

Au sujet de l'article « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement »

(RFG n° 111, 2^e trimestre 2005)

A. DHOUB, Vinci Construction France, Nanterre

1. Étreinte latérale du sol

1.1. Commentaire

L'intitulé du texte « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles » laisse penser que ces recommandations concernent essentiellement les fondations superficielles de type semelles qui sont plus sensibles aux tassements que les radiers, les dallages et les ouvrages en terre. Ce texte appelle quelques commentaires.

Le texte est en contradiction avec les étreintes latérales limitant l'emploi des colonnes ballastées, soit : $c_u > 20$ kPa et $q_c > 300$ kPa. En effet :

– le texte du COPREC de 2001 « Recommandations pour le contrôle de la conception et de l'exécution des colonnes ballastées » fixe une cohésion minimale c_u de 40 kPa pour l'ensemble des ouvrages sans distinction ;

– Dhoub et Blondeau (2005) ont montré que, pour une semelle carrée travaillant à une contrainte aux états limites de services ($q_{el,s}$) de 150 kPa, le sol doit présenter une cohésion non drainée c_u d'au moins 40 kPa. Ce qui revient à avoir une pression limite pressiométrique nette p_i^* de 220 kPa ou une résistance en pointe mesurée au cône q_c de 600 kPa. Par contre, ils ont noté qu'une cohésion non drainée de 20 kPa est compatible avec une contrainte sur dallage ou radier de 50 kPa ;

– Dhoub et Blondeau (2005) ont limité la descente de charge verticale centrée à 1 500 kN pour les massifs de semelles isolées fondés sur colonnes ballastées. Cette limitation est motivée par les problèmes de déformations et non de portance. Cette dernière peut être tout simplement traitée par l'élargissement des semelles alors que les déformations dépendent uniquement des caractéristiques des sols comme le montre l'exemple que nous présentons ci-après.

1.2. Exemple à méditer

Sur un chantier de colonnes ballastées sous semelles de plusieurs bâtiments, les sols de fondations, composés essentiellement d'argiles molles, limons et sables avec quelques passées tourbeuses, ont été caractérisés par des forages et essais sur site comprenant des essais pressiométriques (Norme NF P94-110-1) et des essais de pénétration statique (norme NF P94-113). Les profils pressiométriques et de pénétration statique sont donnés dans les figures 1 et 2, respectivement (Dhoub et al., 2006a). Il convient de noter :

– les pressions limites pressiométriques (p_i^*) présentent une moyenne de 130 kPa, ce qui revient à avoir une cohésion non drainée (c_u) de l'ordre de 24 kPa. Le module pressiométrique moyen (moyenne harmonique) est de 900 kPa ;

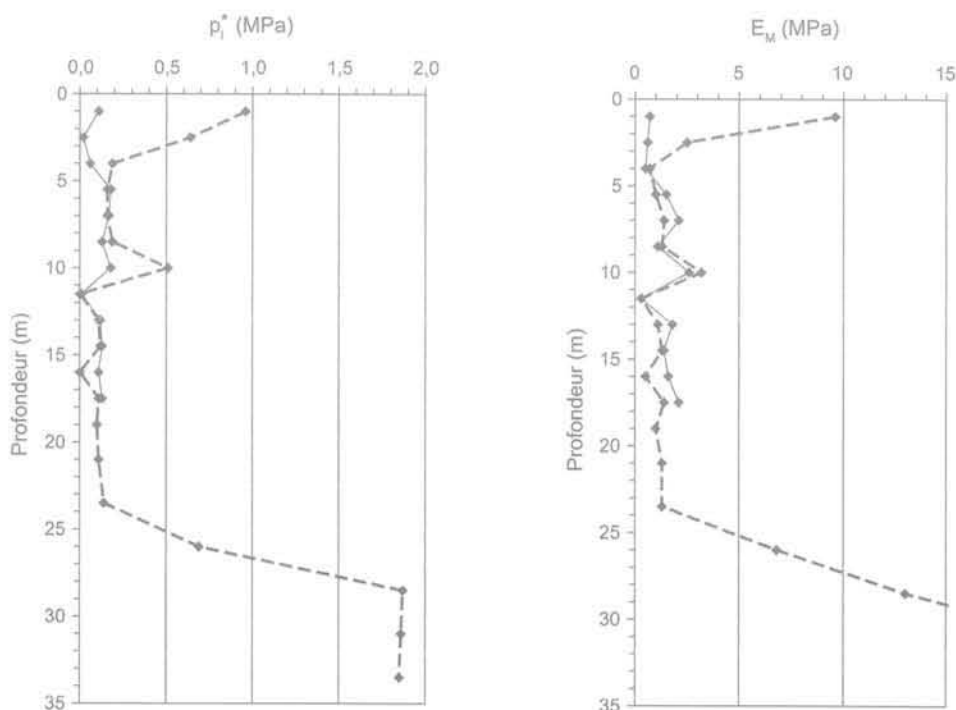


FIG. 1 Évolution des caractéristiques pressiométriques en fonction de la profondeur (Dhoub et al., 2006a).

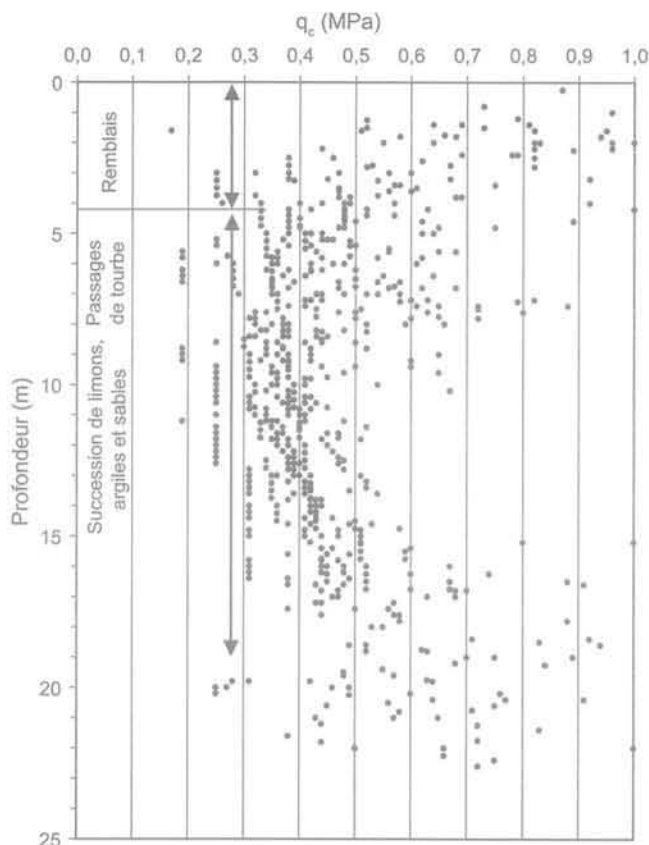


FIG. 2 Profil de pénétration statique : résistance en pointe (q_c) en fonction de la profondeur (Dhouib et al., 2006a).

– les résistances en pointe mesurées au cône (q_c) sont très faibles et varient entre 200 et 400 kPa dans les horizons d'argiles limoneuses avec des passages tourbeux épais de 1,0 à 5,0 m, où les valeurs de q_c chutent en dessous de 200 kPa ;

– les rapports des résistances en pointe (q_c) aux modules pressiométriques (E_{pm}) conduisent, dans les argiles limoneuses avec passages tourbeux, à des valeurs allant de 0,8 à 7,6, avec une moyenne de 2,2.

Après traitement, les bâtiments ont subi des tassements très importants et n'ont pas pu être livrés. Ces tassements résultent principalement des facteurs suivants :

– le confinement est très faible autour du ballast, les déformations latérales dues à l'expansion latérale du ballast s'accompagnent automatiquement de tassements verticaux, donc de tassements importants comme l'ont montré les mesures réalisées pendant un an ;

– l'absence d'un substratum franc sur lequel peuvent s'appuyer les colonnes est un facteur déclenchant de déformations en profondeur, donc de tassements déviatoriques ;

– la présence de la tourbe sur des épaisseurs allant de 1,0 à 5,0 m constitue un autre facteur aggravant pour deux raisons : la tourbe présente ici, d'une part, une étroitesse latérale faible (q_c de moins de 200 kPa) qui ne peut pas confiner le ballast sous des charges « ponctuelles » aussi élevées (jusqu'à 2 600 kN) et constitue, d'autre part, un matériau non pérenne car à comportement évolutif à l'instar des matériaux de décharge.

2. Calcul des tassements

2.1. Commentaire

La méthode de calcul des tassements proposée dans le cadre de ces recommandations est basée sur la règle T0 de Ménard. Nous avons essayé de comparer les tassements estimés par cette méthode à ceux mesurés sur chantier et/ou calculés par la méthode de Priebe (1995) et les éléments finis sur trois exemples de semelles sur colonnes ballastées.

2.2. Exemples

Exemple 1

La figure 3 illustre l'évolution des tassements mesurés sur chantier de semelles isolées fondées sur colonnes ballastées incorporées dans les sols dont les caractéristiques sont présentées sur les figures 1 et 2. Il ressort de ces graphiques que (Dhouib et al., 2006a) :

– les tassements calculés par la méthode proposée dans le cadre de ces recommandations sont largement sous-estimés par rapport aux mesures et aux calculs conduits par la méthode de Priebe (1995) qui offre une bonne concordance avec les tassements mesurés sur chantier (Fig. 3) ;

– l'évaluation des facteurs de réduction des tassements montre que la méthode proposée surestime ce facteur comme le montre la figure 4. En effet, pour cet exemple précis, les valeurs de ce facteur obtenues par cette méthode varient de 8 à 21 alors qu'elles sont de 2 à 3 d'après la méthode de Priebe (1995) et de 2 à 5 d'après les mesures. Ce qui est plus raisonnable en l'état des connaissances actuel dans ce domaine.

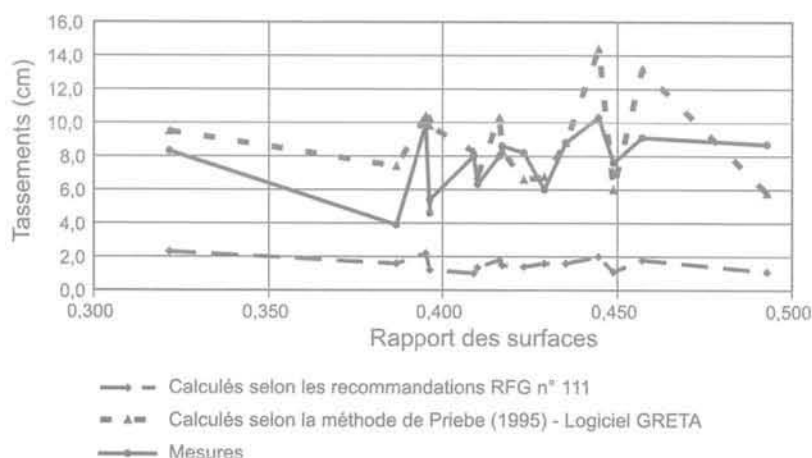


FIG. 3 Évolution des tassements mesurés et calculés en fonction du taux d'incorporation (exemple 1 : tassement).

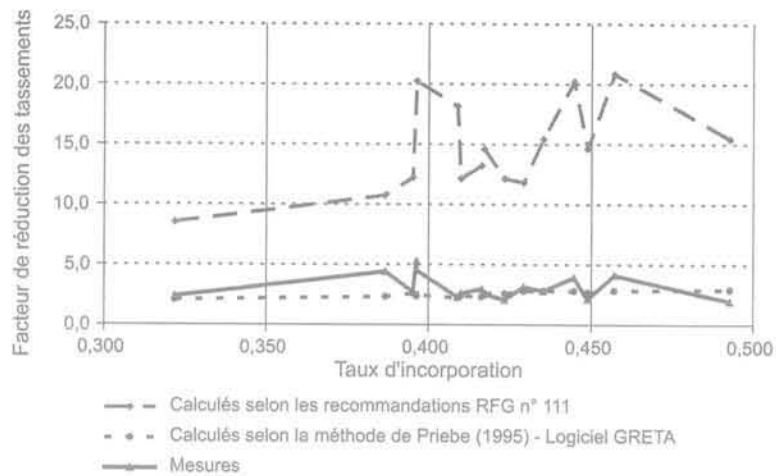


FIG. 4 Coefficient de réduction des tassements en fonction du taux d'incorporation (exemple 1 : tassement).

Exemple 2

Sur la figure 5 sont présentés les tassements mesurés sur chantier et calculés par un modèle de calage en éléments finis à l'aide de CESAR-LCPC 3D (Dhouib *et al.*, 2006b). Cet exemple montre clairement que la méthode de calcul des tassements proposée dans le cadre de ces recommandations sous-estime largement les tassements.

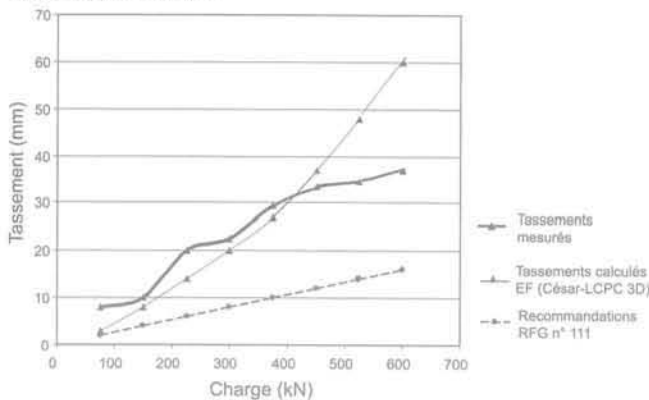


FIG. 5 Évolution des tassements mesurés et calculés en fonction de la charge appliquée (exemple 2 : tassement).

Exemple 3

L'exemple 3 traite le cas d'une semelle carrée de $3 \times 3 \text{ m}^2$ reposant sur 5 colonnes ballastées incorporée dans de l'argile et soumise à des incréments de charge verticale allant de 0 à 100 kPa (Kirsch *et al.*, 2004).

Les caractéristiques des argiles sont les suivantes :

$\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$;
 $c_s' = 14 \text{ kPa}$;
 $\varphi_s' = 18 \text{ degrés}$;
 $E_s = 1.200 \text{ kPa}$.

Celles des colonnes ballastées sont :

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$;
 $c_c' = 0 \text{ kPa}$;
 $\varphi_c' = 38 \text{ degrés}$;
 $E_c = 60\,000 \text{ kPa}$;
 $L_c = 8 \text{ m}$;
 $D_c = 0,8 \text{ m}$.

La figure 6 récapitule l'évolution des tassements mesurés et calculés par la méthode de Priebe (1995, logiciel GRETA) et par la méthode proposée par les recommandations de la *Revue française de géotechnique* n° 111. Ce troisième exemple montre encore que la méthode proposée dans les recommandations sous-estime clairement les tassements. La méthode de Priebe (1995) a l'air de surestimer les tassements dans la gamme des contraintes de 20 à 80 kPa dans le présent exemple.

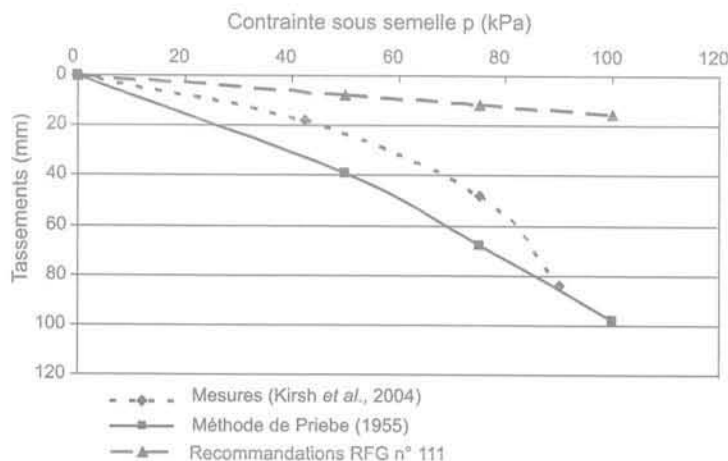


FIG. 6 Comparaison des tassements mesurés et calculés en fonction de la charge verticale appliquée sur semelle carrée fondée sur cinq colonnes ballastées (exemple 3 : tassement).

3. Conclusion générale

Le traitement des sols par colonnes ballastées sous semelles nécessite une grande attention de la part de tous les acteurs de la construction. Contrairement aux ouvrages de grandes dimensions (radiers, dallages, remblais), les semelles apportent des charges centrées dont résultent des déformations localisées sous structures. Les semelles de bâtiments sont très sensibles aux tassements qui doivent rester dans une fourchette de 1 à 2 cm.

En termes d'étreinte latérale, le sol doit présenter une contrainte de confinement suffisante pour réduire au minimum l'expansion latérale du ballast, et par conséquent, les déformations du sol autour de la colonne et les tassements qui en découlent.

Les valeurs minimales requises pour pouvoir améliorer le sol par colonnes ballastées sous semelles doivent être les suivantes :

- une cohésion non drainée $c_u > 40$ kPa ;
- une résistance en pointe mesurée au cône $q_c > 600$ kPa ;
- une pression limite pressiométrique nette $p_l > 200$ kPa.

La descente de charge sur semelle doit être limitée à 1 500 kN. Au-delà, toute amélioration des sols par colonnes ballastées est à éviter en raison de déformations excessives.

La méthode d'homogénéisation pour les ouvrages de grandes dimensions (radiers, dallages et remblais) peut être maintenue dans ces recommandations. Dhouib et Blondeau (2005) ont montré que cette méthode conduit à des résultats proches de la méthode de Priebe (1995) et des mesures. Par contre, la méthode proposée dans les recommandations pour l'évaluation des tassements sous semelles est à écarter. Elle sous-estime les tassements et n'a fait, *a priori*, l'objet d'aucune validation.

A ce jour, la méthode de Priebe (1995) est la seule méthode qui fournit, d'après notre expérience (Dhouib et Blondeau, 2005), des résultats proches des mesures, sans toutefois oublier que cette méthode est, elle aussi, semi-empirique et reste d'un emploi délicat en ce qui concerne le calcul des tassements sous semelles (Priebe, 2004).

En conclusion, ce texte est utile pour la profession. Malheureusement, tel qu'il est actuellement présenté, il pourrait nuire à une utilisation raisonnable des colonnes ballastées sous semelles. Il est indispensable de le reprendre immédiatement en associant les géotechniciens (USG) et quelques experts.

Bibliographie

Dhouib A., Blondeau F. (2005) – *Colonnes ballastées : techniques de mise en œuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle*. Presses des Ponts et Chaussées, p. 272.

Dhouib A., Dupraz M. (2006a) – « Étude comparative de tassements excessifs sous semelles sur colonnes ballastées ». *Symposium international ELU/ULS*, Paris – Marne-la-Vallée, 23-25 août 2006, p. 461-470.

Dhouib A., Soyez L., Soyez B. (2006b) – « Comportement à la rupture de colonnes ballastées sous semelles : étude de quelques cas ». *Symposium international ELU/ULS*, Paris – Marne-la-Vallée, 23-25 août 2006, p. 471-480.

Kirsch F., Stahlmann J., Wehr W. (2004) – « Berechnung von Baugrundverbesserungen nach dem Rüttelstopfverfahren ». *Vorträge der Baugrundtagung – 2004 in Leipzig*, Hrsg. DGGT.VGE, p. 149-156.

Priebe H.J. (2004) – « Le dimensionnement des colonnes ballastées ». *Symposium international Amélioration des sols en place (ASEP-GI 2004)*, Paris 2004, LCPC, Presses des Ponts et Chaussées, p. 489-503.