

Modélisation numérique du comportement d'une colonne de soil-mixing et confrontation à un essai de chargement en vraie grandeur

Numerical modeling of a soil-mixing column behavior and comparison with a full-size load test

Cuira F.
TERRASOL, Paris, France

Costa d'Aguiar S.
SNCF I&R, Paris, France

Grzyb A., Pellet F.
INSA, Lyon, France

Mosser J.-F.
SOLETANCHE BACHY, Rueil-Malmaison, France

Guimond-Barrett A., Le Kouby A.
IFSTTAR, Paris, France

RÉSUMÉ : Cet article présente les résultats d'un travail de modélisation numérique visant à simuler un essai de chargement axial sur une colonne de sol-ciment, réalisée par soil-mixing en voie humide. Quatre modèles ont été bâtis dans le cadre de ce travail : trois modèles en éléments finis, et un modèle semi-analytique simplifié. Les résultats des quatre modèles sont confrontés à ceux obtenus par un essai de chargement monotone en vraie grandeur, réalisé sur une colonne de sol – mixing de 400 mm de diamètre et 5 m de hauteur, mise en œuvre dans un sol limoneux à sablo-graveleux. Ces résultats permettent notamment de reproduire le mode de rupture observé lors de l'excavation de la colonne, et mettent en évidence la nécessité de modéliser correctement le comportement non linéaire du matériau sol-ciment qui influe significativement sur le comportement global, à la différence des pieux « rigides ».

ABSTRACT: This article shows the results of a numerical modelling study aiming at simulating an axial load test on a soil-cement column, carried out using the wet soil-mixing method. Four models were built as part of this study: three finite element models and one simplified semi-analytical model. The results from the four models were compared with those from a full-size monotonic load test, performed on a Ø400 mm diameter and 5m high soil-mixing column, installed in silty to sandy-gravelly soils. These results allow to reproduce the failure mode observed during the column excavation, by emphasizing the need of an accurate modelling of the non-linear soil-cement material which has a significant influence on the general behaviour, unlike with “rigid” piles.

KEYWORDS: Numerical modelling, soil reinforcement, Soil-mixing, load test.

1 INTRODUCTION

La technique du soil mixing permet d'améliorer les caractéristiques d'un sol meuble par mélange mécanique *in situ* avec un liant hydraulique. Le sol initialement présent sur le chantier est alors valorisé comme un matériau de construction, avec le double intérêt de diminuer les déchets (sols excavés) et de réduire la consommation de matériaux et d'énergie.

Le procédé Springsol® utilise un outil ouvrant, pour réaliser des colonnes de sol-ciment de diamètre variable, ce qui limite au maximum l'impact des travaux sur les existants. Ce procédé offre des perspectives aussi bien dans le domaine de la maintenance des plateformes ferroviaires (possibilité de renforcer les structures ferroviaires sans avoir à déposer les voies), que dans celui du renforcement des fondations existantes (empreinte des forages sur les structures limitée au diamètre de l'outil fermé).

Cette souplesse et le caractère économe en déchets et en matériaux permettent au procédé Springsol de répondre aux nouvelles exigences environnementales et économiques des projets. C'est donc dans le but de développer ces solutions que Soletanche Bachy, la SNCF et Terrasol collaborent au sein du projet de recherche RUFEX (Renforcement et réUtilisation des plateformes et Fondations Existantes) avec l'IFSTTAR, l'INSA de Lyon et l'École des Ponts ParisTech.

Cet article présente les résultats d'un travail de modélisation numérique d'un essai de chargement monotone conduit jusqu'à la rupture sur une colonne de soil mixing réalisée sur un chantier de validation du projet RUFEX.

2 ESSAI DE CHARGEMENT EN VRAI GRANDEUR

Un essai de chargement sur une colonne de soil-mixing de 400 mm de diamètre et 5 m de hauteur a été réalisé sur le site expérimental du projet Rufex situé sur la commune de Vernouillet (78). Le contexte géotechnique est caractérisé par des remblais en surface suivis d'une couche de limon sableux reposant sur un sable graveleux. Aucune nappe phréatique n'a été rencontrée lors des reconnaissances. Le Tableau 1 récapitule les caractéristiques géo-mécaniques issues des essais réalisés.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des sols du site.

Nature	Limon sableux	Sable graveleux
Profondeur du toit (m)	0,5	3,5
Pression limite nette pl^* (MPa)	1	2,5
Module pressiométrique E_m (MPa)	10	20
Cohésion c' (kPa)	2	0
Angle de frottement ($^\circ$)	27	37

La colonne testée a été forcée avec l'outil Springsol®. Le malaxage du sol avec le liant hydraulique (ciment de type CEM III) a été effectué *in situ* par voie humide. La quantité de ciment injectée dans la colonne sous forme de coulis était d'environ 230 kg / m³.

L'essai de chargement a été réalisé 90 jours après l'installation de la colonne, avec des paliers de chargement de 50 kN maintenus pendant 30 min. La courbe de chargement obtenue est présentée sur la Figure 1. Le chargement a été arrêté pour une charge maximale de 400 kN, lorsque le tassement de la tête de la colonne a dépassé 40 mm (1/10^{ème} du diamètre).

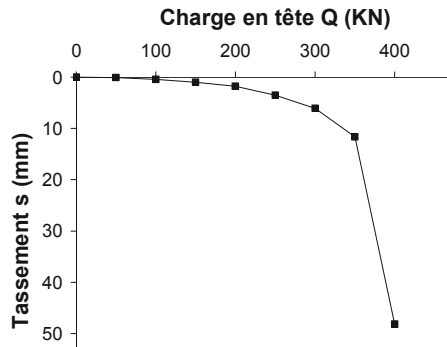


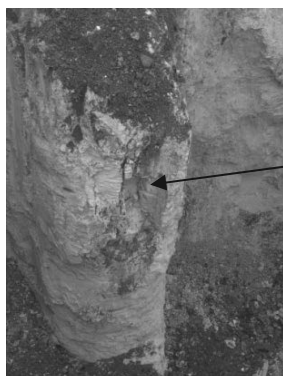
Figure 1. Courbe de chargement sur colonne de soil-mixing.

Après 180 jours, l'excavation de la colonne testée a permis de distinguer une partie supérieure (de 0 à 2,5 m) constituée de limon traité et une partie inférieure composée de sable traité. Une zone de transition faite d'un mélange de limon et de sable traité a été observée entre 2,5 et 3,5 m. Des fragments de la colonne ont été prélevés, carottés en laboratoire, et soumis à des essais mécaniques pour déterminer la résistance et le module de déformation du matériau constitutif de la colonne (Tableau 2).

Tableau 2. Résultats des essais en laboratoire sur les éprouvettes provenant de la colonne excavée.

Nature	Limon traité (1)	Transition (2)	Sable traité (3)
Profondeur (m)	0,5 - 2,5	2,5 - 3,5	3,5 - 5,0
Résistance Rc (MPa)	3,7	7,6	11,9
Module local E ₅₀ (MPa)	1280 Rc	1280 Rc	1280 Rc
Angle de frottement (°)	42	42	42
Cohésion (kPa)	700	1700	2800

Vers 1 m de profondeur, la colonne de limon traité apparaît particulièrement fissurée et fracturée (Figure 2), ce qui fait suggérer que la rupture s'est produite au sein du matériau constitutif de la colonne. Ce constat est conforté par le fait que la portance de la colonne (estimée à partir des résultats des essais pressiométriques) était a priori supérieure à sa résistance interne (estimée à partir des résultats des essais sur les éprouvettes carottées).



Zone de limon traité fissurée et fracturée vers 1 m de profondeur

Figure 2. Excavation de la colonne après l'essai de chargement.

3 MODÉLISATION DE L'ESSAI DE CHARGEMENT : MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS

Le résultat de l'essai de chargement est utilisé comme référence pour l'évaluation de quatre modèles numériques dont trois basés sur un traitement complet en éléments finis. Ces modèles sont construits selon la coupe schématique suivante (Figure 3) et sur la base des paramètres donnés dans les Tableaux 1 et 2.

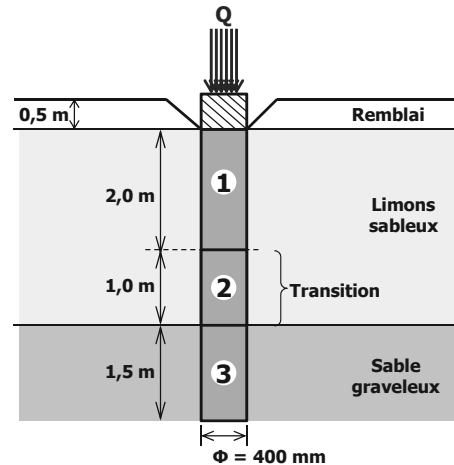


Figure 3. Coupe de calcul retenue

3.1 Modèle 1 (logiciel GEFDyn)

Ce modèle est bâti à l'aide du logiciel éléments finis GEFDyn. Il s'agit d'un modèle tridimensionnel où la colonne est modélisée par des éléments volumiques à 8 nœuds formant un quart de cylindre de 400 mm de diamètre et 5 m de long, noyé dans un milieu continu de 20 m de profondeur. Des éléments d'interface ont été introduits entre la structure de la colonne et les éléments de sol.

Le modèle de comportement choisi est un modèle linéaire élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture de Mohr Coulomb (noté MC par la suite) pour les différents matériaux (sol et colonne). La loi de l'interface est celle d'Aguiar et al (2011) dont la formulation est basée sur les mêmes hypothèses de comportement que le modèle dit de Hujieux (1985) qui se révèle très adapté au comportement non linéaire des sols. La richesse de ce type de modèle réside dans la possibilité, en fonction des paramètres de la surface de charge et du type d'érouissage, de modéliser des comportements qui peuvent aller du simple « élastique parfaitement plastique » à un comportement élasto-plastique à érouissage déviatorique et volumique. Pour le présent calcul, les paramètres de l'interface sont choisis de manière à représenter une surface de charge de Mohr Coulomb avec un comportement élastique parfaitement plastique. L'angle de frottement à l'interface a été choisi égal à celui du sol environnant. Cela est justifié par le mode de réalisation de la colonne (malaxage local) qui produit une interface rugueuse mobilisant ainsi un mécanisme de rupture mettant en jeu la résistance intrinsèque du sol (Figure 4).



Figure 4. Etat de la surface d'un tronçon de colonne excavée

3.2 Modèle 2 (logiciel ABAQUS)

Le modèle 2 est bâti sous le logiciel ABAQUS. Il s'agit d'un modèle axisymétrique qui intègre une loi de comportement avancée de type « Drucker-Prager » modifiée avec cap (DPC). Ce modèle permet de prendre en compte l'effet d'écroutissage du sol, l'historique de contraintes, ainsi que l'effet de compaction en pointe sous la colonne. La surface de charge est composée de trois parties : une limite de rupture en cisaillement de type Drucker-Prager, un cap elliptique, et une zone de transition (Figure 5).

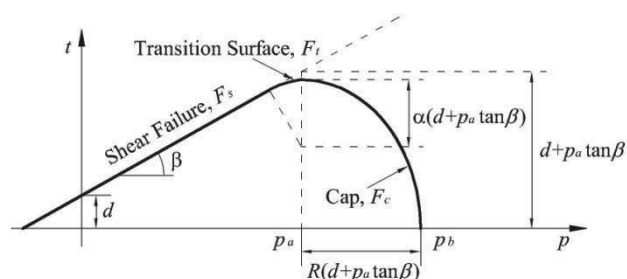


Figure 5. Loi de Drucker-Prager modifiée avec cap (DPC)

Les paramètres β et d s'expriment en fonction de l'angle de frottement interne φ et la cohésion c à l'aide de la relation (1) :

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad \text{et} \quad d = \frac{18c \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (1)$$

Les autres paramètres sont choisis soit par calage, soit d'une manière forfaitaire sur la base d'éléments bibliographiques. En particulier, le paramètre p_b qui délimite la surface d'écroutissage, doit en toute rigueur être calé sur le résultat d'un essai de consolidation isotrope. Dans le présent exercice, ce modèle (DPC) a été considéré pour caractériser le comportement des sables graveleux. Pour les autres matériaux (colonne et limons sableux), il a été retenu une loi linéaire élastique parfaitement plastique avec critère de rupture de Mohr Coulomb (MC). Pour la définition de la loi DPC dans les sables graveleux, les paramètres suivants ont été considérés : $R = 0,10$, $\alpha = 0,01$ et p_b fonction de la déformation volumique plastique selon la loi d'écroutissage des sables d'Ottawa (Helwany 2000). Enfin, des éléments d'interface ont été introduits avec une loi MC.

3.3 Modèle 3 (logiciel PLAXIS)

Le 3^e modèle est un modèle axisymétrique bâti sous le logiciel PLAXIS. Les éléments utilisés sont des éléments triangulaires à 15 nœuds et 30 degrés de liberté. Pour le sol et la colonne, on choisit une loi de contraintes-déformations de type « HSM » (Hardening Soil Model - Figure 6) qui est une loi hyperbolique tenant compte de l'écroutissage en cisaillement et en compression.

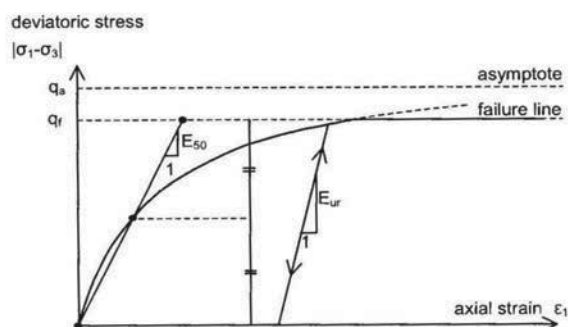


Figure 6. Principe de la loi HSM sous PLAXIS

Ce modèle permet par ailleurs de tenir compte de la variation du module de déformation sécant E_{50} (à 50% de la contrainte de rupture) avec l'état de contraintes. Cette variabilité est contrôlée par un paramètre « puissance » noté m , qu'on prend usuellement égal à $m = 0,5$ pour le sol en place (le module sécant est proportionnel à la racine de la contrainte appliquée). Pour la colonne, ce paramètre est pris égal à $m = 0$ (pas de variation du module sécant avec l'état de contraintes). Enfin, cette loi est combinée avec un critère de rupture de type Mohr Coulomb.

Des éléments d'interface ont été par ailleurs introduits sur toute la frontière de la colonne avec une loi de contraintes-déformations et un critère de rupture identiques à ceux des sols environnants.

3.4 Mise en œuvre et résultats

Pour les trois modélisations réalisées, les données géotechniques ont été complétées par les valeurs du module de déformation sécant $E_{50}^{h/2}$ à mi-épaisseur dans chaque couche : $E_{50}^{h/2} = 25$ MPa pour les limons sableux et $E_{50}^{h/2} = 100$ MPa pour les sables graveleux. La Figure 7 présente la courbe de chargement simulée à l'aide des trois modèles présentés ci-dessus. Une très bonne concordance est observée entre la modélisation et les mesures jusqu'à 300 kN (75% de la charge de rupture mesurée). Les modèles 2 et 3 mettent en évidence un palier de rupture net situé entre 350 et 400 kN, ce qui correspond, à 10% près, au palier obtenu par l'essai de chargement sur site.

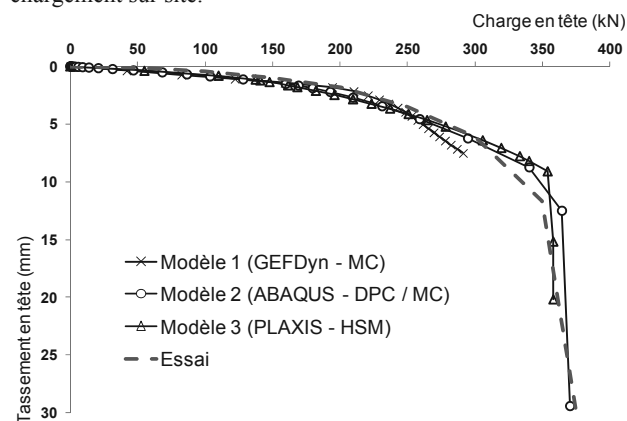


Figure 7. Simulation de la courbe de chargement par modélisation numérique en éléments finis

Dans les modèles 2 et 3, le palier de rupture obtenu correspond au développement d'une zone de plastification « conique » dans la partie supérieure de la colonne vers 1 m de profondeur (Figure 8). Ce constat est corroboré par les observations faites sur site lors de l'excavation de la colonne.

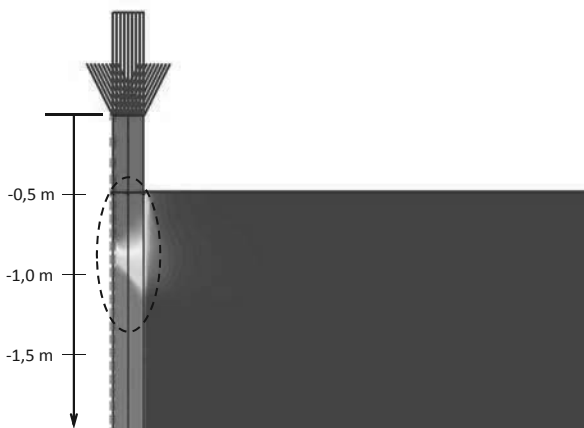


Figure 8. Développement d'un mécanisme de rupture localisé dans la colonne (modèle 3)

4 MODÈLE SEMI-ANALYTIQUE SIMPLIFIÉ

4.1 Principe du modèle

On utilise à présent un modèle semi-analytique simplifié basé sur la méthode dite « t-z » : la colonne est assimilée à une poutre verticale travaillant en compression axiale, tandis que le frottement latéral τ et la contrainte en pointe q suivent une loi de mobilisation de Frank et Zhao (1982), et sont donc fonctions du déplacement vertical de la colonne w . Chaque loi est caractérisée à l'aide de deux paramètres : un paramètre de pente (K_t ou K_p) et une contrainte unitaire limite (q_s ou q_p). Ces lois sont couramment utilisées en France pour estimer le tassement d'un élément de fondation profonde, et se révèlent très efficaces dans les exercices de calage par rapport à un essai de chargement en vraie grandeur.

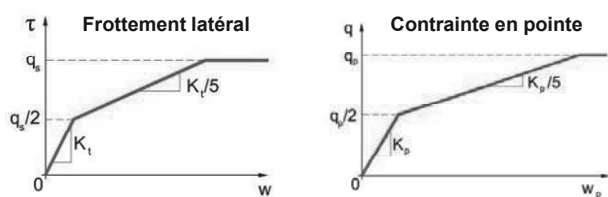


Figure 9. Lois de mobilisation de type Frank et Zhao

Les courbes de mobilisation ci-dessus sont combinées avec la loi de comportement de la colonne, qui relie la contrainte appliquée σ au taux de déformation axiale de la colonne ϵ . A la différence des pieux « classiques » pour lesquels le contraste de rigidité pieu/sol est tel que l'essentiel des tassements est obtenu en pointe, la particularité d'une colonne de soil-mixing réside dans un contraste de rigidité colonne/sol plus faible et une sensibilité notable de la raideur globale en tête vis-à-vis du comportement local. Ces éléments ont justifié le recours à une loi de contrainte-déformation non linéaire pour la colonne : il a été retenu une loi de forme hyperbolique (Figure 10) construite à l'aide de deux paramètres : le module sécant E_{50} et la résistance à la compression simple R_c . Lors du présent exercice, cette loi s'est révélée apte à retranscrire le comportement observé, à la différence d'une loi linéaire élastique.

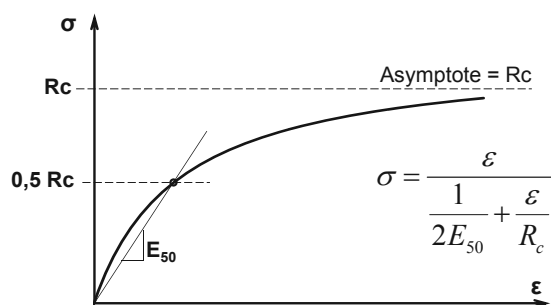


Figure 10. Loi de contrainte-déformation retenue pour la colonne

4.2 Mise en œuvre

La loi de contrainte-déformation de la Figure 10 est construite à partir des paramètres (E_{50} , R_c) qui figurent dans le Tableau 2.

Les paramètres de pente des lois de Frank et Zhao (Figure 9) s'obtiennent par corrélation avec le module pressiométrique E_M : $K_t = 0,8 E_M / B$ et $K_p = 4,8 E_M / B$, où B désigne le diamètre de la colonne. Ensuite, pour le choix du frottement latéral limite q_s , deux hypothèses enveloppes sont examinées : la première est celle d'un contact béton/sol pour laquelle la valeur de q_s s'obtient par corrélation avec la pression limite pl^* ; la deuxième hypothèse est celle d'un contact sol/sol pour laquelle la valeur de q_s est celle du cisaillement limite de Mohr Coulomb : $q_s = \tan(\varphi') \cdot K_0 \cdot \sigma_v'$, avec $K_0 = 0,5$ et σ_v' la contrainte verticale effective initiale à l'interface de la colonne. Enfin, la contrainte limite en pointe q_p est prise égale à 4 MPa.

4.3 Résultats

La Figure 11 présente les résultats obtenus (courbe de chargement). Deux cas ont été étudiés : cas d'un comportement linéaire élastique de la colonne ($E = E_{50}$), et cas d'un comportement non linéaire ($E = f(\sigma)$) selon la loi décrite dans la Figure 10. Pour chaque cas, deux situations sont examinées : frottement de type sol/sol ($q_s = f(\sigma_v')$) et frottement de type béton/sol ($q_s = f(pl^*)$). Les résultats obtenus confirment la pertinence d'une loi de comportement non linéaire pour le matériau constitutif de la colonne, et montrent que le choix d'un frottement de type « sol/sol » est plus représentatif du comportement réel observé. Avec ces hypothèses, le résultat du modèle semi-analytique se révèle très concordant avec celui de l'essai de chargement jusqu'au palier de rupture. Celui-ci est obtenu par plastification en tête de la colonne (contrainte appliquée proche de la résistance à la compression simple R_c).

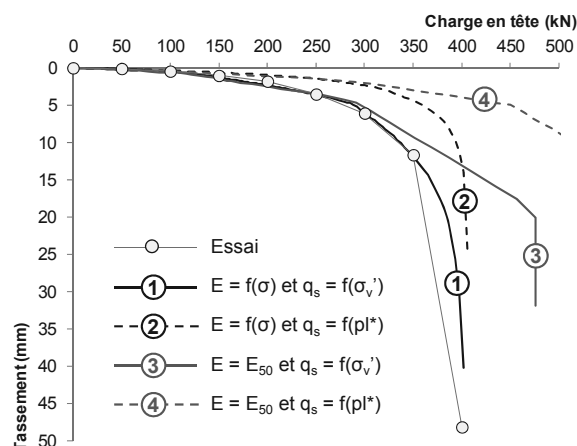


Figure 11. Courbe de chargement – Modélisation analytique simplifiée

5 CONCLUSION

Les enseignements tirés de l'essai de chargement en vraie grandeur ont permis d'orienter le choix des paramètres d'entrée des différents outils numériques développés dans le cadre du projet RUFEX. Les résultats obtenus, tant par les modèles numériques que par le modèle semi-analytique, permettent de bien reproduire le comportement observé lors de l'essai, aussi bien sur le comportement avant rupture que sur le mode de rupture. Ils mettent en évidence la nécessité de modéliser correctement le comportement non linéaire du matériau sol-ciment qui influe significativement sur le comportement global, à la différence des pieux « rigides ».

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la DGCIS (Direction Générale de la Compétitivité et des Services) et les Conseils Généraux de la Région Ile de France et 93 qui cofinancent cette recherche.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- D'Aguiar, S. C., A. Modaresi-Farahmand-Razavi, J. A. dos Santos, and F. Lopez-Caballero (2011). *Elastoplastic constitutive modeling of soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading*. Computers and Geotechnics 38(-), 430447.
- Frank, R. & Zhao, S. R. (1982). *Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins*, Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 119 :17-24.
- Helwany S. 2000 *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*, J. WILEY & SONS, INC pp. 61-67
- Hujeux, J. C. (1985). *Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols en génie parasismique*, pp. 278–302. V. Davidovici, Presses ENPC.