

LES COLONNES BALLASTÉES

(MISE EN ŒUVRE ET CALCUL)

1. Étude des colonnes ballastées

1.1 Présentation du procédé

La pièce essentielle est constituée par un vibreur radial placé à la pointe du tube qui sert de support et assisté par un jet d'eau pour les sols cohérents. Le vibreur pénètre dans le sol sous son propre poids. La pression d'eau est ajustée pour maintenir un espace annulaire autour du tube et du vibreur. Le ballast est alors introduit soit par l'espace annulaire entre le vibreur et le sol soit par un tube associé au vibreur puis grâce aux mouvements du vibreur et aux forces horizontales de celui-ci.

Le ballast est pressé et compacté dans le sol existant. La remontée du vibreur se fera progressivement. La figure 1 ci-dessous montre le schéma de mise œuvre d'une colonne ballastée.

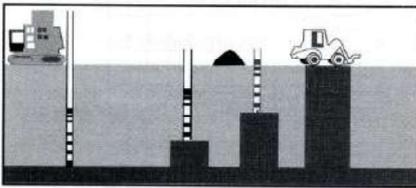


Figure 1 : Mise en œuvre d'une colonne ballastée

1.2 Fonctionnement des colonnes ballastées

La colonne ballastée ne résiste que grâce à la pression latérale exercée par le terrain naturel et son comportement peut être assimilé à un échantillon pulvérulent placé dans un appareil triaxial. On peut donc calculer la force portante des colonnes ballastées suivant le schéma de contrainte ci-dessous :

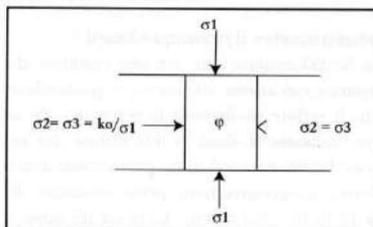


Figure 2 : Schéma des contraintes

1.3 Matériau d'apport

La roche constituait les éléments du matériau d'apport doit avoir une résistance à la compression simple supérieure à 25 Mpa, et n'être ni débitable ni sujette à l'attrition.

La granulométrie doit être telle que :

$$d_5 > 0.1 \text{ mm}$$

$$d_{30} > 30 \text{ mm}$$

$$d_{100} < 160 \text{ mm}$$

La figure 3 montre la courbe granulométrique du matériau actuellement utilisé.

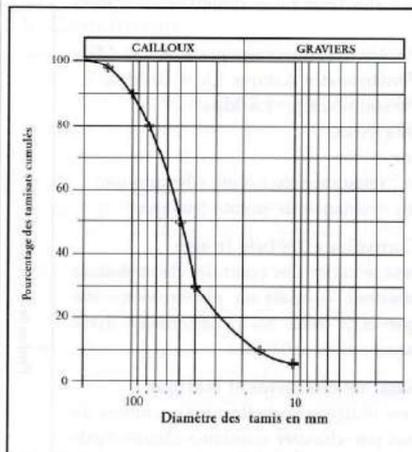


Figure 3 : Granulométrie du sol

1.4 Essais d'information

Il convient de mesurer pour chaque colonne réalisée, la quantité globale de matériau incorporé et l'énergie absorbée en fonction de la profondeur. Pour au moins une colonne par groupe de moins 50 colonnes avec un minimum de 3 colonnes par ouvrage, on mesurera le volume du matériau d'apport mis en place pour chaque mètre de hauteur de colonne et on effectuera une coupe approximative des terrains rencontrés. Le volume d'apport est généralement égal à 1.5 fois le volume théorique de la colonne ballastée correspondant à la section prise en compte dans les calculs.

H. Bendadouche
I. Hydraulique
Université de Béjaïa
S. Lazizi
LNHC Béjaïa

RÉSUMÉ

Le procédé « colonnes ballastées » en tant que solution pour améliorer les caractéristiques mécaniques et réduire le tassement, est largement utilisé en France. Ce procédé est actuellement utilisé en Algérie pour la première fois, précisément au port de Béjaïa. Différents procédés ont été envisagés comme les pieux mais les calculs ont montré que c'est le procédé le plus économique. C'est un procédé facile à mettre en œuvre, relativement rapide et surtout économique, le matériau d'apport étant des cailloux (ballast).

Cette technique, une fois maîtrisée, peut être la solution des problèmes posés par la médiocrité des sols le long de notre littoral. Différents procédés ont été envisagés comme les pieux mais les calculs ont montré que c'est le procédé le plus économique pour limiter les tassements du sol. La technique la plus courante pour la réalisation des colonnes ballastées est le procédé Keller. La pièce essentielle est constituée par un vibreur radial placé à la pointe du tube qui lui sert de support.

Des essais de contrôle au pénétromètre statique et dynamique effectués sur le ballast montrent la contribution des ballasts dans l'amélioration du sol avec une résistance de pointe de 340 bars. Enfin les problèmes de mise en œuvre des moyens de contrôles comme la déviation du train de tiges sont exposés dans cet article.

MOTS CLÉS

colonnes ballastées • tassement • sondages • vibreur • essais de contrôle • résistance de pointe.

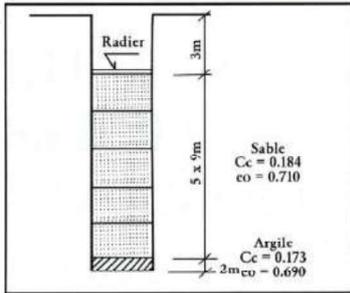


Figure 4 : Coupe lithologique du sol

N°	Profondeur (m)	Qc (bars)
136	6,00	>>140
	7,60	4
175	0,80	140
	1,40	4
188	4,20	≈ 400
	5,40	18
241	6,00	>>140
	8,40	40
253	8,00	>>140
	10,00	10
432	6,60	>>140
	7,00	12

Tableau 1 : Résistance en Pointe

1.5 Étude géotechnique du sol

La figure 4 montre une coupe géotechnique du sol principalement composé de sable de faibles caractéristiques mécaniques.

1.6 Contrôle de qualité des colonnes

- Recommandations sur les contrôles

Pour au moins une colonne par groupe de moins 50 colonnes avec un minimum de 3 colonnes par ouvrage, dans l'axe des colonnes testées, et à partir de 1m de profondeur on doit avoir des résistances minimales suivantes :

- Pénétromètre dynamique Rd = 15 MPa
- Pénétromètre statique Qc = 10 Mpa
- Pressiomètre p = 1.5 Mpa
- SPT N=30

avec

Rd : résistance de pointe (dynamique)
Rc : résistance de pointe (statique)

- Contrôles effectués in-situ

Dans le cadre des contrôles des colonnes ballastées, 6 essais au pénétromètre statique et 2 essais au pénétromètre dynamique ont été effectués.

- Essai de chargement statique

Il est obligatoire d'effectuer au moins un essai par chantier avec une charge égale à 1.5 fois la charge de service

- Contrainte admissible

Elle est calculée sur la section théorique de la colonne et doit être inférieure à 2 fois l'étreinte totale du sol à tous les niveaux et inférieure à 0,8 Mpa.

1.7 Analyse des essais sur colonnes

- Pénétromètre statique lourd

Ces essais ont été effectués à l'aide d'un pénétromètre Hollandais Gouda muni d'un cône mobile. Le frottement latéral est mesuré avec un manchon Begemann.

Ils montrent qu'à partir d'une certaine profondeur, les résistances en pointe chutent brusquement comme le montre le tableau I. Cette chute peut s'expliquer par le fait que le train de tiges subit une déviation à cause de la présence de

cailloux. On peut donc diviser les pénétrogrammes en deux parties (avant et après la déviation des tiges) (Figure 5).

- dans la première partie, les résistances augmentent régulièrement, on a observé une résistance maximale de 320 bars.
- dans la deuxième première partie, les résistances chutent brusquement pour atteindre des résistances variants entre 4 et 70 bars avec une résistance au frottement de même grandeur que la résistance de pointe.

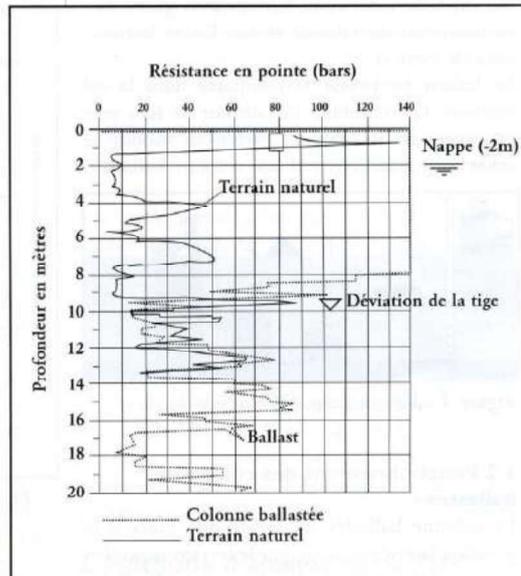
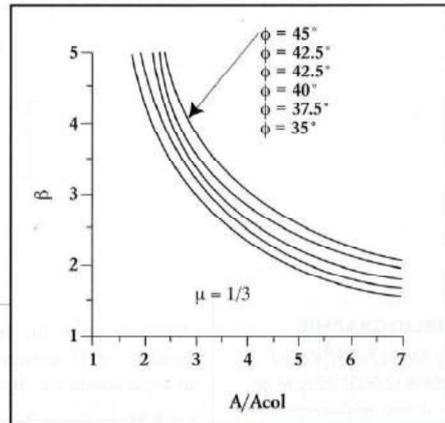


Figure 5 : Diagrammes de pénétration dynamique de l'essai N° 253.

- Le pénétromètre dynamique lourd

L'essai N° 253 montre une montée continue de la résistance qui atteint 400 bars à la profondeur 6,60 m. Il reflète réellement la résistance de la colonne ballastée. L'essai N° 303 donne des résistances de 260 bars à 2 m de profondeur avant de chuter progressivement pour atteindre 40 bars à 11 m de profondeur. Ceci est dû aussi à la déviation du train de tige.

Figure 6 : Abaque de dimensionnement de Priebe



2. Calcul des colonnes

2.2 Predimensionnement d'une colonne isolée

Dans le cas d'une colonne ballastée, la pression latérale peut être assimilée à la pression limite p_l mesurée au pressiomètre dans le terrain naturel. Il en résulte, à rupture, la formule :

$$\sigma_1 = P_l \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{4} \right) \quad (1)$$

L'angle de frottement latéral varie entre 40° à 45° suivant la nature du matériau d'apport. La formule simplifiée suivante peut être retenue dans un avant-projet :

$$\sigma_1 = 4 p_l \quad (2)$$

Pour une pression limite équivalente minimale de 3.5 bars. On trouve :

$$\sigma_{sol} = \frac{3.5}{3} = 1.20 \text{ bars} \quad (3)$$

Le diamètre des colonnes peut varier de 0.60m à 1.20 m suivant le mode opératoire et la nature du terrain naturel.

2.2 Cas d'un réseau de colonnes

2.2.1 Méthodes de calcul

Parmi les méthodes de calcul, on citera celles de :

- Thornburn
- Greenwood
- Priebe
- Balaam
- Booker

Le calcul est basé soit :

- sur la colonne isolée destinée à des fondations de faibles dimensions
- sur un réseau de colonnes disposées suivant un réseau régulier généralement triangulaire ou carré destiné à une fondation de dimension infinie.

Nous avons utilisé la méthode de Priebe qui s'est avéré très fiable, cette méthode permet de déterminer le nombre de colonnes à réaliser sous l'ouvrage.

2.2.2 Hypothèses de calcul

Priebe suppose que l'ensemble sol-colonnes doit vérifier les hypothèses suivantes :

- les tassements en surface sont égaux
- le matériau est incompressible, les déforma-

tions des colonnes se font à volume constant

- Les déformations des sols et du ballast sont dues à des incréments de contraintes causés par l'application d'une surcharge en surface.

2.2.3 Caractéristiques des colonnes

Le diamètre des colonnes varie entre 0.8 et 1.2, on a adopté un diamètre de 0.80m.

Les colonnes sont descendues jusqu'à une profondeur de 22 m.

2.2.4 Calcul des colonnes

Le nombre de colonnes nécessaires est obtenu grâce à l'abaque de dimensionnement de Priebe (Figure 6). En ordonnée, on trouve le coefficient β de réduction des tassements donnée par :

$$\beta = \frac{\sigma_0}{\sigma_{sol}} \quad (4)$$

σ_0 : contrainte admissible du sol

σ_{sol} : contrainte appliquée au sol

En abscisse, on trouve le coefficient de substitution :

$$a = \frac{A}{A_{col}} \quad (5)$$

A : surface du radier rigide

A_{col} : section totale des colonnes.

Les courbes sont paramétrées en fonction de l'angle de frottement interne de ballast.

Données :

- 1- charge transmise par les silos : $\sigma_{sol} = 3$ bars
- 2- pression admissible du sol : $\sigma_{sol} = 1.42$ bars (obtenue par la méthode pressiométrique pour un ancrage de la fondation à 3 m)

D'où $\beta = 3/1.42 = 2.11$

$\phi = 37.5^\circ$

A (surface du radier) = 18 m²

Résultats :

$A/A_{col} = 4.6$

$a_{col} = 0.5 \text{ m}^2$ ($\phi = 0.8\text{m}$)

$A_{col} = 53.32 \text{ m}^2$

soit le nombre de colonnes sous le radier

$n = A_{col} / a_{col} = 53.32 / 0.5 = 111$ colonnes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mlle Cherief, Ksami Fatima (2000). «Etude de sol et son renforcement par colonnes ballastées». Mémoire d'ingénieur. Université de Béjaïa.
- [2] Filiat G. e Jacques D. (1981). «La pratique des sols et fondations».
- [3] Keller Groupe Limited : «Deep vibro technique». Brochure.
- [4] Filiat G. (1979). «Sols et fondations».
- [5] L.N.H.C. (1998). «Documents laboratoire».
- [6] Hocine Bendadouche (1999). «Le pénétromètre dynamique, Mise en œuvre, Applications et Recommandations».

On opte pour un maillage carré, d'où un maillage de 11 colonnes dans les deux sens et un espacement de $18 / 10 = 1.8$ m.

2.2.5 Mécanisme de rupture des colonnes ballastées

- Rupture par expansion latérale

Si la pression limite du sol est faible, la colonne a tendance à s'expanser. Dans le cas présent, le réseau de colonnes comprime latéralement le sol, les déformations déviatoriques sont empêchées, il y a donc moins de risque de rupture.

- Rupture par cisaillement

La rupture par cisaillement se produit lorsque la hauteur de la colonne est inférieure à 4D, comme D est égale à 0.8 m, ce risque est donc écarté.

- Rupture par poinçonnement

Le substratum est à une profondeur de 4.5 à 5.0 m n'est pas atteint par le procédé de colonnes ballastées, qui est limité à 30 m. Il y a donc risque de poinçonnement. Mais si la profondeur des colonnes dépasse la valeur minimale L_{minp} , il n'y a pas de risque de poinçonnement.

$$L_{min p} = \frac{1}{2} \cdot R_{col} \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{C_u} - 9 \right) \quad (6)$$

avec: R_{col} : Rayon de la colonne
 σ_{vo} : contrainte verticale en tête de colonne.

2.2.6 Sécurité à la rupture

La contrainte à la rupture est définie par le DTU13-2 :

$$q_r = \sigma_h \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

$\varphi = 38^\circ$

$\sigma_h = 0.47$ Mpa d'où $q_r = 1.98$ Mpa

Le coefficient de sécurité est donc :

$$Fr = \frac{q_r}{q_u} = \frac{1.98}{0.8} = 2.47$$

Le coefficient de sécurité est supérieur au coefficient minimal de 2 prévu par le DTU13-2.

2.2.7 Calcul de tassement

- Tassement du sol sans inclusions :

Le tassement du sol sans inclusions est calculé par la méthode oedométrique donnant un tassement de 80 cm à la profondeur de 47 m.

- Tassement du sol avec inclusions :

Pour le calcul des tassements à atteindre dans la

couche traitée, le module de déformation du sol (E_m) traité est obtenu comme suit :

$$E_m(A_s + A_c) = (E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c) \quad (8)$$

avec :

E_s = module de déformation du terrain naturel

E_c = module de déformation de la colonne

A_s = surface du terrain naturel

A_c = surface de la colonne

Le calcul du tassement revient donc à calculer le module de déformation de la colonne, les différentes recherches effectués permettent d'écrire en première approximation :

$$E_c = 10 E_s \quad (9)$$

Le tassement du sol sans inclusions est calculé par la méthode oedométrique donnent un tassement de 80 cm. Ce tassement correspond à un module oedométrique du sol de :

$$E_s = 90 \text{ bars d'où } E_c = 900 \text{ bars}$$

Pour $A_s = 0.5111^2$ ($\phi = 0.80$ m) et $A_c = 2.5$ m², on trouve $E_m = 200$ bars et un tassement de 35 cm.

3 Conclusion

Le système des colonnes ballastées est un procédé facile à mettre en œuvre, relativement rapide et surtout économique, le matériau d'apport étant des cailloux ou du gravier. C'est une solution très économique aux problèmes des sols médiocres du littoral constitué de vases très compressibles.

Dans le cadre des contrôles des colonnes ballastées, 6 essais au pénétromètre statique et 2 essais au pénétromètre dynamique ont été effectués in-situ. Les résultats de ces essais prouvent qu'on peut atteindre avec les colonnes ballastées des résistances en pointes très élevées comme le montre la figure 5. L'action des colonnes ballastées en matière de tassement est donc très significative ■