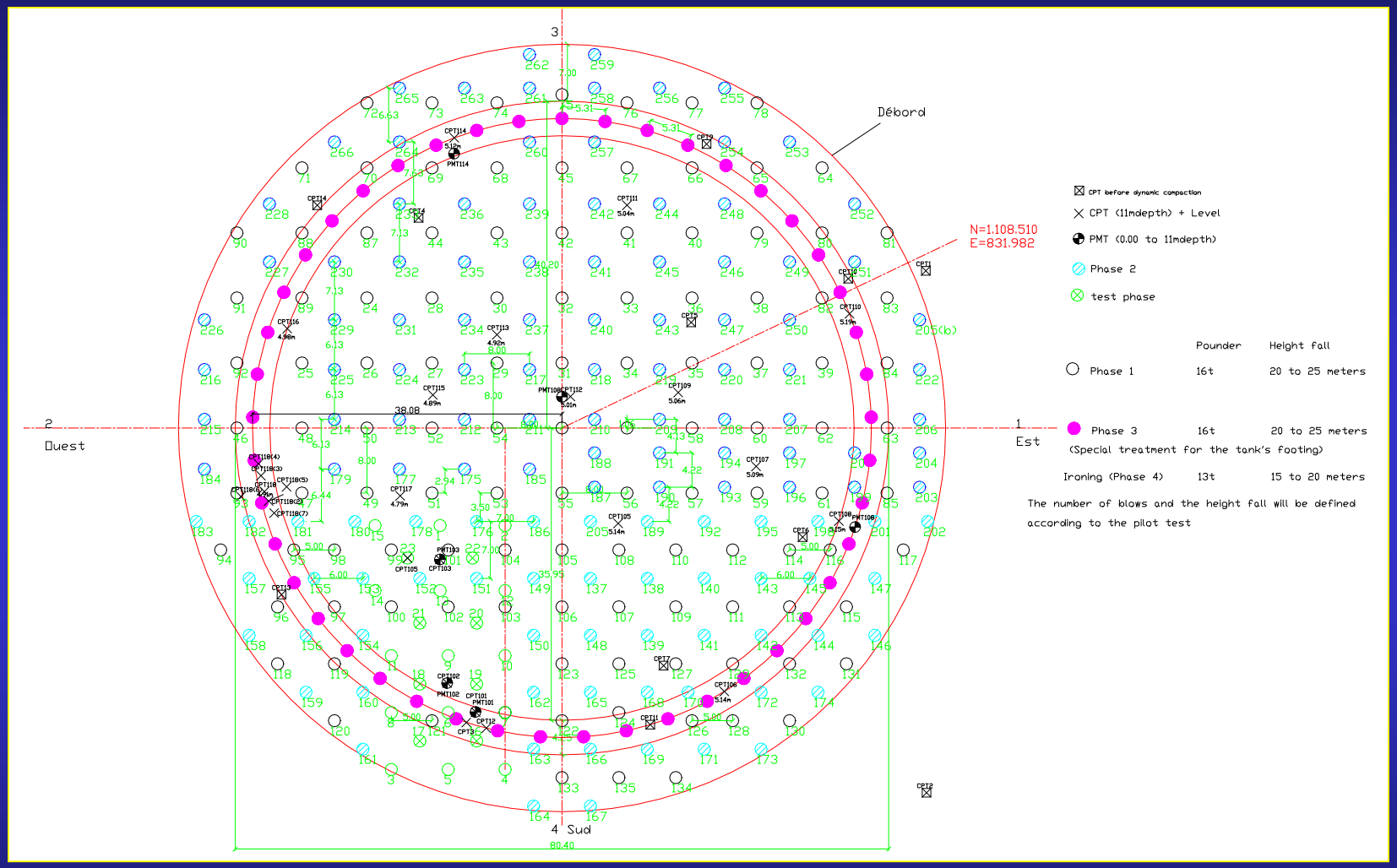


Espagne- Bac GNL :Reconnaissance géotechnique complémentaire

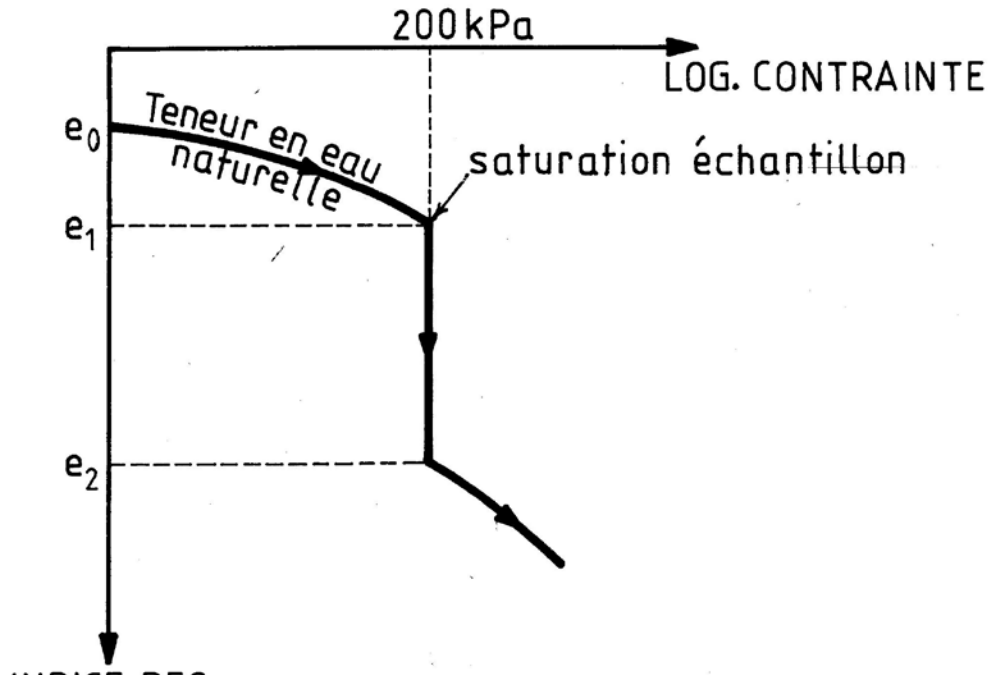


Espagne - Bac GNL

Essai CPTU pour étude du potentiel de liquéfaction



Espagne - Bac GNL: plan de traitement par compactage dynamique et sondages de contrôle

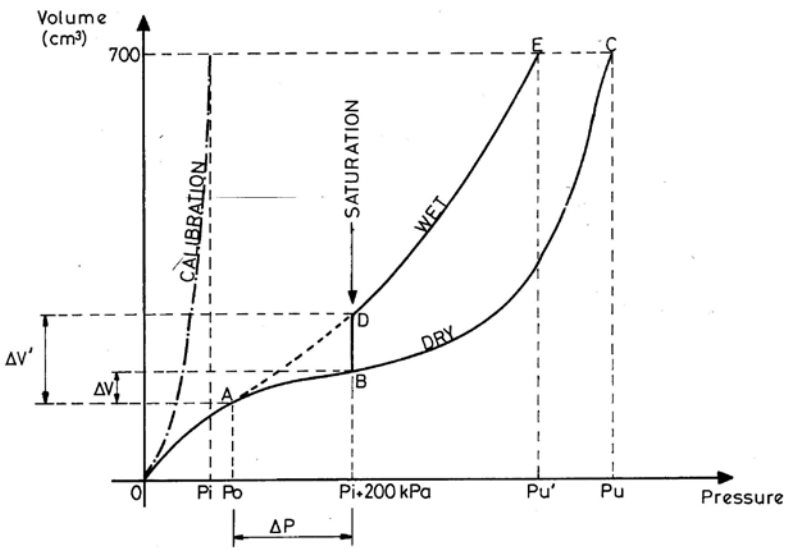


potentiel d'affaissement $= \frac{e_2 - e_1}{1 + e_0} \times 100$

déformation totale à saturation $= \frac{e_2 - e_0}{1 + e_0} \times 100$

COURBE OEDOMETRIQUE TYPIQUE D'UN SOL AFFAISSABLE

Essai oedométrique pour sol affaissable



DRY CONDITIONS

$$Pl = Pu - Pi$$

$$E = K \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

SATURATED CONDITIONS

$$Pl' = P'u - Pi$$

$$E' = K \frac{\Delta P}{\Delta V'}$$

PRESSUREMETER TESTING IN COLLAPSIBLE SOILS

Pressiomètre avec injection d'eau pour essai dans les sols affaissables

Étude d'une solution par pilonnage

(chantier en Afrique du Sud)

Type de sol	SABLE SILTEUX
Epaisseur	2,00 à 5,00 m
Granulométrie	0,005 - 2,000 mm
Teneur en eau	W = 2 à 6 %
Optimum Proctor	W_{opt} = 8 à 11%
Poids volumique sec	13,7 à 16,2 kN/m^3
Déformation totale à saturation	5 à 15%
Module pressiomètrique	E = 20 MPa (E = 2 MPa après saturation)

Caractéristiques des sols de NABOOMSPRUIT

(Valeurs moyennes)	Avant traitement	Après traitement
Densité sèche	14,7 KN/m^3	17,7 KN/m^3
Indices des vides	0,77	0,44
Déformation totale à saturation	10%	< 1%

NABOOMSPRUIT : Amélioration des caractéristiques du sol traité par compactage dynamique

Paramètres géotechniques pour étude et contrôle d'un traitement par pilonnage de sols affaissables

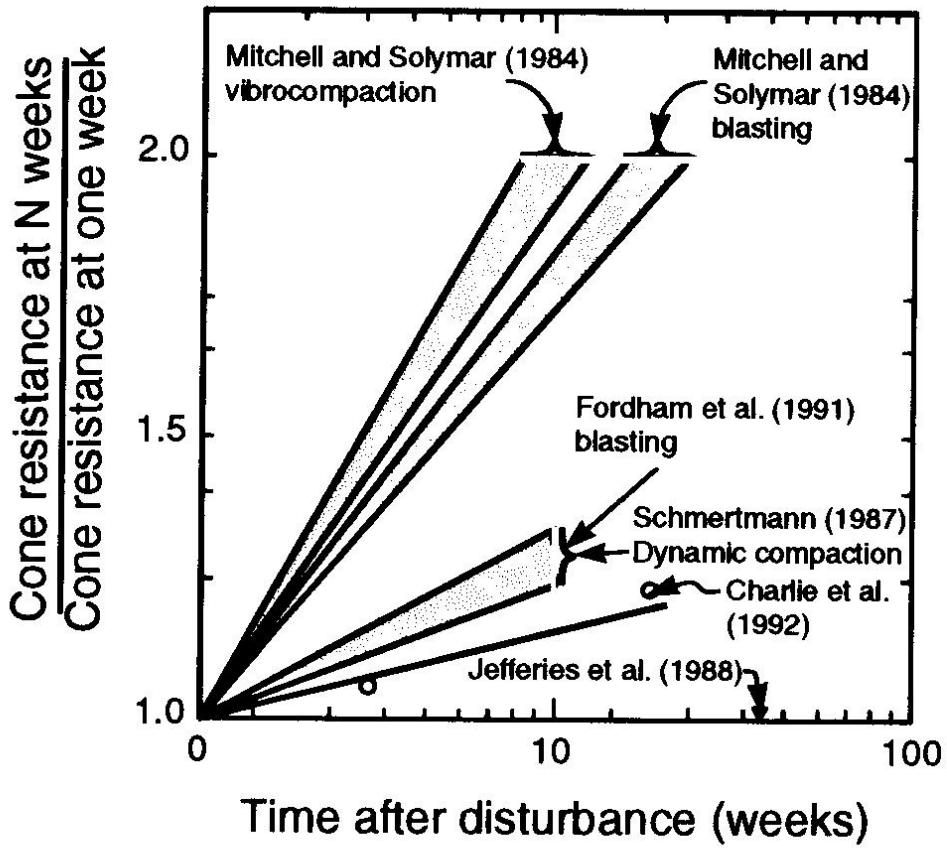
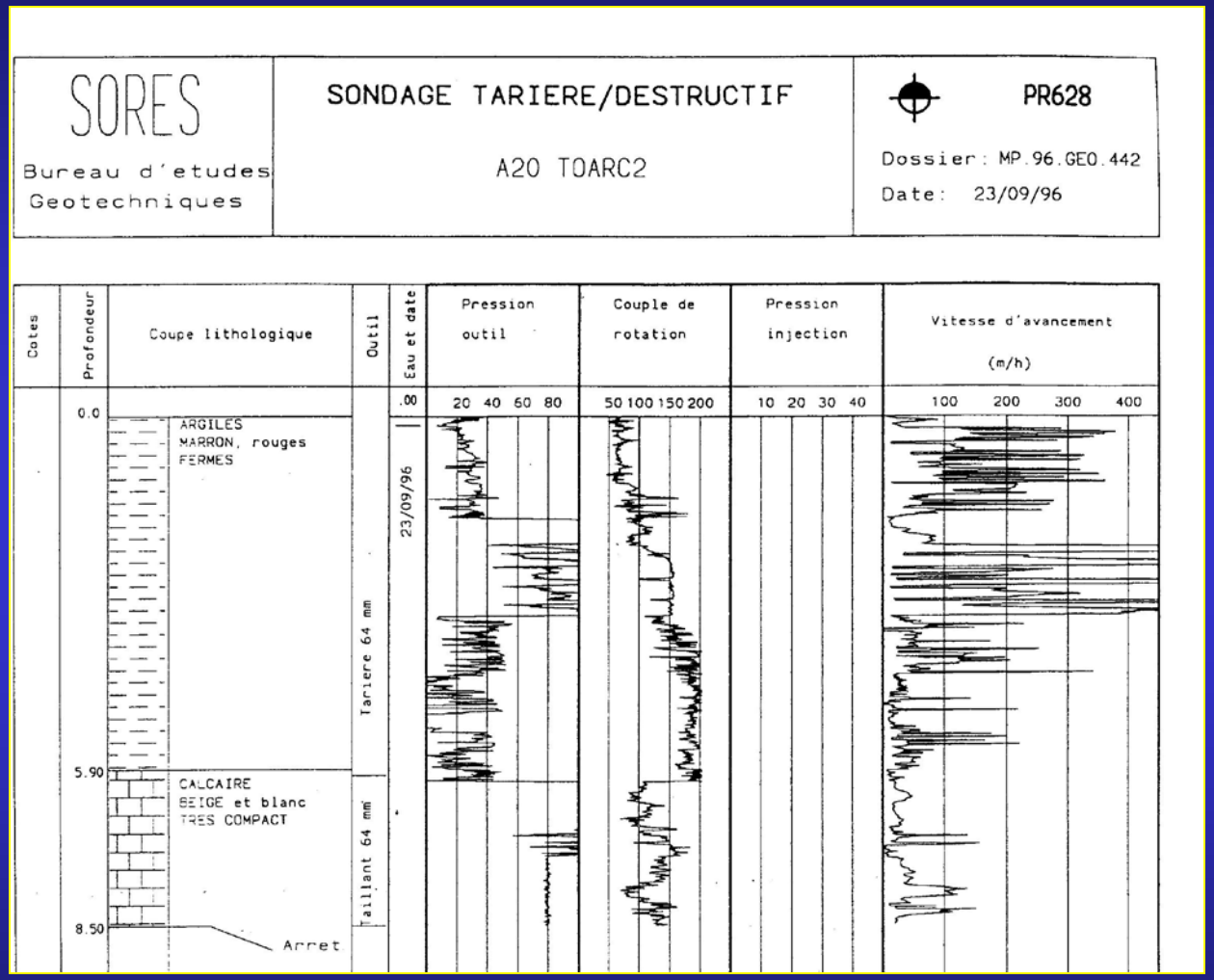


Figure 6.18 Normalized cone resistance in saturated sand versus time after disturbance (after Charlie *et al.*, 1992).

Contrôle de compactage au pénétromètre statique:

Regain de Qc avec le temps

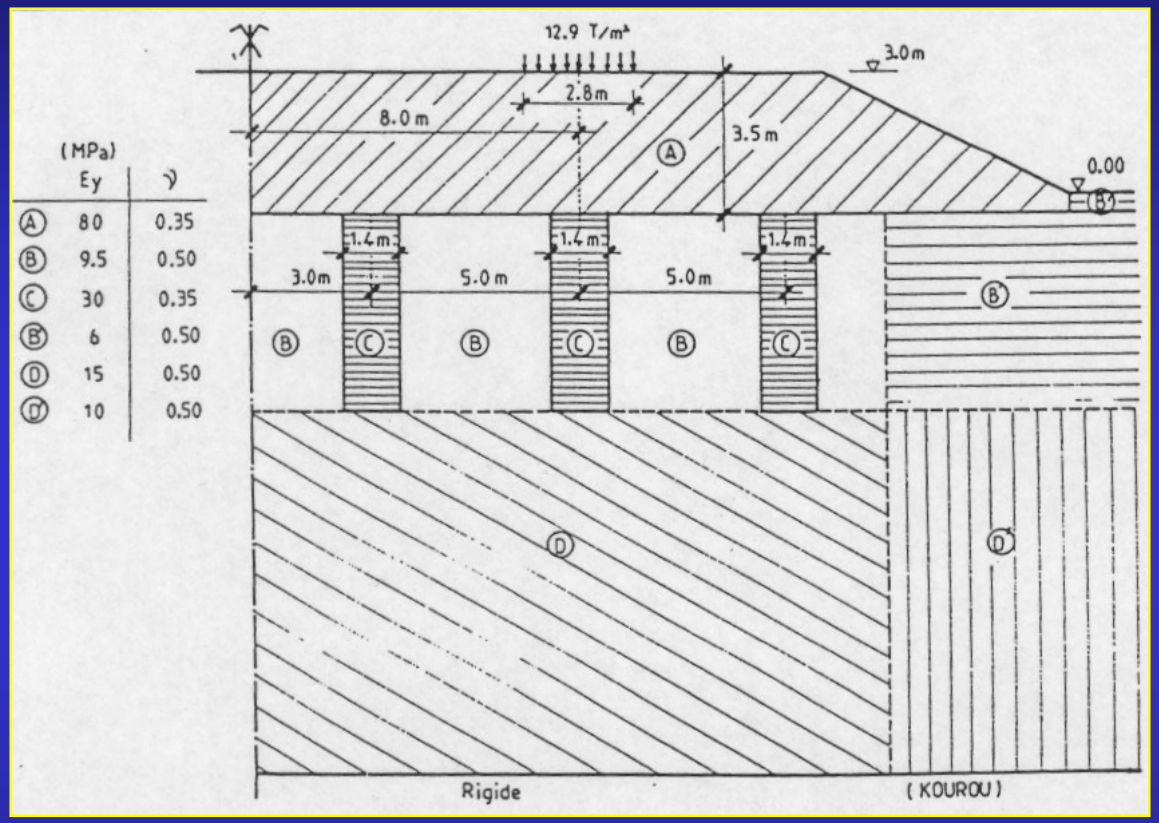


Autoroute A20: Reconnaissance de dolines avant pilonnage

Paramètres géotechniques nécessaires au dimensionnement d'une solution de renforcement par inclusions:

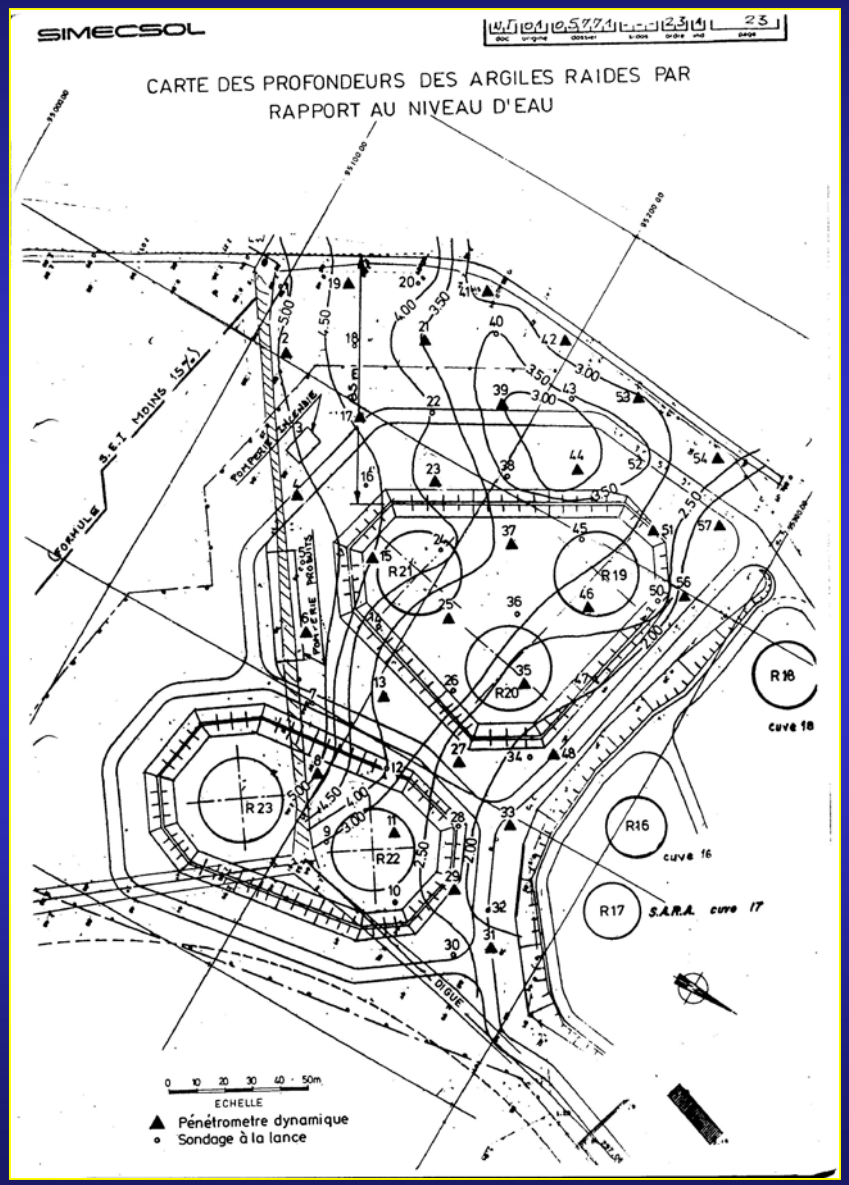
- le sol traité est un matériau composite constitué de l'inclusion entourée du sol encaissant pas ou peu amélioré,
- il faudra donc connaître le module de déformation du sol et de l'inclusion (calcul type éléments finis)

• sol:	pressiomètre ou pénétromètre	
• inclusion:	granulaire:	pressio. ou pénétro.
	cimentée:	éprouvettes



KOUROU – plots ballastés

Paramètres géotechniques pour modélisation aux éléments finis

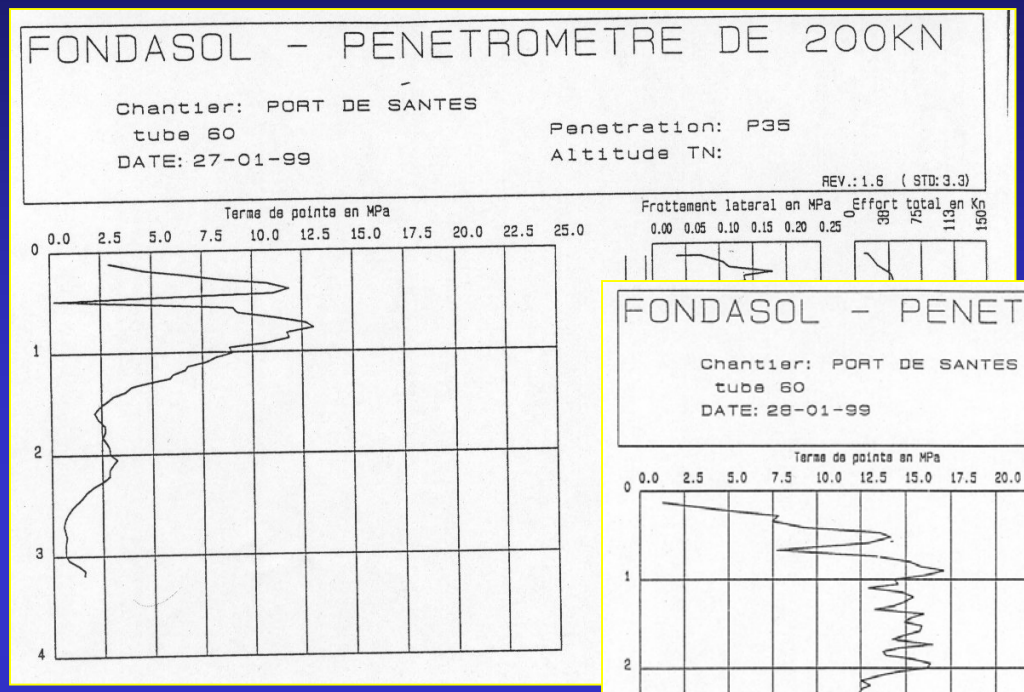


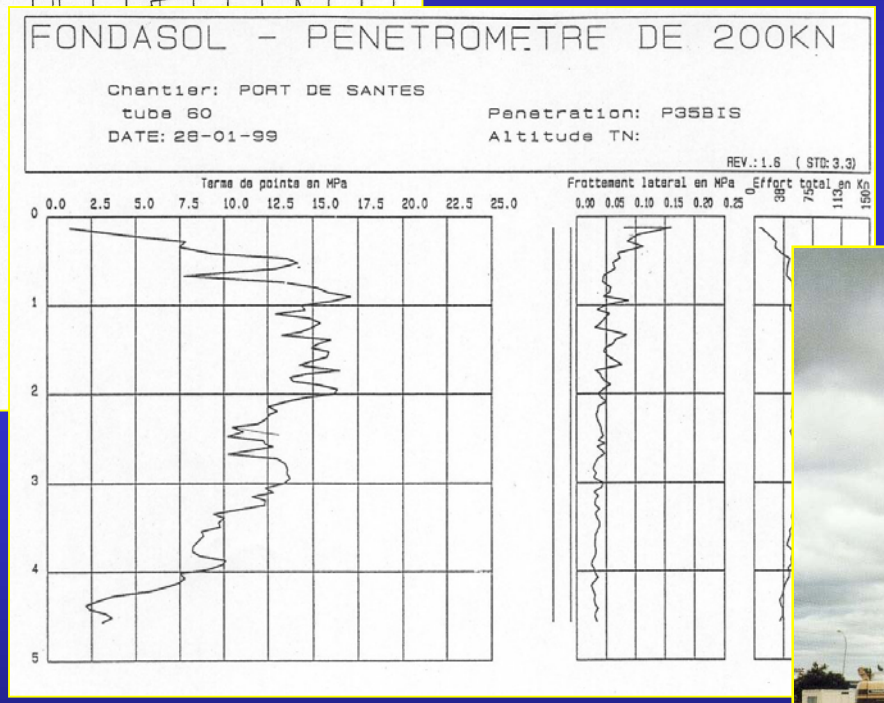
Dépôt Pétrolier en Guadeloupe

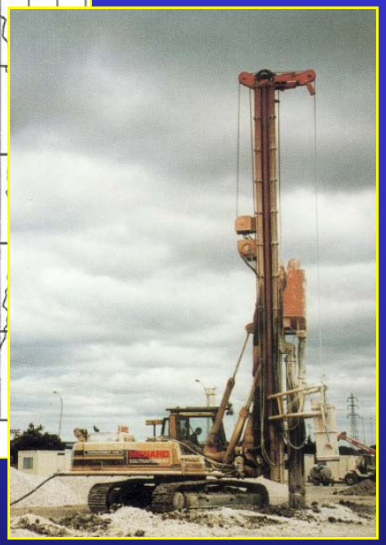
Reconnaissance préliminaire

****

Détermination de la profondeur du sol mou pour traitement par plots ballastés



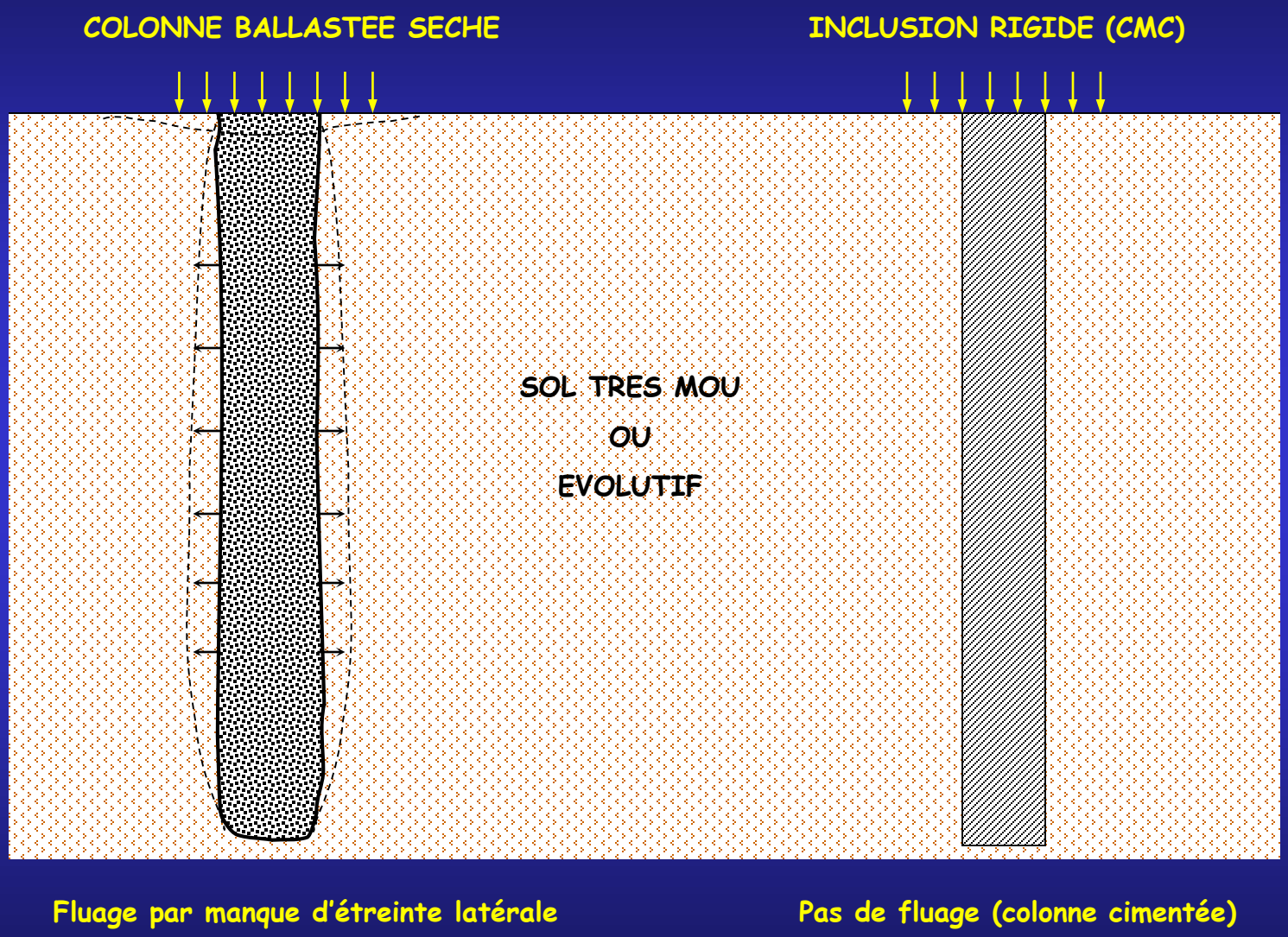




Pénétromètre décalé

Contrôle des colonnes ballastées

Pénétromètre dans l'axe



Nécessité de la vérification de la teneur en matière organique

En conclusion:

• il est indispensable de disposer d'une bonne investigation géotechnique pour l'étude et le dimensionnement d'une solution d'amélioration de sol,

• le contrôle de l'amélioration du sol nécessite de refaire des sondages pendant et après les travaux.