

Fondations superficielles sur colonnes ballastées : comparaison des tassements mesurés et calculés

S. LAMBERT

*Keller Fondations Spéciale
Entzheim, France*

D. RANGEARD

*Institut National
des Sciences
Appliquées, Rennes, France*

Résumé

Cette communication présente une synthèse de plusieurs exemples de projets sensibles aux tassements qui ont fait l'objet de suivis de tassements du début jusqu'à la fin de la construction. Les tassements mesurés seront comparés aux calculs des méthodes usuelles de dimensionnement de colonnes ballastées (Priebe, PLAXIS, méthode des recommandations des colonnes ballastées).

Mots-clés : colonnes ballastées, mesures de tassement, renforcement de sol.

Shallow foundations on stone columns: analysis of measured and calculated settlements

Abstract

This paper presents a synthesis of several examples of settlement sensitive projects where in-situ measurements were performed from the start to the completion of the construction period. The measured settlements will be compared to those obtained from usual design methods for stone columns.

Key words: stone columns, settlement measures, soil reinforcement.

Introduction

Le renforcement de sol par colonnes ballastées est un procédé utilisé couramment sous toutes sortes d'ouvrages, que ce soient des bâtiments de type commercial, logistique, logements, ouvrage génie civil, station d'épuration, silo ou des remblais.

Son succès est étroitement lié au fait que les colonnes ballastées n'ont pas d'incidence sur le dimensionnement des semelles et du dallage. De plus, elles s'adaptent très bien aux contraintes de chantier : terrassement de fouilles, circulation d'engins.

Trois méthodes de dimensionnement de ce procédé sont couramment utilisées : la méthode de Priebe, la méthode figurant dans les recommandations publiées dans la RFG n° 111, et les méthodes numériques basées principalement sur une approche de type éléments finis.

Cette communication présente une synthèse de plusieurs exemples de projets sensibles aux tassements qui ont fait l'objet d'un suivi des tassements depuis le début jusqu'à la fin de la construction.

Les projets présentés concernent essentiellement des bâtiments sensibles aux tassements dont la charge a été appliquée progressivement. Les tassements mesurés sont confrontés aux résultats des calculs réalisés suivant les méthodes usuelles de dimensionnement.

Une consolidation rapide du sol au fur et à mesure de la montée de l'ouvrage est mise en évidence. La prévision des tassements est effectuée à partir des résultats d'essais *in situ* (pressiomètre et pénétromètre).

Le procédé colonne ballastée

Un des aspects cruciaux de la colonne ballastée se situe au niveau de la mise en œuvre. En effet, celle-ci va conditionner le comportement mécanique du renforcement. Quelques rappels de base de ce procédé s'imposent.

Le type de vibreur à utiliser est obligatoirement un vibreur équipé d'un excentrique situé en pied et générant des vibrations horizontales, conformément à la norme EN 14731 (Amélioration des massifs de sol par vibration). Tout autre matériel ne permettra de réaliser que des drains de graviers, comme précisé dans la norme EN 15237.

Le deuxième point important se situe au niveau du refoulement. Celui-ci doit être suffisant pour modifier l'état de contrainte dans le sol afin que le comportement de la colonne ballastée diffère de celui d'un drain (Nguyen T., Foray P., Flavigny E., 2007). Le diamètre de la colonne ballastée doit être le plus important possible et doit s'adapter aux variations de compacité du sol pour traiter toutes les hétérogénéités du sol, même celles non détectées par la campagne de reconnaissance. La force d'appui (ou activation) exercée en pointe de l'outil, et qui permet le refoulement latéral du gravier, est directement corrélée au diamètre de la colonne et aux caractéristiques du sol.

Dans ce qui suit, toutes les colonnes ballastées ont été réalisées avec un matériel de type Keller équipé d'un vibreur à sas haute fréquence (entre 50 et 60 Hz), un lancement à air et une force d'appui sur l'outil vibrant de plus de 25 t.

Comportement d'une semelle sur un sol renforcé par colonnes ballastées

L'approche du comportement à la rupture d'une semelle sur sol renforcé se limite souvent à l'étude de l'expansion latérale d'une colonne ballastée isolée extrapolée ensuite au groupe de colonnes. Cette approche simpliste et sécuritaire est reprise dans les recommandations sur les colonnes ballastées (RFG n° 111). Le principe de cette méthode consiste tout d'abord à estimer la répartition des contraintes entre le sol et les colonnes ballastées modélisées par des raideurs différentes, puis ensuite à vérifier si ces contraintes sont admissibles.

Une autre méthode, celle de Priebe (2002), suppose que le principe du mécanisme de rupture de semelle sur sol homogène est préservé. L'auteur propose de calculer une largeur de semelle fictive b' à partir de l'angle de frottement et de la cohésion du sol avant amélioration, pour laquelle on obtiendrait à l'extérieur de la zone traitée le même cercle de rupture que sous la semelle réelle reposant sur le sol amélioré. Pour les calculs de tassement, la répartition de contraintes entre la colonne ballastée et le sol est également effectuée mais en modélisant la colonne par des équations issues des principes de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu infini (Vesic, 1972).

Ces deux méthodes montrent qu'il y a toujours une forte concentration de charges sur l'élément le plus rigide, à savoir en l'occurrence la colonne ballastée. D'autres approches existent mais lorsqu'elles ne mettent pas en évidence une concentration élevée de charges sur les colonnes, le résultat obtenu n'est pas représentatif du fonctionnement réel du sol renforcé par colonnes ballastées. C'est par exemple le cas de la démonstration du domaine d'utilisation de la colonne ballastée dans l'ouvrage *Colonnes ballastées* (Dhouib A., Blondeau F., 2005), à partir d'une semelle carrée de $2,50 \times 2,50$ m chargée à 150 kPa.

Le résultat obtenu montre que la contrainte résiduelle sur le sol de 140 kPa est quasiment identique à la contrainte appliquée, alors que les méthodes reconnues mentionnées ci-avant indiquent plutôt une contrainte résiduelle de l'ordre de 9 à 14 kPa et la nécessité de prévoir 6 colonnes au lieu de 4 sous une fondation plus grande de $3,20 \times 2$ m.

Dans l'estimation de la portance d'une semelle sur colonnes ballastées intervient le phénomène de consolidation. Ce dernier joue un rôle particulièrement important dans le cas des colonnes ballastées, en raison de leur caractère drainant.

Ainsi, pour des bâtiments lourds sensibles aux tassements, la charge est toujours appliquée progressivement (coulage de dalle puis application des surcharges). Entre chacune des étapes de construction (par exemple 1 à 2 mois entre chaque coulage de dalle d'un bâtiment de logements), une consolidation importante peut s'effectuer. Les caractéristiques mécaniques du sol environnant se trouvent alors améliorées.

Dans le cas général, la vérification des tassements absolus et différentiels est dimensionnante et en fonction des déformations calculées, une adaptation de la structure sera éventuellement envisagée.

Les calculs ont été menés selon trois méthodes :

- *La méthode de Priebe (logiciel GRETA, version commercialisée par la société GeTec).* Conformément à la préconisation de Priebe, un module intrinsèque de 100 MPa a été considéré pour le gravier de la colonne ballastée (c'est-à-dire ne tenant pas compte de son environnement). De plus, pour le calcul de tassement sans colonne par la méthode élastique, le module utilisé a été pris égal à $\xi \times \frac{E_M}{\alpha}$ pour les semelles (avec α = coefficient rhéologique et ξ = coefficient de calage pris dans notre cas égal à 2), afin de retrouver l'ordre de grandeur des tassements obtenus par la méthode pressiométrique. La profondeur du calcul de tassement par la méthode élastique est limitée à $\Delta q(z)/\sigma'(z) < 10\%$ avec $\Delta q(z)$ la charge appliquée et $\sigma'(z)$ la contrainte initiale effective des terres au repos à la profondeur z .
- *La méthode des recommandations sur les colonnes ballastées validée par le CFMS (RFG n° 111).* Le module de la colonne a été pris égal à 60 MPa en tenant compte de son environnement et le calcul de tassement sans colonne est effectué selon la méthode pressiométrique.
- *Selon PLAXIS 3D,* avec prise en compte de la mise en œuvre de la colonne ballastée avec une expansion de 5 % de son volume (Nguyen T., Foray P., Flavigny E., 2007) ou Plaxis 2D avec une homogénéisation des sols. Le module de la colonne a été pris égal à 60 MPa et le module de sol a également été calé pour obtenir l'ordre de grandeur des tassements de la méthode pressiométrique.

Exemple d'ouvrages sensibles aux tassements

4.1

Exemple d'ouvrage sur un sol légèrement organique (MO < 5 %) : bâtiment collectif « La Petite Venise » à Hochfelden (67)

Le projet consiste à construire un bâtiment collectif de 3 étages. Les colonnes ballastées, d'un diamètre variable en fonction de la compacité du sol (0,60 à 0,75 m), ont été disposées sous les semelles isolées et filantes. Sur le site de Hochfelden, il a été mis en évidence un sol vasard et des sables et graviers argileux légèrement organiques baignant dans une nappe située à -1,60 m de profondeur.

Les pertes au feu ont révélé 3 à 5 % de matière organique.

Les colonnes ballastées, d'une capacité portante de 260 kN aux ELS, ont été arrêtées dans les marnes compactes à 5 m de profondeur.

Les tassements mesurés de la figure 1 mettent clairement en évidence une stabilisation rapide de l'ouvrage quelques semaines après chaque application de la charge.

TABLEAU I Données géotechniques du site de Hochfelden (67).

Sol	Profondeur	E_M	P_i	Coefficient rhéologique α
Remblai sablo-graveleux	0 à 2,20 m	7,1 MPa	0,82 MPa	1/2
Sables vasards légèrement organiques	2,20 m à 3,30 m	1,7 MPa	0,31 MPa	1/2
Sables et graviers argileux légèrement organiques	3,30 m à 4,60 m	4,5 MPa	0,51 MPa	1/2
Marne argileuse compacte	> 4,60 m	44,9 MPa	2,78 MPa	2/3

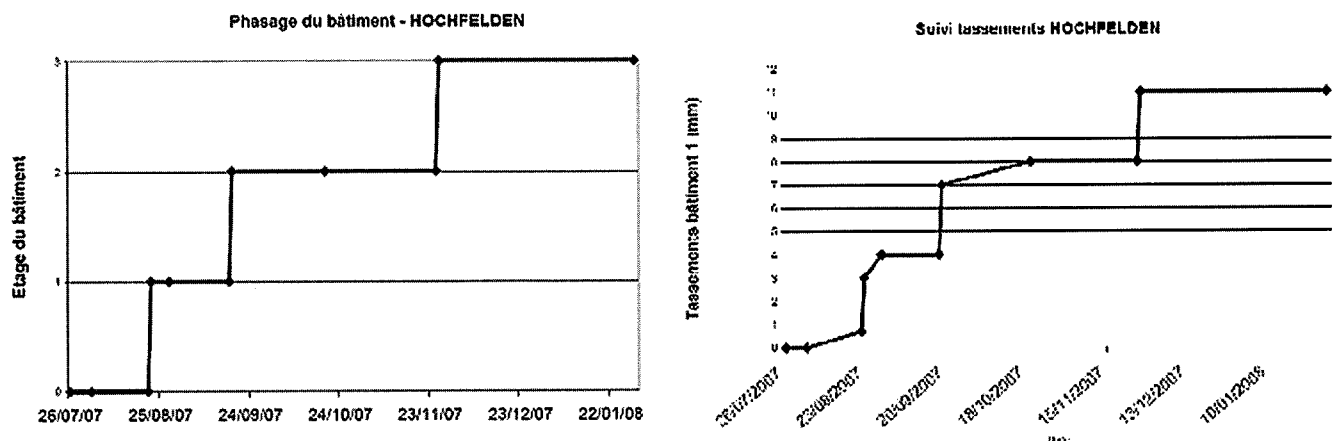


FIG. 1 Phasage des travaux et résultats des suivis de tassements.

L'ordre de grandeur des tassements en fin de construction a été correctement estimé par les trois méthodes.

La méthode figurant dans les recommandations sur les colonnes ballastées a cependant tendance, dans ce cas, à sous-estimer les tassements puisque le calcul du tassement sans colonne par le DTU 13.12 ne tient pas compte de l'influence d'une couche molle intercalée entre deux couches plus consistantes. En appliquant la correction évoquée dans l'ouvrage *Fondations et ouvrages en terre* de G. Philipponnat et B. Hubert, les tassements figurant dans le tableau II ont été majorés de 5 mm.

Exemple de colonnes flottantes : lycée Ferdinand Buisson à Voiron (38)

Dans le cadre de ce projet de bâtiment R + 1, des limons bruns mous (q_c 0,5 à 1 MPa) ont été rencontrés jusqu'à 9 m de profondeur, avec une nappe située à - 1,60 m/TN. Compte tenu des charges du projet, les colonnes ballastées de diamètre 0,80 m ont pu être arrêtées à 7 m de profondeur et sont donc considérées comme flottantes (Fig. 2).

La capacité portante maximale de la colonne a été estimée à 240 kN aux ELS et validée par un essai de chargement. La contrainte de la semelle a été fixée à 150 kPa aux ELS, pour limiter les tassements.

TABLEAU II Résultats des calculs de tassements.

Type de semelle	Charge ELS	Espacement entre colonnes	Méthode de Priebe (GRETA)	Méthode RFG n° 111	PLAXIS 3D (expansion de colonne 5 %)	Moyenne des tassements mesurés
Semelle filante 0,8 m de large	14 t/ml	1,8 m	9 mm	10 mm	11 mm	11 mm
Semelle filante 0,8 m de large	18 t/ml	1,4 m	10 mm	11 mm	15 mm	11 mm

Suivi de tassements de Voiron

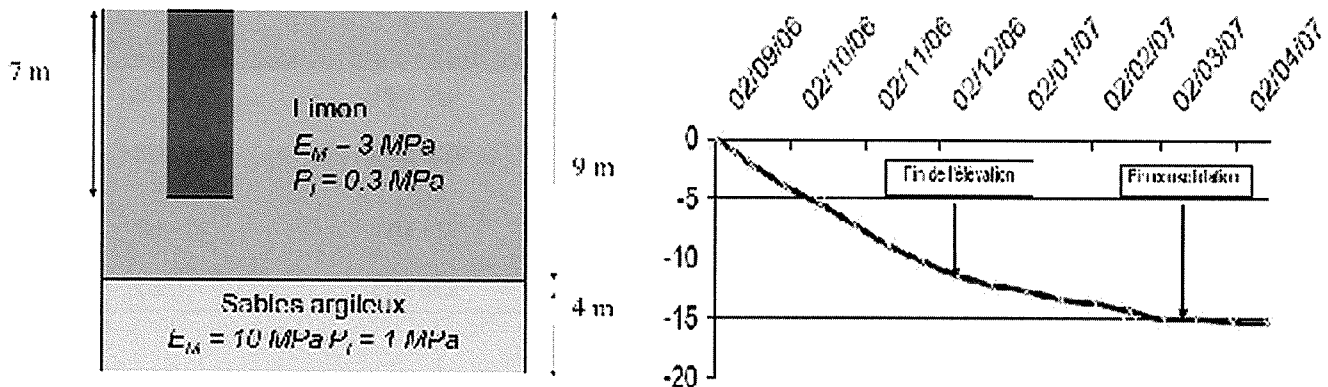


FIG. 2 Hypothèses de sol et résultats des suivis.

TABLEAU III Comparaison des tassements calculés et mesurés de l'ouvrage.

Type de semelle (chargée à 150 kPa)	Charge ELS	Nombre de colonnes	Méthode de Priebe (GRETA)	Méthode RFG n° 111	PLAXIS 3D (expansion de la col. 5%)	Moyenne des tassements mesurés
Semelle isolée 2,4 m x 2,4 m	860 kN	4	20 mm	21 mm	16 mm	15 mm
Semelle isolée 1,9 m x 1,9 m	540 kN	3	18 mm	18 mm	18 mm	15 mm

La méthode de Priebe 2002 permet de calculer les tassements des colonnes flottantes en additionnant le tassement sur la hauteur, en pied et en dessous de la colonne.

Dans notre cas, le critère de fin de calcul de tassement $\Delta q(z)/\sigma'_o(z) < 10\%$ a été atteint avant la base de la colonne et aucun tassement en pied et en dessous de la colonne n'a été calculé.

Par contre, dans le cas de couche profonde les tassements de semelles isolées sont à majorer par un tassement complémentaire en profondeur lié à l'interférence entre semelles. Pour la plupart des bâtiments à étages, il est possible de considérer une surcharge uniformément répartie obtenue par le poids total de l'ouvrage divisé par sa surface à partir de 5 à 7 m de profondeur selon la distance des semelles. Dans notre cas, le tassement obtenu de la couche située entre 7 et 9 m sous la surcharge uniformément répartie de 22 kN/m² du bâtiment est de 7 mm. Cette valeur a été additionnée aux valeurs de tassement calculées par la méthode Priebe et par les recommandations sur les colonnes ballastées (RFG n° 111) du tableau III.

Le suivi de tassements a pu être poursuivi plusieurs mois après la fin de l'ouvrage, et une parfaite

stabilisation des tassements a pu être constatée 3 mois après la fin du gros œuvre, avec 15 mm de tassement, conformes aux prévisions.

4.3

Exemple avec des P_1 de 0,1 MPa : résidence l'Albatros à Marly (57)

Le projet se compose de bâtiments de logements de type R + 3 sur un sol très hétérogène comportant des poches très molles (pression limite de 0,10 et 0,14 MPa). La nappe a été rencontrée vers 4,50 m/TN.

Les colonnes ballastées, de 0,70 m de diamètre moyen et d'une capacité portante de 230 kN, ont été descendues jusqu'aux marnes, entre 6 et 8 m de profondeur. Elles sont disposées uniquement sous les fondations.

L'hétérogénéité dans le sol, due à une forte variation de l'épaisseur et de la compacité du sol, provoque des tassements différentiels qui ont été fortement réduits par les colonnes ballastées. Ces tassements différentiels ont été estimés à un demi-centimètre et validés par les mesures.

TABEAU IV Données géotechniques du site de Marly (57).

Sol	Profondeur	E_M	P_1	Coefficient rhéologique α
Sable limoneux noirâtre	0 à 6 m	4,7 MPa	0,32 MPa (0,10 à 0,54)	0,50
Argile (sur une moitié de bâtiment)	6 à 8 m	4,6 MPa	0,30 MPa (0,14 à 0,50)	0,67
Marnes	> 8 m	27,8 MPa	2,45 MPa	0,67

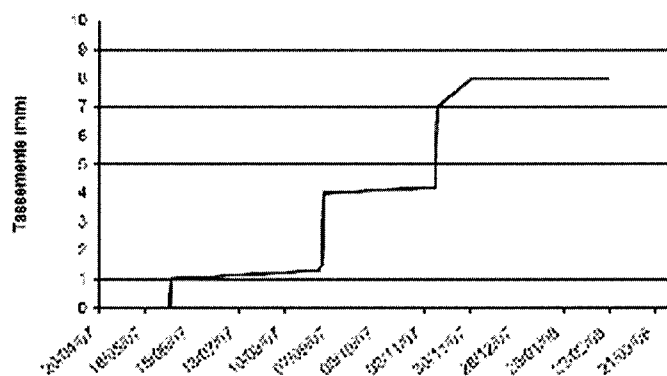
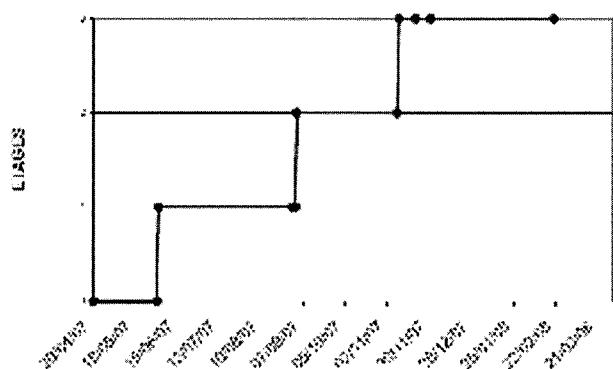


FIG. 3 Suivis de tassements.

TABEAU V Résultats des calculs de tassements.

Type de semelle (contrainte ELS 250 kPa)	Charge ELS	Entraxe de colonne	Méthode de Priebe (GRETA)	Méthode RFG n° 111	PLAXIS 3D (expansion de la col. 5 %)	Moyenne des tassements mesurés
Semelle filante 0,6 m de large	11 t/ml	1,50 m	8 mm	3 mm	12 mm	8 mm
Semelle filante 0,9 m de large	22 t/ml	1,05 m	14 mm	7 mm	13 mm	8 mm

Exemple de semelle chargée à 400 t : bâtiment IKEA à Saint-Martin-d'Hères (38)

Le bâtiment, caractérisé par une structure de type poteau-poutre, comporte un parking en rez-de-chaussée et deux niveaux (zones de réserves et de vente).

Les caractéristiques géotechniques du site, récapitulées dans le tableau n° 6, ne correspondent qu'à une partie du projet.

Pour atteindre une portance de 0,5 MPa aux ELS, les matelas de 1,50 m de sables et graviers a été compacté par la technique d'Induction® (procédé Keller). Cette technique utilise une méthodologie et un vibreur spécifiques pour atteindre des modules de compressibilités très élevés. Les essais pressiométriques de contrôle ont donné dans le matelas des valeurs de $E_M = 40$ MPa.

Les résultats des calculs de tassements dans le tableau VII montrent que les tassements ont été surestimés par les 3 méthodes. Pour le calcul selon la méthode des recommandations sur les colonnes ballastées, la semelle a été considérée à la base du matelas avec des dimensions de 4,90 x 4,90 m tenant compte d'un angle de diffusion de 1H/2V. A ce tassement il a été rajouté les tassements du matelas intercalaire, soit 3 mm. L'écart important entre les tassements calculés et mesurés indique qu'un matelas intercalaire fortement compacté a un effet très bénéfique sur la réduction des tassements.

Conclusion

Cette communication a pour but de rappeler les principaux aspects de la colonne ballastée qui permettent de mieux comprendre le comportement d'une semelle sur sol renforcé.

Les colonnes ballastées doivent impérativement être réalisées avec du matériel spécifique selon la norme des procédés de vibration profonde, en refoulant du ballast selon les variations de compacité du sol et suffisamment pour modifier l'état de contrainte initial. Si l'on intègre le phasage des travaux et la consolidation accélérée du sol par les colonnes, il apparaît très vite que la capacité portante du sol renforcé par colonnes ballastées est très sécuritaire. L'estimation du nombre de colonnes doit par contre obligatoirement suivre des méthodes de dimensionnement reconnues.

Les résultats des mesures de tassements présentés dans cet article montrent une bonne adéquation entre les valeurs calculées et les mesures. Les valeurs obtenues à partir des éléments finis sont très satisfaisants lorsqu'on connaît la difficulté de prendre en compte la phase de mise en place de la colonne ballastée et le peu de connaissance sur la modification de l'état de contrainte du sol engendrée par l'insertion de la colonne.

TABLEAU VI Données géotechniques du site de Saint-Martin-d'Hères (38).

Sol	Profondeur	q_c	E_M	P_i	Coefficient rhéologique α
Sables et graviers	0 à 1 m	10 MPa	40,0 MPa	1,60 MPa	0,33
Limon	1 à 5 m	1 MPa	2,5 MPa	0,33 MPa	0,50
Sables et graviers	> 5 m	20 MPa	30,0 MPa	1,80 MPa	0,33

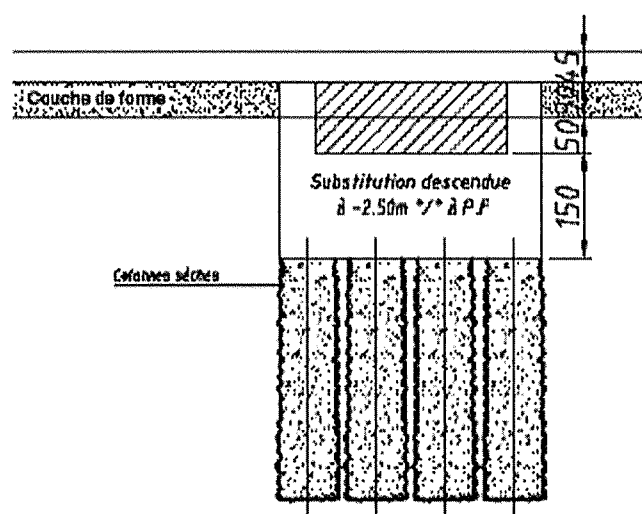


FIG. 4 Disposition des colonnes sous les poteaux.

TABLEAU VII Résultats des calculs de tassements.

Type de semelle (0,5 MPa aux ELS)	Charge ELS	Nombre de colonnes	Méthode de Priebe (GRETA)	Méthode RFG n° 111	PLAXIS 2D	Moyenne des tassements mesurés
Semelle isolée 3,40 m x 3,40 m	4 000 KN	16	12 mm	9 mm	18 mm	2 mm

Bibliographie

Dhouib A., Blondeau F. – *Colonnes ballastées*, Presses des Ponts, Paris, 2005.

Nguyen T., Foray P., Flavigny E. – Prise en compte de l'effet de la mise en place dans la modélisation numérique en 3D

des colonnes ballastées dans l'argile molle. *18^e Congrès français de mécanique*, Grenoble 27-31 août 2007.

Priebe H.J. – Méthode de dimensionnement des colonnes ballastées flottantes

dans les sols très mous, justification de la sécurité à la rupture circulaire ou au grand glissement, 2002.