

PROJET RUFEX – DETERMINATION DES PROPRIETES MECANQUES DES MATERIAUX TRAITES PAR LA TECHNIQUE DU DEEP SOIL MIXING

RUFEX PROJECT – DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TREATED SOILS WITH THE DEEP SOIL MIXING TECHNIQUE

Alain Le Kouby¹, Antoine Guimond-Barrett², Fabien Szymkiewicz¹, Philippe Reiffsteck¹,
¹ IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée cedex
² SNCF, Paris, France, ancien doctorant à l'IFSTTAR

RÉSUMÉ – Cette communication présente l'étude qui a été effectuée sur les deux matériaux naturels présents sur le site de Vernouillet. Des mélanges ont été effectués en laboratoire et des prélèvements ont été effectués sur les colonnes de sol-ciment réalisées sur site. Les propriétés mécaniques (E_0 , E_{50} , q_u) mesurées sur les échantillons mélangés en laboratoire et sur site sont comparées et des corrélations sont proposées.

ABSTRACT – The paper presents a research study that has been achieved on two natural soils that can be found in the Vernouillet site. Indeed, soil-cement mixes have been carried out in the laboratory and soil cement columns were built. Comparisons between mechanical properties (E_0 , E_{50} , q_u) measured on laboratory samples (and on site samples) are shown and correlations are proposed.

1. Introduction

La tâche 3 du projet RUFEX (Renforcement et RéUtilisation des plateformes Ferroviaires et des Fondations Existantes) s'est intéressée plus particulièrement à la caractérisation mécanique du matériau en place mélangé à un liant hydraulique de type ciment.

En effet, le matériau obtenu diffère d'un béton et présente des dosages en liant (ciment) très supérieurs à ceux habituellement utilisés pour le traitement des sols en masse. Néanmoins, les moyens mis en œuvre pour la réalisation des massifs sont assez proches.

Un des enjeux de cette technique est la possibilité de prédire la déformabilité de l'ouvrage final. A cet effet, différentes méthodes peuvent être employées pour déterminer le module de déformation. Les méthodes basées sur les propagations d'onde comme le Pund-it permettent d'accéder à des modules dynamiques en petit déformation.

En ce qui concerne les modules de déformation obtenus à partir d'essais de compression simple menés à la rupture, le dispositif expérimental requis est décrit dans la norme EN 13286-43 (2003). Les déformations longitudinales des éprouvettes sont mesurées localement dans la partie centrale à l'aide de capteurs ou jauges de déformation et au niveau global. Le module local est le plus représentatif de la réponse du matériau.

Le module utilisé pour le dimensionnement d'ouvrages en soil mixing est le module sécant E_{50} calculé à l'aide de la méthode proposée dans EUROSILSTAB (1997).

2. Mesure des modules

2.1. Pund it test : mesure du module dynamique élastique

Le « pund-it test » est un essai de mesure de la vitesse de propagation d'ondes à travers une éprouvette (Figure 1). Il permet de déterminer un module dynamique élastique E_0 . Selon le diamètre de l'éprouvette à tester, on choisit la fréquence qui est de 54 kHz pour les grandes éprouvettes et de 150 kHz pour les petites (diamètre d'environ 52 mm). Ensuite, après avoir défini la hauteur de l'éprouvette, on positionne un couple émetteur récepteur sur les deux faces et dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Un produit visqueux de type gel est appliqué pour faciliter la propagation entre le transmetteur et l'éprouvette. L'appareil donne alors le temps (en μs) et la vitesse (en m/s) de l'onde.



Figure 1. Essai pund-it

Les paramètres mécaniques sont calculés de la manière suivante :

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

$$\varepsilon_G = \left(\frac{V_{\text{plaque}} \times \text{temps}}{\text{hauteur.de.l'éprouvette}} \right)$$

2.2. Essais de résistances en compression: mesure du module statique E_{50} et de la résistance à la compression simple q_u

La mesure du module lors de l'essai de compression simple s'effectue par mesure globale ou locale. De nombreuses études ont montrées la nécessité de réaliser l'essai par mesures locales de façon préférentielle.

La résistance à la compression simple (NF EN 13286-41, 2003) (Figure 2) est déterminée par la relation :

$$R_c = F_{\text{max}} / S$$

avec R_c en Pa, F_{max} en N et S (surface d'application de la force) en m^2

Le module local E_{50} est calculé par la méthode présentée sur la Figure 3. Cette méthode est utilisée pour le calcul du module global et du module local.



Figure 2. Essai de compression et zone de calcul du $E_{50\text{local}}$

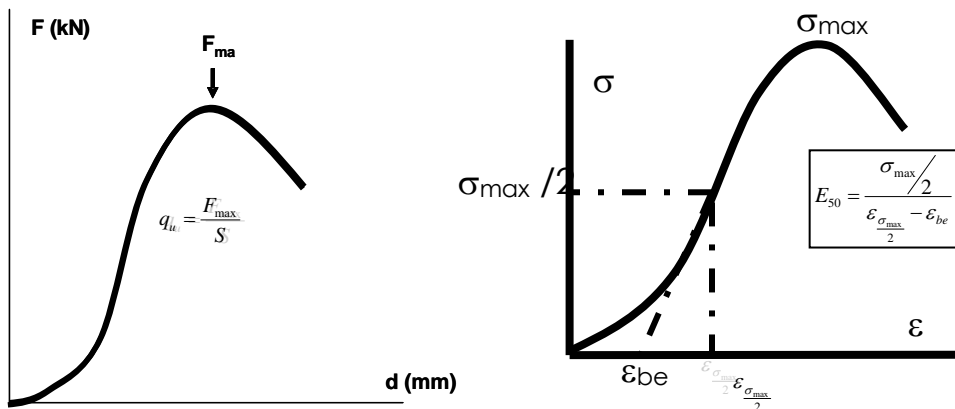


Figure 3. Calcul du module E_{50} par la méthode EUROSILSTAB (2002)

3. Mesures effectuées sur des échantillons préparés en laboratoire

L'évolution du module statique E_{50} , mesurée à différents temps de cure dans quatre sols traités en laboratoire à différents dosages, est représentée en fonction de la résistance à la compression q_u dans la Figure 4. Dans le cas des sables (sable de Fontainebleau (FS) et sable de Vernouillet (VSA)) les valeurs de q_u sont comprises entre 0,1 et 9 MPa. Le module statique E_{50} varie entre 0 et 15 GPa et semble présenter une relation linéaire avec q_u .

La résistance à la compression des échantillons de limon (Limon artificiel (AS) et le limon de Vernouillet (VSI)) varie entre 0,1 et 15 MPa. Pour une même résistance, le module statique E_{50} du limon est inférieur à celui du sable. Bien qu'une certaine dispersion soit observée, une relation linéaire fournit une corrélation utile (Figure 4).

Dans le cas des limons : $E_{50} = 720 q_u$

Dans le cas des sables $E_{50} = 2055 q_u$ avec E_{50} et q_u en MPa.

Après 28 jours de cure, les échantillons de sol-ciment (CEM III et C/E = 0,3) ont des résistances de l'ordre de 2 MPa et des modules statiques E_{50} à peine plus élevées que 1 GPa

Les valeurs de E_{50} déterminées dans cette étude sont plus élevées que celles publiées dans la littérature (EUROSOILSTAB, 2002). Ceci peut être expliqué par les différentes méthodes utilisées pour mesurer les déformations longitudinales des échantillons pendant le chargement. Les travaux expérimentaux ont permis d'analyser l'influence des mesures de déformation (externe et locale) sur la rigidité des sols traités (Tan et al., 2002; Goto et al., 1991; Shibuya et al., 1992). Les déformations à la rupture des échantillons de sol traités dans le cas des essais de compression simple et essais triaxiaux sont de l'ordre de 1 à 5% pour une déformation mesurée de manière externe entre les plateaux (CDIT, 2002; Åhnberg et al., 2003; Åhnberg, 2006 (a) and (b)).

Les déformations à la rupture mesurées ici en utilisant un système de mesures locales sur des échantillons traités en laboratoire sont 5 à 10 fois plus faibles avec des déformations de l'ordre de 0,1 à 1,0 % soit moindres que celles mesurées entre les plateaux.

La détermination des modules à des valeurs de déformation plus faibles explique les ratios E_{50}/q_u élevés (2055 pour les sables traités et 720 pour les limons traités).

Bien que la relation linéaire semble représenter de manière correcte la relation entre E_{50} et q_u il est intéressant de noter que les ratios E_{50}/q_u diminuent avec la résistance suggérant une relation non linéaire entre les deux paramètres.

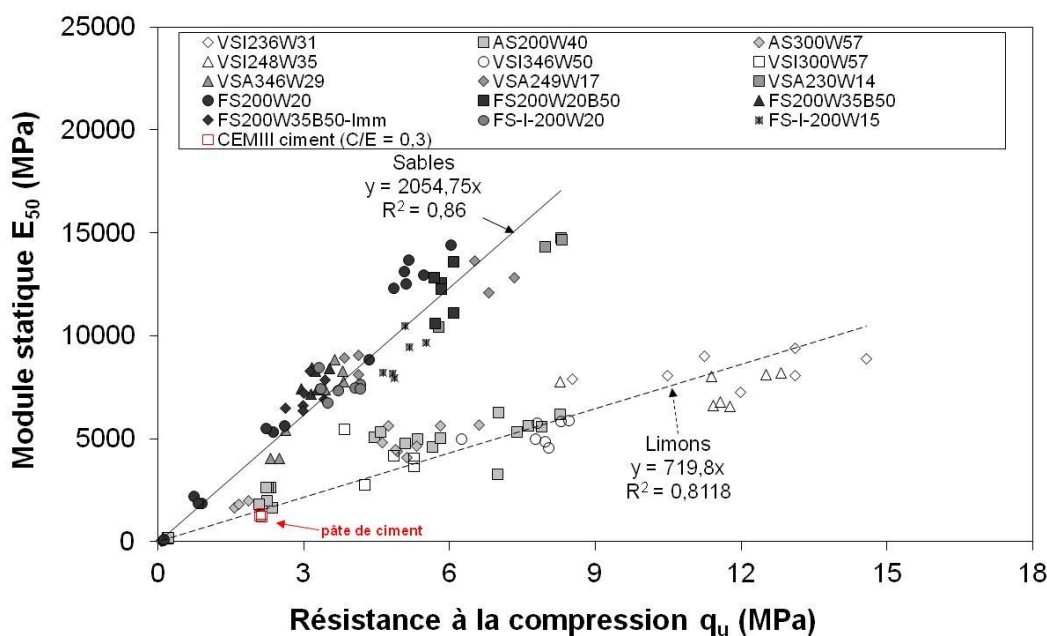


Figure 4. Relation entre le module statique local (E_{50}) et la résistance à la compression (q_u) à partir d'essais en laboratoire

Dans les cas du limon et du sable, le module dynamique E_0 augmente de manière non linéaire avec la résistance à la compression q_u (Figure 5). Les valeurs de E_0 sont comprises entre 1,4 et 20 GPa pour les sables et entre 2 et 12 GPa pour les limons. E_0 est proche de 3,5 GPa pour le ciment CEMIII après 28 jours. Etant donné que la résistance à la compression du sable est pratiquement proportionnelle à la vitesse d'onde de compression V_p ⁴ (Guimond-Barrett, 2013) et qu'il existe une relation entre E_0 et V_p , E_0 montre une corrélation tout à fait intéressante avec la racine carrée de q_u (Figure 5). Dans le cas des limons, le module dynamique E_0 est proportionnelle à q_u ^{1/3} (Figure 6). Les modules dynamiques mesurés sur les échantillons de limon sont inférieurs à ceux trouvés pour les échantillons de sable.

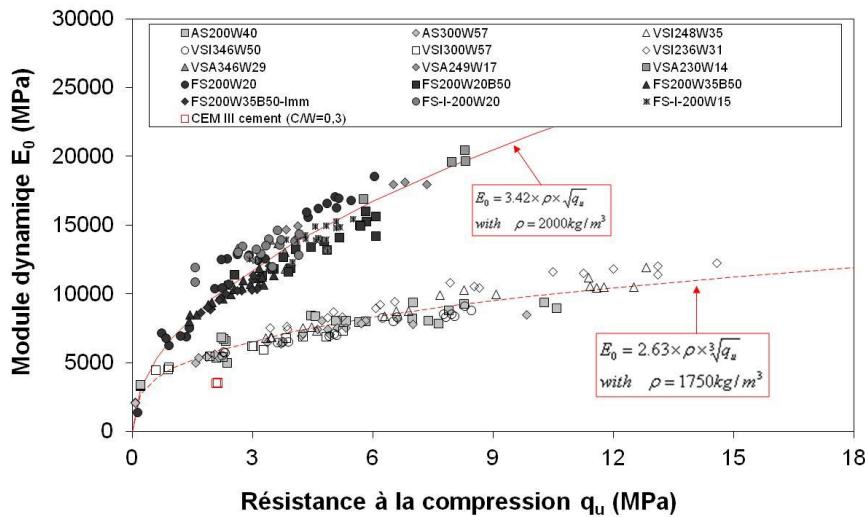


Figure 5. Relation entre le module E_0 et la résistance à la compression à partir d'essais en laboratoire

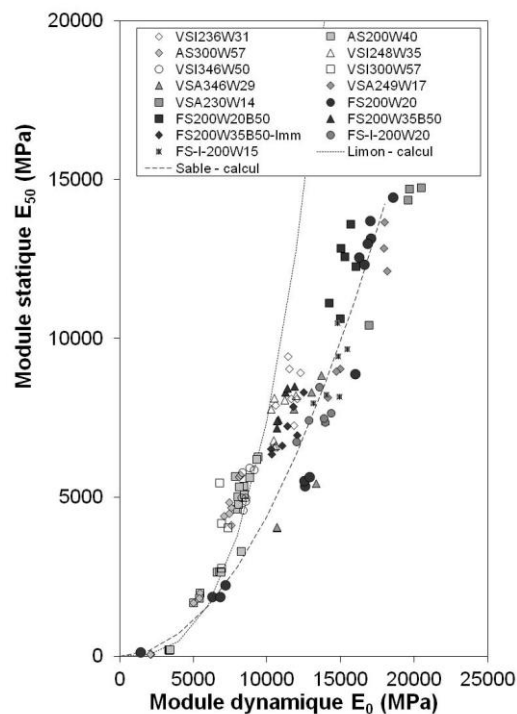


Figure 6. Relation entre le module statique local (E_{50}) et le module dynamique (E_0) à partir d'essais en laboratoire

4. Mesures effectuées sur des échantillons préparés sur le chantier expérimental de Vernouillet

A Vernouillet, six colonnes tests ont été réalisées (X1, X2, X3, X4, X5 et X6) et deux colonnes qui ont servi à des essais de chargement (C1 et C2). Les colonnes X4, X5 et X6 ont été excavées et carottées à 28 jours tandis que les cinq autres ont été prélevées à 180 jours.

La géologie est la suivante :

- entre 1 et 3m : Limon
- entre 3 et 5 m : sable

Dans le cas de la Figure 7 (a) qui représente l'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la profondeur, les valeurs entre 0 et 3 m obtenues à Vernouillet sont comparées aux valeurs moyennes obtenues en laboratoire sur le matériau limoneux mélangé à des dosages similaires à ceux des trois colonnes prélevées respectivement à 28 et 180 jours. Entre 3 et 5m, les résultats sont comparés à ceux obtenues en laboratoire sur des mélanges effectués sur le sable prélevé sur le site.

Sur la Figure 7, on observe une augmentation de la résistance entre la couche de limon et la couche de sable traduisant les résistances plus élevées obtenues dans la couche de sable. On peut noter le peu de mélanges au sein de la colonne.

Dans le cas du limon, les valeurs moyennes mesurées sont de l'ordre de 3 MPa à 28 jours et de 5,25 MPa à 180 jours. On note une dispersion importante due à l'hétérogénéité du sol initial, les variations de distribution et de dosage en ciment, les variations des paramètres machines et la présence d'inclusions de sol toujours plus importantes dans les sols fins par rapport aux sols granulaires.

Dans le sable, les valeurs de résistance sont plus élevées et la dispersion est également importante en raison de l'hétérogénéité de la couche de sable qui contient des lentilles de graviers qui constituent des zones de fortes résistances.

Les résistances obtenues sur site sont inférieures à celles obtenues en laboratoire dans le cas des limons et du sable jusqu'à 4 m de profondeur. A cinq mètres de profondeur, en revanche, les valeurs obtenues sont supérieures à celles obtenues en laboratoire (Figure 7).

Malgré une certaine dispersion, la relation entre les modules statiques et dynamiques, dans le cas des échantillons prélevés sur site, est assez proche de celle établie à partir des essais en laboratoire pour des valeurs de E_0 plus petites que 10 GPa (Figure). Au-delà de 15 GPa, la relation établie pour les sables semble constituer, pour les échantillons prélevés sur site, une corrélation adéquate.

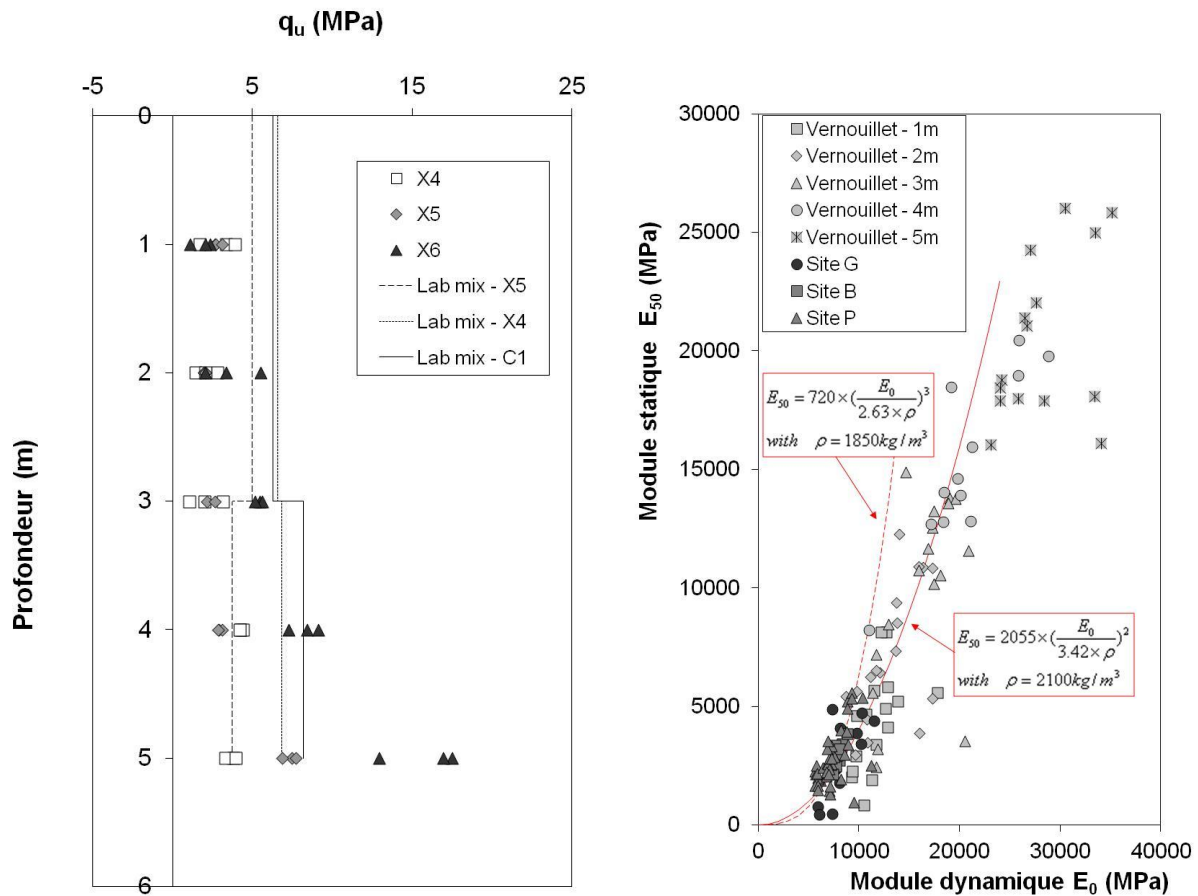


Figure 7 (a) Evolution de la résistance à la compression en fonction de la profondeur pour les colonnes prélevées à 28 jours, (b) Relation entre le module statique (E_{50}) et le module dynamique (E_0)

7. Conclusions et perspectives

Le renforcement des sols par colonne ou écran réalisés avec la technique du Soil Mixing présente de nombreux avantages tels que la rapidité d'exécution et la possibilité de régler le dosage en ciment en fonction du type de matériau. Les mesures de modules locaux sont les plus proches des modules à utiliser pour tout type de modélisation des ouvrages. Les méthodes utilisées pour mesurer les modules sont proposées dans les deux guides issus du projet RUFEX ; Projet RUFEX (a) et (b). Néanmoins, l'hétérogénéité du matériau obtenue après mélange constitue un domaine qui nécessite encore des travaux expérimentaux avant de valider la méthode.

8. Références bibliographiques

- AFNOR. (2003). NF EN 13286-41: Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- Åhnberg, H. (2006a). On yield stresses and the influence of curing stresses on stress paths and strength measured in triaxial testing of stabilised soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 54-66.
- Åhnberg, H. (2006b). Consolidation stress effects on the strength of stabilised Swedish soils. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 10(1), 1-13.

- Åhnberg, H., Johansson, S.E., Pihl, H. and Carlsson, T. (2003). Stabilising effects of different binders in some Swedish soils. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 7(1), 9-23.
- CCTP. (2012). *Mise en œuvre de mélanges en place pour le renforcement des zones de recouvrement du val d'Orléans*
- CDIT 2002. *The Deep Mixing Method*. Journal Coastal Development Institute of Technology (CDIT), Balkema Publishers. 100 pages.
- European-Standard 2005. *Execution of special geotechnical works - Deep Mixing*. European Committee for Standardization (CEN) Brussels. Standard. NF EN 14679
- EUROSOILSTAB 2000. *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilisation*. European project BE 96-3177. Report CT97-0351.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T. (1991). A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. *Soils and Foundations*, 31(1), 169-180.
- GUIMOND-BARRETT, A. (2013). *Influence of mixing and curing conditions on the characteristics and durability of soils stabilised by deep mixing*. Thèse de doctorat Université Paris Est.
- Projet RUFEX. (a). (2014). *Rapports projet FUI Rufex : Deep Soil Mixing - Guide pour le traitement des sols*, 19 pages.
- Projet RUFEX. (b). (2014). *Rapports projet FUI Rufex : Deep Soil Mixing - Recommandations pour l'étude de formulation du mélange*, 17 pages.
- Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X.J., Abe, F., Kim, Y-S. and Park, C-S. (1992). Elastic deformation properties of geomaterials. *Soils and Foundations*, 32(3), 26-46.
- Tan, T. S., Goh, T. L., and Yong, K. Y. (2002). Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing. *Geotechnical Testing Journal*, 25(4), 422–433.