

Réflexions sur la conception des colonnes ballastées

Some thoughts about the design of stone columns

J.P. Magnan & N. Droniuc

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

Y. Canepa

Laboratoire Régional de l'Est Parisien, Melun, France

A. Dhouib

GTM-Construction

RÉSUMÉ

La conception des colonnes ballastées ne se réduit pas à l'application des formules associées à une théorie. L'amélioration des sols par ce procédé s'apprécie par rapport à un état initial sans traitement, dont l'évaluation est très importante pour le succès du projet. La première partie de la communication discute des biais possibles de la reconnaissance géotechnique. Le mode d'exécution des colonnes est un autre paramètre majeur de la conception. La communication l'examine sous le double point de vue du refoulement des sols naturels par le ballast et de la relation entre la résistance du sol et le diamètre réel des colonnes.

ABSTRACT

The design of stone columns cannot be reduced to the application of the formulae associated with a design theory. The improvement of soils by means of this technique has to be estimated with respect to an initial state without stone columns, which has to be carefully assessed in order to achieve a successful treatment. The first part of the paper discusses the possible bias of geotechnical site investigations. The way stone columns are installed is another important major factor for design. This is discussed in the second part of the paper from the two points of view of the displacement of natural soil by the introduction of ballast and of the relationship between the soil strength and the stone columns diameter.

1 INTRODUCTION

Les colonnes ballastées sont largement utilisées dans la pratique des travaux de génie civil. Elles permettent de réduire l'amplitude des tassements et d'améliorer la portance du sol sous les bâtiments, les dallages, les fondations d'ouvrages et les remblais. Les méthodes de calcul sont simples et permettent de déterminer les caractéristiques d'un réseau de colonnes ballastées à partir de la déformabilité et de la résistance du sol, et des valeurs admissibles des tassements global et différentiels de l'ouvrage (Dhouib et Blondeau, 2005).

Les calculs produisent naturellement une plus forte densité de colonnes quand le sol est moins résistant et plus déformable et quand les exigences sur les tassements sont plus fortes. Si la reconnaissance sous-estime les propriétés du sol (résistance et rigidité), le projet peut prévoir des colonnes inutiles. La bonne prévision du comportement du sol naturel sans colonnes est donc essentielle. Cette question est discutée dans la première partie de la communication, en partant des données de quelques chantiers récents, tant sur le plan technique que sur le plan économique.

Pendant l'exécution des colonnes ballastées dans des sols fins peu perméables, le sol subit une déformation à volume constant qui fait remonter la surface du terrain sur le chantier. Ce phénomène est totalement absent des méthodes de calcul et de la conception du renforcement des sols par colonnes ballastées et il n'est pratiquement jamais mesuré sur les chantiers. Nous analysons quelques mesures effectuées sur des chantiers pour évaluer l'importance du phénomène et son influence sur les projets.

Les méthodes courantes de calcul des colonnes ballastées admettent que la dimension de la colonne dépend de la résistance du sol naturel. Les mesures faites pendant les travaux montrent que la géométrie des colonnes dépend fortement de l'opérateur de la machine et de l'énergie transmise au ballast et au sol. L'influence de l'exécution sur le comportement des colonnes et du sol traité est discutée.

2 INFLUENCE DE L'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE SUR LA CONCEPTION

L'accent mis sur le comportement des colonnes ballastées dans les recherches des vingt dernières années a détourné l'attention des géotechniciens d'un aspect fondamental de l'amélioration des sols par l'installation de colonnes ballastées : la question de l'opportunité de mettre en œuvre un procédé d'amélioration des sols sur un site et pour un ouvrage donné. Et cette question renvoie aux bases de la mécanique des sols, qui s'intéresse au comportement des sols naturels soumis à des chargements variés.

Cette question conserve à notre avis une actualité majeure, parce que des expériences récentes ont montré que la situation « sans traitement » peut être évaluée de façon inadaptée. L'image que l'on donne de la construction sur le sol sans traitement peut être tellement catastrophique, tellement exagérée, que l'on décide de réaliser des travaux qui, par comparaison, ne peuvent produire que de bons résultats, même si aucune amélioration réelle n'est obtenue.

Cette situation n'est pas nouvelle dans le domaine de la géotechnique. Il suffit de regarder comment s'est installée la technique des drains verticaux à partir des années 1930 pour en avoir l'image exacte (Magnan, 1983). Pendant vingt ans, chaque chantier a été décrit comme réussi, puis on est entré dans une époque d'une vingtaine d'années où de nombreux ingénieurs et chercheurs ont voulu prouver que la perméabilité verticale du sol n'était pas le bon paramètre de comparaison et que la perméabilité horizontale du sol rendait souvent les drains inutiles. Ensuite la situation s'est normalisée et on a cherché à mieux évaluer la nécessité des drains.

Pour les colonnes ballastées, nous sommes dans une période où la technique a la réputation d'être efficace pour diminuer les tassements et augmenter la stabilité des ouvrages reposant sur des sols trop déformables. La multiplication des techniques et la multiplication des bureaux d'études contribuent aussi à la banalisation de chacune d'entre elles, notamment des colonnes bal-

lastées, sans qu'une attention suffisante soit portée à son applicabilité et à ses limites.

Avant de décider qu'il est nécessaire de traiter les sols sous un remblai ou sous des fondations superficielles, il faut d'abord constater que la simple construction de l'ouvrage n'est pas satisfaisante. La diversité des méthodes de calcul des tassements ou de la stabilité des ouvrages est un facteur secondaire dans ce problème. Elle n'entraîne pas de différences majeures dans les prévisions. Le vrai problème est le choix des valeurs des paramètres du sol. Le temps des grandes reconnaissances géotechniques avec des sondages « intacts », une observation détaillée de la stratigraphie des sols en place et de nombreux essais d'identification, voire des essais en vraie grandeur, est passé pour de nombreux chantiers, où l'urgence a conduit les bureaux d'étude de géotechnique à adopter une stratégie de reconnaissance par essais en place : essais de pénétration statique ou dynamique, y compris au carottier (SPT), essais pressiométriques dans d'autres pays. Le défaut de ces essais en place est qu'ils ne donnent pas de paramètres directement applicables pour le calcul des tassements des massifs de sols déformables. Plus exactement, ils donnent des paramètres que l'on peut employer de façon inadaptée.

La figure 1 montre deux courbes de déformation « réalistes », qui peuvent s'appliquer à tout ouvrage, qu'il soit de grande ou de faible étendue. La première correspond à un sol naturel intact, tel que serait le sol en l'absence de traitement, et la seconde correspond à un sol remanié par les travaux (typiquement le sol fin qui subsiste autour des colonnes ballastées une fois qu'elles ont été installées dans le sol).

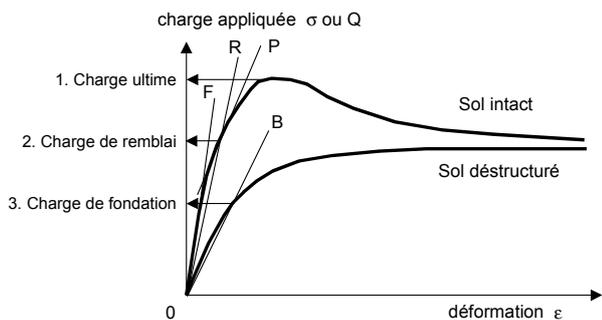


Figure 1. Variations naturelles des modules sécants du sol intact et du sol fin déstructuré

Quatre droites sont tracées sur la figure 1, désignées par les lettres F (fondation), R (remblai), P (pressiomètre) et B (sol entre colonnes ballastées). Les modules sécants qui leur sont associés ont clairement des valeurs différentes : le module pour calculer le tassement d'une fondation superficielle sur le sol naturel, avec un coefficient de sécurité global de l'ordre de 3, est plus petit que le module sécant qui permet le calcul du tassement sous un remblai (avec un coefficient de sécurité global de l'ordre de 1,5). Le module pressiométrique correspond à une déformabilité encore plus grande, assimilable à un module tangent vers le milieu de la courbe. Le module qui correspondrait au tassement d'une fondation sur sol déstructuré est probablement encore plus grand, bien que l'effet de la déstructuration dû au processus d'installation des colonnes ballastées soit difficile à estimer (de plus, la charge qui est appliquée au sol entre les colonnes ballastées est plus faible).

Les données quantitatives qui pourraient permettre d'évaluer les relations entre tous ces modules sont assez rares. Mais des recherches systématiques sur ce point seraient les bienvenues dans les prochaines années, pour permettre une utilisation plus raisonnée des colonnes ballastées en géotechnique.

L'expérience acquise dans les laboratoires des ponts et chaussées français pour l'utilisation du pressiomètre Ménard comme outil de mesure du module de déformation des sols conduit à l'estimation suivante du rapport entre les modules E_F (pour fondations) et E_M (pressiométrique Ménard) :

$$E_F / E_M = 3 \text{ à } 5.$$

L'évolution du module entre un niveau de chargement de fondation et un niveau de chargement de remblai peut probablement être estimé à 2 ou 3 :

$$E_F / E_R = 2 \text{ à } 3.$$

Cela implique que les modules pressiométriques devraient aussi être corrigés pour calculer des tassements de remblais (typiquement multipliés par deux).

Les modules déduits des autres types d'essais en place (essais de pénétration statique et dynamique, notamment CPT et SPT), ne sont pas soumis à la même analyse parce qu'ils résultent de corrélations directes entre le paramètre de résistance et le paramètre de déformabilité, sur la base de mesures sur ouvrages. Néanmoins, on peut garder de l'analyse exposée ci-dessus qu'il faudrait utiliser des corrélations différentes selon le niveau de chargement du sol, avec des modules plus forts pour les faibles charges.

La surestimation de la déformabilité des sols a des conséquences pernicieuses pour la gestion des projets : sur un chantier récent, l'utilisation directe du module pressiométrique pour calculer les tassements a conduit à prévoir un traitement très important des sols de fondations pour réduire et accélérer des tassements qui étaient manifestement très surestimés. Une meilleure estimation du tassement aurait certainement permis de limiter le nombre des colonnes ballastées installées sur le site et peut-être même d'utiliser une méthode de construction différente et plus économique.

3 EFFETS DE LA CONSTRUCTION SUR L'ÉTAT DES COLONNES BALLASTÉES ET LE SOULÈVEMENT DE LA PLATE-FORME DE TRAVAIL

3.1 Diamètre des colonnes

La conception des projets de traitement des sols par colonnes ballastées fait jouer un rôle central à la géométrie des colonnes. Le diamètre des colonnes est, avec leur espacement, le paramètre géométrique principal, qui va contrôler la répartition des charges entre les colonnes et le sol, la valeur de la résistance au cisaillement et de la déformabilité du milieu homogénéisé équivalent, et donc le tassement et la stabilité de l'ouvrage. Il est ainsi essentiel de prévoir correctement ce diamètre. L'épaisseur de la couche de sol déformable entre les colonnes est également un paramètre important, qui interfère avec le calcul des déplacements verticaux du massif de sol traité.

Les méthodes classiques de la mécanique des sols ne permettent pas de calculer les effets de l'enfoncement du ballast dans le sol. Il n'existe pas en effet de modèle de calcul opérationnel pour les grandes déformations des milieux continus décrivant les sols.

L'idée de base du dimensionnement des colonnes ballastées est que la pression appliquée par le sol sur la surface latérale de la colonne est égale à la contrainte horizontale dans le sol. Cette contrainte a pour borne supérieure la contrainte de butée ou la pression limite pressiométrique. Mais cela n'impose aucune condition au diamètre de la colonne. Pour fabriquer une colonne ballastée de 80 cm de diamètre, la procédure dépend du mode d'exécution choisi, par voie humide, avec un forage cylindrique de diamètre un peu plus faible, que l'on remplit avec un tube plongeur, ou par voie sèche, avec un vibreur qui crée un premier trou de diamètre un peu plus faible puis repousse les cailloux radialement dans le sol. On ne peut repousser le ballast dans le sol que si la résistance de ce sol n'est pas trop grande, d'où l'idée de rechercher une relation entre la résistance du sol et le diamètre de la colonne. La figure 2 présente les résultats compilés par Dhoub et Blondeau (2005). On observe que la tendance générale à la diminution du diamètre D_c avec la résistance du sol (c_u ou p_t) n'est pas la seule interprétation possible de ce gra-

phique. On peut aussi noter que, pour les cohésions non drainées supérieures à 20 kPa, les diamètres des colonnes peuvent varier de 60 à 95-100 centimètres. Cette variabilité dénote l'influence d'un autre facteur, qui est l'énergie transmise au sol par le vibreur.

Les matériels modernes permettent de créer dans un même sol des colonnes de diamètre sensiblement plus important qu'autrefois. On ne peut donc analyser les données expérimentales sans un regard pour les techniques d'exécution des colonnes et, notamment, pour la conception, le diamètre et la puissance des vibreurs. Il faut considérer de façon simultanée la résistance du sol, la puissance du vibreur (comparée à la résistance du sol) et la densité du réseau de colonnes. Un exemple récent de sols de cohésion non drainée relativement élevée (c_u allant de 40 à 125 kPa) traités par des colonnes ballastées en voie sèche illustre bien cette interaction ; les résultats obtenus montrent une grande dispersion des diamètres déduits du volume incorporé par mètre de colonne (volume calculé par voie automatique) en fonction de la cohésion non drainée du sol encaissant (Hassen, 2003).

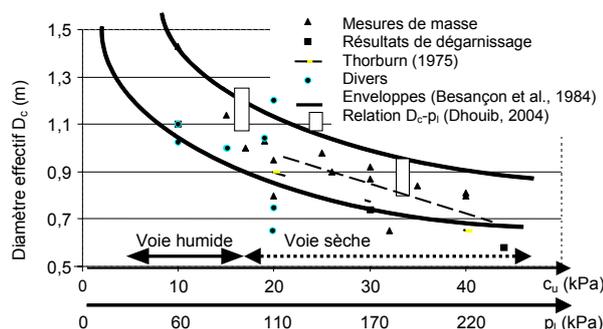


Figure 2. Diamètre réel des colonnes ballastées en fonction de la résistance du sol encaissant (Dhouib et Blondeau, 2005)

La figure 3 illustre la difficulté de l'analyse des relations entre la résistance du sol et la géométrie des colonnes : plusieurs colonnes de géométrie variée peuvent correspondre au même sondage et une colonne plus large peut provenir du refus du vibreur sur un niveau plus résistant.

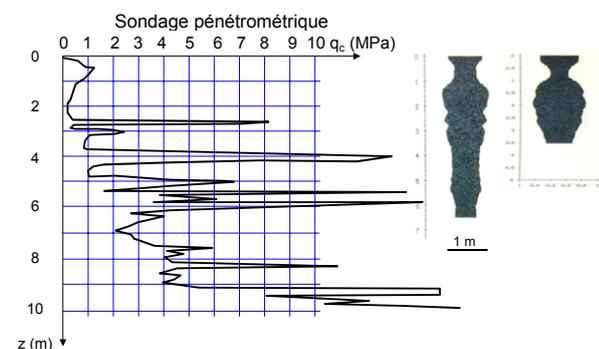


Figure 3. Deux formes de colonnes associées au même sondage pénétrométrique (CPT)

L'influence du phasage lors de l'installation d'un réseau dense de colonnes ballastées est montrée sur la figure 4. Cette figure présente les volumes calculés de quatre colonnes distantes de 3m d'axe à axe, entre lesquelles on est venu ensuite installer une quatrième colonne. Les sols sont des limons sableux et argileux dans la couche de surface, dont la cohésion non drainée est de l'ordre de 60 à 80 kPa. On trouve ensuite des sols argileux. La colonne de la deuxième phase est plus courte, comme si elle avait été bloquée au niveau du bulbe des quatre colonnes antérieures. Les taux d'incorporation calculés à partir du diamètre moyen des colonnes valent $a = 0,16$ (phase 1) et $0,30$

(deuxième phase). Vers 4,5 m de profondeur, le diamètre des colonnes atteint 1,4 m et les taux d'incorporation passent à 0,22 et 0,44. Les colonnes de la première phase ont consommé 3,5 m³ de ballast non compacté en moyenne et la colonne supplémentaire seulement 2,8 m³ (80%). Les colonnes ont été exécutées en 20 minutes (première phase) et 11 minutes (seconde phase) au moyen d'un vibreur Bauer TR17. Le vibreur a un diamètre de 450 mm.

Ces données expérimentales doivent conduire les géotechniciens à relativiser la fiabilité des méthodes qu'ils utilisent pour décrire le comportement mécanique du milieu complexe que peuvent être les massifs traités par colonnes ballastées.

3.2 Soulèvement de la plate-forme de travail

L'effet de l'exécution des colonnes ballastées sur l'état du site traité est peu discuté dans les publications scientifiques. Les calculs se font à partir des caractéristiques initiales du sol, comme s'il les conservait pendant le traitement. Or cet effet ne peut être négligeable : dans un massif de sol argileux, dont on ne peut attendre aucune variation rapide de volume, les colonnes des mailles centrales d'un réseau doivent déplacer vers le haut un volume de sol égal à leur propre volume. Le soulèvement est alors égal à l'épaisseur de la couche traitée multipliée par « $a/(1-a)$ ». Dans l'exemple de la figure 4, on peut évaluer le soulèvement (maximal) Δh_{max} de la plate-forme à

$$\Delta h_{max} = 6 \frac{0,16}{1-0,16} = 1,14 \text{ m} \text{ ou } \Delta h_{max} = 6 \frac{0,3}{1-0,3} = 2,57 \text{ m}$$

selon la phase du chantier. Aucune mesure n'a été faite sur le chantier dont proviennent les données de la figure 4 pour valider ou contredire ces chiffres.

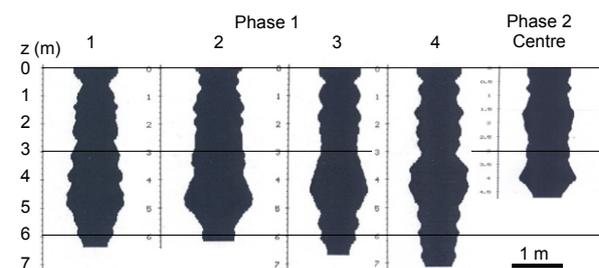


Figure 4 Influence du phasage sur les dimensions des colonnes (géométrie des colonnes des phases 1 et 2)

On sait par contre que des soulèvements ont été mesurés sur certains chantiers : 0,8 m de soulèvement d'un massif de sol argileux pour des colonnes distantes de 2 m ou 0,3 m pour un sol limoneux et des colonnes distantes de 2,5 m (Dhouib, 2004). Il est vraisemblable que le soulèvement de la surface du sol est important sur beaucoup de chantiers de colonnes ballastées en réseau dense et incorporées dans des sols fins comme les argiles et les limons sous nappe. Des mesures systématiques devraient être réalisées sur tous les chantiers pour juger de l'ampleur du phénomène et permettre d'en tenir compte dans l'évaluation des méthodes de calcul et du mode de détermination de leurs paramètres.

Si l'on admet qu'une certaine densification du sol se produit pendant et après l'installation des colonnes ballastées, le soulèvement de la surface du sol est réduit de la compression du sol. En pratique, la diminution du volume du sol ne peut dépasser 10% pour des sols assez lâches. Cela revient à enlever au plus 0,6 m aux valeurs indiquées plus haut, d'où des valeurs de soulèvement de 0,54 m pour la première phase du chantier et 1,97 m à la fin de la seconde. Ces valeurs restent très importantes et il paraît justifié de faire un effort de recherche et d'observations sur ouvrages réels pour mieux connaître cet as-

pect de la technique d'amélioration des sols par colonnes ballastées.

Provoquer un soulèvement du sol naturel lors de l'exécution des colonnes ballastées n'est pas en soi ennuyeux, puisqu'aucune limite de déformation n'est alors imposée au chantier. Mais on peut tout de même s'interroger sur la façon dont le sol réagit à un traitement aussi violent : si l'on se réfère aux concepts usuels de la mécanique des sols, il est fort vraisemblable que la résistance du sol n'a plus de rapport avec sa résistance de pic et est plus proche de sa résistance critique (ou « post-pic » pour utiliser un autre vocabulaire), c'est à dire à la résistance qui reste après de grandes déformations de distorsion. Cela pourrait justifier de rechercher les valeurs de la résistance du sol dans des essais qui sont par nature aussi destructeurs, comme les essais de pénétration statique ou dynamique.

4 CONCLUSION

L'amélioration des sols par colonnes ballastées est devenue l'un des procédés à la mode pour la construction des remblais, structures et bâtiments dans les zones où les sols sont soit un peu trop déformables, soit pas assez résistants pour porter les charges prévues dans les projets. Comme tous les procédés dont on attend des effets économiques importants, elle est utilisée parfois en dehors de ses limites. Nous avons tenté dans cette communication de passer en revue quelques aspects peu discutés de la conception des colonnes ballastées : l'effet des valeurs attribuées à la déformabilité des sols par la reconnaissance géo-

technique, l'interaction entre le sol, le matériel de mise en œuvre et le diamètre des colonnes et le refoulement du sol lors de cette installation.

Il semble indispensable de faire des progrès dans la connaissance de ces différents aspects de la technique des colonnes ballastées pour mieux maîtriser son application pratique.

RÉFÉRENCES

- Besançon G., Iorio J.P. et Soyez B. 1984. Analyse des paramètres de calcul intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées. *Comptes rendus, Colloque international sur le « Renforcement en place des sols et des roches »*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1, 119-126.
- Dhouib A. 2004. Communication personnelle.
- Dhouib A. et Blondeau F. 2005. *Colonnes ballastées, Techniques de mise en oeuvre, domaine d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et développement*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 264p.
- Hassen S. 2003. *Comportement des colonnes ballastées*. Mémoire de DEA, École Nationale des Ponts et Chaussées et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 30p.
- Thorburn S. 1975. Building structures supported by stabilized ground. *Géotechnique*, 25(1), 83-94.