

LE RENFORCEMENT DES SOLS PAR COLONNES

1. Introduction

Le renforcement par colonnes (RpC) est l'une des méthodes d'amélioration d'un sol, dit initial, dont les caractéristiques mécaniques (cohésion et angle de frottement, soit pression limite ou résistance de pointe) et de déformabilité (module de Young, module pressiométrique) sont faibles. En d'autres termes, le sol initial ne peut pas constituer l'assise d'une fondation à cause d'une capacité portante insuffisante et (souvent) en raison d'un tassement excessif (inadmissible).

A titre d'exemples pratiques les sols faisant souvent l'objet d'un RpC sont intermédiaires à deux catégories de sols qualifiés de problématiques:

- Les argiles molles caractérisées par une cohésion non drainée modérée à très faible (inférieure à 30 kPa) et un module de Young souvent inférieure à 3 MPa.
- Les sables lâches (en particulier saturés) dont l'angle de frottement est inférieur à 29° et un module de Young variant de 8 à 15 MPa.

La situation la plus courante d'un RpC, telle que illustrée sur la **figure 1**, est réalisée sous forme d'inclusions verticales (à section supposée circulaire) par un matériau ayant des caractéristiques mécaniques beaucoup meilleures que celles du sol initial. Comme matériau constitutif des colonnes on peut citer:

- Les matériaux grenus (ou pulvérulents) ayant un angle de frottement supérieur à 38° (la cohésion peut être négligée). Cette situation correspond à la technique des « colonnes ballastées » qui peut être exécutée avec différents procédés. Le diamètre des colonnes, après mise en place varie le plus souvent entre 0,8 à 1,2 m.
- Le sol mou en place est traité avec un liant (chaux ou ciment) dont l'ajout est de l'ordre de 8 à 12% en poids de la masse du sol à améliorer. Ce qui correspond à la technique du « Deep mixing » ou traitement en profondeur. Dans ce cas la résistance mécanique est régie par une très forte cohésion (de l'ordre de cent celle du sol initial) et un angle de frottement plutôt modéré (voire négligeable).

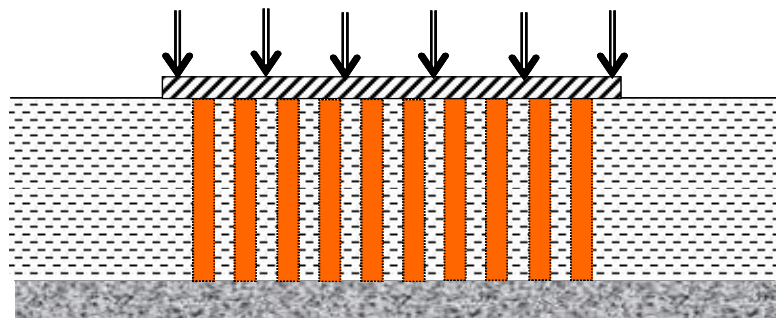


Figure 1. Configuration courante de renforcement par colonnes du type « reposant sur substratum rigide »

Par conséquent, les deux premiers buts essentiellement visés suite à un renforcement par colonnes sont l'augmentation de la capacité portante et la réduction du tassement dues aux caractéristiques du matériau constitutif des colonnes.

Le diamètre des colonnes, qu'on suppose dans les calculs comme étant à section circulaire mais parfois elle est différente selon le procédé, varie souvent entre 0,8 et 1,2 m.

La longueur des colonnes dépend, en premier lieu, de la présence ou non d'un substratum rigide qui en pratique s'identifie à une couche très résistante (argile raide, sable dense). La présence d'un substratum rigide est une situation idéale pour garantir davantage la réduction du tassement.

Lorsque le niveau d'un substratum rigide ne peut pas être atteint la solution « colonnes flottantes » reste envisageable, quoique demeurant très peu pratiquée, en particulier pour les structures sensibles au tassement (figure 2).

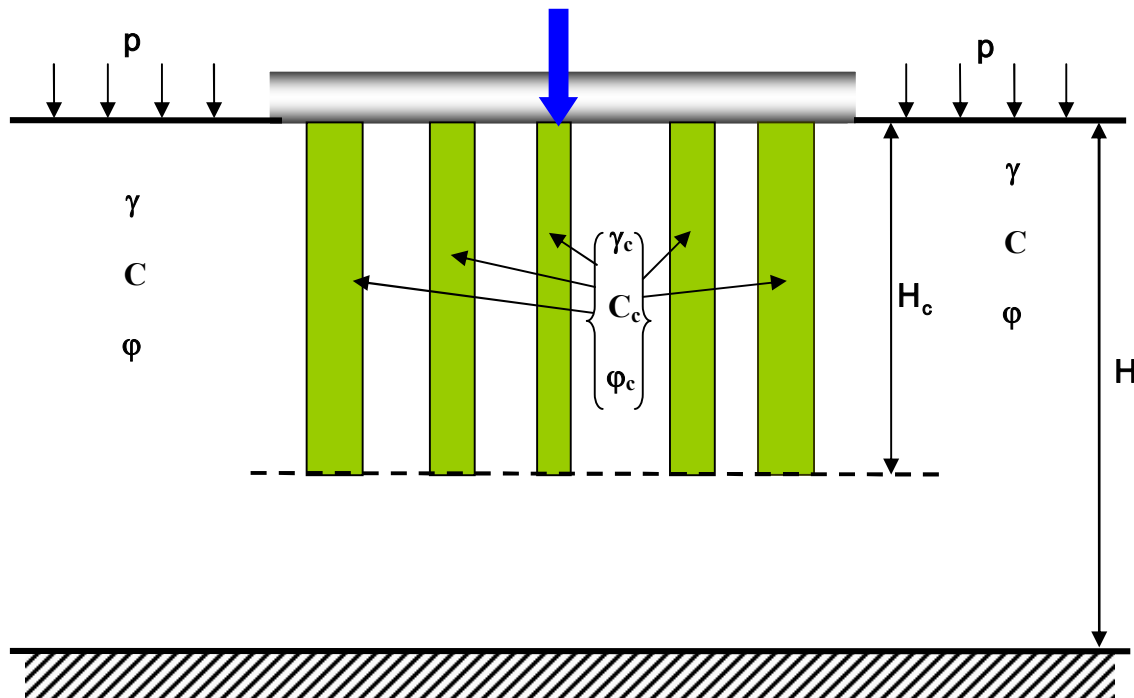


Figure 2. Configuration de colonnes du type « flottant »

En pratique, le renforcement par colonnes est recommandé pour des ouvrages à grande surface d'appui (construction sur radiers, réservoirs, remblais, ...) transmettant une contrainte verticale relativement modérée (inférieure à 150 kPa). Ce qui permet d'avoir un tassement quasiment uniforme et admissible. Dans ces conditions le renforcement par colonnes constitue une alternative très compétitive par rapport à celle d'une fondation sur pieux qui est souvent très coûteuse et nécessitant un temps d'exécution plus long.

Le renforcement des sols par colonnes est une technique qui peut être réalisée avec plusieurs procédés, vibratoires ou autre, en fonction de la nature du sol à améliorer (notamment sa courbe granulométrique) et de(s) l'objectif(s) fixé(s) de l'opération : augmentation de la capacité portante, réduction et (ou) accélération du tassement, élimination du risque contre la liquéfaction.

Le renforcement par colonnes est, de même, très utile dans l'étude de stabilité des pentes surtout lorsque le matériau de renforcement est très perméable pour jouer le rôle de drain.

Généralement deux types de sol font souvent l'objet d'un renforcement par colonnes : les sols fins et les sols grenus.

- Les sols fins mous (argile, limon fin à sableux) ont souvent une résistance au poinçonnement faible ; ils sont en plus très compressibles et nécessitent un temps de consolidation très grand. Pour de tels sols les colonnes ballastées ou « pieux de sable » sont les deux variantes de renforcement d'usage très répandues à l'échelle internationale depuis les années cinquante. Le matériau d'apport constitutif des colonnes est en général drainant et possède un angle de frottement élevé (supérieur ou égal à 38°). Bien qu'à partir des années soixante dix le procédé de traitement des sols mous à la chaux (ou la chaux-ciment) est apparu notamment dans les pays scandinaves. Ce nouveau procédé, qui

connaît jusqu'à nos jours un essor important, permet de réaliser les mêmes performances que celles acquises par les colonnes ballastées ou pieux de sable.

- Les sols grenus (sable) lâches sont caractérisés par un indice de densité (ou densité relative) inférieure à 50 %, par conséquent, leur résistance au cisaillement est faible. Le procédé de vibro compactage permet d'augmenter leur densité relative suite à un réarrangement des grains par diminution des vides.
Ce procédé peut être exécuté avec un matériau d'apport, en général grenu, différent du sol à traiter.

L'expérience tunisienne

Les pieux de sable

En fonction de la granulométrie du sol à améliorer on optera pour les colonnes ballastées ou pour le vibrocompactage (figure 1) Keller.

Figure 1 – Les procédés de renforcement en fonction de la granulométrie du sol à améliorer, Keller [1].

Technique de vibroflotation

mettre les courbes.

La «vibroflotation» est le procédé permettant la densification (ou compactage) par vibrations du sol en place, qui subit à l'échelle locale une sorte de liquéfaction durant laquelle les particules se déplacent entre elles jusqu'à atteindre le degré de densification souhaité.

L'outil vibreur assurant le vibrocompactage des sols possède les caractéristiques suivantes :

diamètre	:	350 mm
longueur	:	3,5 m
poids	:	21 kN
force du moteur	:	130 kw
amplitude de max	:	23 mm
Force excentrique	:	300 kN
Révolutions par minutes (RPM)	:	1800 à 60 Hz.

Figure 2 – Le vibreur V 23 (vibroflotation)

Selon la granulométrie du sol à améliorer l'efficacité de la vibroflotation varie comme suit : (p.1 l'illustration est donnée sur la figure 3).

Figure 3 – Catégories de sol à améliorer par vibrocompactage

Zone A : Dans laquelle les sols se prêtent très bien au compactage. Le vibreur les densifie rapidement de façon à compromettre une pénétration ultérieure dans le même sol à la même profondeur.

Zone B : Un sol de cette zone ayant jusqu'à 10 % d'éléments fins est qualifié d'idéal pour la vibroflotation ;

Zone C : La vibroflotation est de même faisable pour les sols de cette zone, mais le temps d'exécution du compactage est plus long que celui des sols de la zone B. Le pourcentage d'éléments fins peut atteindre 15 %.

Zone D : Le vibrocompactage n'est pas faisable pour les sols de cette zone ; la technique des colonnes ballastées est applicable.

Pour les sols grenus (non cohérents) la densification par le vibrocompactage est appelée : Sand Compaction Method (ou parfois Sand Compaction Pile).

Dans la littérature anglo-saxonne: L'amélioration par colonnes ballastées est appelée « Stone columns technique ».

L'exécution des colonnes ballastées peut être réalisée par voie sèche et par voie humide. Les deux procédés d'exécution ainsi que les performances technologiques qu'ils procurent sont données dans vibroflotation [2].

Dimensionnement d'une fondation sur sol renforcé par colonnes

A l'instar de tout type de fondation (superficielle, profonde, ou autre) la méthode de dimensionnement appropriée devra comporter, en premier lieu, la vérification de la capacité portante admissible du SR et, en second lieu, la vérification du tassement admissible. Cependant, lorsque les colonnes jouent le rôle de drains verticaux, s'ajoute une vérification vis-à-vis du temps de consolidation. Enfin, lorsque la justification du renforcement par colonnes vise également la réduction du risque de liquéfaction, une vérification s'ajoute aux précédentes.

Les méthodes en vigueur (France): Recommandations relatives aux colonnes ballastées.

Pour la capacité portante on considère le modèle de la colonne isolée avec différents mécanismes de rupture dépendant essentiellement de la longueur de la colonne.

Pour l'estimation du tassement on fait usage du modèle de la cellule composite en considérant que le sol entourant la colonne ne subit aucune déformation latérale.

Les méthodes récentes

Nouveaux développements sur la base des résultats obtenus par la modélisation « groupe de colonnes ».

L'usage des logiciels

Peu développé, mais en cours de progression.

Exemple de dimensionnement :

La construction d'un remblai autoroutier (figure 4) est projetée sur le sol ayant les caractéristiques suivantes :

- Classification du sol (USCS) CL
- Module de Young $M_e = 1000 \text{ kN/m}^2$
- Perméabilité verticale $k = 10^{-7} \text{ cm/s}$

- Cohésion non drainée $C_u = 15 \text{ kN/m}^2$
- Poids volumique $= 17 \text{ kN/m}^3$

Figure 4 – Remblai sur sol mou renforcé par colonnes ballastées.

En vue d'exécuter la structure de chaussée, l'entreprise a exigé que 95 % du tassement de consolidation primaire soit atteint en 90 jours.

Problème à résoudre :

La stabilité de la pente du remblai : les excès de pression interstitielle engendrés par le remblai dans le sol mou diminuent la résistance du sol. La vitesse du tassement est très faible vis-à-vis des exigences de l'entreprise.

Références bibliographiques

CFMS. Recommandations relatives aux colonnes ballastées :
COPREC et le SOFFONS

[1] Keller (2000) : Les procédés de vibration profonde des sols. Brochure 10-2 F ; Germany.

[2] Vibroflotation G. (2001) : Rapport interne. Rev. 01/91.

[2] M. BOUASSIDA, S.. BOUSSETTA (1994) : Le renforcement des sols par colonnes.
Comptes rendus du séminaire du 25 novembre ; ENIT.