

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.

Renforcement de sols mous par colonnes à module contrôlé

Reinforcement of soft soils by means of controlled modulus columns

Ph.Liausu – *Directeur Technique, Menard Soltraitement*

B.Pezot – *Ingénieur Etudes, Menard Soltraitement, PO Box 28, 91620 Nozay, France*

RÉSUMÉ: Il est courant de renforcer des sols de fondation compressibles par des inclusions granulaires du type colonnes ballastées ; cette technique atteint toutefois ses limites, soit lorsque le sol encaissant est trop mou ou organique et n'offre donc pas d'étreinte latérale suffisante, soit lorsque le facteur de réduction des tassements est trop faible en raison de charges très élevées.

C'est pourquoi une nouvelle technique a été récemment développée dite « colonnes à module contrôlé », consistant à renforcer le sol par des inclusions semi-rigides cimentées. Ces colonnes sont mises en œuvre par une tarière particulière, motorisée par de puissants équipements, qui refoule le sol latéralement pratiquement sans remontée de terre ni vibrations. Durant la remontée de l'outil, un mortier spécialement formulé est injecté, dont le module de déformation se situe entre celui du ballast compacté et celui du béton de pieu classique. L'article présente donc deux cas concrets de chantiers réalisés dans un sol tourbeux, pour l'un, et avec de très fortes charges réparties, pour l'autre.

ABSTRACT: It is usual to reinforce compressible foundation soils by means of granular inclusions such as stones columns; however, this technique reaches its limits, either when the soil is too soft or organic and does not offer a sufficient lateral support, or when the settlement reduction ratio is too small in case of high applied loads.

Therefore, a new technique has been recently developed, named "controlled modulus columns", consisting in reinforcing the soil by means of semi rigid cemented columns.

These columns are realized by a specially designed auger, installed by powerful equipment which displaces the soil laterally with virtually no spoil or vibration. During the auger extraction process, a specially formulated mortar is pressuregrouted, the deformation modulus of which lies between the one of compacted gravel backfill and the one of piles concrete.

The paper presents two case histories carried in peaty soils, for one project, and with very high loads, for the other.

1 LA COLONNE A MODULE CONTROLE

1.1 Préambule

Les inclusions verticales relèvent de la technique la plus ancienne dans le domaine des fondations. Les réseaux de pieux de bois fichés sous de nombreuses cathédrales ou ponts anciens remplissent encore leur fonction de nos jours.

Les inclusions verticales répondent au souci de réduire les tassements sous les fondations et de les homogénéiser à l'échelle du massif traité.

Cette méthode de fondation trouve son prolongement actuel de façon économique et sophistiquée dans la technique des colonnes à module contrôlé (CMC), qui sont des inclusions semi-rigides.

1.2 Les inclusions rigides et les inclusions souples

Les principes de renforcement de sol par inclusions verticales se répartissent classiquement en deux familles assez distinctes : les *inclusions rigides* (réalisées comme des pieux) et les *inclusions souples* (par exemple, les Colonnes Ballastées).

Entre ces deux groupes, subsiste une large fenêtre de besoins techniques qui n'étaient servis par aucun procédé jusqu'à l'apparition des CMC.

1.3 Présentation des Colonnes à module contrôlé

Les CMC sont des *inclusions semi-rigides* dont le module de déformation à long terme se situe entre le module du béton de pieux et le module des colonnes ballastées. Selon les formulations, ce module varie de 500 à 10 000 MPa.

La solution des CMC ne vise pas à réaliser des pieux devant

supporter chacun directement la charge de l'ouvrage, mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement répartis et en densité suffisante. Le dimensionnement des CMC se base sur la recherche d'une répartition des efforts entre les colonnes et le sol encaissant en fonction du tassement admissible pour le projet.

Les CMC présentent les caractéristiques suivantes :

- Procédé de réalisation : Matériau cimenté mis en place à la tarière creuse
- Module de déformation : de 100 à 2 000 fois celui du sol
- Méthode de traversée du sol : à la vis refoulante, sans déblais
- Effet sur le sol : Amélioration des terrains entre les colonnes si elles sont assez rapprochées
- Diamètre des colonnes : diamètre de l'outil de forage
- Fabrication du matériau : en centrale

Les CMC permettent en particulier de fonder les ouvrages dans les cas qui ne pouvaient être traités par les inclusions souples et notamment :

- Sol trop lâche ou trop mou (manque d'étreinte latérale pour les inclusions souples)
- Sol tourbeux ou organique ou remblais divers (évolution incontrôlée de l'étreinte latérale)
- Charges très élevées
- Tassements admissibles très limités.

Tout comme les inclusions souples, les colonnes à module contrôlé permettent de réaliser des dallages sur terre-plein grâce à la mise en place d'une couche de répartition en tête des inclusions. Elles permettent également de reprendre les semelles de fondation ou des radiers à l'exclusion des efforts horizontaux et de soulèvement.

D'autre part, les CMC présentent l'avantage de ne pas générer de vibrations ce qui permet de travailler en toute sécurité le long d'ouvrages mitoyens.

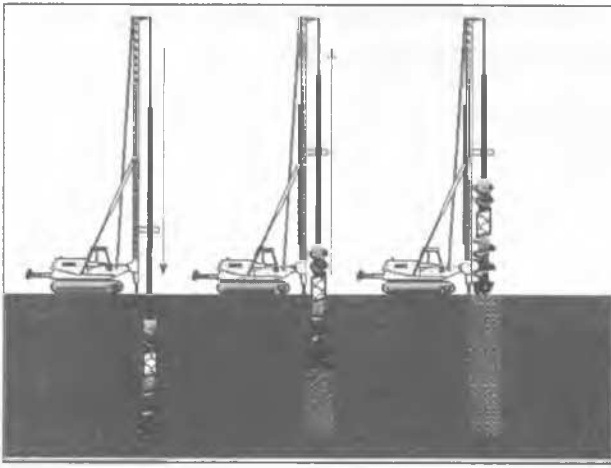


Figure 1. Schéma de réalisation des CMC

1.4 Méthode de réalisation des colonnes à module contrôlé

Les colonnes à module contrôlé sont réalisées par refoulement du sol et sans déblais à l'aide d'un outil creux permettant l'alimentation des colonnes par la pointe. Il s'agit en général d'une vis refoulante.

Les engins employés sont spécialement conçus pour développer conjointement une poussée sur l'outil particulièrement élevée, ainsi qu'un fort couple, de façon à refouler les sols latéralement au cours de la pénétration de la vis.

Celle-ci est vissée dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis lentement remontée sans déblais. Un mortier fluide est libéré au cours de la remontée dans la cavité de sol par l'âme de la vis spéciale, de façon à constituer une colonne de 40 à 50 cm de diamètre (cf. figure 1).

Ces colonnes sont réalisées après mise en place d'une plateforme de travail de 30 cm en bons matériaux. Le dispositif opératoire proposé à sec et sans extraction de terre, n'entraîne pas de pollution significative de la plateforme.

Les colonnes sont contrôlées par enregistrement des paramètres d'injection (figure 2) ainsi que la prise d'échantillons pour essais d'écrasement.

Les paramètres enregistrés et imprimés sur les fiches de contrôle comprennent :

- Les vitesses d'avancement et de rotation en descente
- Le couple de rotation en descente
- La pression et le volume de mortier injecté

Le profil des colonnes est dérivé de ces paramètres.

2 EXEMPLE DE RENFORCEMENT D'UN TERRAIN TOURBEUX : STOCKAGE OTOR PICARDIE

Dans le cas présenté ci-après, les Colonnes à module contrôlé sont préférées aux colonnes ballastées car le sous-sol, de nature essentiellement tourbeuse, ne permet pas de garantir la pérennité de l'étreinte latérale nécessaire à leur fonctionnement.

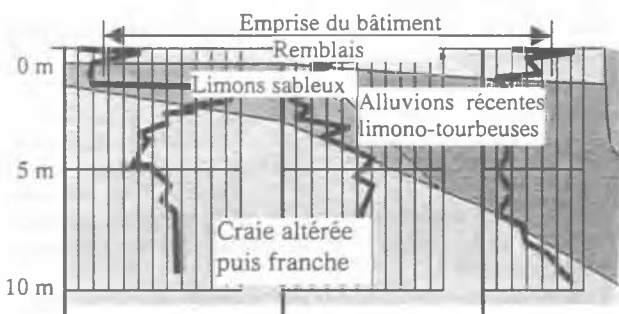


Figure 2. Profil géotechnique

1.5 Présentation du projet

Le projet consiste à réaliser une extension des établissements Otor Picardie à Contoire Hamel (Somme). Il s'agit d'une unité de recyclage de papiers accolée aux bâtiments existants.

L'extension, d'une superficie de 6 800 m², contient une chaîne de production (dérouleuse) et un stockage de bobines de papier sur dallage représentant une surcharge répartie de 50 kPa. L'ensemble est couvert par une structure métallique reposant sur des semelles chargées à 500 KN. L'ensemble de ces éléments fait l'objet du renforcement du sous-sol par CMC.

1.6 Conditions géotechniques

Les conditions géotechniques préalables au renforcement ont été identifiées par deux campagnes de sondages réalisés par le CEBTP d'Amiens.

Le terrain est situé dans la vallée de l'Avre, le long de la rivière. Le profil géotechnique est présenté sur la figure 2.

La nappe d'eau se situe de 1,72 m à 3,30 m sous la surface.

Les couches du sous-sol présentent donc des caractéristiques hétérogènes sur l'emprise du bâtiment (tableau 1). La couche tourbeuse constitue la principale difficulté vis-à-vis des fondations superficielles et d'un dallage sur terre-plein.

1.7 Principes de renforcement du sous-sol

Le renforcement doit tenir compte à la fois des différentes zones de chargement du projet, des tolérances sur les tassements associées à ces zones et des différentes zones de sous-sol. Il s'agit donc d'adapter le sol à la structure projetée.

L'unité de renforcement étant la colonne à module contrôlé réalisée selon un diamètre fixe à l'aide d'un matériau de caractéristiques uniques déterminé pour l'ensemble du chantier, les deux paramètres qui permettent la conception du renforcement sont :

- La profondeur des colonnes
- La densité de colonnes par unité de surface et leur disposition.

1.7.1 Les semelles

La reprise des semelles est assurée par un groupe de quatre colonnes de façon à limiter les tassements à 1,5 cm sous 150 kN ELS par colonne.

1.7.2 Les rails transversaux et les appareils lourds

Les rails de roulement sont incrustés dans la surface du dallage. Celui-ci est surépaissi sur une largeur de 1,10 m. Les colonnes sont disposées en files sous les axes des rails. L'intervalle entre les colonnes est choisi de façon à limiter les tassements à 1 cm.

1.7.3 Le dallage

Les dallages sont repris par la réalisation d'un maillage de colonnes carré de 3,0 m de coté. Un matelas de répartition en grave compactée d'une épaisseur totale de 45 cm est intercalé entre les colonnes et le dallage.

Tableau 1. Caractéristiques des couches de sol

Couche de sol	Epaisseur	Principales caractéristiques mesurées
Remblai	0,60 à 1,90 m	$Q_c > 10$ MPa $P_l = 0,7$ MPa ; $E_p = 9$ MPa
Alluvions tourbeuses	Zéro à 6 m	$P_l = 0,22$ MPa ; $E_p = 2,0$ à 3,6 MPa
Alluvions limono-sableuses	Zéro à 4 m	$P_l = 1,8$ MPa ; $E_p = 15$ MPa
Craie altérée	Toit à 2,0 à 8,0 m	—

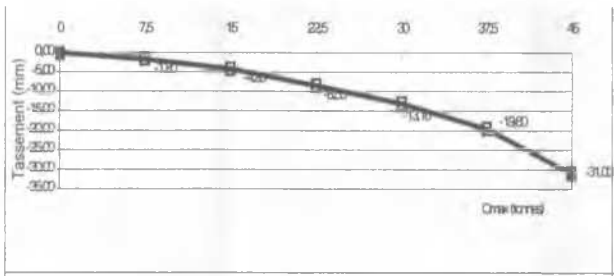


Figure 3. Courbe de chargement à 60mn : déflexion à la fin de chaque palier.

Le maillage des colonnes est doublé dans la zone qui se trouve surélevée par du remblai représentant jusqu'à 30 kPa de contrainte supplémentaire. Le maillage est prolongé jusqu'à une maille à l'extérieur du dallage coté rivière où les tourbes sont présentes jusqu'à 8,0 m de profondeur. Cette sur largeur étend le renforcement dans cette zone plus sensible aux tassements.

L'ensemble du chantier représente environ 1300 colonnes.

1.8 Calculs de dimensionnement du dallage

Les principaux résultats des calculs de dimensionnement aux éléments finis réalisés pour différentes zones sont les suivants :

- Tassement d'ensemble pouvant atteindre 3 à 4 cm dont 0,9 cm de raccourcissement de la colonne. Ce tassement correspond à un facteur d'amélioration de 2,5 à 3 seulement, mais avec une sécurité bien meilleure sur le comportement à moyen terme des couches tourbeuses.
- Traction maximale dans le béton du dallage : 1,8 MPa. Le dallage ne se fissure pas et la flexion ne sollicite pas les armatures. Il reste dimensionné avec l'armature minimale requise. Les efforts parasites induits par la présence des colonnes sont maîtrisés.
- Contrainte verticale maximale dans les colonnes : 2,4 MPa. Cette contrainte représente une charge dans la colonne de 300 kN. Le sol supporte donc le complément, soit une charge de 150 kN par maille.

1.9 Contrôle de la qualité

La qualité de la réalisation est contrôlée a posteriori par la réalisation de quatre essais de chargement réalisés directement sur l'arase supérieure de colonnes à module contrôlé à l'aide d'une plaque de diamètre 60 cm.

Les graphiques correspondant à l'un de ces essais sont donnés ci-après (figures 3 et 4).

L'essai est poussé jusqu'à la charge de 450 kN, soit une fois et demi la charge de service de la colonne. Le tassement obtenu sous cette charge est de 31 mm. Le raccourcissement de la colonne peut être estimé à 12 mm compte tenu de son module ce qui laisse supposer environ 20 mm d'enfoncement en pointe sans rupture du sol.

Le tassement mesuré sous la charge de service de 300 kN est

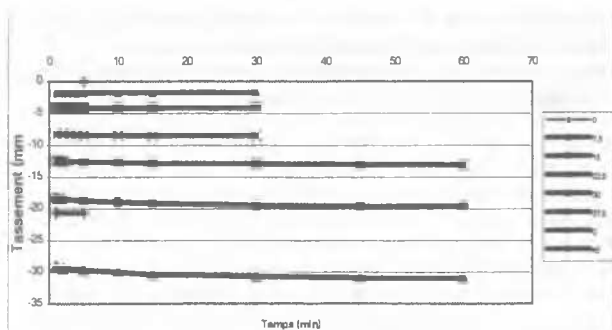


Figure 4 – Tassements à chaque palier en fonction du temps

de 13 mm, soit le tiers du tassement calculé. Cependant, l'essai de chargement d'une colonne seule mobilise un frottement positif alors que la surcharge uniformément répartie le réduit considérablement en comprimant le sol. Ce résultat n'est donc pas en contradiction avec le calcul.

La colonne testée est conforme au dimensionnement.

1.10 Conclusions

Le procédé des colonnes à module contrôlé a permis de répondre exactement au problème posé d'adaptation du sol à l'ouvrage prévu.

Dans certains cas, une limitation stricte des tassements a été recherchée, comme sous les semelles de structure ou sous les équipements de la chaîne de fabrication. Dans le cas des zones de stockage, un blocage trop strict des tassements aurait conduit au risque de voir se développer des efforts parasites dans le dallage et des désordres.

Ces éléments ont été pris en compte dans le dimensionnement du réseau de colonnes à module contrôlé de façon satisfaisante.

2 RENFORCEMENT DE L'ASSISE D'UN DALLAGE LOURDEMENT CHARGÉ

2.1 Présentation du projet

Le projet consiste en l'extension des halls de stockage des produits métallurgiques des établissements Thyssen au Mans dans la Sarthe. La principale difficulté de réalisation tenait à la surcharge d'exploitation sur dallage exceptionnellement élevée puisqu'elle atteignait 160 kPa pour un des halls à construire.

Les investigations géotechniques réalisées sur le site avaient mis en évidence la coupe type de sol suivante, à partir de la surface du terrain :

- remblais d'environ 2 mètres d'épaisseur, constitués de matériaux sablo-graveleux et de limons avec débris divers,
- alluvions modernes de la Sarthe jusque vers 3,50 mètres de profondeur, constituées d'argile sableuse ou de sable argileux,
- alluvions anciennes de la Sarthe, constituées de sables et graviers propres.

On trouvera à la figure n° 5 le profil pressiométrique moyen du terrain d'assise du projet.

On peut constater que les 3,50 mètres supérieurs étaient relativement peu compacts, avec un module pressiométrique Ménard moyen E_M de l'ordre de 3,0 MPa.

2.2 Choix de la solution de renforcement

Sans traitement de sol préalable, le tassement prévisible ΔH du dallage chargé à $\sigma = 160$ kPa se montait donc à :

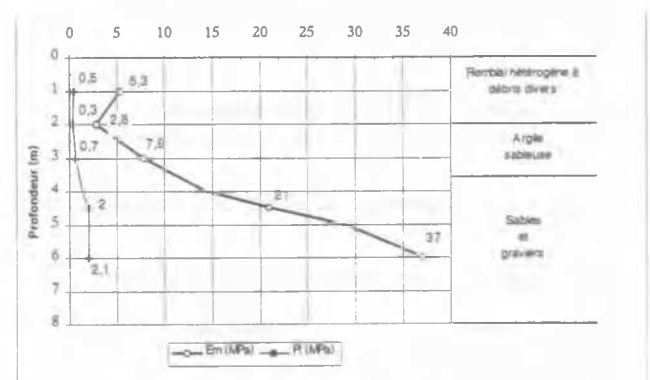


Figure 5. Coupe géotechnique

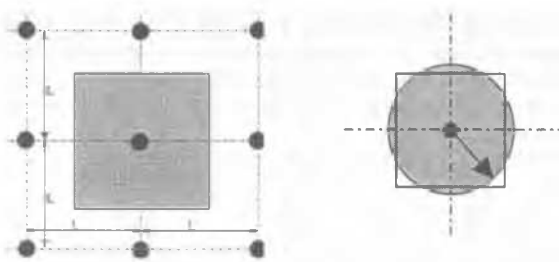


Figure 6. Principe de la modélisation axi-symétrique

$$\Delta H = (H \cdot \sigma) / (E_M / \alpha)$$

avec H = épaisseur compressible (3,50 m)

α = coefficient de structure (1/2 pour le sol considéré)

soit $\Delta H = 9$ cm environ.

Une telle valeur n'était bien entendu pas acceptable et c'est pourquoi une solution de renforcement préalable du sol a été étudiée, afin d'éviter un coûteux plancher porté sur pieux.

Il a d'abord été envisagé d'avoir recours à des colonnes balastées, mais il a vite été constaté que, pour réduire les tassements à une valeur acceptable de l'ordre de 2 centimètres, il aurait fallu utiliser un maillage de colonnes tellement resserré que cette solution n'aurait été ni réalisable ni économique. En effet, un facteur de réduction des tassements de l'ordre de 4, correspond à un taux d'incorporation de 40%, soit une Colonne de diamètre 70 par mètre carré, selon l'approche élastique.

C'est pourquoi l'on s'est vite orienté vers une solution d'inclusions semi-rigides permettant une bien meilleure réduction des tassements.

Après concertation avec le maître d'œuvre du projet, la technique des colonnes à module contrôlé a finalement été retenue.

2.3 Dimensionnement de la solution

Le dimensionnement du réseau a été réalisé par une modélisation aux éléments finis élasto-plastique effectuée avec le programme Plaxis.

Cette approche permet de prendre en compte le sol renforcé, mais aussi le dallage proprement dit avec sa forme de répartition et d'obtenir ainsi la répartition des contraintes et des déformations dans le complexe sol et structure.

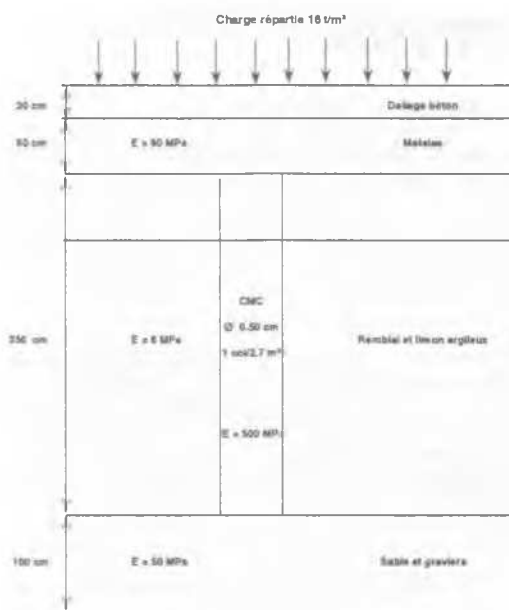


Figure 7. Modèle aux éléments finis

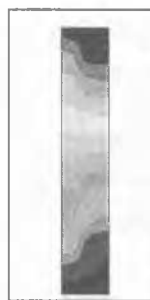


Figure 8. Déformations verticales



Figure 9. Distribution des contraintes verticales

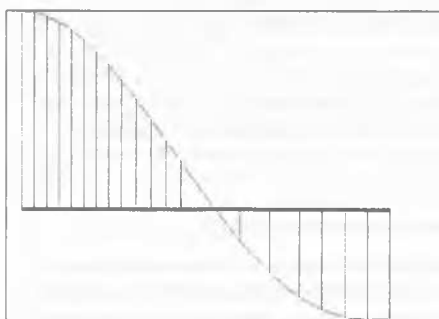


Figure 10. Distribution des moments dans le dallage béton
Valeur maximale 8.6kN/m

Sous une charge uniformément répartie, le problème peut être étudié en modélisation axi-symétrique, selon le schéma donné à la figure n° 6.

Les paramètres du modèle final sont représentés sur la figure n° 7.

Après plusieurs calculs préliminaires, un réseau de colonnes de 50 cm de diamètre et de 3,50 m de profondeur disposées suivant un maillage carré de 1,65 m de côté a été retenu.

Un dallage de béton de 30 centimètres a été pris en compte, cette épaisseur étant nécessaire pour des problèmes de poinçonnement de charges ponctuelles. Le matelas de répartition avait pour sa part une épaisseur de 60 centimètres.

Les principaux résultats de la modélisation, sont les suivants :

- tassement absolu de l'ordre de 2 cm (figure 8)
- contrainte verticale maximale dans les inclusions de 2,7 MPa, compatible avec le mortier utilisé pour constituer les colonnes (figure 9)
- Moment maximal M dans le dallage béton de 9 kN.m/m (Figure 10), correspondant à une contrainte maximale de traction dans le béton de $6.M/(b.H^2)$ de 0,6 MPa permettant de ne pas armer le dallage (autrement que par les treillis habituels anti-fissuration)

Dans les zones moins lourdement chargées à 60 kPa, le maillage a été porté à 3,00 m de côté.

Les contrôles d'exécution ont comporté, comme dans le cas présenté précédemment, un enregistrement des paramètres de réalisation, des essais d'écrasement sur éprouvettes de mortier et un essai de chargement sur colonne à module contrôlé.

Tous ces résultats ont permis de valider les hypothèses prises en compte dans le calcul présenté ci-dessus.