

**COMITE FRANCAIS DE MECANIQUE DES SOLS
ASSOCIATION FRANCAISE DU GENIE
PARASISMIQUE**

**EVALUATION du RISQUE de
LIQUEFACTION des SOLS
sur le SITE du NOUVEAU
PORT de TANGER (MAROC)**

Plan de l'exposé

- Présentation du projet
- Contexte géologique
- Conditions sismiques
- Les essais in-situ
- Les essais de laboratoire
- Influence du chargement apporté par l'ouvrage
- Influence de la liquéfaction partielle sur la stabilité des caissons : calculs pseudo-statiques et dynamiques
- Conclusions

Le site : Détroit de Gibraltar, 45 Kms au NORD-EST de TANGER, Façade Atlantique



24/03/ 2010

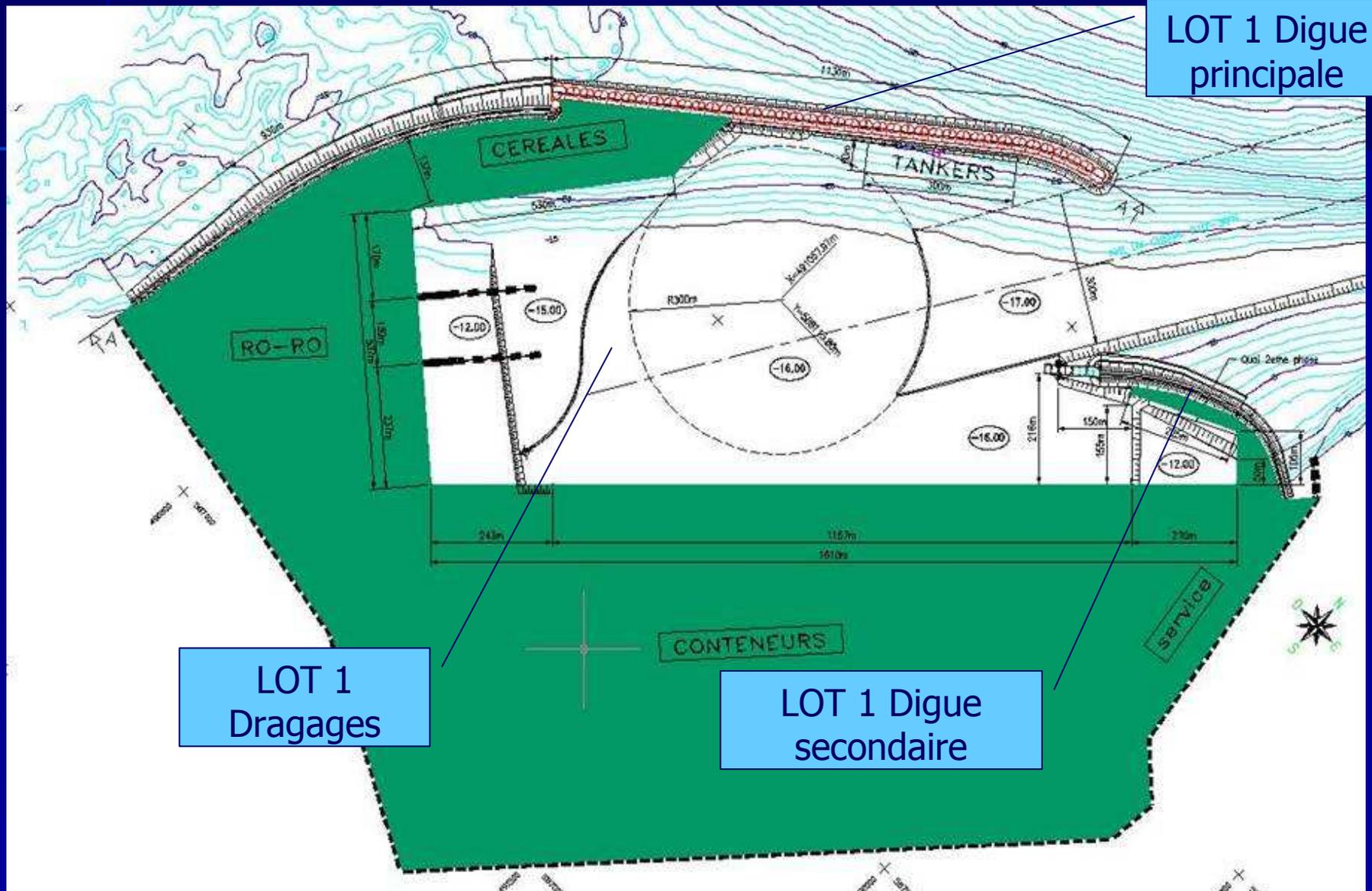
CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Le projet du port de TANGER – MEDITERRANEE (LOT 1)

- Une digue principale de > 2000 ml composée sur 900 m d'une digue traditionnelle à talus et sur 1100 m d'une digue à caissons
- Une digue secondaire de 600 m
- Des dragages à la cote moyenne de -16.00
- Digue à caissons : 40 caissons quadrilobés d'emprise 28.00 x 28.00 m fondés à la cote -20.00 sur un matériau d'assise préalablement clapé
- Contrainte effective au niveau de l'assise = 300 KPa
- Hauteur totale = 35 m avec les superstructures de la digue

Le projet du port de TANGER - MEDITERRANEE



État d'avancement des travaux en MAI 2007



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Les intervenants

- Maître d'Ouvrage : ASTM (Agence Spéciale Tanger Méditerranée) représentant le Royaume du Maroc, assisté du Prof. Leslie T.YOUD
- A.M.O.: INGEMA (Maroc) HALCROW (R.U.)
- Entreprise : Groupement SAIPEM-SA / BOUYGUES-TP assisté de MECASOL (M.LONDEZ) et TERRASOL / GEOTER
- Commission spécialisée créée entre les intervenants pour l'évaluation du risque de liquéfaction des sols
- Les enjeux : traitement du sol en place

Préfabrication puis mise à l'eau des caissons



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Remorquage des caissons



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Caissons en fabrication à la cote définitive le long du quai de rehausse



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Fabrication des superstructures de la digue



24/03/ 2010

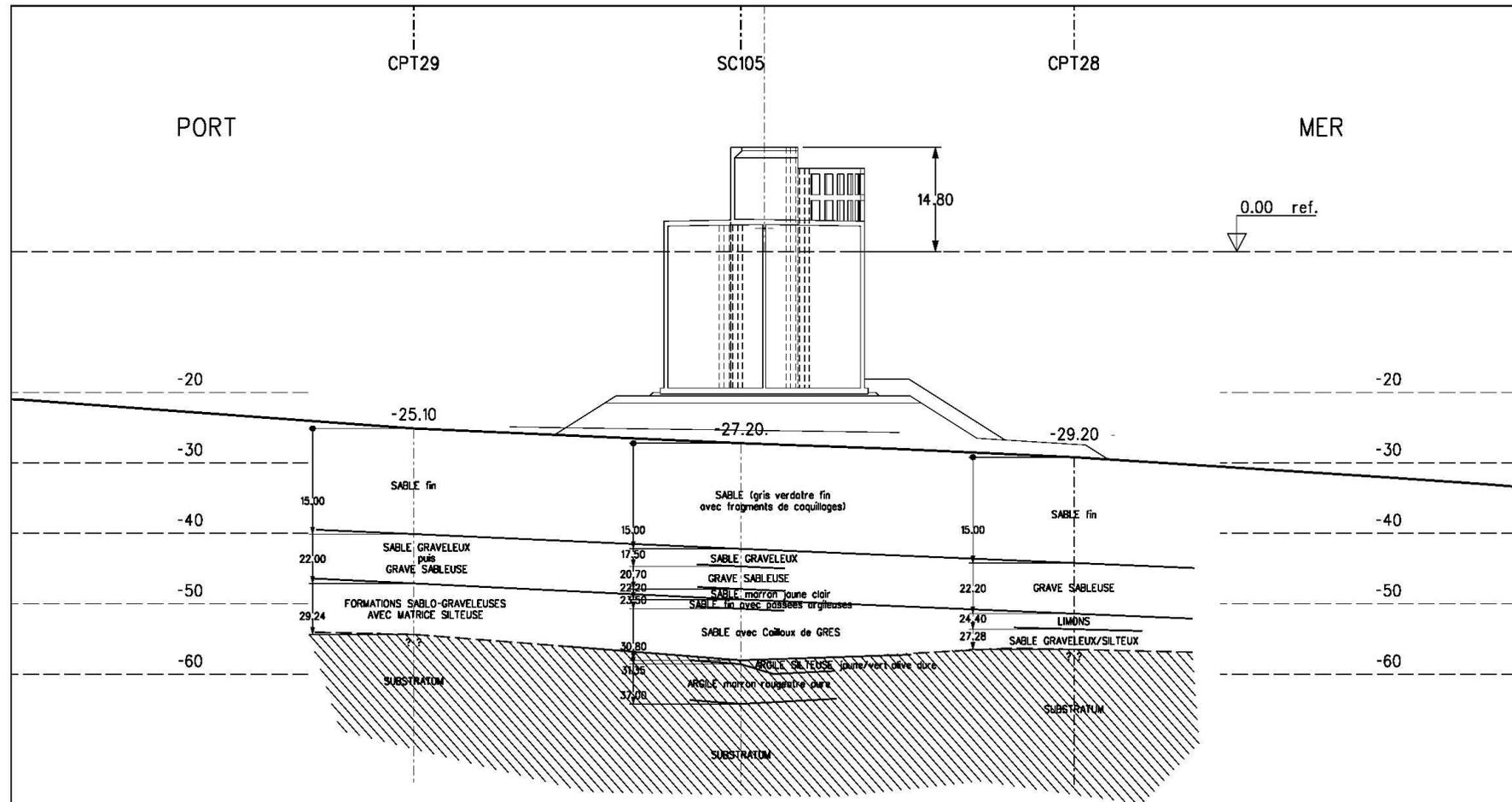
CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Le contexte géologique

- Couverture quaternaire sur un socle de flyschs tertiaires et secondaires
- Terrains quaternaires 1 : sédimentation marine (**sable fin** à moyen coquillier)
- Terrains quaternaires 2 : sédimentation fluviale de l'Oued R'mel (alternances de **sable**, d'argile molle avec matières organiques, de graves)
- Substratum à l'Ouest du site : alternance de grès micacés et pélites (OLIGOCENE, nappe des flyschs des BENI IDER)
- Substratum au centre du site : calcaires / calcaires et marnes micacées rouges (Paléocène / Éocène) / marno-calcaires (Crétacé Supérieur) (BENI IDER)
- Substratum à l'Est du site : alternance de grès vert-jaune et de pélites (Crétacé Inférieur – Flysch du DJEBEL TISIRENE)

Une coupe géologique



**PORT DE TANGER - MEDITERRANEE - DIGUE PRINCIPALE
COUPE TRANSVERSALE VERS LE PM 2050**

1/500
1/500
A3

d:\tonger\section6.dg

Document 14.02/TEC/M/PED/PLA/02207 0

PAGE 12/17

BDe le 18/11/03
JB.F le 18/11/03

24/03/ 2010

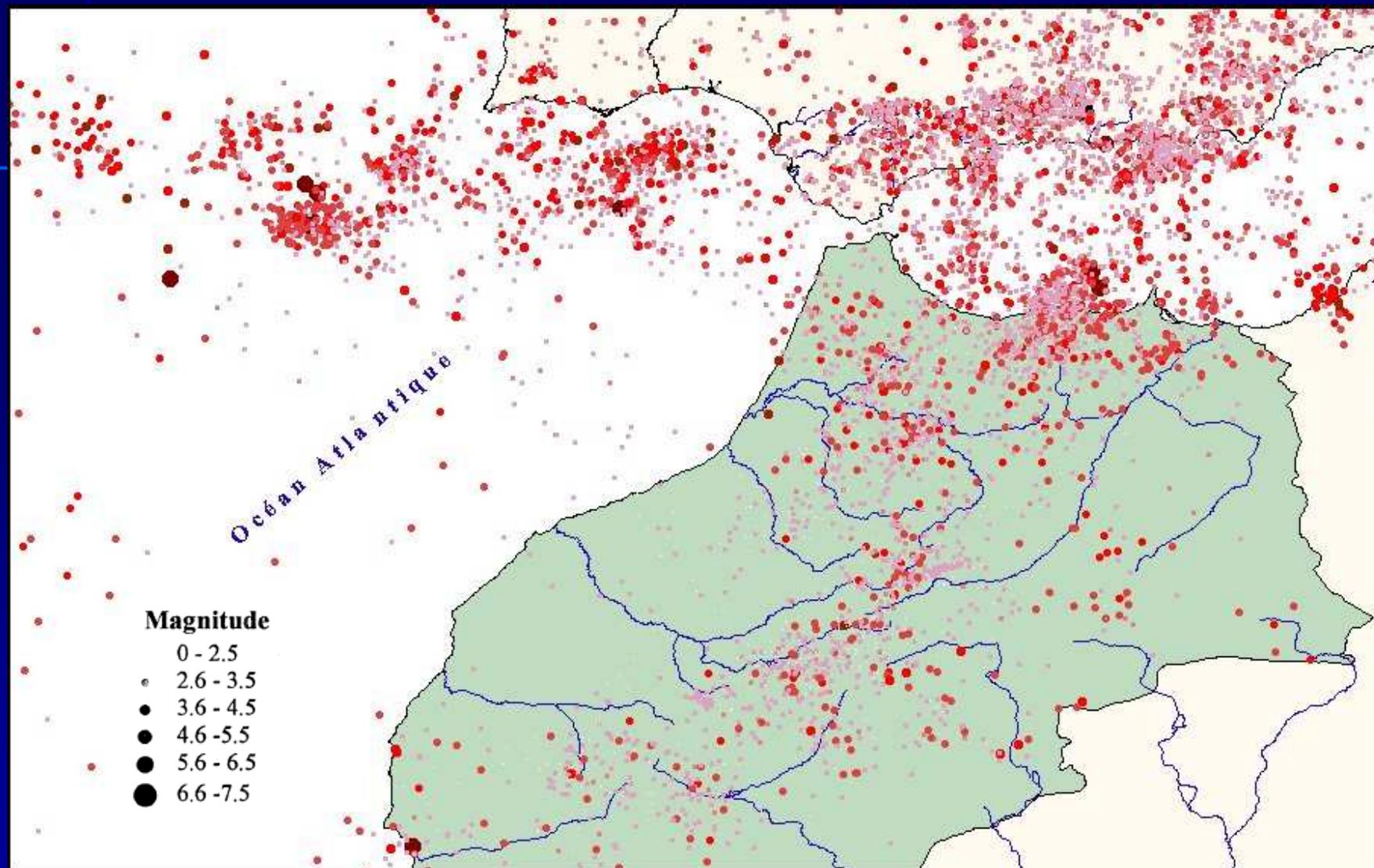
CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Les conditions sismiques

- Évaluation de l'aléa sismique : Étude sismo-tectonique faite par l'Université MOHAMMED V de RABAT (MM.CHERKAOUI / AZEBRIY)
- Source locale : mouvements les plus pénalisants dans les hautes fréquences
- Source lointaine : Golfe de CADIX /SW du CAP ST VINCENT, mouvements les plus pénalisants dans les basses fréquences

Recensement des SMHV



Sismicité de la région ibéro maghrébine (1901 - 2002)

24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Séismes de référence du site

Tableau IX : Séismes de référence du site du futur port Tanger-Méditerranée. h : profondeur du foyer; R_e : distance épacentrale entre le site et le séisme; R_t : distance au site après translation; R_{ft} : distance focale après translation; M : magnitude, I_0 : intensité épacentrale

SOURCE	ZONE-SOURCE	CONTEXTE GEODYNAMIQUE	SEISME DE REFERENCE								
			Date	h (km)	R_e (km)	R_t (km)	R_{ft} (km)	SEISME MAXIMAL (SMHV)		SEISME MAJORE (SMS)	
								I_0	I au site	I_0	I au site
								M			
LOINTAINES	SW du Cap St Vincent (SWSV)	Interplaque Compressif Croûte océanique	01/11/1755	22	450	370	≈371	XII	VII	XII	VII
		8.5									
LOINTAINES	Golfe de Cadix (GC)	Intermédiaire Croûte intermédiaire	12/04/1773	15	180	65	≈71	VIII	VI-VII	XI	VII-VIII
		5.8									
PROCHE	Rif Occidental (NW)	Intraplaque Croûte continentale	29/09/1926	6	18	7	9	V-VI	V	VI-VII	VI
		4.2									

Hypothèses de conception : 2 jeux de valeurs

Tableau XII : Valeurs moyennes des accélérations maximales

		Valeur moyenne (g)	Valeur moyenne + un écart-type (g)
NW Rif (Site)	SMHV, M=4.2	0.081	0.144
	SMS, M=4.7	0.131	0.240
Golfe de Cadix	SMHV, M=5.8	0.034	0.061
	SMS, M=6.3	0.043	0.078
SW Cap St Vincent	SMHV=SMS, M=8.5	0.047	0.093

Reconnaitances géotechniques : Barge 36 m x 12 m équipée d'un mât de forage avec compensateur de houle



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Reconnaitances géotechniques

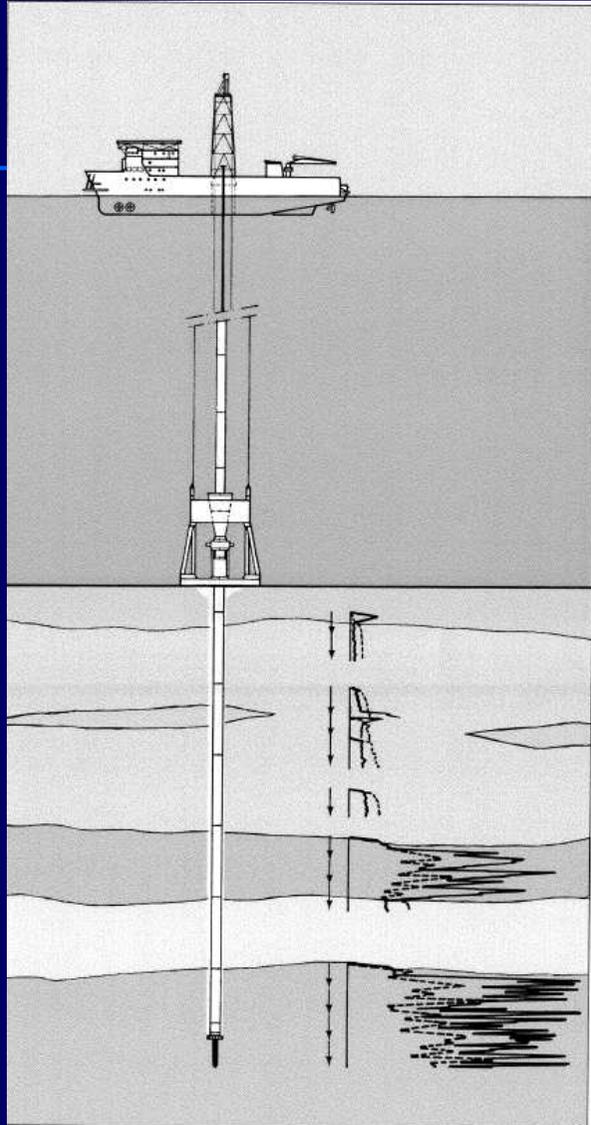
- Mat de forage avec compensateur de houle de 3.00 m
- Double tubage
- Bâti de réaction posé sur le fond



Prélèvements d'échantillons intacts dans les sables (!)

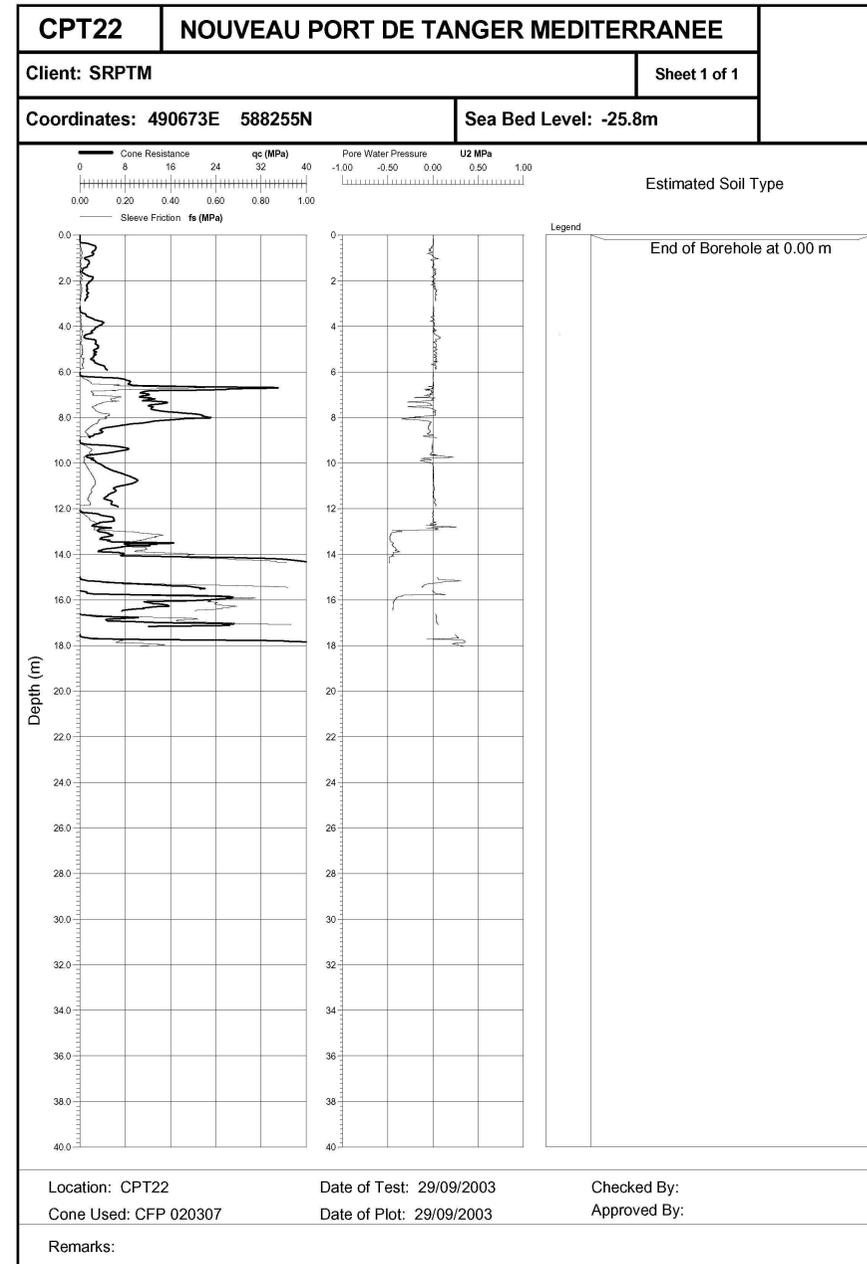


Reconnaitssances géotechniques : CPT



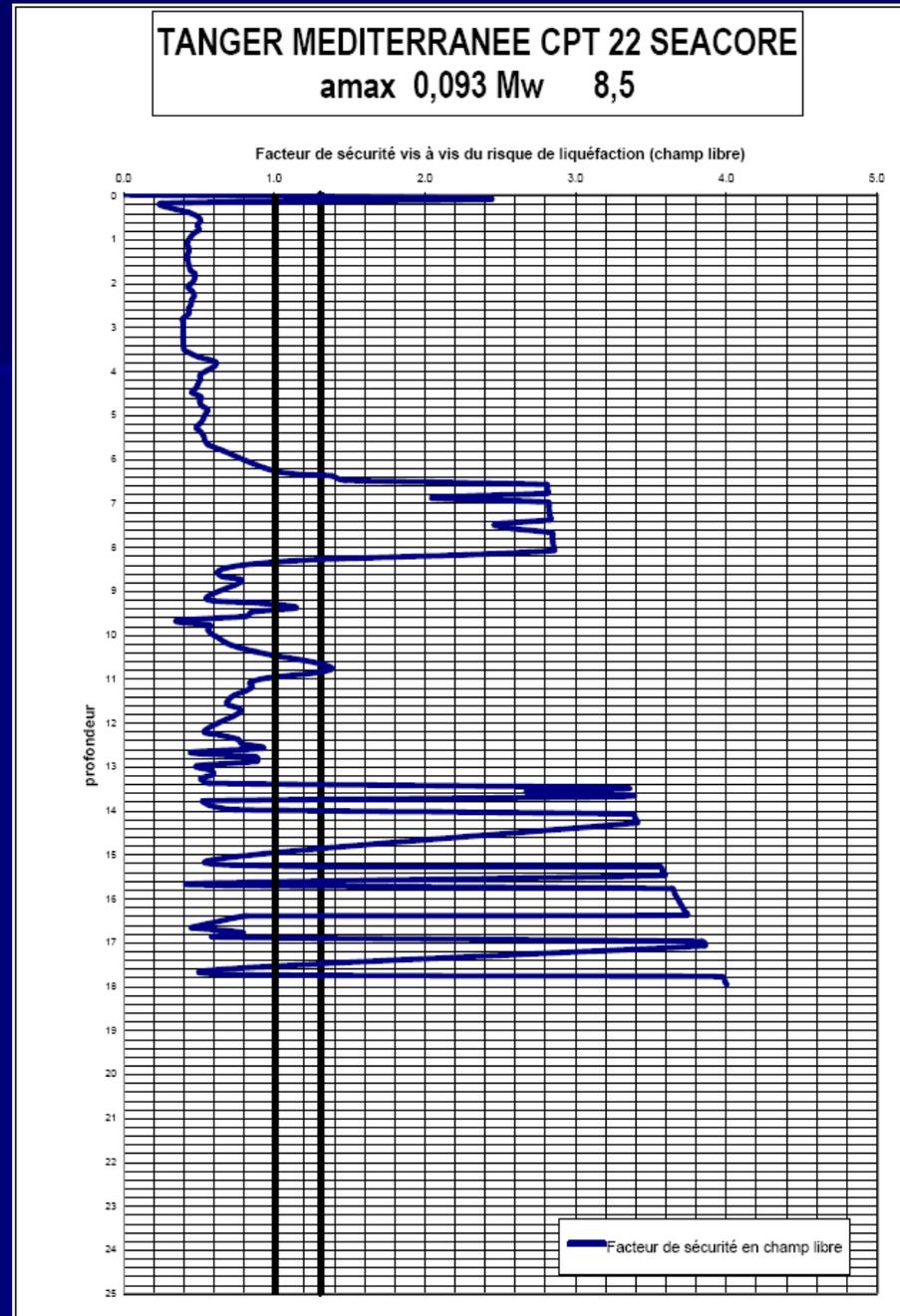
24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Essais In-situ

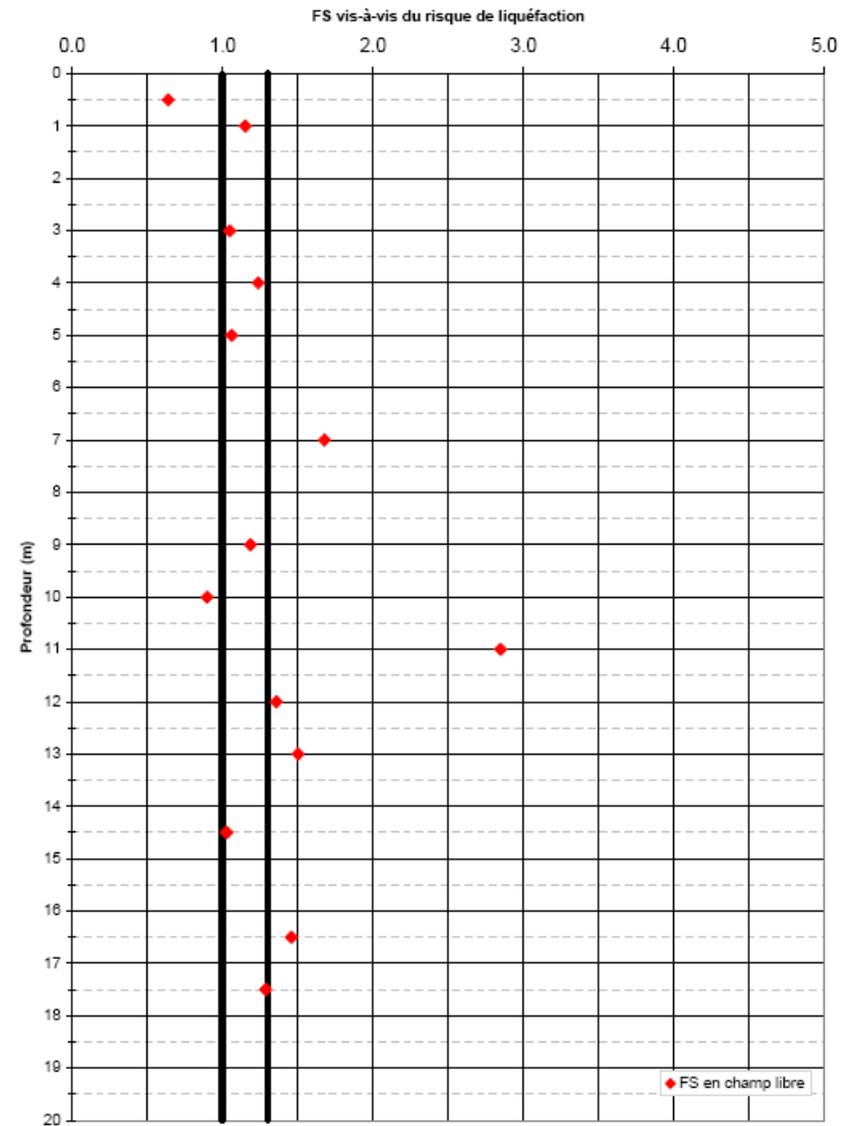
- Evaluation du risque de liquéfaction en champ libre par essai CPT/ interprétation selon les règles NCEER / $FS = MSF \times CRR/CSR$
- Nota : CSR moyen = 0.15 à 0.10 entre 0 et 15 m de profondeur pour accélération a_{max} de 0.093 g



Essais in-situ

- Evaluation du risque de liquéfaction par essai SPT en champ libre / interprétation selon les règles NCEER / $FS = MSF \times CRR/CSR$

TANGER MEDITERRANEE SPT 108 SEACORE
amax 0.093g Mw 8.5



Conclusions des essais in-situ

- Essais CPT concluant franchement au risque de liquéfaction dans certains sondages,
- Le couple Magnitude = 8.5, accélération 0.093 g est plus défavorable que $M = 4.7$ et acc. = 0.24 g,
- Interprétation des essais SPT plus délicate et résultats parfois contradictoires avec les CPT,
- Si D_r initiale = 40 à 55 %, risque de liquéfaction très probable (densité relative extrapolée depuis les essais CPT) ,
- Difficulté de prendre en compte l'influence du chargement de l'ouvrage via les recommandations NCEER

Apport des essais de laboratoire : les essais de cisaillement cycliques (triaxial ou boîte de cisaillement NGI)

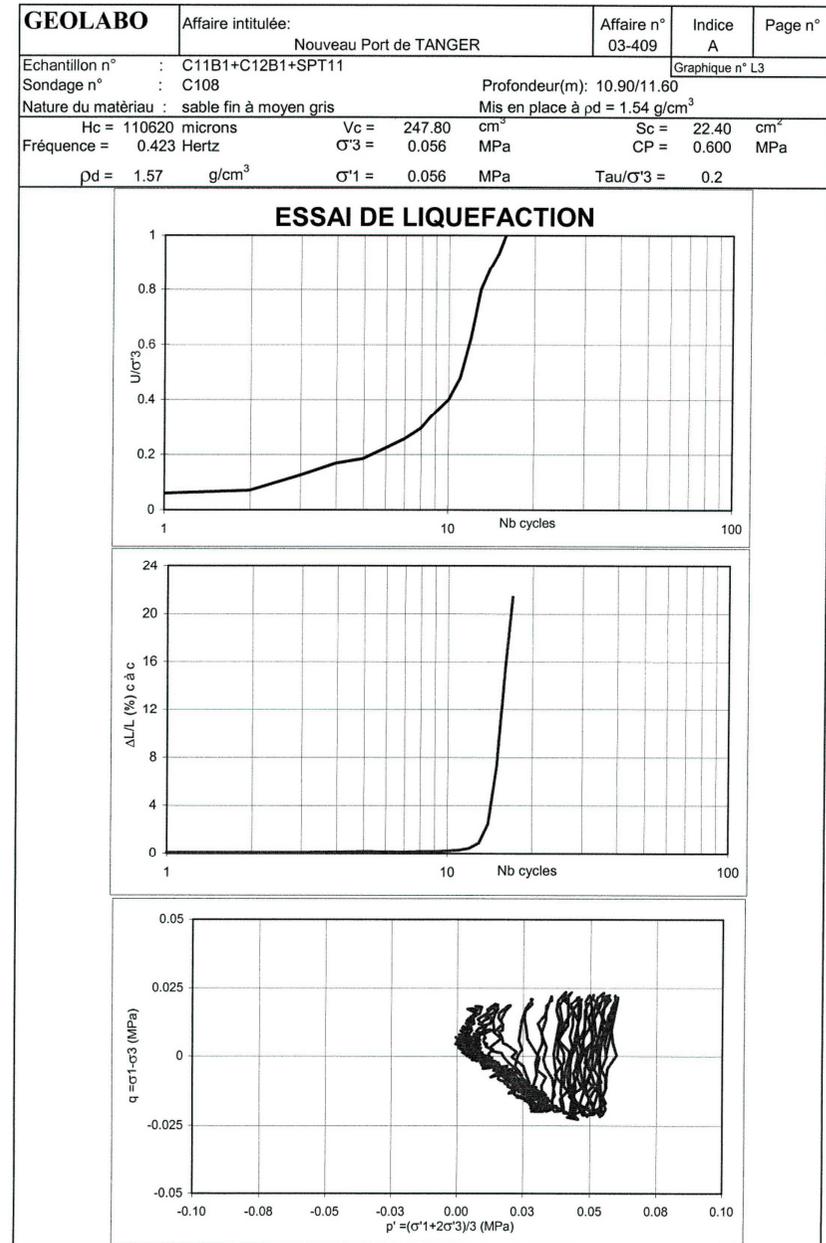
- Influence des paramètres granulométriques
- Influence de la densité relative avant / après consolidation
- Influence de la contrainte de cisaillement statique initiale
- Influence de l'intensité de la sollicitation cyclique

Résultats des essais de cisaillement cycliques

Sondage	Profondeur échantillon	Type de test	Granulométrie échantillon		ETAT INITIAL		CONSOLIDATION				RESULTATS EN FIN D'ESSAI CYCLIQUE					Phénomène observé		
					σ'_{v0} estimé	Dr estimée	Conditions de chargement simulées		σ'_v	σ'_H	τ_a	τ_a/σ'_v	τ_{cy}	τ_{cy}/σ'_v	u / σ'_v		déformation de cisaillement γ_i	nombre de cycles
					KPa	%			KPa	KPa	KPa		KPa				%	N
SC 108	10.90/11.60	TRI	3	7%	90	56%	champ libre	56	56	0	0.00	11	0.20	1.00	-	17	liquéfaction	
SC 108	10.90/11.60	TRI	3	7%	90	46%	sous l'ouvrage	285	285	0	0.00	57	0.20	1.00	-	4	liquéfaction	
SC 104	9.20-9.40	DSS	41	20%	74	38%	champ libre	69	?	0	0.00	7	0.10	0.91	2.52	30	liquéfaction (résultats douteux)	
SC 108	5.00/5.85	TRI	25	16%	43	53%	champ libre	60	60	0	0.00	8	0.13	0.60	-	33	augmentation pression interstitielle	
SC 105	4.65-5.03	DSS	38	20%	38	49%	sous l'ouvrage	450	?	100	0.22	59	0.13	0.58	9.73	31	déformation excessive diminution du module de 70 %	
SC 104	9.20-9.40	DSS	41	20%	74	38%	sous l'ouvrage	470	?	0	0.00	59	0.13	0.39	-0.05	30	diminution du module de 30 % augmentation de la pression interstitielle	
SC 108	5.00/5.85	TRI	25	16%	43	55%	sous l'ouvrage	285	285	0	0.00	37	0.13	0.30	-	32	augmentation pression interstitielle	
SC 104	3.00-4.00	DSS	4	12%	28	50%	champ libre	100	?	0	0.00	14	0.14	0.23	0.05	31	augmentation pression interstitielle	
SC 104	9.20-9.40	DSS	41	20%	74	38%	champ libre	69	?	0	0.00	4	0.06	0.19	-0.005	31	augmentation pression interstitielle	
SC 105	10.00-10.35	DSS	2	7%	82	74%	sous l'ouvrage	450	?	100	0.22	62	0.14	0.14	0.14	30	augmentation pression interstitielle	
SC 104	9.20-9.40	DSS	41	20%	74	38%	sous l'ouvrage	470	?	0	0.00	31	0.07	0.13	0.008	29	augmentation pression interstitielle	
SC 108	3.00/3.70	TRI	58	17%	27	54%	champ libre	60	30	15	0.25	8	0.13	0.10	-	35		
SC 108	5.00/5.85	TRI	25	16%	43	48%	sous l'ouvrage	400	200	100	0.25	52	0.13	0.10	-	32		
SC 106	10.30-10.60	TRI	3	15%	84	42%	sous l'ouvrage	200	90	55	0.28	25	0.12	0.09	0.274	31		
SC 104	6.00-6.75	DSS	53	22%	52	75%	sous l'ouvrage	450	?	100	0.22	60	0.13	0.05	0.14	31		
SC 104	9.00-9.20	TRI	41	20%	73	60%	sous l'ouvrage	470	210	130	0.28	64	0.14	0.03	0.087	30		
SC 105	4.45-4.65	TRI	12	12%	36	51%	sous l'ouvrage	450	202	124	0.28	64	0.14	0.03	0.06	30		
SC 105	7.25-7.50	TRI	21	15%	59	65%	champ libre	60	27	17	0.28	8	0.13	0.03	0.07	29		
SC 105	13.40-13.70	TRI	2	9%	109	?	champ libre	110	50	30	0.27	12	0.11	0.02	0.04	27		

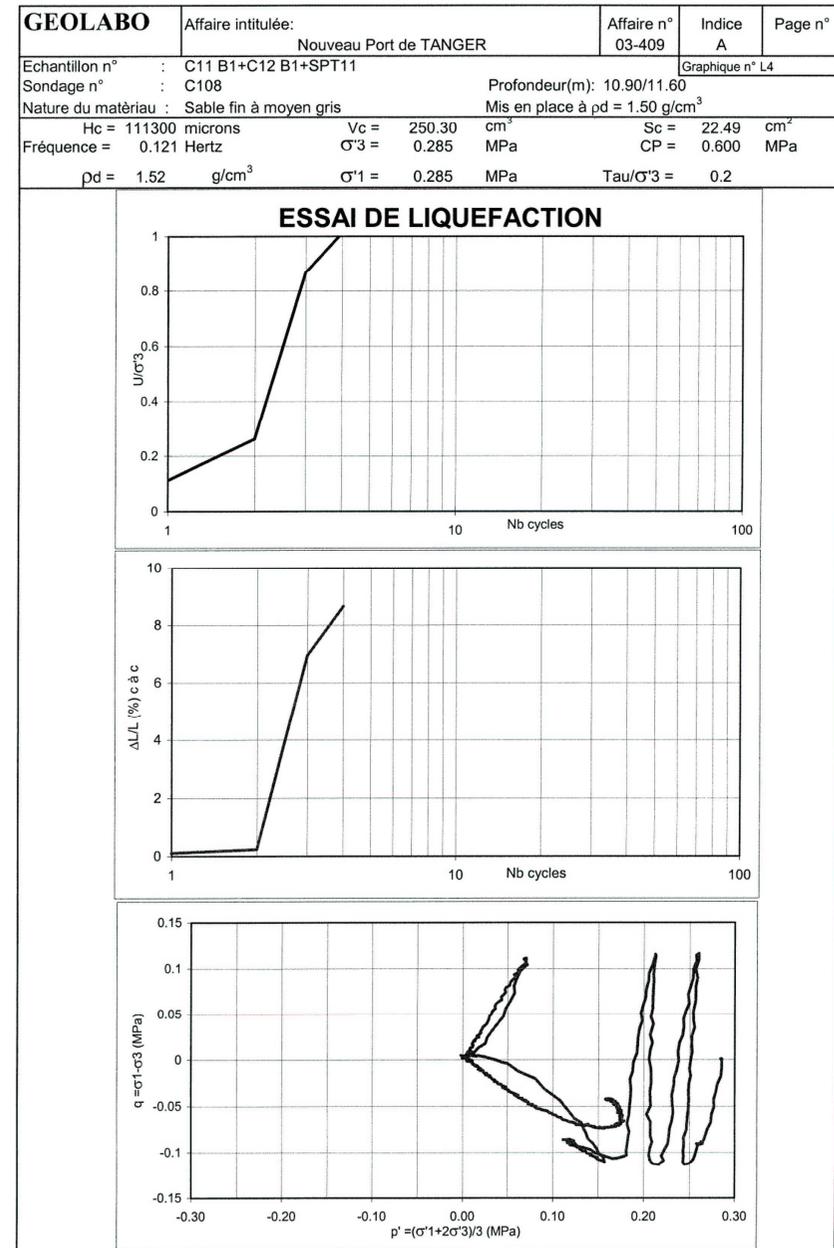
Essai de cisaillement cyclique

- Essai triaxial ayant liquéfié, $CSR = 0.2$
- Conditions : en champ libre
- Consolidation isotrope



Essai de cisaillement cyclique

- Essai triaxial ayant liquéfié, $CSR = 0.2$
- Conditions : sous chargement
- Consolidation isotrope



Granulométrie : catégorie des sables liquéfiables

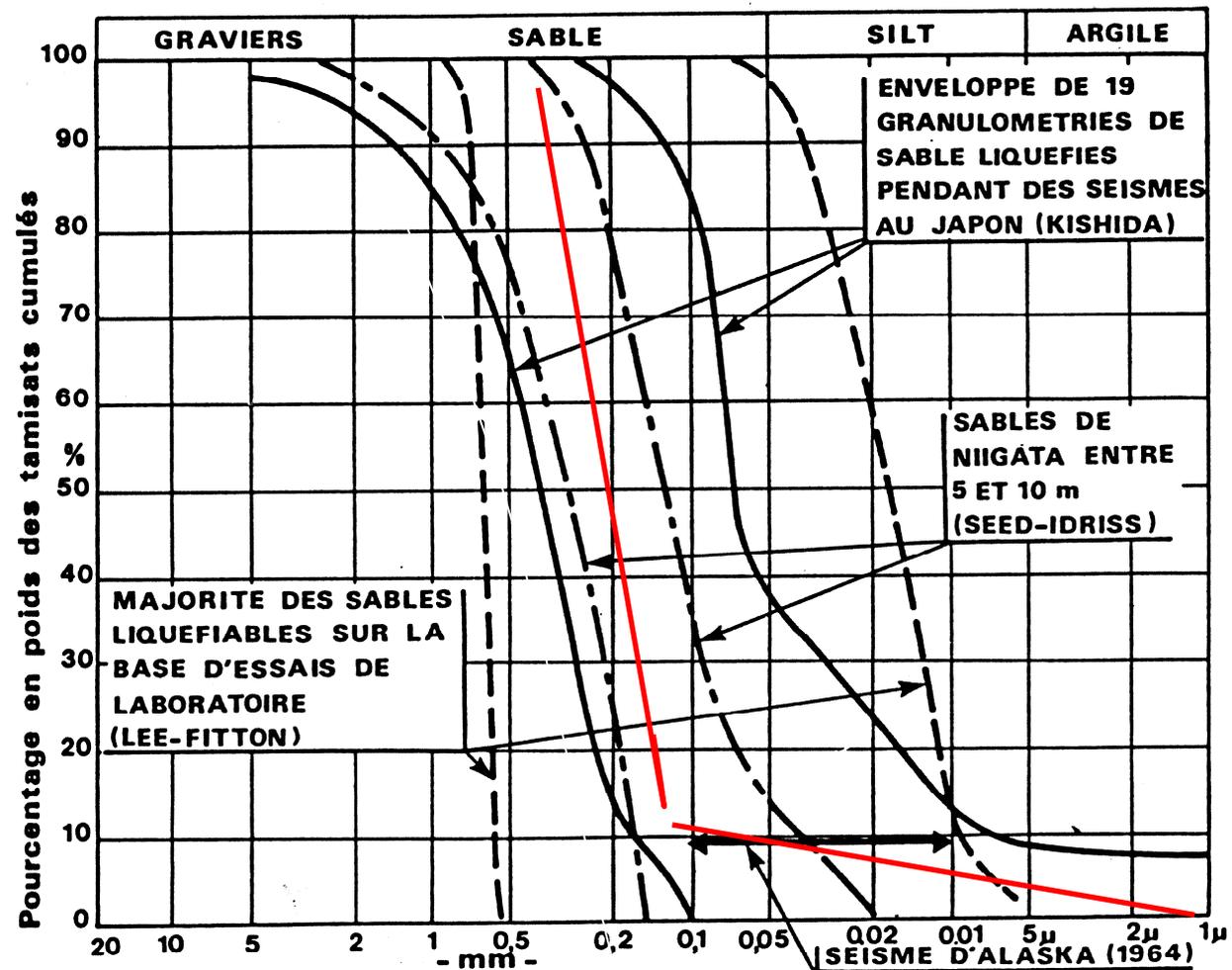


Figure 11 Fuseau granulométrique des sols liquéfiables

Influence de la granulométrie : concordance (relative) avec la littérature (SEED)

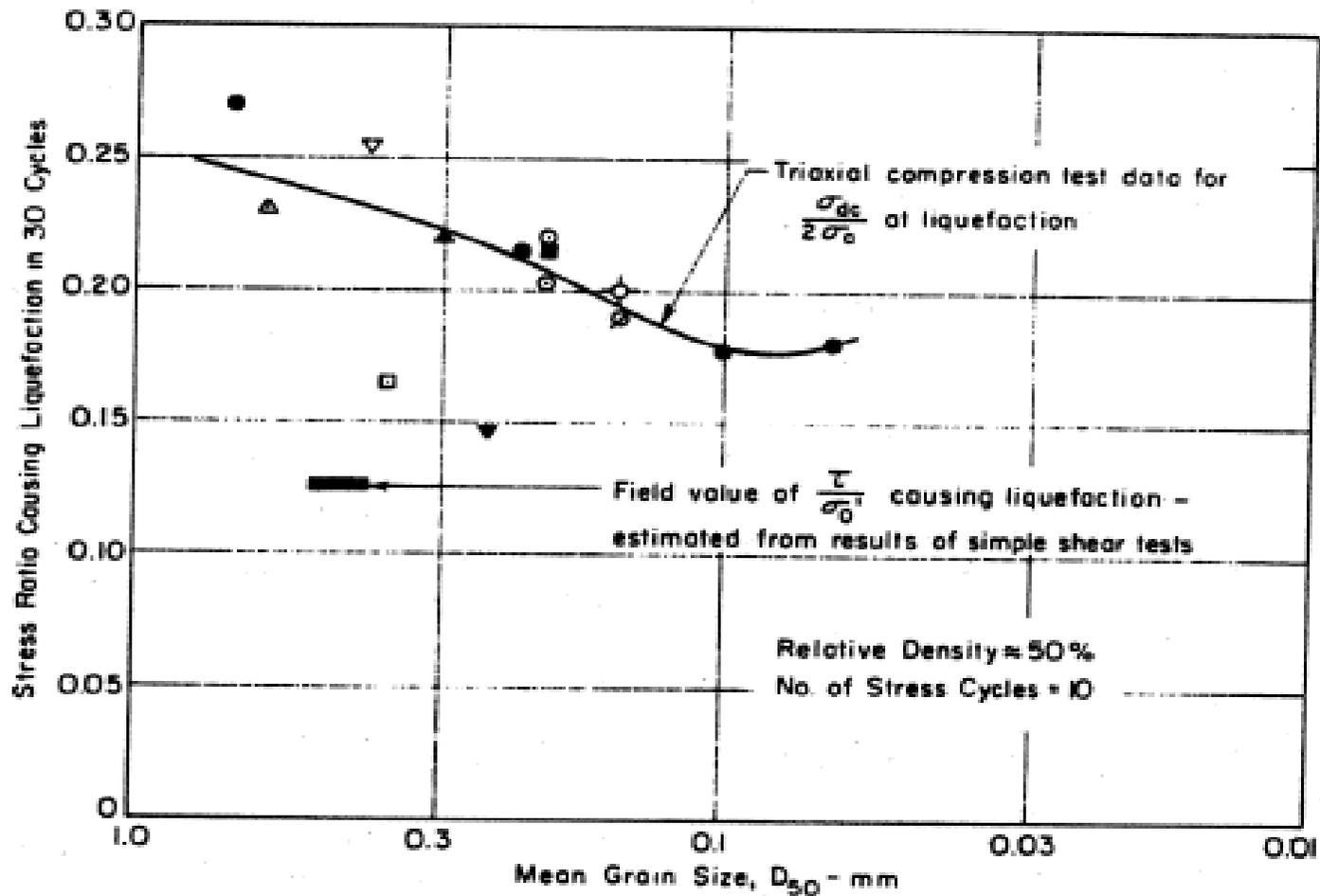
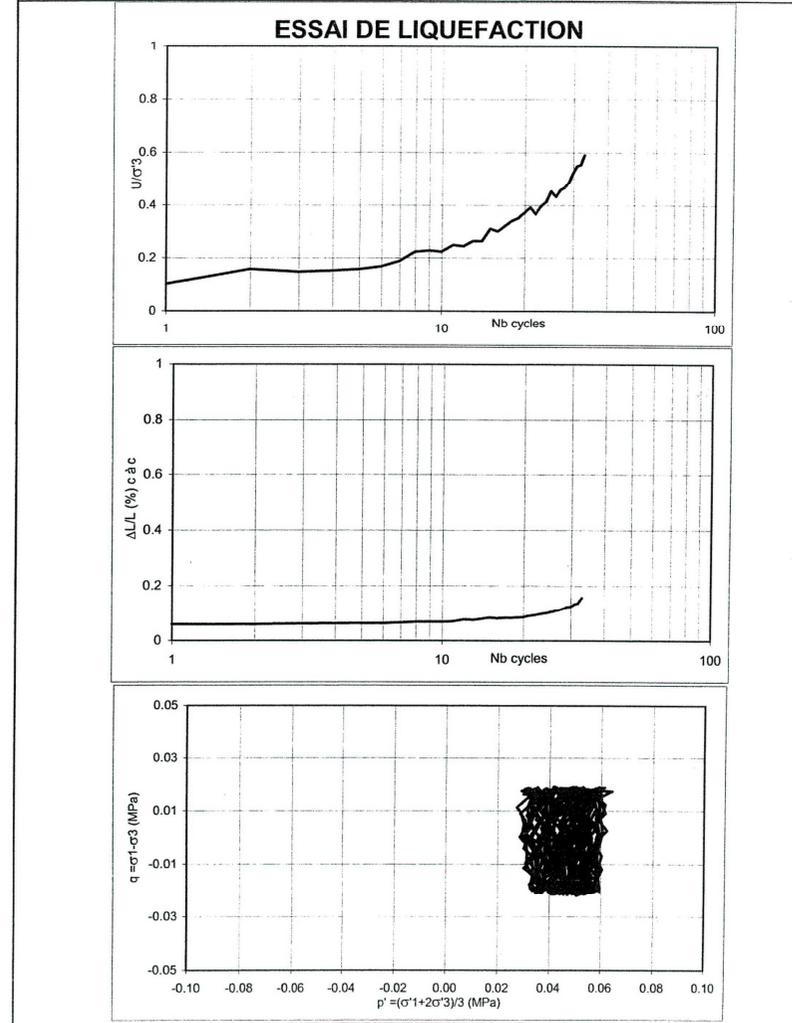


FIG. 7.—STRESS CONDITIONS CAUSING LIQUEFACTION OF SANDS IN 30 CYCLES

Essai de cisaillement cyclique

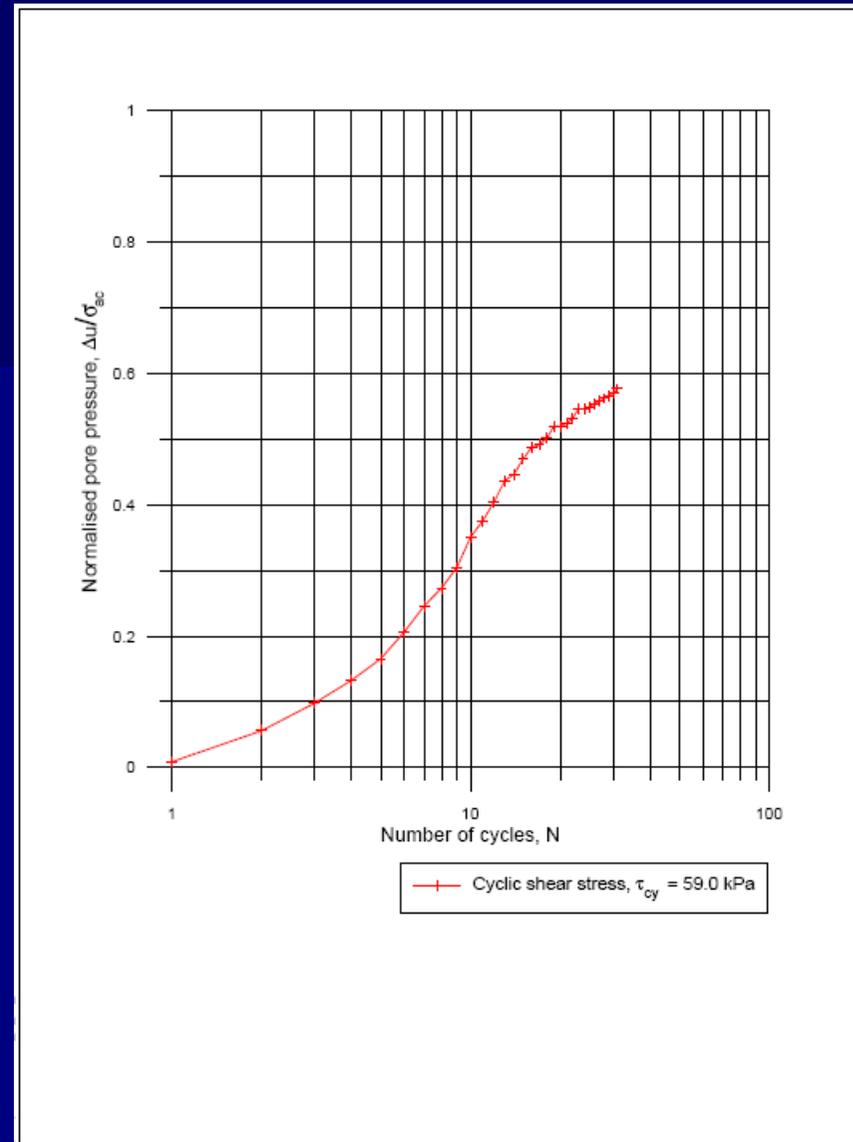
- Essai triaxial « réactif » avec augmentation significative de la pression interstitielle

GEOLABO		Affaire intitulée:	Affaire n°	Indice	Page n°
		Nouveau port de TANGER	03-409	A	
Echantillon n°	: C06B1+C06B2	Profondeur(m): 5.00/5.85		Graphique n°	
Sondage n°	: SC108				
Nature du matériau : sable fin à moyen gris , passages noirâtres		Mis en place à $\rho_d = 1.49 \text{ g/cm}^3$			
Hc = 108760 microns	Vc = 236.96 cm^3	Sc = 21.79 cm^2			
Fréquence = 0.47 Hertz	$\sigma'_3 = 0.060 \text{ MPa}$	CP = 0.600 MPa			
$\rho_d = 1.58 \text{ g/cm}^3$	$\sigma'_1 = 0.060 \text{ MPa}$	Tau/ $\sigma'_3 = 0.13$			



Essai à la boîte de cisaillement cyclique

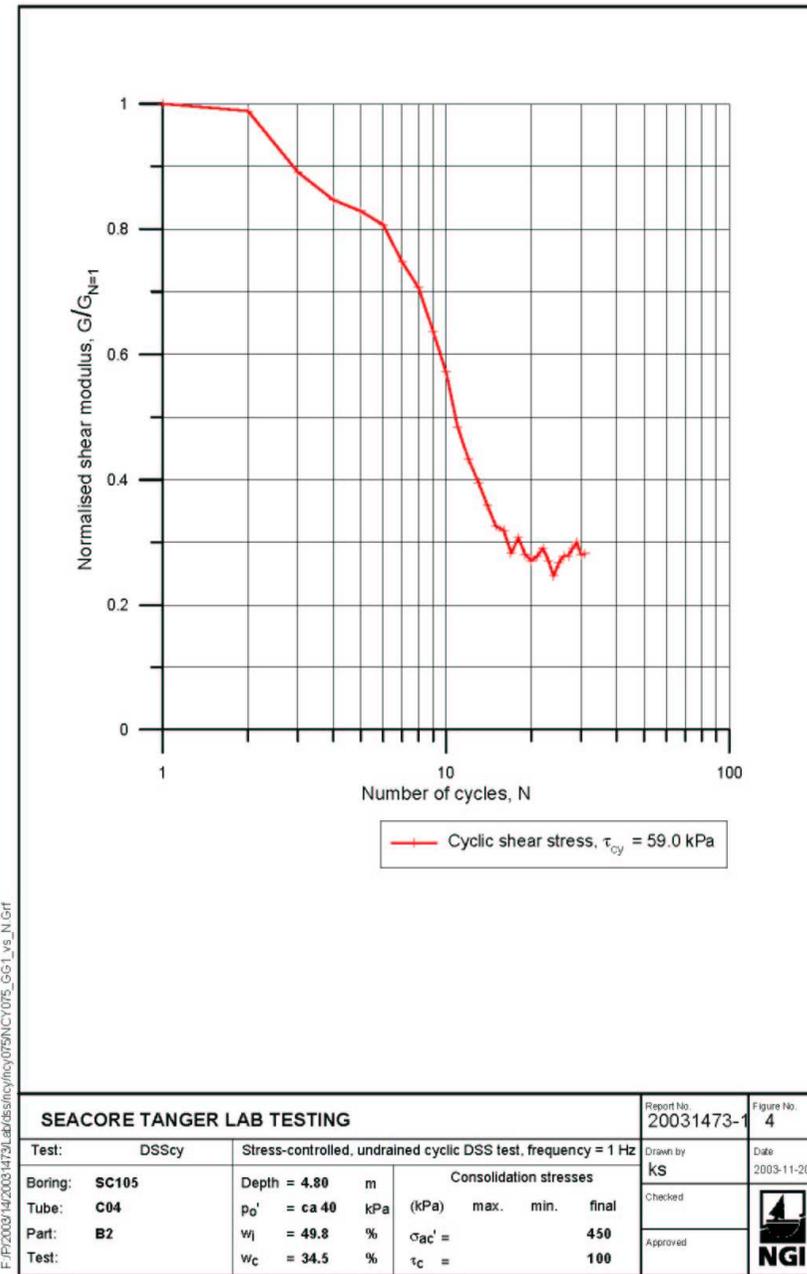
- Essais réactifs : augmentation significative de la pression interstitielle



SEACORE TANGER LAB TESTING				Report No. 20031473-1	Figure No. 3	
Test:	DSScy	Stress-controlled, undrained cyclic DSS test, frequency = 1 Hz			Drawn by KS	Date 2003-11-20
Boring:	SC105	Depth = 4.80 m	Consolidation stresses (kPa)			
Tube:	C04	$p_{o'}$ = ca 40 kPa	max.	min.	final	
Part:	B2	w_l = 49.8 %	σ_{ac} =		450	
Test:		w_c = 34.5 %	τ_c =		100	
					Checked	
					Approved	

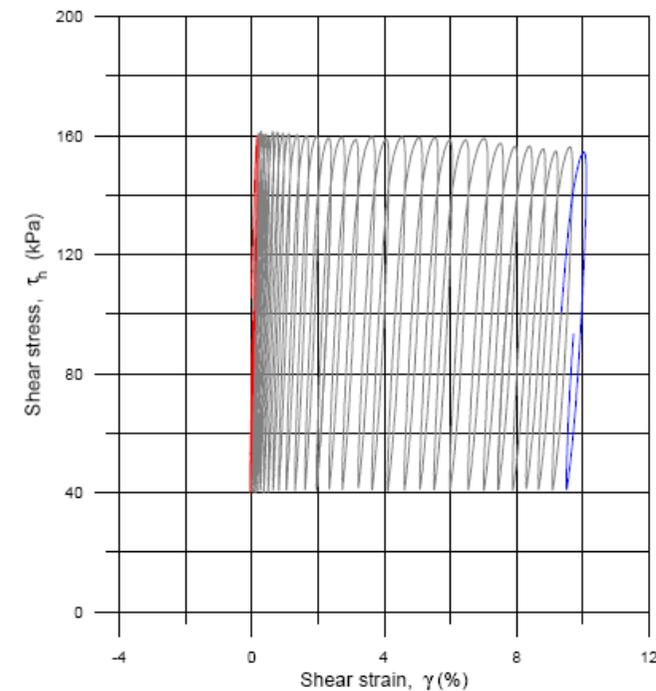
Essai à la boîte de cisaillement cyclique

- Essais réactifs : diminution significative de la valeur du module de cisaillement



Essai à la boîte de cisaillement cyclique

- Variation de la déformation de cisaillement pendant l'essai

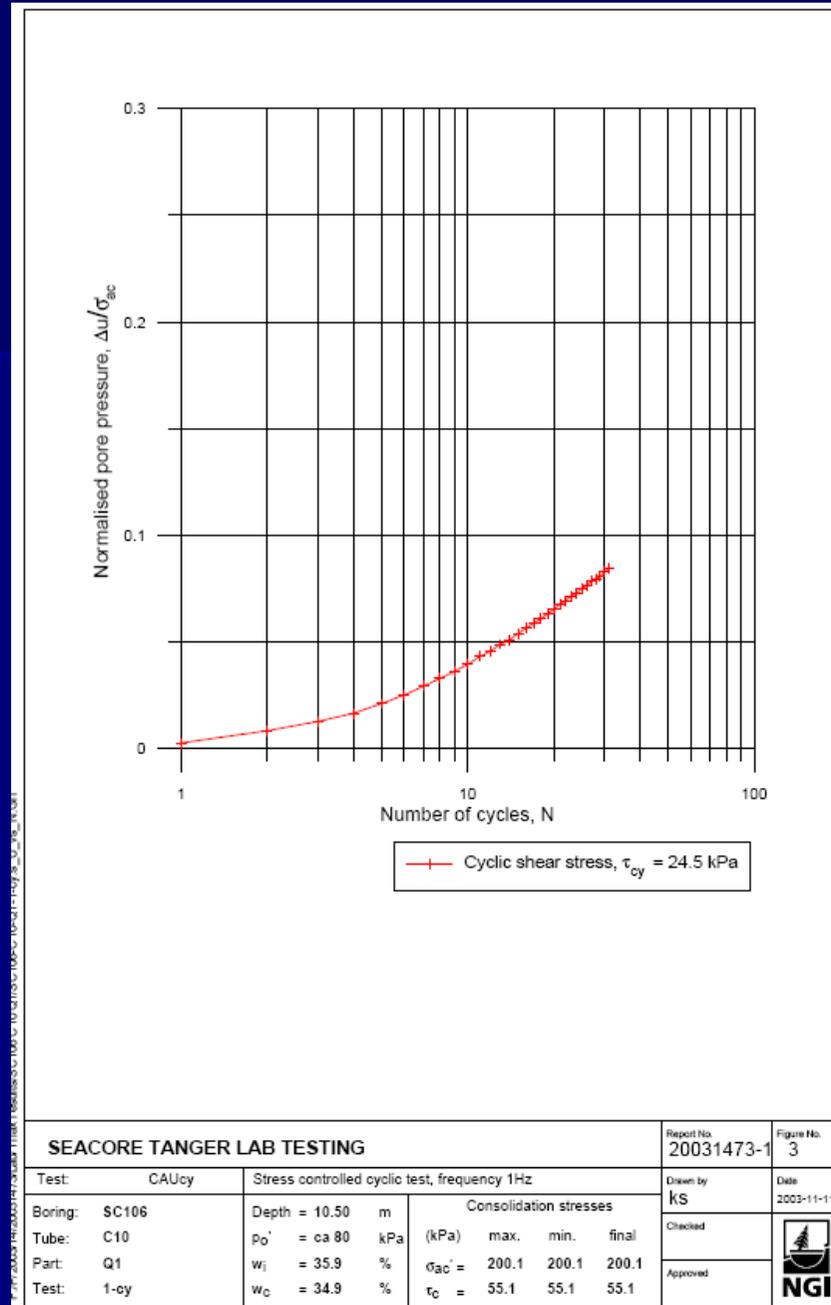


SEACORE TANGER LAB TESTING

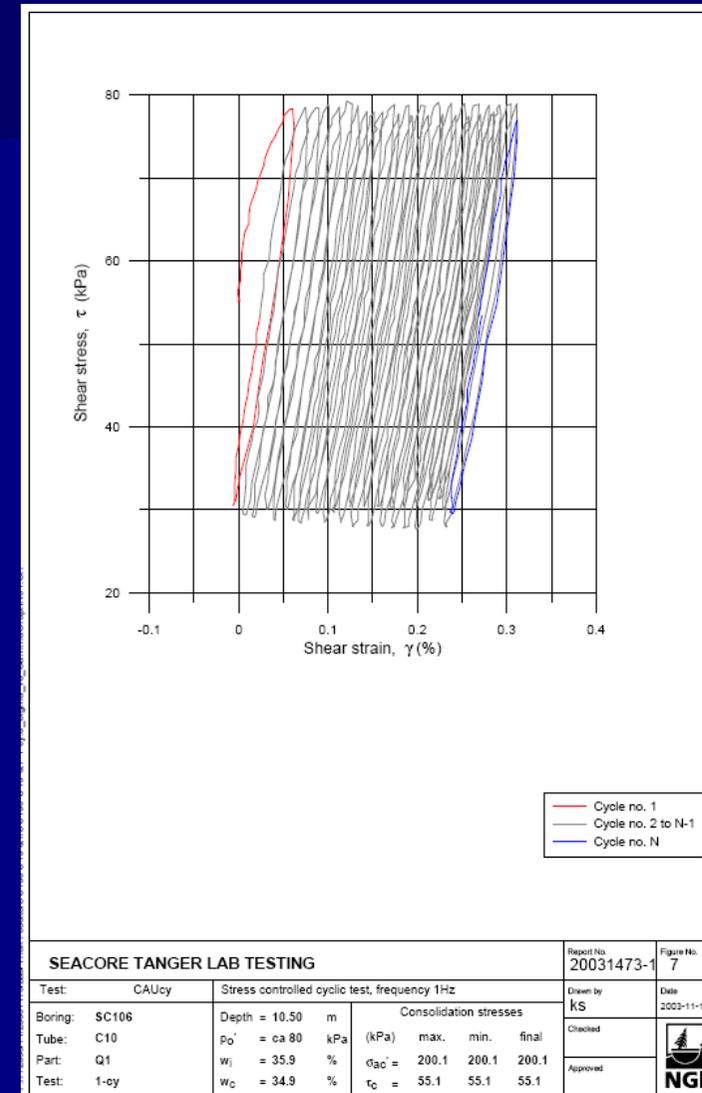
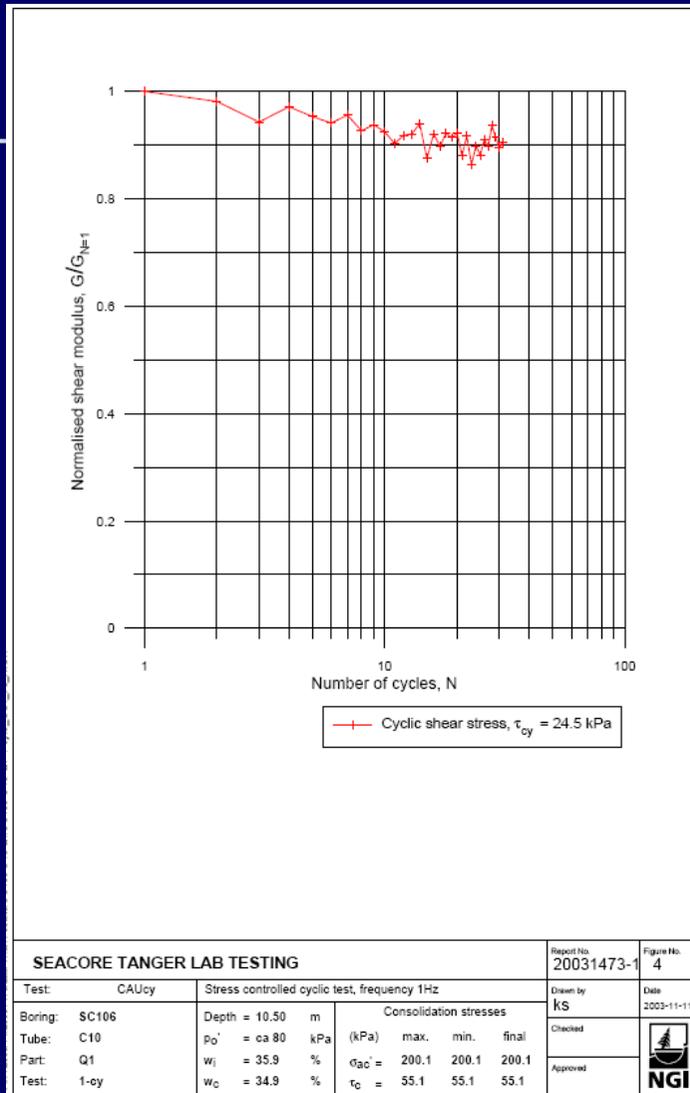
Test: DSScy			Stress-controlled, undrained cyclic DSS test, frequency = 1 Hz			Report No. 20031473-1	Figure No. 7
Boring: SC105	Depth = 4.80 m	Consolidation stresses			Drawn by KS	Date 2003-11-20	
Tube: C04	$p_o' = ca\ 40\ kPa$	(kPa)	max.	min.	final	Checked	
Part: B2	$w_l = 49.8\ \%$	$\sigma_{ac}' =$			450	Approved	
Test:	$w_c = 34.5\ \%$	$\tau_c =$			100	NGI	

Essai triaxial cyclique

- Essais non réactifs : moins de 10 % d'augmentation de la pression interstitielle



Essais non réactifs : pas de diminution du module de cisaillement, déformation de cisaillement variant peu



24/03/ 2010

CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



Conclusions des essais de laboratoire

- Essais répartis en proportion à peu près égale entre essais « réactifs » et « non réactifs », les essais à consolidation anisotrope étant non-réactifs pour la plupart,
- Pas de corrélation entre la réactivité et la teneur en fines,
- Liquéfaction avérée pour $\tau/\sigma'_v = 0.2$, soit pour une accélération ne correspondant plus en fait aux hypothèses,
- Consolidation : le chargement vertical à $\sigma'_v = 300$ KPa n'exclut pas le risque de liquéfaction,
- Influence de la contrainte de cisaillement statique initiale et de l'intensité de la sollicitation cyclique : *seul le cas où la contrainte de cisaillement cyclique est suffisamment élevée pour inverser la direction du cisaillement conduit à la liquéfaction*

Influence des valeurs respectives de la contrainte de cisaillement statique (après chargement apporté par l'ouvrage) et de la contrainte de cisaillement cyclique

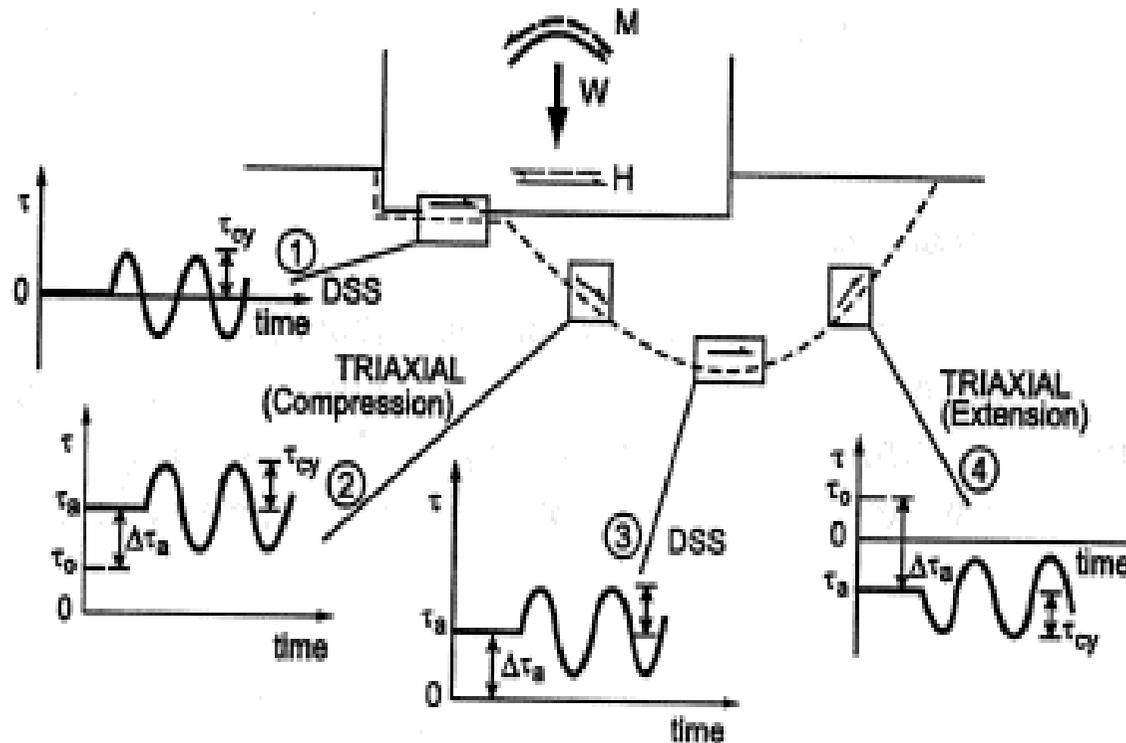
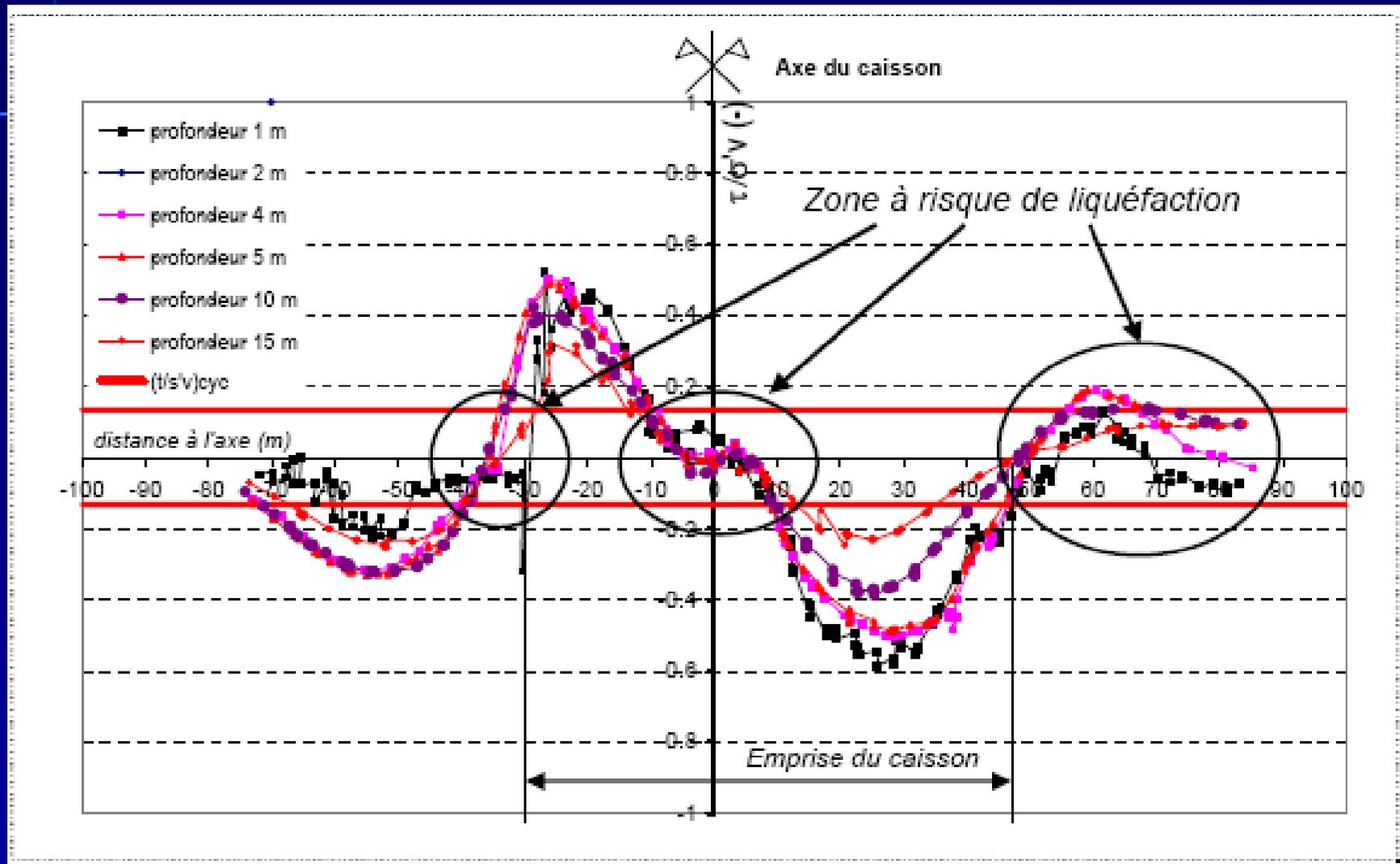
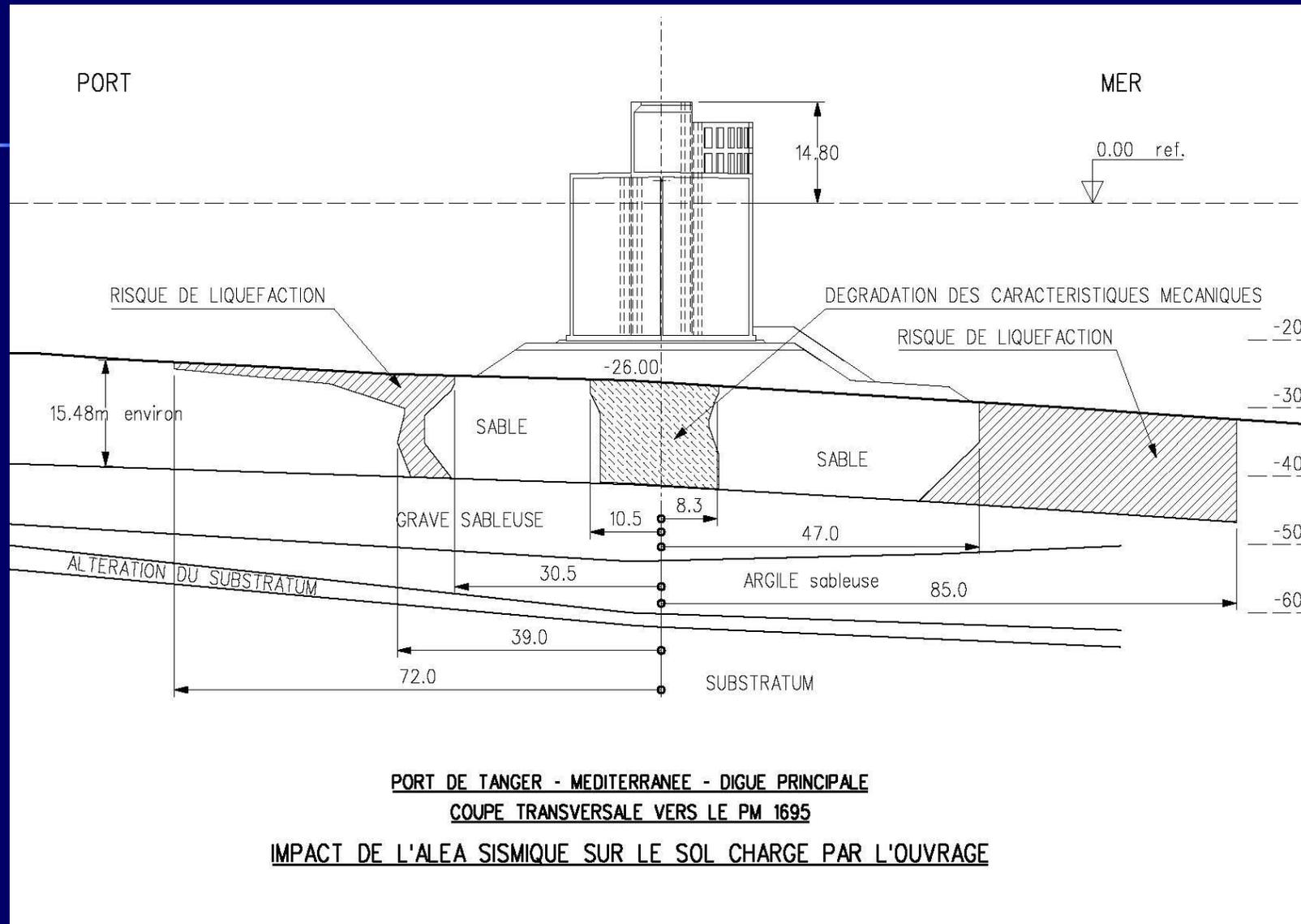


Figure 1. Simplified shear stress conditions for some elements along a potential failure surface beneath a structure subjected to cyclic loading.

Évaluation de la contrainte de cisaillement statique après chargement apporté par l'ouvrage (calculs MEF)



Influence du chargement apporté par l'ouvrage vis-à-vis des zones susceptibles de se liquéfier



Analyse pseudo-statique de la stabilité avec augmentation localisée des pressions interstitielles

- Condition statique $F = 1.5$

COUPE 1225

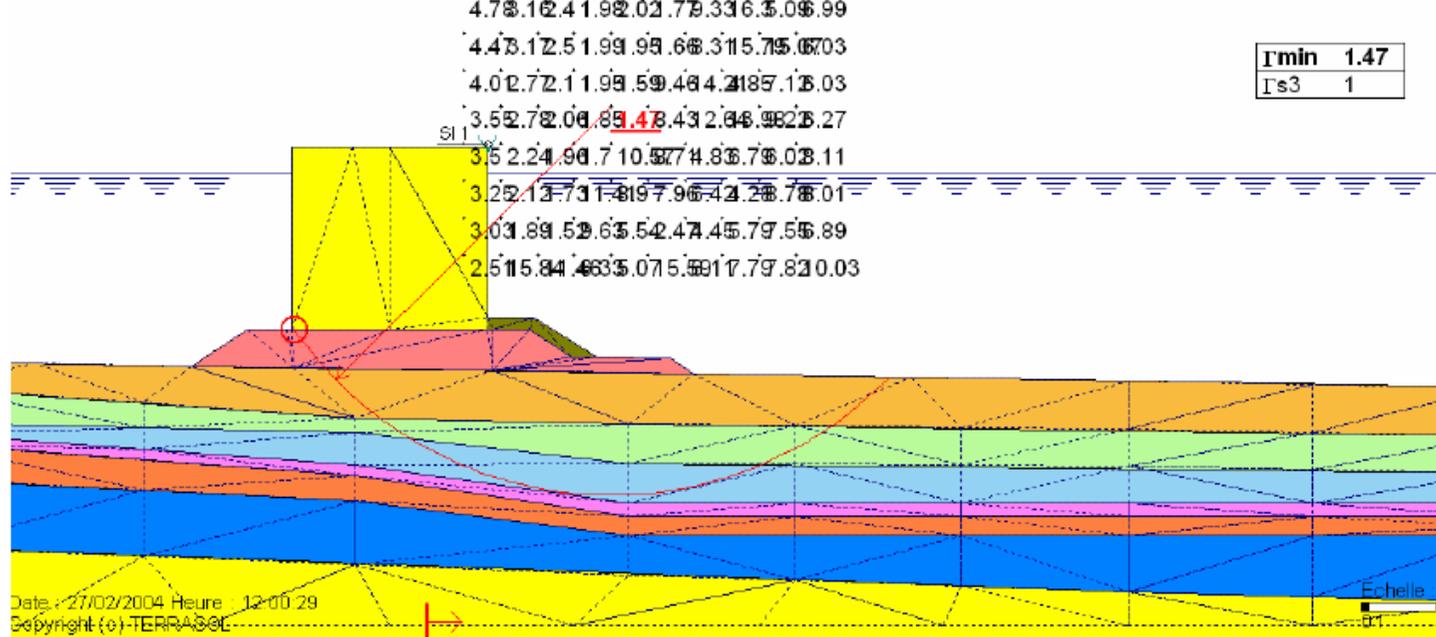
Sans accélération sismique, sans altération des pressions interstitielles

sol n°	1	2	3	Interdit	4	5	6	Interdit	7	8	9	10
γ	18	18	18	18.5	20.6	19.9	20	21.5	19	23		
Γ_{s1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c	0	0	0	12	18	28	3000	1	15	80		
Γ_c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ϕ	37	34	36	20	20	20	38	38	45	20		
Γ_ϕ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Unités : kN mètre et degré

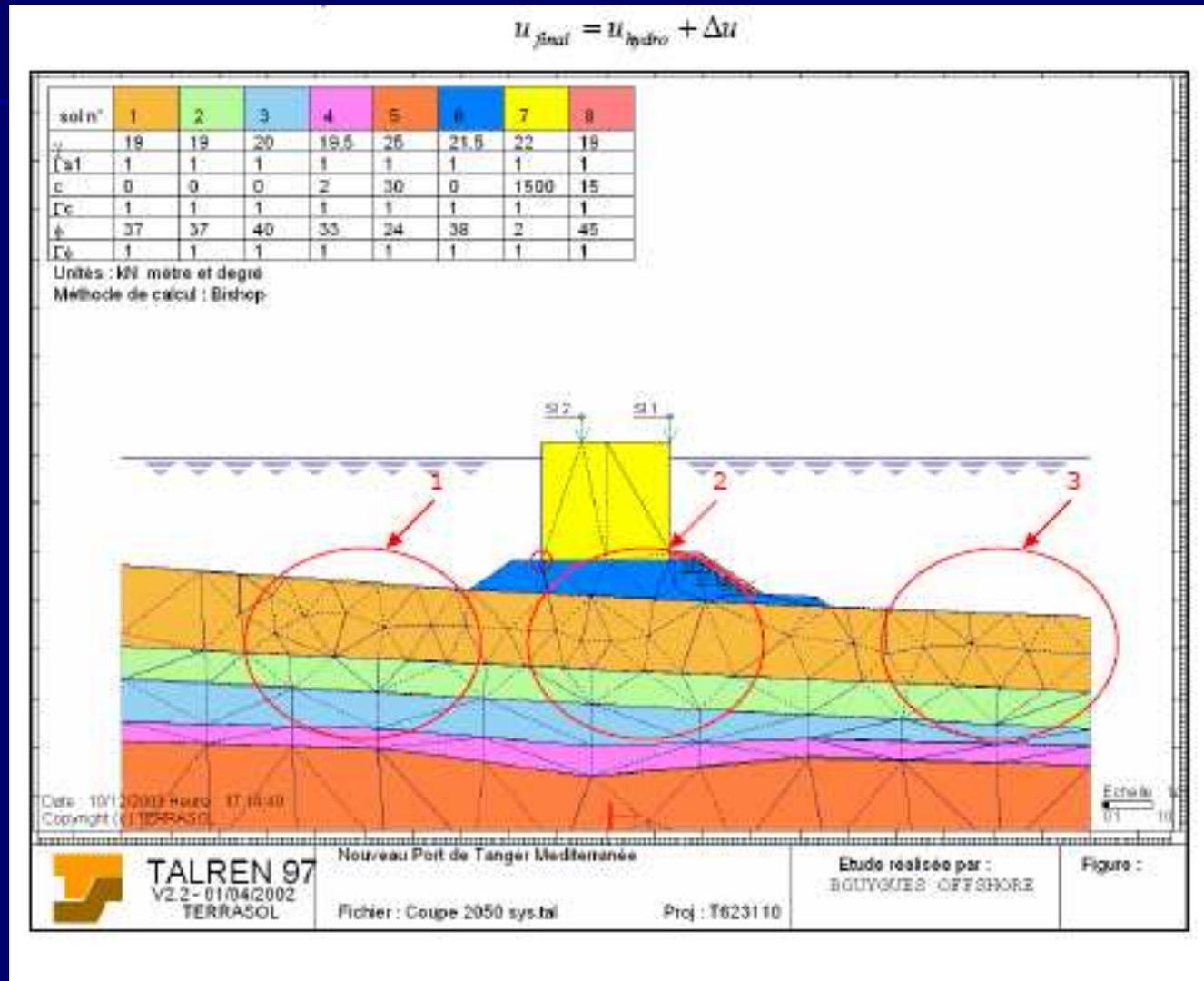
Méthode de calcul : Bishop

Les conditions sur les sols 7 et 4 sont vérifiées en même temps.



Analyse pseudo-statique de la stabilité avec augmentation localisée des pressions interstitielles

- Importation du maillage EF puis incrémentation manuelle des pressions
- $\Delta u = 60\%$ sur les bords et 30% sous caisson



Analyse pseudo-statique de la stabilité avec augmentation localisée des pressions interstitielles

- $\Delta u = 60\%$ sur les bords et 30 % sous caisson
- $F = 1.2$

COUPE 1225
Pressions 03-06

sol n°	1	2	3	Interdit 4	5	6	Interdit 7	8	9	10
γ	18	18	18	18.5	20.6	19.9	20	21.5	19	23
Γ_{sf}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c	0	0	0	12	18	28	3000	1	15	80
Γ_c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ϕ	37	34	36	20	20	20	38	38	45	20
Γ_ϕ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

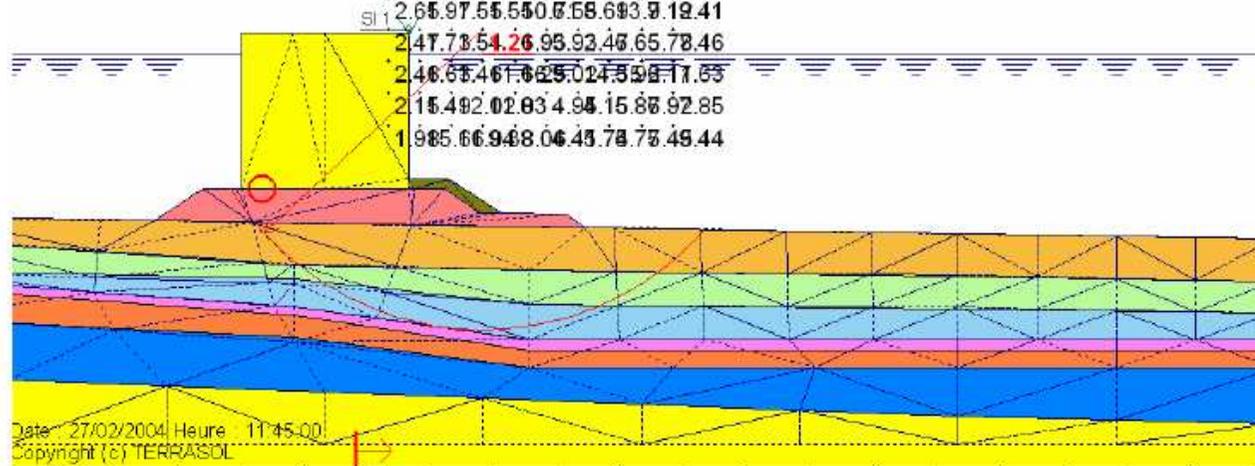
Unités : kN mètre et degré

Méthode de calcul : Bishop

Les conditions sur les sols 7 et 4 sont vérifiées en même temps.

4.01.72.24.94.72.61.53.99.99.99
 3.82.53.97.67.51.61.59.91.5.97.5
 3.51.41.77.73.59.42.313.15.07.3
 3.22.15.81.52.29.44.3.75.65.9.04
 2.92.06.52.57.36.85.85.3.9.08.86
 2.65.97.55.55.0.7.68.69.3.9.12.41
 2.47.73.54.26.93.93.43.65.78.46
 2.46.65.46.6.62.5.02.4.5.9.11.65
 2.15.49.2.02.83.4.94.15.87.92.85
 1.98.5.66.9.68.0.6.43.78.73.49.44

Γ_{min} 1.21
 Γ_{s3} 1



Limites de l'analyse pseudo-statique

- Analyse classique basée exclusivement sur la valeur de l'accélération
- Non-concomitance du pic d'accélération et de l'impact de la liquéfaction partielle

COUPE 1225

Accélération sismique (0.12H - 0.06V), sans altération des pressions interstitielles

sol n°	1	2	3	Interdit	4	5	6	7	Interdit	8	9	10
γ	18	18	18	18.5	20.6	19.9	20	21.5	19	23		
Γ_{s1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c	0	0	0	12	18	28	3000	1	15	80		
Γ_c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ϕ	37	34	36	20	20	20	38	38	45	20		
Γ_ϕ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

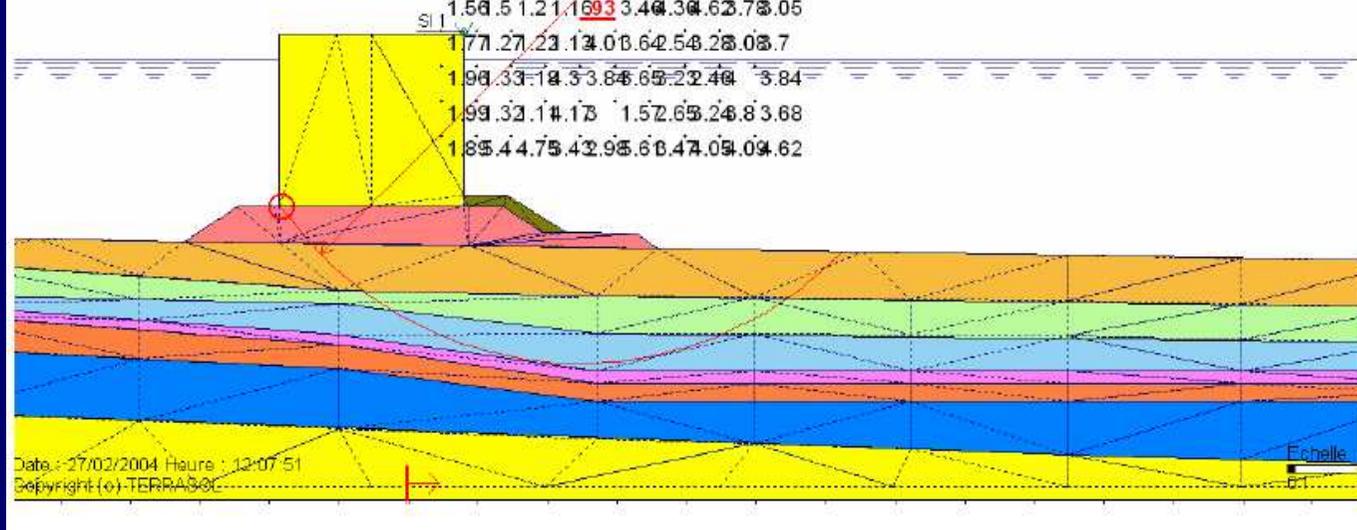
Unités : kN mètre et degré

Méthode de calcul : Bishop

Les conditions sur les sols 7 et 4 sont vérifiées en même temps.

1.74.57.43.32.21.08.02.55.22.28
 1.68.48.31.17.04.11.07.29.39.99
 1.59.34.17.02.12.3.39.52.32
 1.92.59.31.11.15.99.3.27.53.42.82
 1.74.38.13.15.95.3.52.4.2.38.12.88
 1.59.51.21.16.93.3.40.30.62.78.05
 1.77.27.23.13.03.64.54.28.03.7
 1.99.33.18.33.84.65.22.40.3.84
 1.99.32.14.17.1.52.65.24.83.68
 1.85.44.75.42.95.60.47.09.09.62

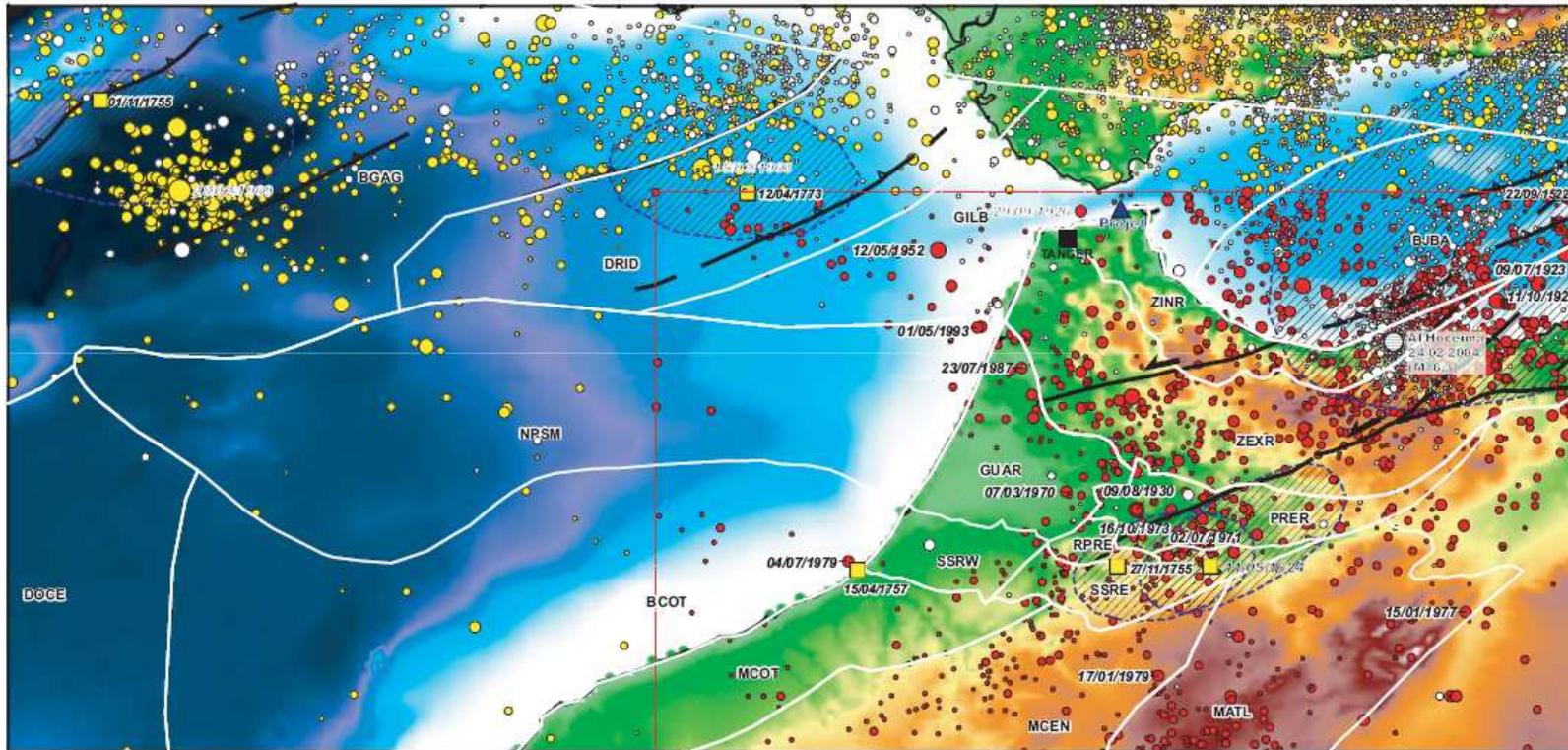
Γ_{min}	.93
Γ_{s3}	1



Étude sismique complémentaire (GEOTER)

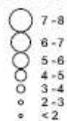
Contexte sismotectonique de la région Nord du Maroc

FIGURE : 1



SISMICITE HISTORIQUE ET INSTRUMENTALE

Magnitude des séismes



Catalogues sismiques

- Catalogue T.E. Cherkaoui
Domaine continental (période 1901-1998)
- Catalogue T.E. Cherkaoui
Domaine océanique (période 1901-1993)

Données GEO-TER, 1999

12/04/1773 Date et épicoentre approximatif des séismes historiques majeurs (ante-1900)

▨ Aire épicoentrale des séismes historiques majeurs

17/01/1979 Date des principaux séismes par zone sismotectonique

ZONAGE SISMOTECTONIQUE

Données GEO-TER, 1999

NPSM Contours des zones sismotectoniques et identifiant de zone

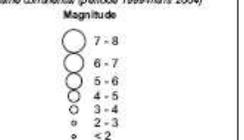
STRUCTURES TECTONQUES D'ECHELLE CRUSTALE DANS LA ZONE DE COLLISION AFRIQUE-EUROPE

↗ Chevauchement
↖ Dérochement



Données complètes, 2004

Sismicité récente
Domaine océanique (période 1984-mars 2004)
Domaine continental (période 1999-mars 2004)



● Epicoentre du séisme d'Al Hoceima du 24 février 2004

Version du : 30-03-2004

Auteur : David CARBON

Fichier : contexte_sismotectonique2.ai

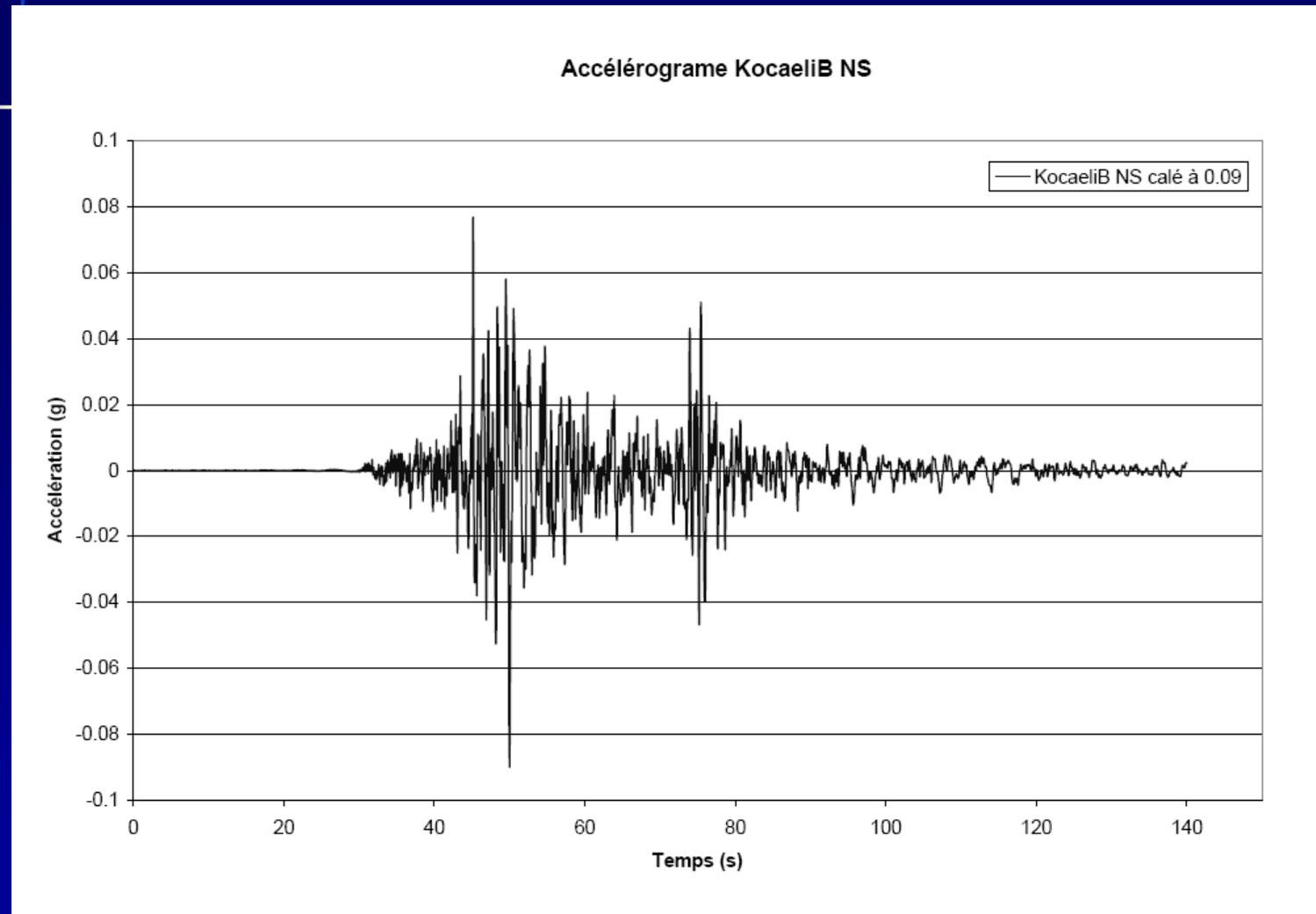
Source : GEO-TER, 1999, modifié 2004

24/03/ 2010

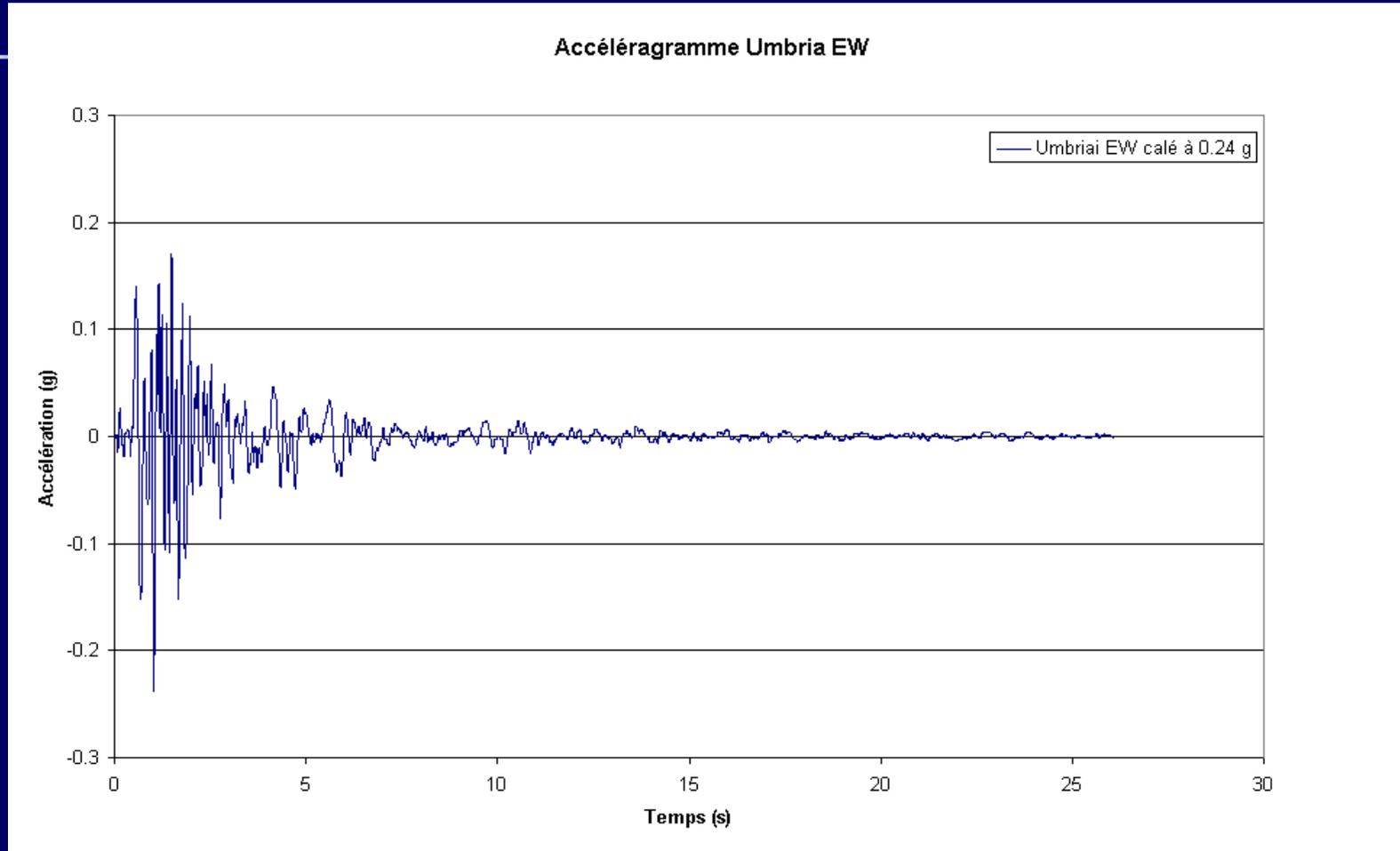
CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY



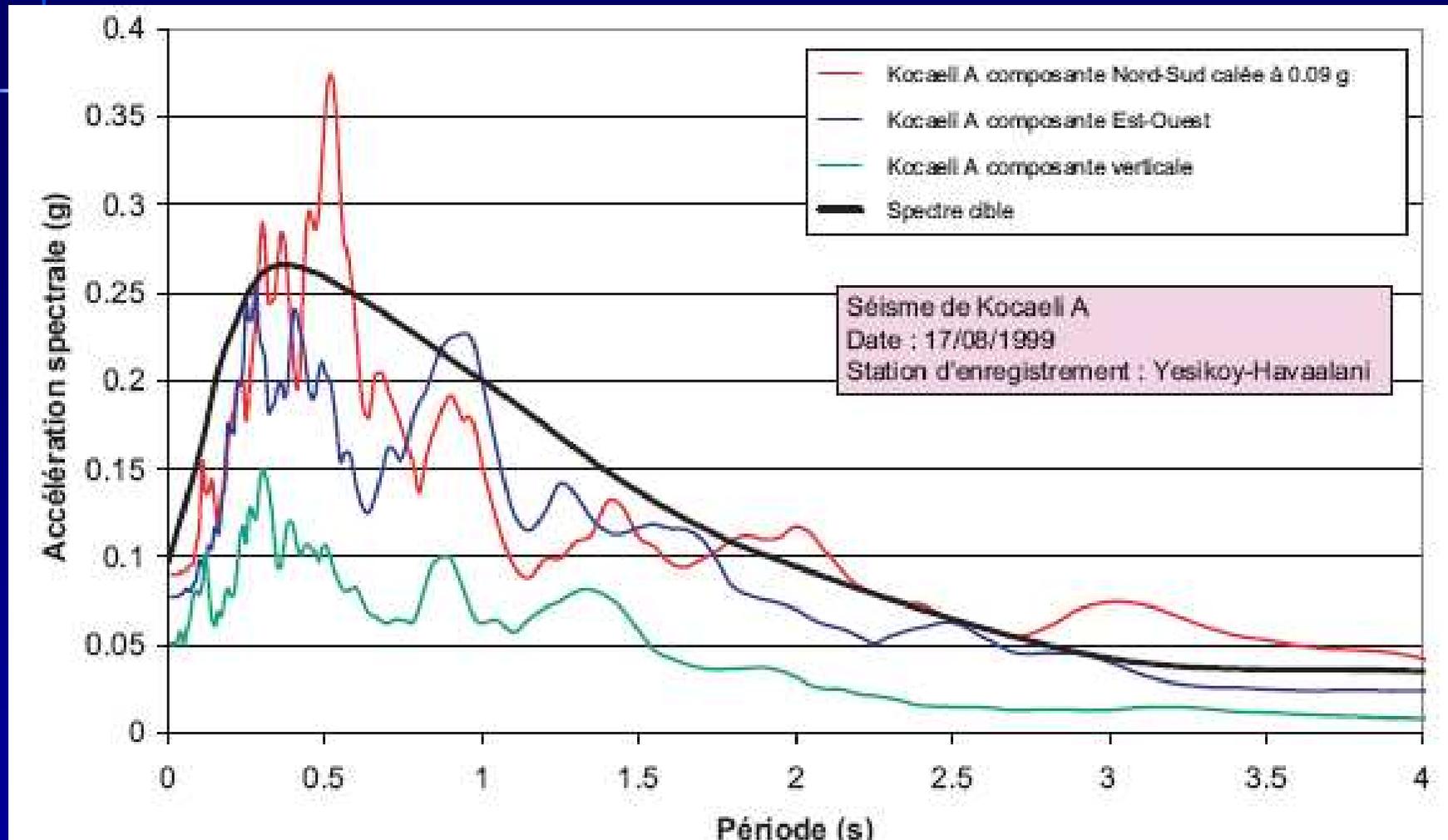
Calculs dynamiques: recherche de signaux représentatifs



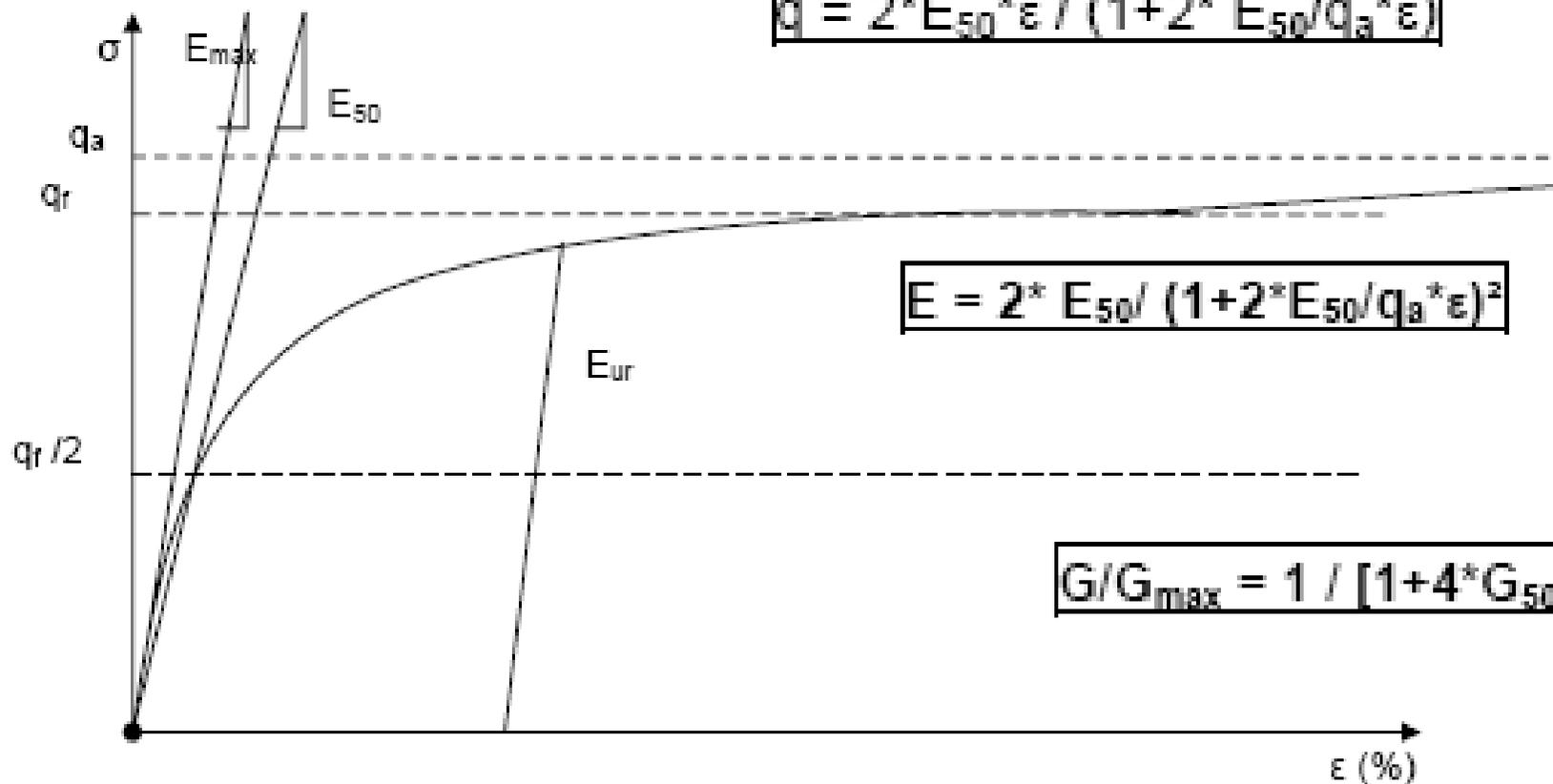
Calculs dynamiques: recherche de signaux représentatifs



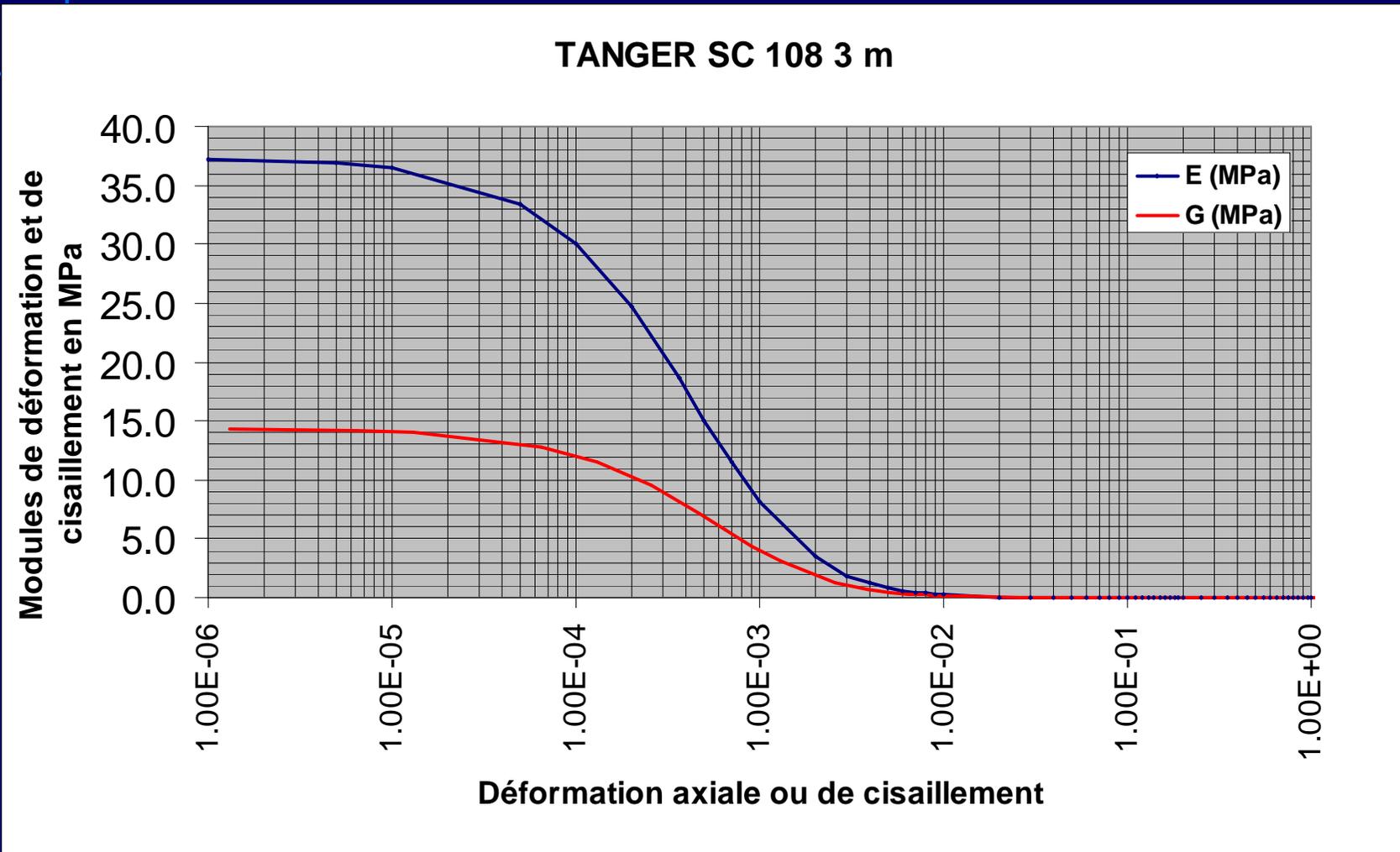
Validation du choix des signaux par la comparaison des spectres de réponse



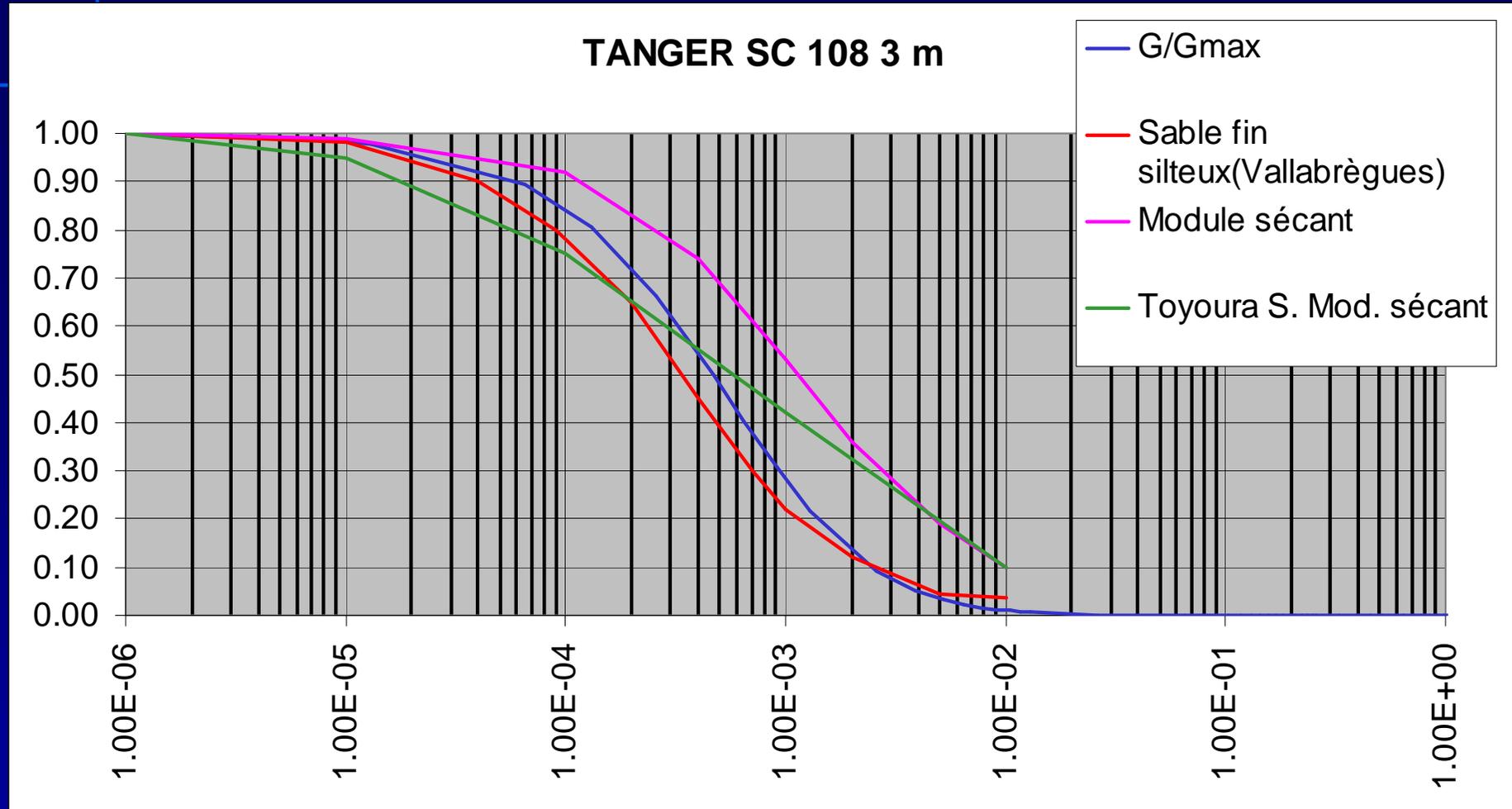
Calculs dynamiques : Modélisation des sables fins par un modèle hyperbolique non-linéaire avec écrouissage type « HSM » (Hardening Soil Model) dans PLAXIS 2D



Modélisation des sables fins par un modèle hyperbolique non-linéaire type « HSM » (Hardening Soil Model)



Modélisation des sables fins par un modèle hyperbolique non-linéaire : validation par comparaison avec courbes MECASOL



Quelques résultats de l'analyse dynamique



	PM 2050-C1	PM 2050-C2	PM 2050-C3	PM 2050-C6	PM 2050-C5	PM 2050-C4	PM 2050-C7
	Kocaéli B 100 s	Kocaéli B 100 s Masses voile	Kocaéli B 100 s Masses éléments	Kocaéli A 100 s	Umbria 10 s	Umbria 10 s Masses éléments	Friuli 10 s
Déplacement base du remblai [mm] - pt B	$U_x < 10$ $U_y < -15$	$U_x < 10$ $U_y < -30$	$U_x < 20$ $U_y < -30$	$U_x < 20$ $U_y \sim -10$	$U_x < 10$ $U_y < 10$	$U_x < 10$ $U_y < 10$	$U_x < 10$ $U_y < 10$
Déplacement du caisson fin séisme [mm] - pt C	$U_x < 20$ $U_y < -20$	$U_x < 20$ $U_y < -35$	$U_x < 45$ $U_y < -40$	$U_x < 25$ $U_y \sim -25$	$U_x < 10$ $U_y \sim -10$	$U_x < 50$ $U_y \sim -15$	$U_x < 20$ $U_y \sim -10$
Déplacement du caisson pendant séisme [mm] - pt C	$U_{x,max} \sim 70$ $U_{y,max} \sim -20$	$U_{x,max} \sim 70$ $U_{y,max} \sim -20$	$U_{x,max} \sim 70$ $U_{y,max} \sim -20$	$U_{x,max} \sim 60$ $U_{y,max} < 10$	$U_{x,max} \sim 35$ $U_{y,max} \sim -15$	$U_{x,max} \sim -32$ $U_{y,max} \sim -15$	$U_{x,max} \sim +33$ $U_{y,max} \sim 11$
Déplacement pied aval du caisson [mm] - pt D	$U_x < 30$ $U_y \sim 10$	$U_x < 30$ $U_y \sim 10$	$U_x < 45$ $U_y \sim 10$	$U_x < 20$ $U_y < 10$	$U_x \sim 5$ $U_y < 10$	$U_x < 10$ $U_y < 10$	$U_x < 15$ $U_y < 10$
A_{max} base du modèle [m/s^2] - Pt A	-0,88 m/s^2	-0,88 m/s^2	-0,88 m/s^2	-0,88 m/s^2	-2,35 m/s^2	-2,35 m/s^2	-2,35 m/s^2
A_{max} base du remblai [m/s^2] - Pt B	+ 1.5 m/s^2	+ 1.5 m/s^2	+ 1.5 m/s^2	+ 1.3 m/s^2	+1,5 m/s^2	1,5 m/s^2	-1,6 m/s^2
A_{max} pied aval du caisson [m/s^2] - Pt D	+1.5 m/s^2	+1.5 m/s^2	+1.5 m/s^2	- 1.4 m/s^2	+1,3 m/s^2	1,0 m/s^2	-1,6 m/s^2
Fréquence amplifiée base du remblai [Hz] - pt B	1,15	1,23	1,12	1.44	1.2	0,68 - 1,1	1.0
Fréquence amplifiée haut du caisson [Hz] - pt C	1,28	1,24	1,16	1,4 - 1,7 à 2,4	1.38	0,68 - 1,1 1,7 à 2,3	1,2
Surpression fin du séisme (kPa) - pression négative	-100 < P < 200	-100 < P < 250	-100 < P < 250	-200 < P < 200	-200 < P < 200	-100 < P < 100	-200 < P < 200
Distorsion γ_{xy}	< 1 %			< 1,2 %	< 0,6 %		< 0,4 %
Temps de consolidation	4,1 mois	4,6 mois	3,5 mois	6,6 mois	4,5 mois	3 mois	4,3 mois
Déplacement base du caisson [mm]	$U_x \sim 0$ $U_{y,gauche} \sim -5$ $U_{y,droite} \sim 0$	$U_x \sim -5$ $U_{y,gauche} \sim -10$ $U_{y,droite} \sim -10$	$U_x \sim -8$ $U_{y,gauche} \sim +5$ $U_{y,droite} \sim +10$	$U_x \sim 0$ $U_{y,gauche} \sim -10$ $U_{y,droite} \sim -2$	$U_x < 10$ $U_{y,gauche} \sim -12$ $U_{y,droite} \sim +5$	$U_x \sim -4$ $U_{y,gauche} \sim -8$ $U_{y,droite} \sim -2$	$U_x \sim 10$ $U_{y,gauche} \sim +4$ $U_{y,droite} \sim -6$

Modèle Éléments Finis PLAXIS : points représentatifs pour évaluation des déplacements

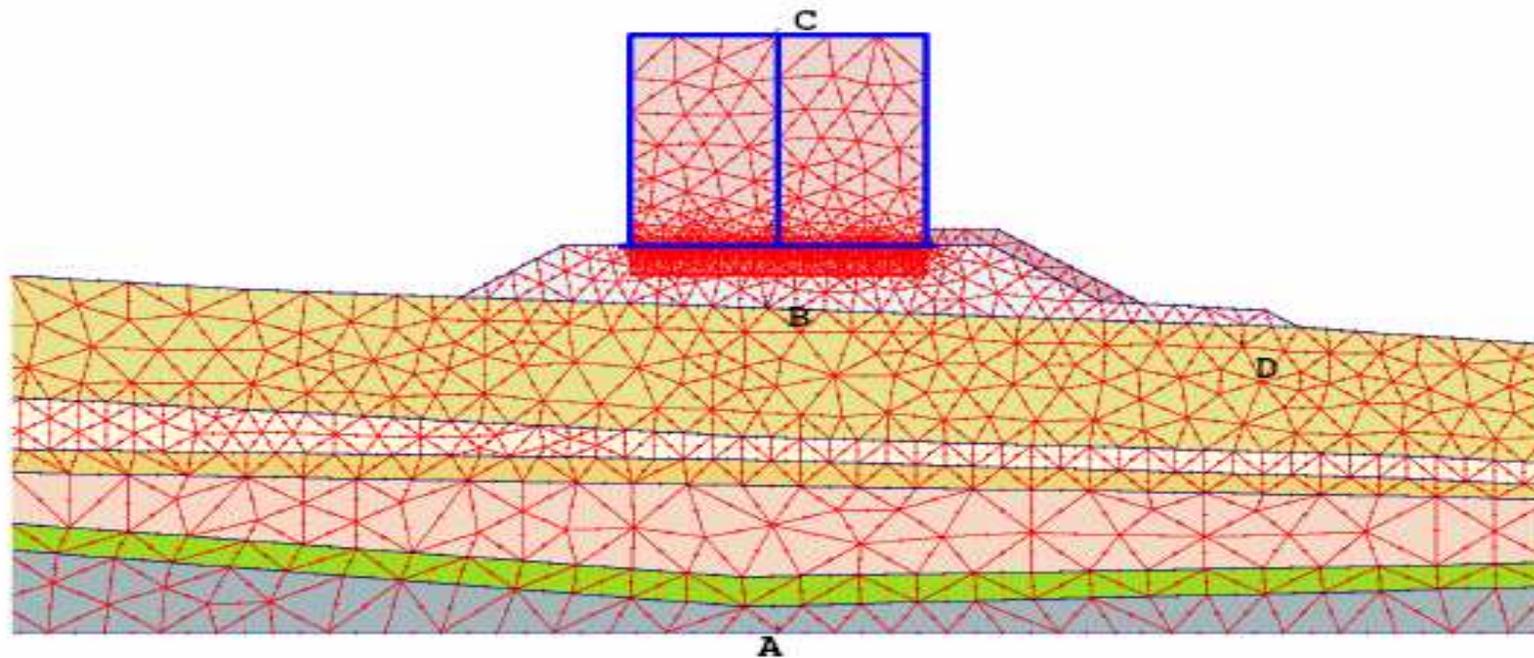
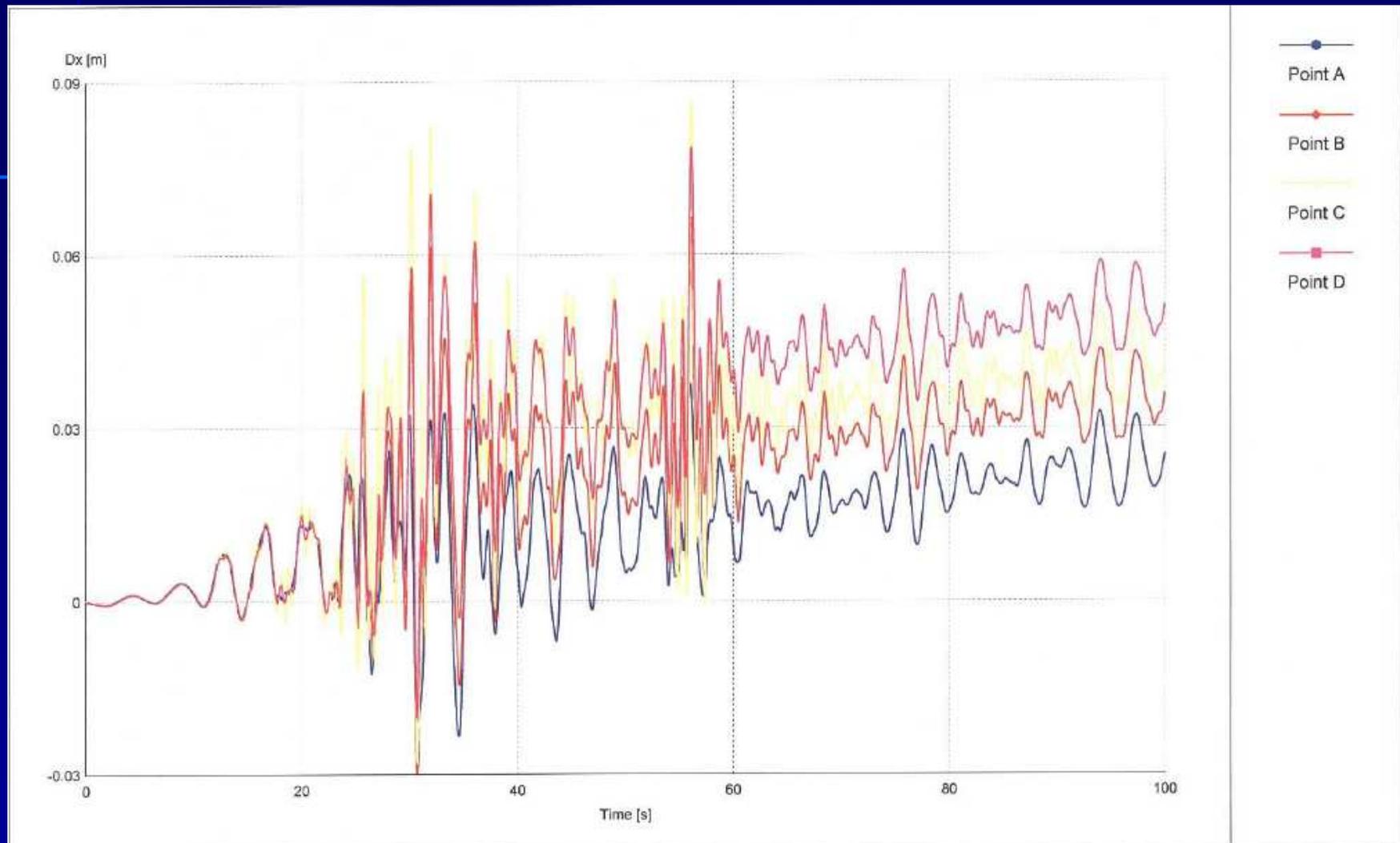


Figure 6 : Points de calcul - déformations

Évolution des déplacements horizontaux pendant le séisme



PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Project description

Tanger Mediterranee

Project name

PM2050-C1.plx

Date

06/05/2004

User name

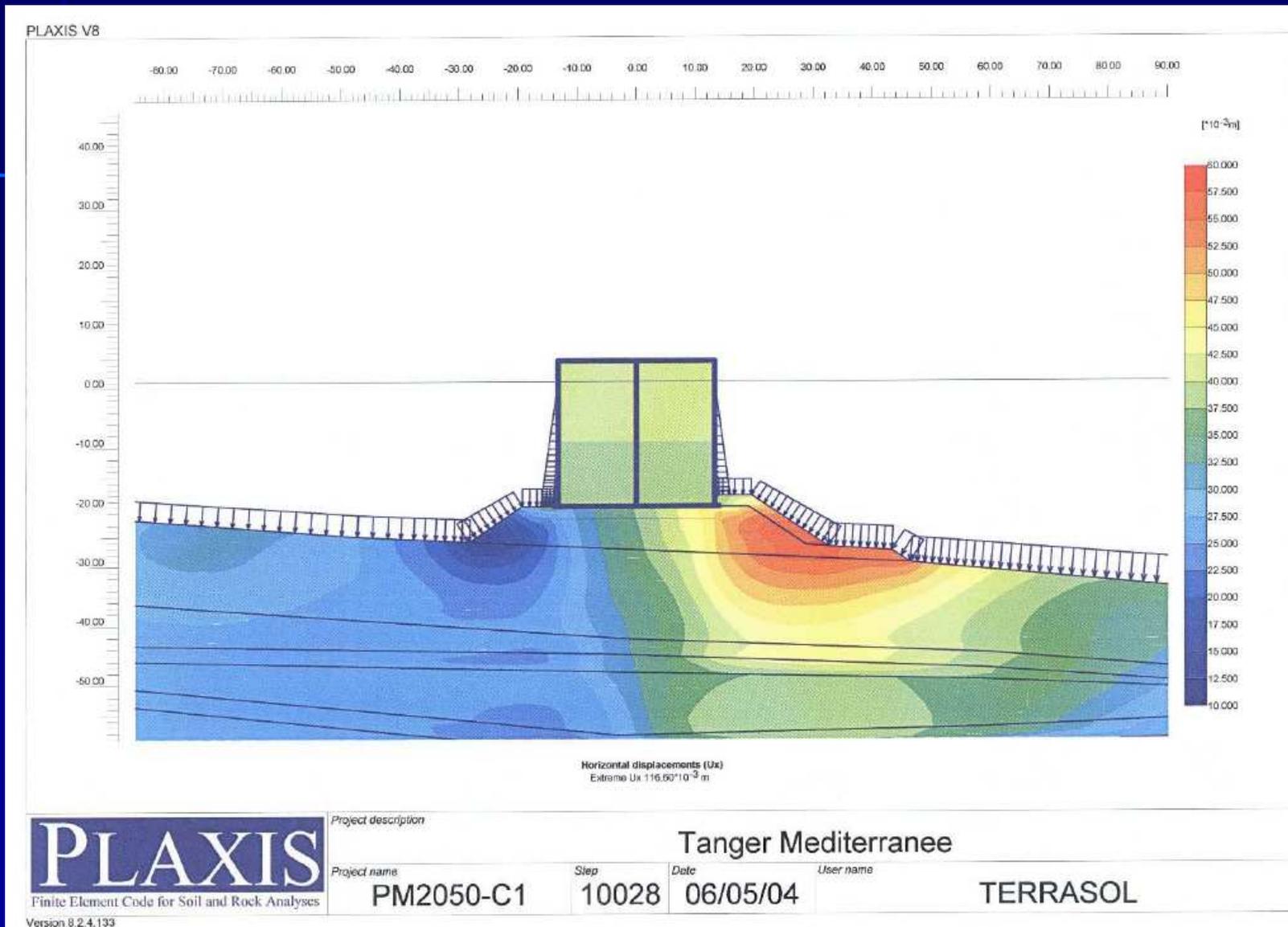
TERRASOL

24/03/ 2010

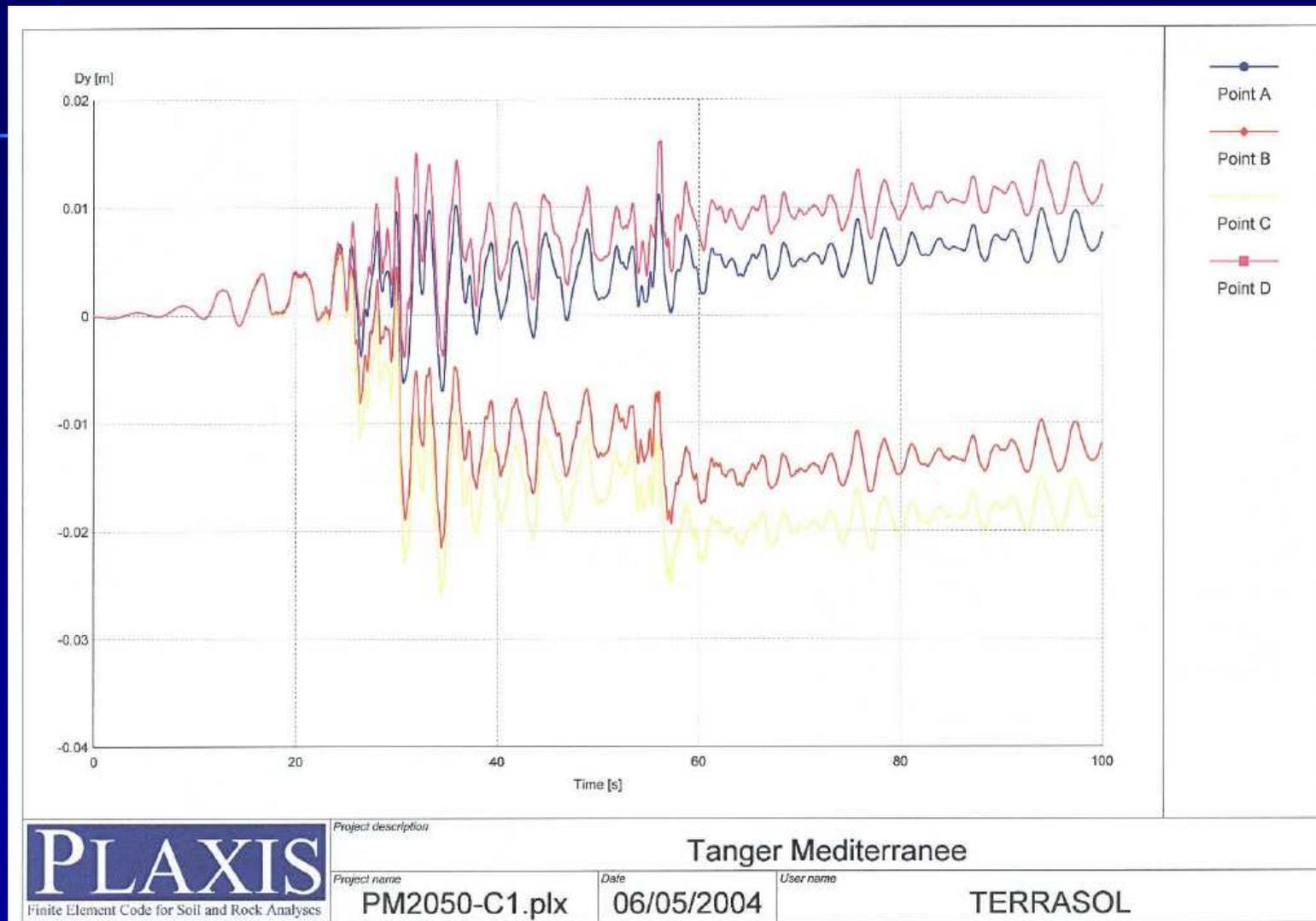
CFMS -AFPS/ Liquéfaction des sols Port de TANGER / B.DEMAY

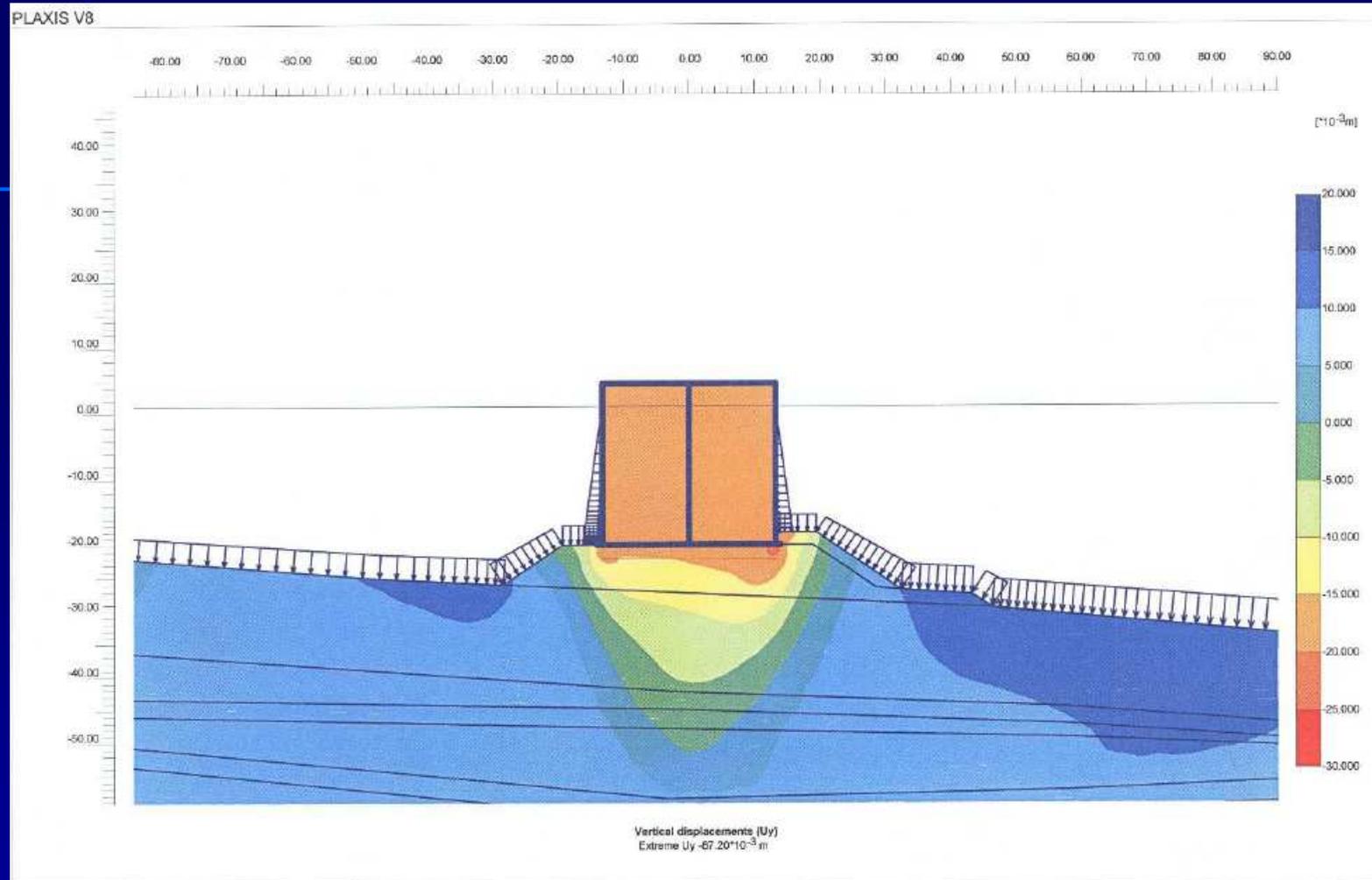
Carte des déplacements horizontaux après le séisme



Évolution des tassements / déplacements verticaux pendant le séisme



Carte des déplacements verticaux après le séisme



PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses
Version 8.2.4.133

Project description					Tanger Mediterranee	
Project name	Step	Date	User name			
PM2050-C1	10028	06/05/04	TERRASOL			

Modèle Éléments Finis : points représentatifs pour évaluation des contraintes

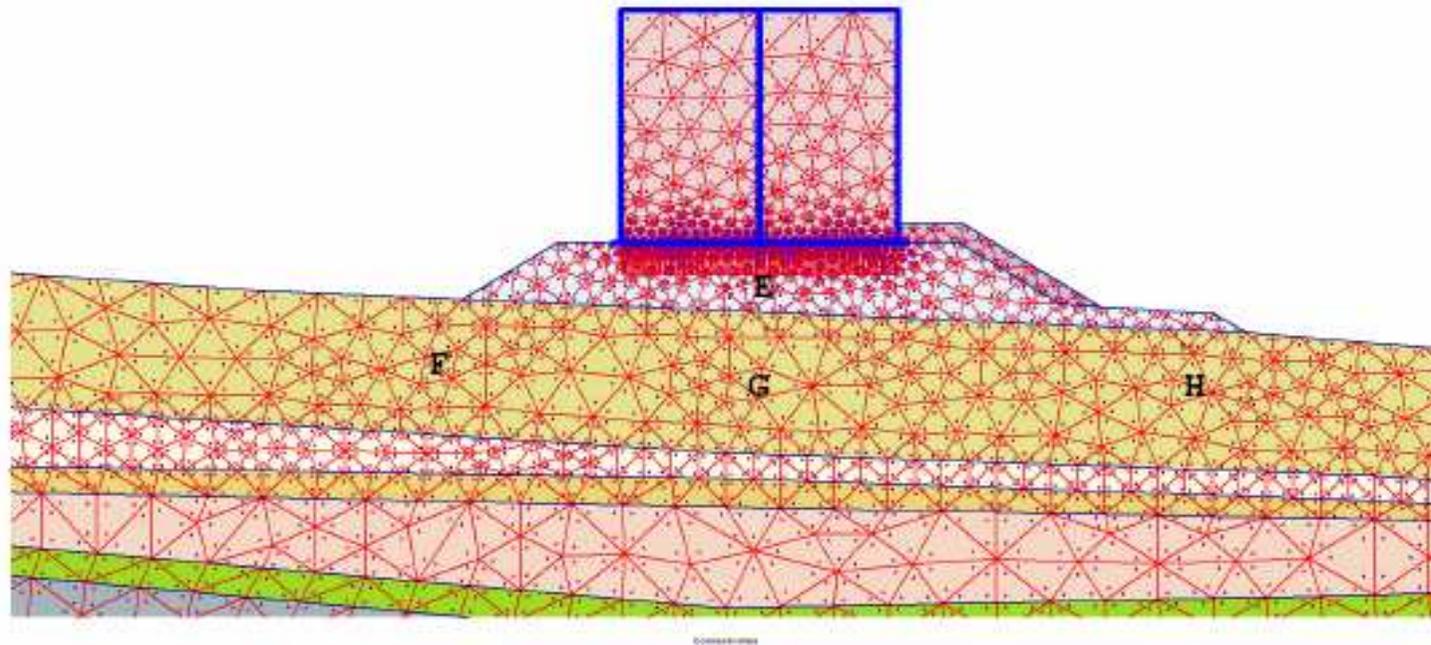
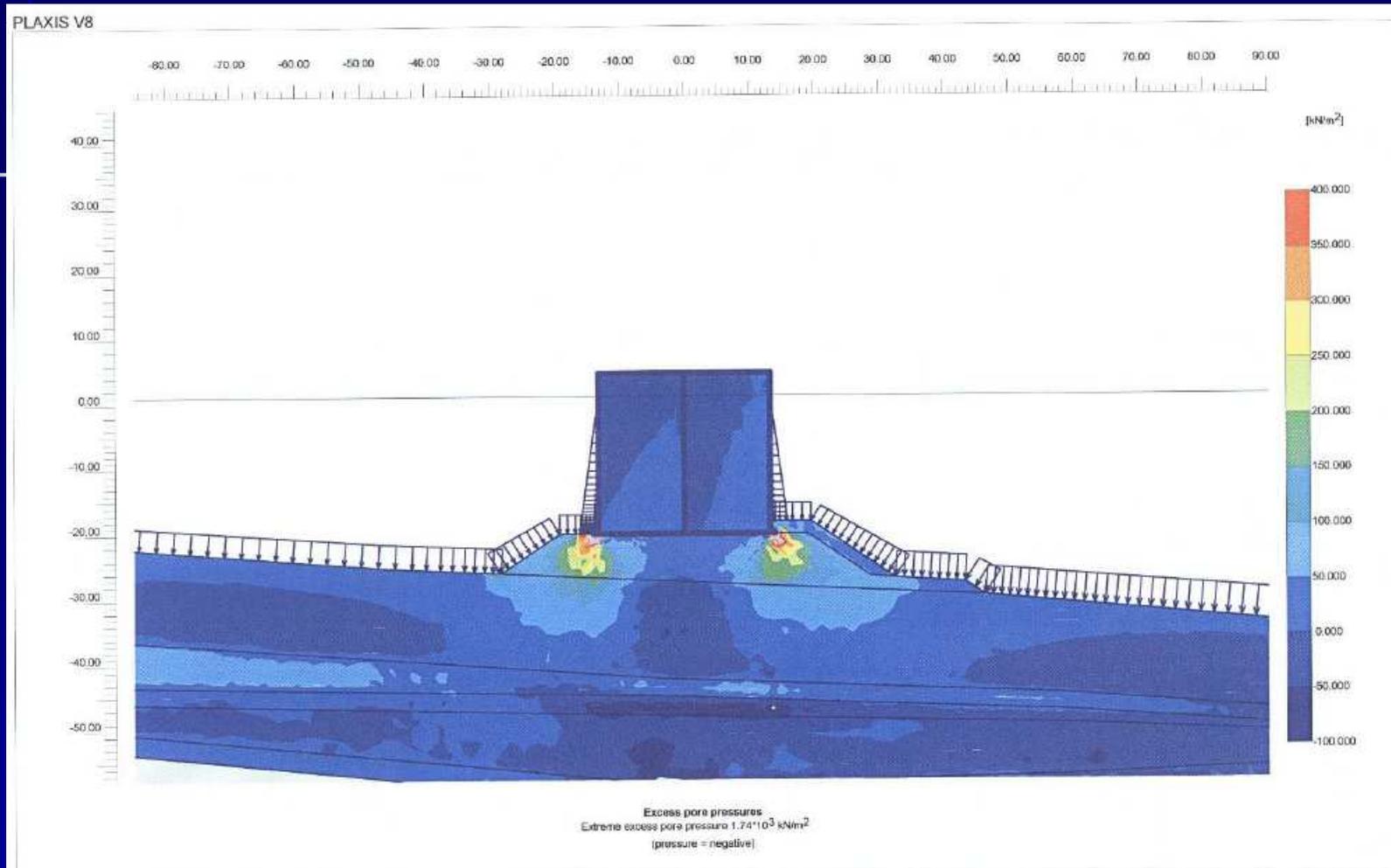


Figure 7 : Points de calcul - Contraintes PM 2050

Carte des surpressions hydrostatiques après le séisme



PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Project description

Tanger Mediterranee

Project name

PM2050-C1

Step

10028

Date

06/05/04

User name

TERRASOL

CONCLUSIONS

- Pour le PROJET : Pas de traitement de sol
- Notion de « liquéfaction partielle » (augmentation de la pression interstitielle) avec dégradation des caractéristiques de déformation
- Il est fondamental d'étudier l'influence du chargement apporté par l'ouvrage
- Résultats parfois contradictoires entre essais in-situ, préférence au CPT.
- Importance fondamentale des essais de laboratoire, notamment pour séismes d'impact « moyen »
- Les analyses pseudo-statiques basées sur la seule valeur de l'accélération peuvent conduire à des conclusions erronées, parler de liquéfaction sans magnitude associée n'a pas de sens
- Analyse dynamique temporelle : l'analyse détaillée d'interaction sol-structure sous sollicitations dynamiques requiert une démarche rigoureuse et vigilante dans l'établissement des données d'entrée