

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Le traitement des sols fins par injection solide

Improvement of fine soils by compaction grouting

A.GUILLOUX, Bureau d'Ingénieurs Conseils TERRASOL, Puteaux, France
F.BLONDEAU, Bureau d'Ingénieurs Conseils TERRASOL, Puteaux, France

RESUME : L'article décrit deux exemples récents de chantier d'amélioration de sols fins par injection solide. Il présente les résultats obtenus, en particulier en ce qui concerne l'amélioration des caractéristiques géotechniques, et conclut sur quelques réflexions que soulève l'utilisation de ce procédé dans des sols fins saturés.

PRESENTATION

Le "compactage par injection solide" est une technique relativement récente, qui s'est développé en France depuis le début des années 1980, et dont les applications ont été faites essentiellement dans des terrains hétérogènes (éboulis, remblais,...), mais plus rarement dans des sols fins saturés. On rappelle que cette technique consiste à incorporer dans le sol, à partir de forages de petit diamètre régulièrement espacés (un forage pour 15 à 25 m²), un mortier de nature "visqueuse" (en général du sable avec un peu de liant) qui ne claqua pas le terrain, mais le refoule et donc en diminue l'indice des vides, jusqu'à former des colonnes de 0,50 à 1,50 m de diamètre en général). Dans les applications courantes, le taux de substitution du sol par le mortier est de l'ordre de 3 à 6 %.

L'objet de cette communication est de présenter deux applications récentes -pour le port de Dunkerque, et pour les nouveaux théâtre et musée de Nice - de cette technique d'amélioration dans des limons plus ou moins argileux, de faible compacité, et d'analyser les améliorations de résistance obtenues, par différentes méthodes de contrôle. On présente également les principes d'évaluation du facteur de réduction des tassements en fonction du pourcentage d'incorporation, ainsi que quelques réflexions sur le principe de la méthode appliquée aux sols fins.

PORT AUTONOME DE DUNKERQUE.

Le port de Dunkerque est situé dans les dépôts deltaïques du Rhin. A l'endroit de la nouvelle darse du quai à pondéreux ouest (QPO) on y rencontre environ 30 à 35 mètres de sable reposant sur le substratum d'argile des Flandres (fig. 1). Une couche de limons, présente sur l'ensemble du site, coupe la continuité verticale du sable entre les cotes -13 et -14,5. Au voisinage immédiat de cette couche, le sable est dans un état suffisamment lâche pour être liquéfiable sous l'effet de chocs ou d'agressions telles que les opérations de dragage. Plusieurs ruptures se sont produites en 1982 et 1984, entraînant la liquéfaction de 100.000 à 300.000 m³ de sable dans la souille et affectant certaines parties d'ouvrages de protection du quai. Afin de protéger les talus en service dans la zone sensible, il a été décidé de renforcer les sables lâches et la couche de limons par injection solide.

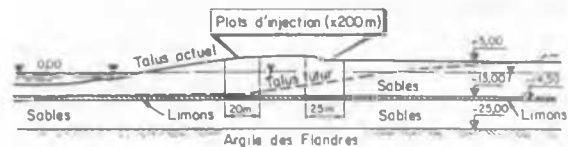


Fig. 1 : Port de Dunkerque

Les sols à traiter sont caractérisés par :

	D ₅₀ (μm)	D ₁₅ (μm)	C _u	φ	q _c (MPa)	I _D
sable	200	100	5	40	2 à 9	20
limon	30	2	-	37	0,7	-

L'injection a concerné deux plots de 20x200m entre les cotes -12,5 et -15 destinés à former un patin stable en cas de liquéfaction à l'arrière. Une première passe à la maille de 5m x 5m a permis d'incorporer 4% de matériau. Une deuxième passe a porté ce taux à 8% à l'interface inférieure des limons dans la tranche supposée particulièrement sensible. Le matériau injecté est caractérisé par :

sable de Dunkerque :	1510 kg/m ³
cendres :	350 kg/m ³
eau :	245 kg/m ³
w _φ :	12%
φ :	38°

Le contrôle de l'efficacité du traitement a été réalisé par sondages au piézocône. Il a fait ressortir l'amélioration suivante :

sables I _D final =	60%
limons q _c final =	q _c init. x 2

Cette amélioration est statistique et n'est pas homogène, certains points demeurant faibles, d'autres étant sensiblement plus améliorés mais, dans l'ensemble, le traitement a été jugé satisfaisant.

LE NOUVEAU THEATRE ET LE MUSEE DE NICE.

Ces deux bâtiments sont à construire sur les voûtes existantes en béton armé de la rivière canalisée du Paillon, lesquelles reposent sur des terrains constitués de (cf figure 2) :

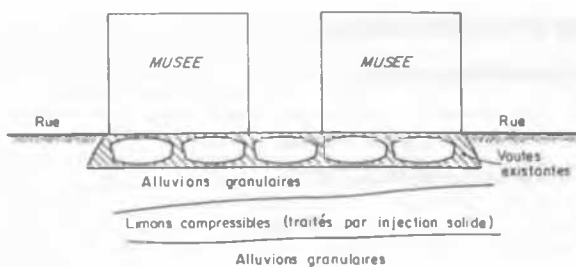


Fig. 2 : Théâtre et Musée de Nice

- un ensemble de terrains alluviaux, avec une alternance de niveaux sablo-graveleux compacts et de limons argileux compressibles,
 - un substratum triasique (marno-calcaires et gypses) situé à 20/30 m de profondeur et très altéré en partie supérieure.

Devant les difficultés liées à la réalisation des pieux, on a retenu une solution de fondation directe sur les voutes existantes, après avoir amélioré les limons compressibles par "injection solide", afin de réduire les tassements prévisibles, notamment différentiels, à des valeurs admissibles pour les ouvrages.

Le mortier utilisé est fait à partir d'un sable auquel on a ajouté 60 à 80 kg/m³ de cendres volantes, et les pourcentages d'incorporation ont varié entre 3 et 5 %, conformément au projet, afin de tenir compte des variations d'épaisseurs des limons compressibles : pour mieux uniformiser les tassements, on a cherché à plus améliorer les zones à forte épaisseur de sols compressibles.

Deux types d'essais de contrôle ont été réalisés :

- des forages destructifs avec enregistrement des paramètres de forages, où l'amélioration du sol se traduit par une réduction très nette des vitesses d'avancement V_a (pour une pression sur l'outil constante) : avant traitement V_a varie entre 150 et 300 m/h, alors qu'après amélioration, il varie entre 80 et 120 m/h;
- des essais au pénétromètre statique où l'on constate systématiquement une augmentation de la résistance en pointe q_c entre les essais réalisés avant et après traitement (figure 3). Cette augmentation varie entre 20 et 70 %, et il est remarquable de constater qu'elle est d'autant plus forte que le sol était initialement plus mou.

C'est l'un des enseignements a priori très intéressants de ce chantier : la technique d'amélioration par injection solide a un effet d'homogénéisation des sols, qui permet d'obtenir, à partir d'un sol initialement de caractéristiques hétérogènes, un sol amélioré de caractéristiques beaucoup plus uniformes. C'est un résultat important pour toutes les applications dans lesquelles on recherche essentiellement une réduction des tassements différentiels.

Cette réduction des tassements a été estimée en cumulant deux effets :

- un écoulement du sol lors de l'injection solide, qui a pour effet d'augmenter son module de déformation de 70 à 100 % environ pour les pourcentages mis en oeuvre,
- un "effet-colonne" analogue à celui pris en compte dans les colonnes ballastées, qui dans le

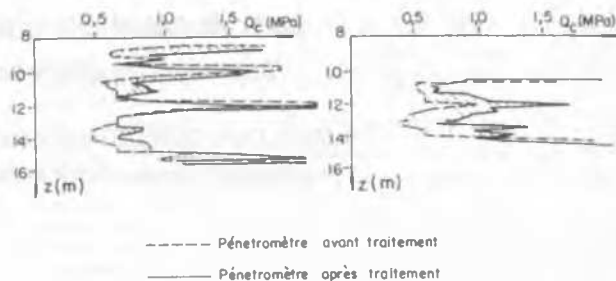


Fig. 3 : Pénétrètres avant et après traitement

cas d'un rapport entre les modules de déformation des colonnes de mortier et du sol, égal à 8 environ pour une maille de 4 x 5 m et un taux d'incorporation moyen de 4 %, permet de réduire environ de 30 % les tassements.

Lors de la rédaction de cet article, le chantier de construction des bâtiments étant en cours, il était trop tôt pour juger de l'effet réel de l'injection solide sur la réduction des tassements.

QUELQUES REFLEXIONS

L'injection solide est une technique d'amélioration encore trop récente pour que l'on puisse en tirer des conclusions générales et définitives, mais il semble possible de retenir les éléments suivants :

- dans les sols hétérogènes et notamment les remblais, elle assure un rôle d'homogénéisation des propriétés mécaniques en améliorant de préférence les parties les plus mauvaises ;
- dans les sols fins limoneux et a fortiori argileux, il est nécessaire d'incorporer une quantité importante de matériau, jusqu'à 8 à 10% parfois, pour obtenir un résultat significatif ;
- dans ce cas, il y a lieu de se préoccuper de la dissipation des surpressions interstitielles générées par l'injection et l'addition de drains verticaux peut s'avérer indispensable au centre des mailles d'injection ;
- la colonne injectée est en soi une colonne de matériau résistant qui renforce le sol en place indépendamment de l'amélioration propre de la compacité de celui-ci.

BIBLIOGRAPHIE

- P. DUPEUBLE, J. ROBERT et A. DENIAU (1985). Le compactage par injection solide. Revue Travaux, Juillet-Août 1985.
- M. GAMBIN (1985). Le compactage statique horizontal. Colloque franco-soviétique sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols, Moscou, Octobre 1985.
- M. GAMBIN (1985). Tendances nouvelles en amélioration des sols. Chantiers de France n° 189, Décembre 1985.
- R. BOUCHET, M. GAMBIN et J.L. PROUST (1986). Procédés utilisés pour réduire les risques de liquéfaction sur le terre-plein de Fontvieille à Monaco. 1er Colloque Nationale de Génie Parasismique, Saint-Rémy-les-Chevreuse, Janvier 1986