

Chapitre 3 : Colonnes Ballastées

Enseignant : Dr. Noui Abdelkader

Institut des Séances de la terre et de L'univers, Université Batna 2
Batna 05078, Algérie

1. Introduction

Le renforcement ou l'amélioration de sol regroupe plus particulièrement l'ensemble des techniques conduisant à inclure des éléments verticaux dans le sol (inclusions) afin d'en améliorer la tenue sous l'effet d'une charge statique ou dynamique apportée par un ouvrage (fondations superficielles ou remblai) ou sous l'action de la poussée des terres dans le cas des ouvrages de soutènement ou de stabilisation des talus naturels.

Le terme *inclusion* concerne des éléments verticaux regroupant :

- les inclusions souples telles que les colonnes ballastées, les plots ballastés, les colonnes à module mixte ;
- les inclusions rigides comme les pieux par exemple.

Ce chapitre présente des généralités sur la technique d'amélioration des sols en particulier celles des colonnes ballastées, Cette technique utilisée généralement pour améliorer la capacité portante et réduire le tassement des fondations situées dans les sols mous.

2. Mécanisme

Les mécanismes de base de l'amélioration du sol par colonnes ballastées sont (1) compactage du sol par l'expansion latérale des colonnes ballastées, (2) amélioration/renforcement du sol par le ballast dans la masse du sol, et (3) accélération de consolidation dans les sols cohérent. Les différences entre le mécanisme de transmission de charge d'un pieu et celui d'une colonne ballastée sont présentées à la Fig. 1.

La surcharge est principalement supportée par les pieux seulement et il n'y a pas de transmission de contrainte au sol environnant dans le cas des fondations de pieux (Fig. 1). Une seule colonne ballastée est défaillante principalement par l'expansion latérale, alors qu'un groupe de colonnes ballastées peut échouer par expansion latérale ou par rupture en cisaillement de la masse sol/colonnes.

3. Méthodes d'exécution des colonnes ballastées

Les colonnes ballastées peuvent être réalisées par des

vibreurs suspendus à une grue. La société 'Keller' a développé plusieurs types de vibreurs à savoir les conditions du sol. L'alimentation du matériau d'apport (ballast) peut se faire par le haut (alimentation par le haut) ou par le bas du vibreur (alimentation par le bas).

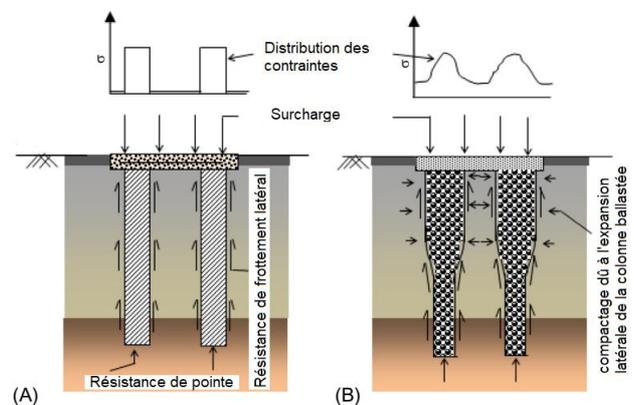


Fig. 1 Transmission de surcharge des (A) pieux et (B) colonnes ballastées

Le fonçage du vibreur dans le sol s'effectue par l'injection de l'eau ou de l'air et parfois les deux (cas assez rare).

Il y a deux procédés de mises en œuvre :

- par voie humide ;
- par voie sèche.

3.1 Colonnes exécutées par voie humide (vibro-replacement)

La machine spécialisée est auto foncée avec un lançage à l'eau pour aider la pénétration sous l'effet du poids propre de vibreur. Le sol est déplacé suite au processus d'injection de l'eau, et les particules solides se déplacent à la surface par l'eau durant la réalisation du forage. Une fois le forage atteint la profondeur désirée, le vibreur sera remonté, et le matériau d'apport est incorporé gravitairement dans le forage réalisé. Un compactage du ballast est ensuite achevé par ré-pénétration du vibreur par passes successives de l'ordre de 0.3 à 1.2 m. Un processus qui amène à un déplacement latéral du ballast sur les bords du forage, et par conséquent une expansion de la colonne (Fig. 2).

Ces étapes seront répétées jusqu'à la fin de l'installation de la colonne. Cette dernière sera finie avec un diamètre de

0.8 à 1.2 m. Plus que le sol en place est compressible, plus que l'expansion de la colonne sera significative.

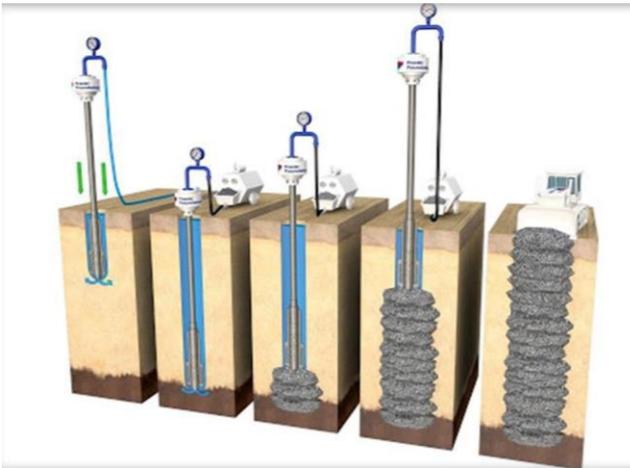


Fig. 2 Réalisation des colonnes ballastées en voie humide (Document Atlas Fondations)

La Fig. 2 présente les étapes de la procédure de l'installation d'une colonne par cette méthode et elle est utilisée dans les sols relativement imperméables et cohésifs ($c_u = 15$ à 50 kPa) et dans les endroits où la nappe phréatique est élevée et la stabilité du forage est discutable (Greenwood et Kirsch 1984). Le principal inconvénient de cette technique est représenté dans la grande quantité d'eau requise et qui doit ensuite être éliminée sans causer de pollution (Babu et al. 2012).

3.2 Colonnes Exécutées par Voie Sèche (vibro-displacement)

Dans cette méthode, la pénétration à la profondeur requise est effectuée par auto-fonçage du vibreur directement dans le sol par refoulement latérale. Le forage est réalisé sous la pression d'air pour aider la pénétration du vibreur sous l'effet de son poids propre et des vibrations profondes. Aucune particule solide ne sera déplacée, et la réalisation du forage sera par vibro-refoulement. Le ballast est incorporé par une benne à la tête du forage. Une expansion latérale résulte suite compactage de la colonne, et cette dernière atteint un diamètre maximal de l'ordre de 0.6 m (moins que celle obtenue par installation par voie humide). La Fig. 3 présente les étapes de l'installation d'une colonne par voie sèche.

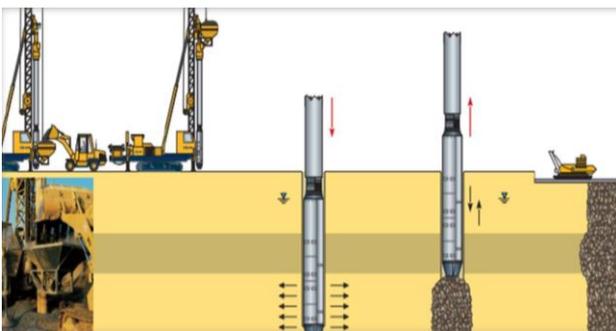


Fig. 3 Réalisation des colonnes ballastées en voie sèche (Document Keller)

4. Paramètres de dimensionnement

Les paramètres nécessaires pour le dimensionnement des colonnes ballastées sont le diamètre et la profondeur des colonnes, espacement entre les colonnes, taux d'incorporation, facteur de concentration des contraintes, facteur de réduction de tassement, etc.

Le diamètre de la colonne mise en œuvre par voie humide (80 à 120 cm) est plus important que celui d'une colonne mise en œuvre par voie sèche (50 à 80 cm). La détermination de la hauteur des colonnes ballastées se fait à base de la contrainte transmise par l'ouvrage, la nature du sol et le but recherché.

4.1 Taux d'incorporation 'a'

Le taux d'incorporation 'a' (facteur de substitution) est le rapport entre l'aire de la colonne A_c et l'aire totale d'une cellule élémentaire A , il utilise pour déterminer le pourcentage de la colonne par rapport au sol. 'a' est lié au diamètre de la colonne (D) et à l'espacement entre les colonnes (S)

$$a = \frac{A_c}{A} = k \left(\frac{D}{S} \right)^2 \quad (1)$$

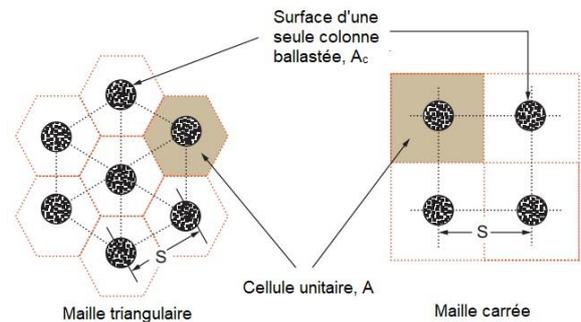


Fig. 4 Cellule unitaire en maillage triangulaire et carrée de colonnes ballastées

Où k est $\pi/4$ et $\pi/(2\sqrt{3})$ pour les maillages carrés et triangulaires, respectivement. Le diamètre équivalent d'un cylindre renfermant la cellule unitaire peut être considéré comme $1.05S$ pour un modèle triangulaire et $1.13S$ pour un modèle carré.

4.2 Facteur de concentration des contraintes 'n'

Le rapport de concentration des contraintes verticales est le rapport de la contrainte apportée par la colonne σ_c à celle apportée par le sol après traitement σ_s :

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (2)$$

4.3 Facteur de réduction des tassements 'β'

Le facteur de réduction des tassements β est le rapport du tassement s_i du sol avant traitement au tassement s_f du milieu composite obtenu après traitement :

$$\beta = \frac{s_i}{s_f} \quad (3)$$

5. Contrôle sur le terrain et exécution

Lors de l'exécution de colonnes ballastées, il est très important de contrôler le diamètre des colonnes, l'espacement entre deux colonnes, quantité de ballasts introduits dans la colonne, etc.

En général, il y a une différence entre le volume théorique de ballast rempli calculé et le volume réel utilisé sur le site. Il s'agit principalement dû au mouvement latéral de ballast pénétrant dans les sols environnants et à l'étendue du compactage donné aux ballasts. Par conséquent, on utilise généralement un facteur de réduction pour les deux méthodes d'exécution (voie humide, voie sèche).

Au début de tout projet de colonne ballastée, des essais sont nécessaires pour valider la qualité du matériau et vérifier la réponse au sol attendue avec l'installation des colonnes ballastées.

En plus, les points suivants doivent être pris en compte :

- le ballast doit être propre et sans matière fine ou étrangère. Les matériaux doivent être de bonne qualité et durables ;
- la sensibilité du sol doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle est < 3 . Une plus grande sensibilité du sol pose des problèmes pour reprendre la résistance au cisaillement. Par ailleurs, la pression latérale exercée par les sols environnants est un facteur déterminant dans la construction de colonnes ballastées. Par conséquent, les colonnes ballastées ne sont pas efficaces dans les tourbes, les dépôts de déchets et les sols organiques ;
- pour faciliter le drainage de l'eau interstitielle in situ et éviter les mauvais effets de l'accumulation d'eau au sommet des colonnes ballastées, un matelas de drainage de sable ou de sol sans cohésion devrait être fourni ;
- la circulation de la bentonite doit être évitée pour protéger la stabilité des colonnes, parce qu'il bloque l'écoulement d'eau interstitielle du sol dans la colonne ballastée et donc son drainage. On peut plutôt utiliser un tubage ;
- dans les sols cohérents, le préchargement est essentiel en combinaison avec la colonne ballastée. Il s'agit de tenir en compte des tassements résiduels qui peuvent dépasser les limites permises.