COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Traitements et améliorations des sols

Combinaison de procédés d'amélioration de sol sur un site pétrolier au Mexique

JST DU 05/04/2023

Journée parrainée par KELLER

Sommaire

Rafinerie de Dos Bocas dans le golf du Mexique

Introduction / Description du projet

- **Conditions du sol et risque de liquéfaction**
- **Aménagement général du site**
- **Fondations des unités de traitement**
- **Planches d'essais des inclusions rigides**
- **Traitement du risque de liquéfaction**
- **Le chantier**

Conclusions

Description du projet

Le projet

Rafinerie de Dos Bocas dans le golf du Mexique

Projet de 8 milliards d’euros

17 unités de traitement

Démarrage des travaux en 2019 pour une livraison prévue en 2025.

Capacité de 340 000 barils de pétrole par jour

Site de 500 hectares de process et de tanks

Equipe de projet

Owner

SENER
(Ministry of Energy)

GEIC - CFE
(Federal Electricity Comission)

II-UNAM
(Unam University)

PEMEX - PTI
(Petroleos Mexicanos)

Main Contractors

JV
Van Oord + Grupo Huerta Madre

SAMSUNG ENGINEERING

TECHINT

Le marché d’amélioration et de renforcement de sol

Lot Keller: 47,5 millions d’euros

Durée du chantier: 3 ans de septembre 2019 à aout 2022

- Lot compactage dynamique: 245 ha
- Lot inclusions rigides (235 km)
- Lot Compaction Rigid Inclusion (43 km)

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Conditions du sol et risque de liquéfaction

Contexte géotechnique

- Réhausse du niveau général du site par un remblaiement de matériaux de dragage (2 - 4 m d'épaisseur) pour se prémunir des inondations,
- Sable liquéfiable jusqu'à 11-12 m de profondeur
- argiles molles en profondeur sur 4/5 m d'épaisseur à 12 m et également au-delà de 25 m de profondeur,

Risque de liquéfaction

CPT file : CPTu-8_Dicimsa

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	15.00 m
Earthquake magnitude M_w:	6.50	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.19	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		

UG	Depth.	qc	USCS	FC	γ_m	S_u	ϕ'	E_{50}
-	[m]	[Mpa]	-	[%]	[kN/m^3]	[kPa]	[°]	MPa
U-1	0.0-3.5	**8.6**	SM	**25**	19	0	37	34
U-2	3.5-5.0	**1.8**	MH	**90**	18	0	26	12
U-3	5.0-13.5	**4.5**	SM	**12**	19	0	35	20
U-4	13.5-18.5	**0.8**	CH	**85**	18	32	26	3
U-5	18.5-30.0	**4.5**	SM	**23**	20	0	40	40
U-6	30.0-32.0	**7.3**	ML	**58**	18	195	26	45
U-7	32.0-34.0	**14.8**	SM	**40**	20	0	42	60
U-8	34.0-40.0	**6.6**	CH	**86**	20	215	26	25

FS_{liq} <1.0

S_{liq} ≈ 16.0 cm

Aménagement général du site / compactage dynamique

Compactage dynamique

Surface traitée:
traitement d'ensemble sur 275 hectares pour éviter des désordres sur les ouvrages et également les voiries et réseaux lors d'un séisme (risque de tassement important lié à la liquéfaction du sol)

Solution retenue: compactage dynamique

Objectifs de la solution:
- **Compacter les remblais de réhausse de 5 m de hauteur et les sols sableux jusqu'à 12 m de profondeur**
- **Supprimer le risque de liquéfaction**

Avantages de la solution:
- **Économique et rapide surtout pour de grandes surfaces**
- **Permet de traiter les sols liquéfiables sur toute leur épaisseur,**

Large Dynamic Compaction works (245 HA)

JV Van Oord - Grupo Huerta Madre

Job summary:

9 cranes: 8 LH885 & 1 LH895 – DC kit

8 months (Oct 2019 – Apr 2020) double shift

Design: PEMEX-PTI

Drop Height 18 m / Drop Weight 24 tonnes (10 blows)

Compaction 8 – 12 m of liquefiable clean sand

Triangular Grid: 8 x 5,65 m

KELLER

Résultats du compactage dynamique

Liquéfaction

Liquéfaction

Une planche d'essais avec des inclusions rigides est programmé pour définir le maillage

Fondations des unités de traitement

Fondations des unités de traitement

Après le compactage dynamique, les problèmes suivants restaient à traiter pour les tanks

Compactage dynamique	Zones sableuses	Zones argileuses (en rouge)
Liquéfaction dans certaines zones		x
Portance		x
Tassements	x	x

Fondations des unités de traitement

Choix des solutions sous les radiers des tanks

Compactage dynamique	Zones sableuses	Zones argileuses (en rouge)
Liquéfaction dans certaines zones		x
Portance		x
Tassements	x	x
Solutions de renforcement possibles	Option 1: Inclusions rigides Option 2: drains et préchargement	Option 1: Inclusions rigides + compaction grouting = CIR Option 2: drains et préchargement Option 3: colonnes ballastées + inclusions rigides

Difficultés	10 premiers mètres très compacts -> tarière creuse	Phasage tx pour la combinaison des procédés Délais/matériaux pour le préchargement

Zone de tanks sur renforcement par Inclusions rigides

Planche d'essais

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Planche d’essais des inclusions rigides

Planches d’essais

8 remblais de préchargement: 45 x 35 x 5 m

- **Drains de 10 cm maille triangulaire 3 x 3 m prof 20 m pour les 8 remblais**
- **Inclusions rigides mailles 2,5m; 3,0m et 3,5m triang. Ø= 0.4 m; 25 m de profondeur.**
- **Durée des mesures: 1,5 mois**

Instrumentations:

- **2 Cellules de pressions interstitielles (à 15 et 17 m)**
- **5 Piges de tassement pour mesures topographiques**

KELLER

cfms

Planches d’essais

Les travaux:

Inclusions rigides:
- IR: Soilmec SR-60
- Outil: Tarière creuse en diamètre 400 mm
- Béton: 25 cm slump; gravillon 10-12 mm

Drains plats
- Pré forage (BG – 28)
- Drain Pelle CAT-330 avec un mat
- Productivité: >5000 lm/**poste**

Planches d’essais

Sans renforcement

Maille triangulaire des IR 2,5 m

Maille triangulaire des IR 3,5 m

Planches d’essais

Les inclusions rigides permettent de réduire les tassements de 16 cm sous 90 kPa à:

- **3,5 cm pour une maille 2,5 m (rapport de réduction 4,6)**
- **6 cm pour une maille 3,5 m (rapport 2,7)**

Le compactage dynamique a permis de réduire les tassements de 15 cm à 9 cm (rapport 1,7)

La combinaison compactage dynamique/IR permet de réduire encore d’avantage les tassements mais seulement dans un rapport de 1,1

Les pressions interstitielles n’augmentent quasiment pas avec des IR par rapport avec un remblai sans IR (15 kPa avec IR et 5 kPa sans IR)

La consolidation des sols est rapide même sans drains (pour 100 kPa de surcharge umax = 30 kPa sans IR dissipées en 1 mois et 5 kPa avec IR): drains abandonnés

Planches d'essais

Poursuite des travaux ?

- **Réalisation d'un renforcement par inclusions rigides diamètre 400 mm maille triangulaire maximale de 2,5 m (5,4 m²) pour un rapport de réduction d'environ 5,**
- **Préchargement abandonné et pas de drains en intermaille**

Par contre comment traiter le problème de la liquéfaction dans les zones sablo-limoneuse non traitée par CD ?

Solutions possibles avant la réalisation des inclusions rigides en intermaille:

	drainage	Augmentation du CRR	Diminution du CSR	Réduction des tassements	Economique
Drains	+++ (drains plats interdit)				++ (préforage)
Colonnes ballastées	+++	+++	+	++	++
Compaction Rigid inclusion	o	++	o	+++	+

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Traitement du risque de liquéfaction par CIR

(Compaction Rigid Inclusion)

Compaction Rigid Inclusion

La procédure de réalisation des CIR est différente de l'injection solide:

- Foreuse puissante LRB 355
- Utilisation de mortier au lieu du béton (slump 13)
- Pression de pompage: limiter à 5 bars pour éviter d'endommager le capteur de pression
- Remonter en continu de l'outil à la difference de l'injection solide
- Débit de pompage du mortier au minimum (800 l/min)
- Domaine d'utilisation: sable propre et sable limoneux (FC 15-20% → Ic < 2.05)

Mortar Description		Unit
f'c (28d)	20	MPa
max. Size	5	mm
Slump	13±2	cm
T	<32	ºC
Workability	3	hrs

Compaction Rigid Inclusion

Combinaison des avantages de l'IR et de l'injection solide

- **utilisation de l'outil à refoulement de l'IR**
- **Injection selective de mortier**
- **Objectif augmenter la densité pour augmenter le Fs liquéfaction**
- **Réduire les tassements par la réalisation d'inclusions rigides**

Compaction Rigid Inclusion

Définition des critères d'arrêt lors de la planche d'essais:

- Diamètre maximum
- Diamètre théorique (environ 60 cm)
- Maximum de pression pour éviter le claquage du sol
- Soulèvement de la plateforme de travail

Compaction Rigid Inclusion

- **Approche théorique des volumes à injecter**

$$D_r = \left(\frac{1}{C_1}\right) \cdot ln\left(\frac{Q_{cn}}{C_0}\right)$$ (Badi et al. 1986)

Δ qc $\xrightarrow{\text{corrélation}}$ ΔD_r

$$\Delta Dr = \varepsilon_v \cdot D_{ro} \frac{1+e_0}{(e_{max}-e_o)}$$

$$\Delta D_r = \frac{\Delta e}{e_{max}-e_{min}}$$

$$\varepsilon v = \frac{A_{IRC}}{A}$$

Avec

$Dr0 = (e_{max}-e_0) / (e_{max}-e_{min})$

e_0 indice des vides initiale

e_{max} indice des vides maximum

e_{min} indice des vides minimum

Compaction Rigid Inclusion

- **Planche d'essais**
  - **Plusieurs mailles carrées ont été testées: 2.10 m, 2.35 m, 2.50 m**
  - **Vérification des paramètres de bétonnage**

- **RI section:**
- Pull up speed: 5-6 m/min
- Pumping rate: 800 l/min
- Pressure: 0-1 bar
- $Ø_{RI}$: 40 cm

- **CRI section:**
- Pull up speed: 2.7 m/min
- Pumping rate: 800 l/min
- Pressure < 5 bar
- $Ø_{CRI}$:40 - 60 cm

KELLER

Compaction Rigid Inclusion

Contrôles des CPT avant et après

Maille carrée retenue: 2,10 m (4,41 m²)

qc multiplié par 2:
5 MPa → 10 MPa

DBNR – TECHINT Contract. Compaction Grouting. Trials.

Compaction Rigid Inclusion

Validation des résultats

Post-CPTu → FS_{liq} >1.1 → W_{liq} = 1.20 cm

Le chantier d’inclusions rigides IR et CRI

Le chantier

Zone de traitement préalable avec du compactage dynamique

Travaux Keller

- 15 tanks Ø 55.00 m; H=18 m
- Surcharge 155 kPa
- 235 000 lm of Ø 40 cm RI
- Profondeur des IR: 28 m/PFT
- Outil: Tarière creuse
- Maille: 5,4 m² (maille triangulaire 2,5 m)

Objectif des IR

- Réduction des tassements

Moyens matériels:

1 Soilmec SR-70
1 Soilmec SR 125
2 LRB 355

Le chantier

Compaction Rigid Inclusion **Zone de traitement argileuse sans compactage dynamique (en rouge)**

Travaux Keller

- tanks Ø 30,5 m; H=12,5 m et Ø 85 m; H=15 m
- Surcharge 115 kPa
- Linéaire: 43 km
- Outil: Tarière à refoulement INSER
- Maille primaire en CIR: 2,10 m profondeur 13 m
- Maille secondaire en intermaille en IR: 2,10 m profondeur 28 m.

Objectif des IR

- Augmenter la portance
- Réduction des tassements W < 10 cm
- Traiter un problème de liquéfaction Fsliq > 1,10

Compaction Rigid Inclusion

Maille primaire: CIR
Maille secondaire: IR

Dimensionnement

Compaction Rigid Inclusion

$S_{hydrotest}$ = 5.30 cm < 10 cm

Dimensionnement

Objectif: tassement < 10 cm sous 150 kPa

Modèle HS small avec Plaxis 3D

- Estimation des tassements à long terme dans les formations argileuses profondes
- Prise en compte des sollicitations sismiques
- Vérification STR des inclusions rigides
- Prise en compte du phasage et recommendation pour la durée de l'hydrotest: 20 jours minimum.

Static – Hydrotest and Operation

Seismic - Hydrodynamic

Rigid Inclusion in perimeter (394)

KELLER

DBNR – PEMEX Contract. Design

Le chantier

Arase et recépage:

- Arase dans le béton frais avec une Tarière sur 1,8 m
- Test d'impédance réalisé sur les IR

Arase dans le béton frais

Recepage des IR non arasées dans le béton frais

Le chantier

Beaucoup d’usure pour les outils à refoulement dans les sables

Vérification de la portance de la PFT

Le chantier

Une difficulté supplémentaires entre novembre 2020 à mars 2021

9 personnes infectées par le Covid heureusement sans symptome

Conclusion

CONCLUSION

- Projet de grande taille qui a nécessité de gros moyens en personnel et en matériel du groupe Keller (Keller Mexique a pu profiter de l'aide des autres BU du Canada et de l'Europe)

- Chaque procédé présente des avantages et inconvénients. La solution optimale consiste dans certains cas à combiner les solutions,

- Le CRI a montré son efficacité dans les sables et sables limoneux (FC< 20 %)

- Les planches d'essais sécurisent le projet vis-à-vis de l'efficacité des procédés proposés, permet d'optimiser et valide les délais d'exécution,

- Nécessité d'adapter le matériel aux terrains rencontrés et au procédé retenu.

- Mobilisation de foreuses très puissantes (LRB 355) pour le CRI avec outil de refoulement

KELLER
KELLER

DBNR – PEMEX Contract.

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Merci pour votre attention

Combinaison de procédés d'amélioration de sol sur un site pétrolier au Mexique

JST DU 05/04/2023

Journée parrainée par KELLER