COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

JST DU 05/04/2023

Traitements et améliorations des sols

Deep soil mixing : une technique de renforcement alternative. De la formulation à la durabilité

Université Gustave Eiffel

Alain Le Kouby (Univ-Eiffel/IFSTTAR/LCPC)

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Sommaire

- Introduction
- Généralités
- Quelques résultats
- Durabilité du Deep soil mixing
- Conclusions et perspectives

Deep soil mixing – une technique alternative

- *Inclusions rigides,*
- *Pré-consolidation*
- *Substitution*
- *Injection*

- *Deep Soil mixing : valorisation des matériaux de site*
  - **Efficacité variable du traitement suivant le type de sol,**
  - **Présence d'inclusions de sol**
  - **Parfois qualifiée d' « *injection dirigée* »**

➲Pour les sols à forte teneur en eau, la *méthode sèche* est appliquée : un outil injecte le liant sous forme de poudre et le malaxe au sol en place.

➲Pour les sols à faible teneur en eau, il s'agit de la *méthode humide* : un outil injecte le liant sous forme de coulis à basse pression et le mélange au terrain

Deep soil mixing - Introduction

- Le soil mixing permet d'améliorer les caractéristiques du sol en le mélangeant avec un liant, généralement du ciment.

- Cette technique ne nécessite aucune transformation de matériaux avant sa mise en œuvre : pas d'extraction du le sol

- En utilisant le sol en place, le soil mixing produit peu de déblais : il y a donc peu de terre à évacuer.

- Matériel nécessaire à sa mise en œuvre est plus compact.

- Apport en liant est moins important que pour d'autres techniques de renforcement de sol.

Il peut donc répondre à certaines contraintes environnementales dans les chantiers.

➲ La réalisation se fait en trois phases :
- déstructuration du sol en place,
- injection du liant,
- malaxage.

Deep soil mixing - Introduction

Le soil mixing est une technique simple, en innovation permanente. Elle s'adapte facilement aux ouvrages à réaliser et aux sols en place.

Elle a donc de nombreuses applications :

- réduction des tassements sous les ouvrages,
- étanchéité, par exemple pour le confinement de sols pollués,
- soutènement,
- stabilisation des sols, notamment pour éviter une liquéfaction des sols en cas de séisme.

(Benhamou and Mathieu, 2012)

Deep soil mixing – Généralités

Colonnes

Limon traité (0 – 3 m)

Sable traité (3 – 5 m)

Ecrans / Tranchée

Deep soil mixing – Généralités

RUFEX (2014)
Renforcement et réutilisation des plateformes ferroviaires et des fondations existante

Fondations

Amélioration de sols

Essai de chargement d'une colonne – Calage avec un modèle sol-ciment

Deep soil mixing – Généralités

Etanchéité

Tranchée de sol mixé

DIGUE SECHE

- Résistance à la compression simple **R_c (28 jours) ≥ 1.5 MPa**
- Perméabilité à l'eau **K (m/s) (28 jours) ≤ 10^{-8} m/s**

DIGUE EN CHARGE

- Résistance à la compression simple **R_c (28 jours) ≥ 0,5 – 1 MPa**
- Perméabilité à l'eau **K (m/s) (28 jours) ≤ 10^{-8} m/s**

Sable

Limon argileux

Deep soil mixing

Deep soil mixing

- Formulation
- Performance
- Durabilité
- Erosion
- Géophysique

➢ **Formulation : (> 100 mélanges)**

Type de sol (granulaire – sol fin), sec, à l'état naturel

Ouvrabilité , teneur en eau, C/E, temps de prise

Type d'outil (colonne, tranchée sol mixé…)

Ciment CEM III C-32.5 : C > 140 kg/m³

Essai à la table d'écoulement
NF-EN 459-2
Utilisable sur site

Etalement de 32±2 cm au mini-cône

Déterminer la quantité d'eau nécessaire pour avoir un mélange **auto-plaçant**

Deep soil mixing

Deep soil mixing

- Formulation
- Performance
- Durabilité
- Erosion
- Géophysique

➢ Performance – quelques essais :

Vitesse d'onde de compression (V_p)

Module dynamique E_0:

$$E_0 = \rho \times \frac{(1+\nu)\times(1-2\nu)}{(1-\nu)} \times V_p^{\,2}$$

ν pris à 0,25

ρ Densité en kg/m³, V_p et V_s en m/s.

ASTM. C597

Essai de compression simple (q_u; $E_{50\ global}$, $E_{50\ local}$)

AFNOR. (2003). NF EN 13286-41 and EN 13286-43

Essai de perméabilité - k

Essai de perméabilité
XP CEN ISO/TS 17892-11 (AFNOR 2005)

Deep soil mixing – Caractérisation des inclusions
Méthodes non destructives

Méthode 1D *(BBRI, Belgique, 2016)*

La méthode actuellement utilisée

- *Tracer **4 lignes 90°** l'une de l'autre **sur la surface extérieure** des éprouvettes*

- *À l'aide d'une **règle**, mesurer la **longueur** des inclusions de sol et des cailloux*

→ ***% 1D***

Méthode 2D *(Amrioui et al. 2022)*

Développée dans une étude précédente

Dérouler** la surface **latérale** en utilisant **Photoshop

Traitement d'images + % 2D

CSM – Digue - Méthode 1D
% inclusions [0-18%] avec quelques cas à 20-40% .

Détermination des inclusions de sol (BBRI/SBRCURnet, 2018)

Deep soil mixing – Caractérisation des inclusions
Méthodes destructives

~~Tomographie RX~~ → Développer une nouvelle méthode 3D basée sur l'analyse d'images

1. Sciage et génération de géométrie 2D à l'aide des logiciels Photoshop, Illustrator et Autocad

Découpes de 3mm → Acquisition d'images → Image réelle → Segmentation

2. Reconstruction 3D à l'aide du logiciel SolidWorks

Image 3D d'un échantillon de DSM

Amrioui, J. (2023)

Deep soil mixing – Effet des inclusions

CSTC / BBRI (2018)

DREAL Centre

Deep soil mixing – Base de données inclusions

Deep soil mixing

Méthode sèche Méthode humide

Durabilité du Deep soil mixing

Ikegami et al. (2005)

Onimaru et al. (2009)

Durabilité du matériau traité – Effet des inclusions de sol

Protocole expérimental en laboratoire

Fabriquer des éprouvettes **contenant des inclusions** en laboratoire

- 0 %
- 5 %
- 15 %
- 25 %

→ Maturation pendant **1 mois** à **38°C**

Pour accélérer la prise cimentaire

→ Application du protocole de **vieillissement artificiel**

→ Après X cycles : **Essais mécaniques, hydrauliques et microstructuraux**

1 + 2 — **Sollicitation A**
- *Séchage pendant 2 jours (étuve à 45°C)*
- *Immersion totale pendant 3 jours (20°C)*

→ *Après 2, 6,12 et 24 cycles*

3 — **Sollicitation B**
- *Séchage pendant 3 jours (20°C / 55% HR)*
- *Montée capillaire pendant 2 jours (20°C)*

→ *Après 2, 6 et 12 cycles*

→ *Mesure des propriétés mécaniques, hydrauliques et micro-structurales*

→ *R_c, E_{50}, V_p, V_s, k porosité à l'eau, PIM,*

(Amrioui, J. (2023)

Durabilité du matériau traité – Essais d'érosion

Essai d'érosion de trou (Hole Erosion Test (HET))

La résistance à l'érosion interne peut être évaluée de manière qualitative par l'essai au HET. Cet essai a pour objectif de reproduire le modèle d'érosion qui pourrait se produire sur un ouvrage hydraulique,

Les paramètres déterminés sont (Chevalier et al. 2016):

- **la contrainte de cisaillement critique τ_c pour laquelle se déclenche l'érosion et,**
- **la relation entre contrainte de cisaillement et taux d'érosion ε pour différents temps de cure et après des cycles**

Essai de percolation

Test de percolation pour simuler la dégradation du matériau DSM dans la zone saturée en permanence dans l'écran

Montage de 3 cellules de percolation

Eprouvettes de D100 mm de diamètre

Après X jours de percolation → *Analyse chimique (pH, conductivité électrique, ICP...)* – *Poromercure et nano-TRX* – *Vp et f* – *Indentation*

Deep soil mixing
Durabilité des ouvrages – Choix des sollicitations

- Instrumentation de la tranchée de sol mixé et du corps de digue (**2017-2022**)
- Mise en place d'une station météorologique (température, pluviométrie)

© Univ. Eiffel

- Collaboration DREAL / CEREMA / Univ-Eiffel (**2013-2023**)
- Le Kouby et al, (2022)

Conclusions

Quelques aspects du Deep soil mixing:

✓ Valorisation des matériaux de site	× Temps de prise
✓ Améliorer les performances mécaniques	× Efficacité variable en fonction du type de sol
✓ Diminuer la porosité du sol	
✓ Consommer une partie de l'eau	
✓ Diminuer la sensibilité à l'eau du sol	
✓ Diminuer la perméabilité du sol	

Conclusions

Quelques corrélations

Conclusions

	Sols grenus	Limons et argiles
R_{C7}	comprise entre 0,15 et 9 MPa suivant la granulométrie Prédictible en connaissant C et C_{63}	inférieure à 4 MPa Dépend de C, w, (et de VBS ?)
R_C gain de résistance	R_{C14} = 1,65 * R_{C7} si R_{C7} < 6 MPa R_{C28} = 2 * R_{C7} si R_{C7} < 6 MPa (légère surestimation) Prédictible plus précisément en connaissant $w_{initiale}$ et w_{finale} R_{C90} = 1,2 * R_{C28} si R_{C7} < 6 MPa	R_{C14} = 1,75 * R_{C7} R_{C28} = 2 * RC7 en moyenne (résultats assez dispersés) Dépend de w et C R_{C90} = 1,37 * R_{C28}
R_{c28} /	$q_{u_t} = \frac{w_f}{w_i} \times 19.428 \times C^{1.777-0.171 \ln C_{63}} \times C_{63}^{0.544} \times (\ln$	R_{c28} = 15,02 * C/E – 1,02
Augmentation de résistance de R_c avec le temps de cure	$q_{u,t} = q_{u,7} \times \beta$ avec $\beta = \exp\left[s_7 \times \left(1 - \sqrt{\frac{7}{t}}\right)\right]$	
$E_{50\ global}$	E_{50} = 70 - 200 * R_C si R_C < 1 MPa E_{50} = 60 - 160 * R_C si R_C < 5 MPa $E5_0$ = 50 - 120 * R_C si R_C > 5 MPa avec un maximum de 1 GPa Relation linéaire entre E_{50} et R_C jusqu'à 5 - 6 MPa puis radoucissement de la pente avec atteinte d'un plateau pour E_{50}	E_{50} = 70 - 230 * R_C Relation linéaire entre E_{50} et R_C
Relation entre la module statique $E_{50local}$ et R_c (q_u)	E_{50} = 1300 R_c	E_{50} = 500 R_c
Relation entre E_0 et R_c	$E_0 = 3.42 \times \rho \times \sqrt{q_u}$	$E_0 = 2.63 \times \rho \times \sqrt[3]{q_u}$
Relation entre E_0 et R_c	[31] E_0 = 6623,68 $(R_c)^{0,52}$	E_0 = 4737,70 $(R_c)^{0,}$
Relation entre E_{50} et la vitesse d'onde de compression V_p	$E_{50} = 121 \times V_p^{\ 4}$	$E_{50} = 22.6 \times V_p^{\ 6}$

Deep mixing - Soutènement

PART I

1. Introduction
2. General observations & area of applications
3. Functional requirements of the SMW's
4. Risk management
5. Preliminary research and preparation
6. Design
7. Execution
8. Quality control
9. Lifetime, management and maintenance
10. Conclusions et recommendations

PART II

1. Introduction
2. State of the Art

BBRI/SBRCURnet, 2018

Perspectives

- Base de données chantier à comparer à Base de données laboratoire,
- Liants alternatifs,
- « Guide sur la conception et l'exécution des ouvrages en Deep soil mixing »

Bibliographie

- AFNOR - (2005). Execution of special geotechnical works - Deep Mixing. European Committee for Standardization (CEN) Brussels. Standard. NF EN 14679.
- Lebon, S. P. (2005). Keynote lecture-New Methods in European Deep Mixing-A contractor's perspective on the developing challenges of execution. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm. Swedish Deep Stabilisation Research Center, Linköping, Sweden.
- Benhamou, L. and Mathieu, F. (2012). Geomix Caissons against liquefaction Seismic background of Caribbean Islands. In ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI (pp. 33–40). Brussels.
- Szymkiewicz, F. (2011). Evaluation des propriétés mécaniques d'un sol traité utilisé en paroi de soutènement. Thèse Université Paris-Est, 244p.
- Guimond-Barrett, A. (2013). Influence des conditions de mise en œuvre et de dosage sur la durabilité des sols traités aux liants hydrauliques en renforcement de plateformes d'infrastructures ou de bâtiments. Thèse Université du Havre, 276p.
- RUFEX (2014) - Mosser J.-F., Cuira F., Robinet A., Calon N., Dupla J.-C., Canou J., Cui Y.-J., Liman A., Reiffsteck P. Le Kouby, A. et coauteurs. Rapports projet FUI Rufex : rapport final, 107 pages.
- BBRI/SBRCURnet. (2018). Handbook Soil mix walls. Taylor and Francis Group. ISBN 978 90 5367 6441 7.
- Helson, O. (2017). Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition. Thèse Université Cergy Pontoise, 230p.
- Hessouh, J. J. (2021). Caractérisations physique et mécanique, et durabilité des bétons de sol : matériaux de laboratoire et matériaux de chantiers, Thèse Cergy Paris Université, 32p.
- Le Kouby, A., Saussaye, L., Patouillard, S. (2022). Feedback on the monitoring of a dyke reinforced with Deep soil mixing technique in Loire river. Proceedings of the 11th International Symposium on Field Monitoring in Geomechanics. London, September 2022.
- Amrioui, J. (2023). Vulnérabilité des digues au changement climatique – Effet des techniques de renforcement des sols. Thèse Université Gustave Eiffel, en cours.

cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Université
Gustave
Eiffel

Deep soil mixing – RUFEX 2014

⇨ Loi de contrainte – déformation pour la colonne sol-ciment

Courbe de chargement

Deep soil mixing – Digue de Loire

(a) pourcentage d'inclusion de sol

(b) et d'inclusions cailloux

⇨ Evolution de la perméabilité en fonction du pourcentage d'inclusions

Deep soil mixing – Digue de Loire

(a), pourcentage d'inclusion de sol

(b) et d'inclusions cailloux

⇨ Evolution du module de Young Ex et Ey en fonction du pourcentage d'inclusions

Deep soil mixing – Digue de Loire

Figure 2: a. Section through a soil mix column; in this section a rectangular sample with dimensions of 120×240 mm is selected; b. Mesh generated for the discontinuous simulations (red lines indicate the soil inclusions)