

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Sur une nouvelle méthode de dimensionnement des fondations sur sol renforcé par colonnes

A new design scheme of foundations resting on reinforced soils by columns

A. Bouassida – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisia

RESUME: Le dimensionnement d'une fondation posée sur un sol renforcé par colonnes est étudié par une nouvelle méthode qui tient compte des vérifications de la capacité portante et du tassement. Pour le calcul de la capacité portante du sol renforcé, on propose un modèle incluant la contrainte admissible du sol initial. Cette démarche permet, en fixant la contrainte admissible requise pour le sol renforcé, de déterminer le facteur de substitution minimal. A partir du calcul du tassement, à l'aide des approches variationnelles en élasticité linéaire, et en se fixant la valeur admissible du tassement, on détermine la valeur maximale du facteur de substitution. A partir de l'encadrement trouvé on optimisera le choix du facteur de substitution pour le dimensionnement de la fondation. La méthode proposée, qui s'applique à tous les cas de renforcement repose, donc, sur la détermination du facteur de substitution, paramètre essentiel à partir duquel on décide du choix du diamètre des colonnes, leur espacement, et par suite leur emplacement sous la fondation.

ABSTRACT: A new design scheme including both bearing capacity and settlement criteria is presented for foundations resting on reinforced soils by columns. Starting with bearing capacity verification, from the required admissible stress of the reinforced soil the minimum value of the improvement area ratio is derived. Using linear elastic variational approach, a maximum value of the improvement area ratio is deduced from the required admissible settlement. Within the established bounding of the improvement area ratio, the foundation design will be optimised. The improvement area ratio is the main parameter from which parameters such as columns diameter, spacing and location under the foundation will be determined. The proposed design scheme is applicable for all reinforcement cases, that is its main advantage.

1 INTRODUCTION

Dans un projet de dimensionnement d'une fondation sur sol renforcé par colonnes, le facteur de substitution représente un paramètre important qui intervient aussi bien pour le calcul de la capacité portante, que pour l'estimation du tassement.

Néanmoins, en fonction de la priorité à laquelle on a eu recours pour décider le renforcement par colonnes, avec les méthodes jusqu'ici proposées, le facteur de substitution est retenu principalement, soit pour augmenter la capacité portante avec une marge fixée, soit pour réduire le tassement à une valeur admissible (et, éventuellement, accélérer le temps de consolidation pendant une durée déterminée). Evidemment, ces critères dépendent du procédé d'exécution retenu pour la réalisation des colonnes.

Cette méthode de dimensionnement, bien qu'elle soit suffisante au niveau de la réalisation des projets courants, peut être étendue dans un contexte général qui permet de traiter tous les cas de renforcement par colonnes d'une manière standard. En effet, l'amélioration de la capacité portante et la réduction du tassement, sont deux performances indissociables

en vue de quantifier réellement l'effet du renforcement par colonnes.

Dans cette perspective, le présent travail a pour but essentiel de proposer une méthode de dimensionnement où on optimisera le choix de la valeur du facteur de substitution, en analysant, par ordre de priorité, une augmentation de la capacité portante, puis une réduction du tassement fixées à l'avance.

A titre d'illustration, on traite deux cas pratiques de renforcement avec la méthodologie proposée dont on montre l'intérêt sur la plan pratique pour dimensionner une fondation sur sol renforcé par colonnes.

2 RAPPELS SUR QUELQUES METHODES DE DIMENSIONNEMENT ANTERIEURES

Le dimensionnement d'une fondation sur sol renforcé par colonnes a été examiné initialement à l'aide de méthodes utilisant le modèle de la colonne isolée (Aboshi et col, 1979 par exemple). Pour le calcul de la capacité portante du sol renforcé, ce modèle fait abstraction de la résistance du sol initial qui est souvent très faible (pour les vases molles) par rapport

$$\eta = \frac{S_c}{S} \quad (1)$$

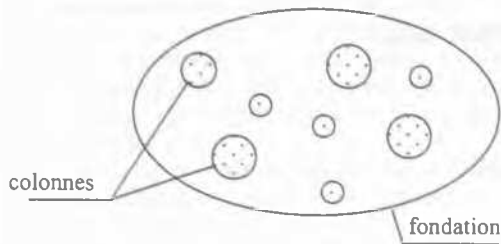


Figure 1. Schéma de renforcement par un groupe de colonnes sous une fondation de forme quelconque.

à celle du matériau constitutif des colonnes (tel que le ballast). Ensuite, pour le calcul de la capacité portante notamment, le recours au modèle « groupe de colonnes » a permis de tenir compte de la contribution du sol initial, Barksdale et col (1983), Bouassida et col (1995).

La résistance du sol initial (encaissant) est prise en compte à travers l'expression des caractéristiques moyennes du sol renforcé qui sont proposées à partir de la loi dite « des mélanges ». Par cette voie, en vue de calculer la capacité portante ultime du sol renforcé par un groupe de colonnes, on cite la contribution de Barksdale et col (1983) faite pour le cas d'une fondation superficielle, et celle de Enoki et col (1991) faite pour le cas d'un remblai. Toutefois, ces expressions ont été proposées, sans avoir eu recours à un cadre théorique donné pour les établir. Alors que Broms (2000) propose de tenir compte de la résistance du sol initial indépendamment de celle du matériau constitutif des colonnes, on utilise le principe de superposition pour calculer la capacité portante ultime du sol renforcé. A ce propos, avec les règles pressiométriques en vigueur Amar et col (1994), basées sur le modèle de la colonne isolée, on ne prend pas en compte la contribution du sol encaissant.

Concernant le calcul du tassement, on fait souvent recours au modèle de la cellule composite (ou cellule élémentaire) en adoptant souvent le comportement élastique linéaire. Nous citons en particulier les contributions de Balaam et col (1981) et Chow (1996). Avec le modèle de la cellule composite, un comportement élastoplastique a été adopté pour le matériau constitutif des colonnes, Priebe (1995) et Poorooshasb et col (1997). Très récemment, le recours au modèle « groupe de colonnes » a été examiné en utilisant les méthodes variationnelles en élasticité linéaire, Bouassida et col (2001).

Il est donc intéressant de proposer une méthode élaborée dans un cadre théorique, permettant le dimensionnement d'une fondation sur sol renforcé par colonnes. Laquelle méthode permettrait d'analyser

conjointement la capacité portante et le tassement. L'avantage majeur de la méthode proposée est de considérer le modèle de renforcement par un groupe de colonnes qui est beaucoup plus réaliste que celui de la cellule composite auquel plusieurs auteurs ont fait recours aussi bien pour le calcul de la capacité portante que pour l'estimation du tassement. Ci-dessous, on introduit la méthode proposée qu'on applique, ensuite, pour le dimensionnement des fondations de réservoirs de grandes dimensions sur sol renforcé par colonnes.

3 LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT PROPOSEE

On aborde le dimensionnement en considérant le schéma de renforcement par colonnes reposant sur un substratum rigide, qui est le plus adopté en pratique. Cependant, le cas de renforcement par colonnes flottantes est, de même envisageable, comme on le verra plus loin.

Avec la méthode proposée, on dicte le choix du facteur de substitution d'une manière rationnelle en vérifiant l'aspect « capacité portante », en premier lieu, et l'aspect « tassement » en second lieu. Cette démarche permet de traiter tous les cas de figure indépendamment de la priorité recherchée par le recours au renforcement par colonnes, c.à.d., l'augmentation de la capacité portante, ou plutôt la réduction du tassement et (ou) l'accélération de la consolidation. A ce propos, on note qu'une valeur optimale du facteur de substitution, en terme de capacité portante, a été proposée par Bouassida et col (1998) dans le cas de renforcement d'un sol purement cohérent par un matériau cohérent et frottant.

Dans la suite, on considère une fondation rigide de forme quelconque de surface S , reposant sur un sol renforcé par un groupe de colonnes (toutes situées sous la fondation) dont la section totale est notée S_c (Fig. 1). Le facteur de substitution du sol est, donc, défini par :

3.1 Etude vis à vis de la capacité portante

En adoptant le modèle de la « colonne isolée », la contrainte admissible, notée $\bar{\sigma}_c$, s'écrit :

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_{ult}^c}{F_c} \quad (2)$$

où σ_{ult}^c désigne la contrainte verticale ultime qui induit la rupture par poinçonnement en tête de la colonne. Diverses propositions ont été faites pour déterminer la valeur de σ_{ult}^c qui dépend notamment

des caractéristiques de la colonne et du sol environnant.

F_c est le coefficient de sécurité vis à vis du poinçonnement. Le matériau constitutif de la colonne étant souvent sélectionné, et sa mise en place bien contrôlée, on adopte $F_c = 2$, Amar et col (1994).

Dans le cas d'une fondation posée sur un sol renforcé par un groupe de colonnes, la contrainte admissible, notée $\bar{\sigma}_s$, du sol encaissant (situé entre les colonnes), est de même déterminée à partir de la contrainte ultime, notée σ_{ult}^s , pour la fondation considérée. On a :

$$\bar{\sigma}_s = \frac{\sigma_{ult}^s}{F_s} \quad (3)$$

La surface du sol encaissant étant relativement grande par rapport à celle des colonnes S_c , par conséquent, ses caractéristiques mécaniques sont moins contrôlées (ou représentent une grande dispersion) que celles du matériau constitutif des colonnes, on prend alors une marge de sécurité plus importante que celle adoptée pour F_c , d'où la valeur $F_s = 3$.

Avec l'hypothèse des petites déformations, la contrainte admissible du sol renforcé, notée $\bar{\sigma}_{renf}$, est écrite sous forme de la combinaison linéaire suivante :

$$\bar{\sigma}_{renf} = \alpha \bar{\sigma}_c + \beta \bar{\sigma}_s \quad (4)$$

où : $\alpha; \beta \in [0,1]$.

Comme les contraintes $\bar{\sigma}_c$ et $\bar{\sigma}_s$ correspondent à l'état des petites déformations (pour lequel le tassement de la fondation demeure admissible donc faible) en désignant respectivement par σ_v^c et σ_v^s les distributions de la contrainte verticale sous la fondation de surface S, d'une part sur la surface des colonnes et, d'autre part, sur la surface du sol environnant les colonnes les conditions suivantes devront être satisfaites :

$$\sigma_v^c \leq \bar{\sigma}_c \quad (5)$$

$$\sigma_v^s \leq \bar{\sigma}_s \quad (6)$$

En adoptant la convention des mécaniciens des sols postulant que les contraintes normales sont positives en compression, le chargement vertical Q exercé par la fondation sur le sol renforcé, équilibre les

répartitions des contraintes σ_v^c et σ_v^s agissant respectivement sur les surfaces S_c et $S_s = S - S_c$, d'où :

$$Q = \int_{S_c} \sigma_v^c ds + \int_{S_s} \sigma_v^s ds \quad (7)$$

En supposant que σ_v^c et σ_v^s représentent des valeurs moyennes constantes (hypothèse davantage réaliste pour le cas d'une fondation souple), à partir des inéquations (5) et (6), et de (1) et (7), il vient que :

$$Q \leq [\eta \bar{\sigma}_c + (1 - \eta) \bar{\sigma}_s] S \quad (8)$$

Par identification entre les expressions (4) et (8), en utilisant (2) et (3), la contrainte moyenne transmise sur le sol renforcé, qui est constante et dont la valeur est égale à (Q/S) , vérifie :

$$(Q/S) \leq \bar{\sigma}_{renf} = \eta \bar{\sigma}_c + (1 - \eta) \bar{\sigma}_s \quad (9)$$

Par identification entre (4) et (9) on aura : $\alpha = \eta$ et $\beta = 1 - \eta$.

A partir de (9), on distinguera les cas particuliers :

sol non renforcé : $\eta = 0$;

sol entièrement renforcé : $\eta = 1$.

La superposition des termes de la résistance admissible du sol encaissant et du matériau constitutif des colonnes demeure une approximation permettant le calcul de la contrainte admissible du sol renforcé. En effet, les expressions (2) et (3) ont été adoptées pour deux problèmes différents qui sont respectivement celui de la colonne isolée, et celui d'un sol non renforcé. Une approche globale de calcul de la contrainte admissible du sol renforcé reste envisageable. Néanmoins la valeur du coefficient de sécurité à adopter pour le sol renforcé nécessite d'être bien ciblée.

En pratique, l'intérêt de l'expression (9) est perçu comme suit : on se place dans la situation où la capacité portante admissible du sol initial (ou encaissant) est insuffisante, vis à vis du chargement réel à transmettre, noté $Q_{réel}$, qui est donné ainsi que la surface de la fondation S. Les valeurs des contraintes ultimes, σ_{ult}^c et σ_{ult}^s , sont déterminées à partir d'un règlement donné, on pourra alors déduire le facteur de substitution minimal, noté η_{min} , permettant de garantir la capacité portante requise du sol renforcé. D'où, on a :

$$\eta_{min} = \frac{(Q_{réel}/S) - \bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}_c - \bar{\sigma}_s} \quad (10)$$

où $Q_{réel}$ désigne le chargement réellement appliqué par la fondation sur le sol renforcé.

A partir de (10) on voit clairement que le recours au renforcement par colonnes, vis à vis de la capacité portante, est inutile si la contrainte à transmettre au sol renforcé est inférieure à la contrainte admissible du sol encaissant. Le matériau constitutif des colonnes ayant des caractéristiques mécaniques beaucoup plus élevées que celles du sol encaissant, le dénominateur en (10) est toujours positif.

Le calcul de la valeur de η_{min} à partir de (10) constitue le point de départ du dimensionnement d'un sol renforcé par colonnes. En effet, la vérification du dimensionnement de la fondation vis à vis du tassement se fera évidemment pour une valeur $\eta \geq \eta_{min}$.

3.2 Etude vis à vis du tassement

Elle sera menée avec l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire des constituants du sol renforcé, tout en conservant le schéma de colonnes reposant sur un substratum rigide. Dans ce contexte, en faisant recours à une approche variationnelle en contrainte, il a été établi (Bouassida et col, 2001), pour une fondation rigide de forme quelconque, reposant sur un sol renforcé par un groupe de colonnes, que l'on détermine un majorant du tassement du sol renforcé, noté δ_r , par l'expression est :

$$\delta_r \leq \frac{(Q_{réel}/S)H_r}{E_{éq}} \quad (11)$$

$$\text{avec : } E_{éq} = \eta E_c + (1 - \eta) E_s \quad (12)$$

Le chargement $Q_{réel}$ exercé par la fondation sur le sol renforcé vérifie évidemment la condition (8).

$E_{éq}$ désigne le module équivalent classique qui correspond à la moyenne des modules d'élasticité du sol encaissant et du matériau constitutif des colonnes pondérées par les fractions surfaciques qu'ils occupent sous la fondation. Les caractéristiques du matériau constitutif des colonnes et du sol encaissant sont notées respectivement E_c, ν_c et E_s, ν_s .

H_r désigne la longueur des colonnes.

En reportant dans (11) la valeur minimale du facteur de substitution trouvée à partir de (10), on vérifiera si le tassement du sol renforcé est inférieur à la valeur du tassement admissible, notée $\bar{\delta}$, qui est souvent fixée en pratique. Dans le cas où le tassement de l'ouvrage est admissible, c.à.d. :

$$\delta_r \leq \bar{\delta} \quad (13)$$

à partir de (11), (12) et (13) on détermine la valeur maximale du facteur de substitution qui s'écrit :

$$\eta_{max} = \frac{(Q_{réel}/S)(H_r/\bar{\delta}) - E_s}{E_c - E_s} \quad (14)$$

Ainsi, à partir des inéquations (10) et (14) on établit, pour le facteur de substitution, l'encadrement suivant :

$$\eta_{min} \leq \eta \leq \eta_{max} \quad (15)$$

dans lequel devrait être située la valeur de η assurant les vérifications de la capacité portante et du tassement pour une fondation posée sur un sol renforcé par colonnes. Autrement, il n'y a pas lieu de considérer une valeur du facteur de substitution située à l'extérieur de l'intervalle $[\eta_{min}; \eta_{max}]$.

3.3 Commentaires

La méthode ci-dessus proposée est applicable pour tout projet de renforcement par colonnes ; c. à d. elle est indépendante du procédé de renforcement, de la forme de la fondation et du maillage adopté pour les colonnes.

En terme de capacité portante : la capacité portante réelle du sol renforcé sera déterminée pour la valeur du facteur de substitution qui sera retenue à partir de (15), notamment lorsqu'on adopte le modèle « groupe de colonnes » qui dépend de η tel que proposé par Bouassida et col (1995).

Dans le cas où on est amené à opter pour des colonnes flottantes, le calcul de la capacité portante est fait de la même manière que pour le cas des colonnes reposant sur un substratum rigide sous réserve d'une limitation sur la longueur des colonnes. Cette dernière qui est indépendante du facteur de substitution, est toujours vérifiée dans la pratique du moins pour les cas de renforcement courants (Bouassida, 2000). De ce fait, la détermination de la valeur minimale du facteur de substitution, ci-dessus présentée, reste valable également dans le cas d'un renforcement par colonnes flottantes.

En terme de tassement : l'estimation est faite à partir de l'expression (11) peut correspondre au comportement à court terme du sol, en adoptant les caractéristiques non drainées, et au comportement à long terme en adoptant les caractéristiques drainées.

La vérification proposée repose uniquement sur la donnée du tassement admissible absolu ; une deuxième vérification s'impose sur les tassements différentiels de l'ouvrage. Cette dernière pouvant être menée avec un calcul numérique (par éléments finis)

pour suivre le comportement de l'ouvrage sous l'action du chargement retenu.

La méthode proposée ne prend pas en compte l'amélioration des caractéristiques élastiques du sol suite à l'exécution des colonnes qui peut avoir lieu notamment lors d'une amélioration par vibro-compactage.

Pour le cas des colonnes flottantes, le tassement de la fondation est la somme d'un terme relatif à l'épaisseur du sol renforcé, noté δ_r , et d'un terme relatif à l'épaisseur sous-jacente en sol non renforcé, noté δ_{nr} . L'estimation du tassement δ_{nr} ne fait pas intervenir, d'une part, le facteur de substitution, et d'autre part, elle se fait indépendamment de l'estimation du tassement δ_r . Ainsi, à partir de (13) la détermination de η_{\max} ne concerne que le tassement de l'épaisseur en sol renforcé par les colonnes. D'où, le schéma de renforcement par colonnes flottantes peut être traité avec la méthode ici proposée en déterminant le facteur de substitution η_{\max} maximal à partir de l'expression (14) où le tassement admissible sera limité sur l'épaisseur en sol renforcé. Ce tassement admissible sera notée $\bar{\delta}_r$.

3.4 Avantages de la méthode proposée

L'encadrement (15) par les valeurs η_{\min} et η_{\max} est fait indépendamment de l'emplacement des colonnes sous la fondation et de sa surface S.

Une estimation du tassement du sol non renforcé peut être faite à partir de (11) en y posant $\eta = 0$. La comparaison de cette estimation du tassement avec celles obtenues par d'autres méthodes donne une idée sur les caractéristiques élastiques retenues notamment pour le sol encaissant.

Dans le cas où les données retenues pour le sol initial, ou bien pour le matériau constitutif des colonnes, ne sont pas représentatives, une aberration sur l'encadrement (15) est possible. La méthode proposée présente, donc, l'avantage d'être un indicateur permettant de vérifier le choix des caractéristiques retenues pour les constituants du sol renforcé.

3.5 Etapes du dimensionnement

A partir de l'expression (15) on retient une valeur du facteur de substitution. Ensuite, on détermine, dans l'ordre, les autres paramètres du renforcement comme suit :

* En fonction du type sol à renforcer, on fixe le procédé d'exécution à adopter (vibro-substitution, vibro-compactage, traitement par un liant, etc.), d'où le diamètre des colonnes, noté d_c , sera fixé.

* A partir de (1) on déduit le nombre de colonnes.

* En fonction du type de maillage retenu pour la mise en place des colonnes, on détermine l'espacement « e » à leur entraxe.

Les paramètres η , d_c , et e ont été déterminés, selon les méthodes retenues pour la calcul de la capacité portante et pour l'estimation du tassement, on quantifiera les performances escomptées du renforcement à savoir l'augmentation de la capacité portante et la réduction du tassement, et éventuellement l'accélération du temps de consolidation. A titre d'illustration, dans le paragraphe qui suit, on applique la méthode proposée pour l'étude de deux cas de renforcement par colonnes.

4 EXEMPLES D'ILLUSTRATION

4.1 Cas d'un réservoir circulaire : colonnes reposant sur un substratum rigide

Sur la coupe de sol représentée sur la figure 2, on se propose de fonder un réservoir d'hydrocarbures de diamètre 30 m, transmettant au sol une contrainte verticale supposée uniforme égale à 80 kPa. En raison de ses caractéristiques mécaniques satisfaisantes, on assimilera la couche de sable à un substratum rigide. Le renforcement de la couche d'argile molle, est fait par colonnes dont le matériau constitutif est un tout-venant de carrière ayant pour caractéristiques: $\varphi'_c = 40^\circ$;

$$E_c = 10E_s = 20000kPa ; \nu_c = 0,25.$$

A partir des règles pressiométriques, la capacité portante admissible de l'argile molle est estimée à : $\bar{\sigma}_s = 45kPa$; alors que le chargement apporté au

sol est : $\frac{Q_{réel}}{S} = 80kPa$, d'où le recours nécessaire à

un renforcement par colonnes. La contrainte admissible selon les règles prescrites, pour une colonne isolée ayant les caractéristiques ci-dessus, est :

$\bar{\sigma}_c = 260kPa$. Compte tenu de ces données, à partir de (10), on aura: $\eta_{\min} = 0,17$.

Par ailleurs, en adoptant les caractéristiques du ballast données sur la figure 2, une estimation du tassement du sol renforcé, à partir de (11), avec la valeur $\eta_{\min} = 0,17$ conduit à : $\delta_r = 15,8cm$.

On se propose de renforcer le sol par colonnes pour réduire davantage le tassement jusqu'à la valeur admissible : $\bar{\delta} = 10cm$. A partir de (14), on détermine : $\eta_{\max} = 0,22$.

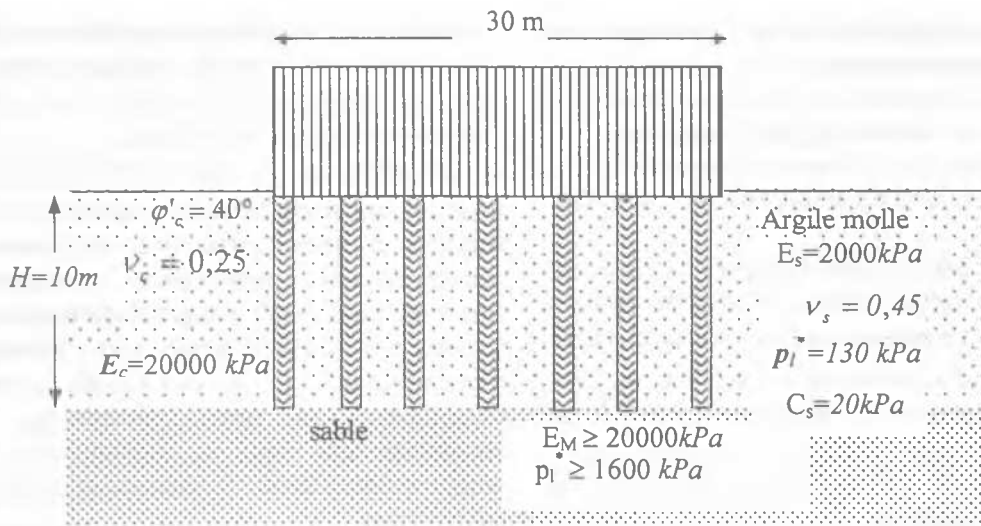


Figure 2. Réservoir d'hydrocarbures sur sol renforcé par colonnes ballastées reposant sur un substratum rigide

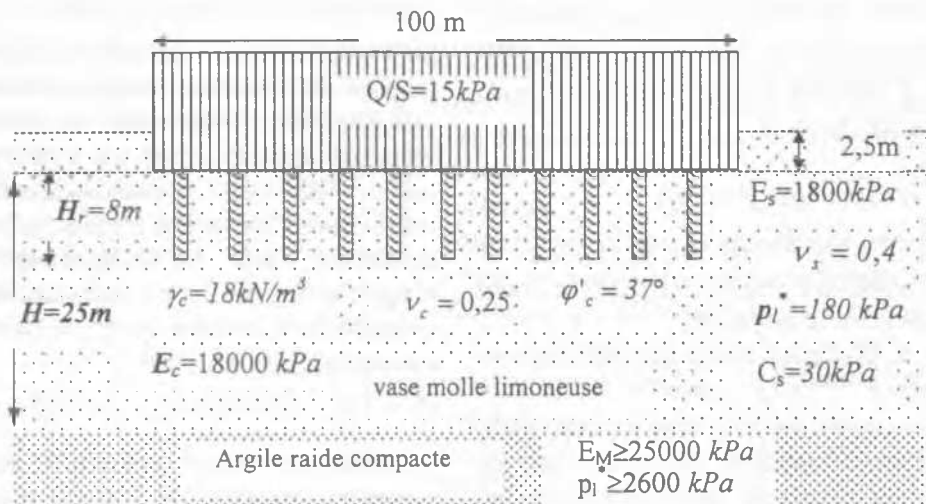


Figure 3. Bassin d'aération reposant sur sol renforcé par colonnes de sable flottantes

Ainsi, on conclut pour le cas analysé qu'il n'y a pas lieu de considérer une valeur du facteur de substitution à l'extérieur de l'intervalle $[0,17 ; 0,22]$. En fixant la valeur du facteur de substitution à $\eta = 0,20$, l'usage de plusieurs méthodes d'estimation du tassement du sol renforcé conduit aux résultats présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Estimations du tassement du sol renforcé (en élasticité linéaire) pour $\eta = 0,20$.

Méthode	Tassement (cm)
Balaam & Booker (1981)	7,3
Chow (1996)	7,4
Règles pressiométriques (1995)	10,7
Méthodes variationnelles (module équivalent)	14,3

La valeur retenue $\eta = 0,20$ correspond à un renforcement effectué avec 180 colonnes ballastées de diamètre 1 m réparties selon un maillage carré avec un espacement environ égal à 1,98 m. Cette valeur est très voisine de l'espacement optimum (assurant la meilleure capacité portante) préconisé par Bouassida et col (1995) défini par : « $2r_c \sqrt{K_p - 1}$ » avec : $r_c = 0,5m$ le rayon de la colonne, et $K_p = tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_c}{2} \right) = 4,6$.

Pour ce premier cas, on note que le recours au renforcement par colonnes a permis à la fois une augmentation de la capacité portante et une réduction significative du tassement.

4.2 Cas d'un bassin d'aération : renforcement par colonnes flottantes

Lors de la construction d'ouvrages de grandes dimensions (réservoirs, bassins d'aération, etc..) fondés sur une argile molle très compressible, le chargement transmis est souvent uniforme et modéré (inférieure à 80 kPa). Dans une situation pareille, la capacité portante admissible de l'argile molle est souvent vérifiée. Alors que les tassements estimés sont très prononcés. Le recours à la technique de renforcement par colonnes ballastées contribue à une réduction très significative du tassement à une valeur admissible (Bouassida et col. 2000). Dans ces conditions, on procède au dimensionnement d'un bassin d'aération, de longueur 100 m et de largeur 20 m, reposant sur une couche d'argile limoneuse d'épaisseur 25 m surmontant une couche d'argile raide calcareuse qu'on assimilera à un substratum rigide (Fig. 3).

Le bassin d'aération transmet au sol une contrainte additionnelle, supposée uniforme, estimée à 15 kPa. A partir des données pressiométriques, la capacité portante admissible du sol initial est estimée à 65 kPa. Ainsi, du point de vue capacité portante, il n'y a pas lieu de procéder à un traitement du sol. Par conséquent, la détermination de la valeur minimale du facteur de substitution n'a pas lieu dans ce cas.

Cependant, par la méthode oedométrique, le tassement de consolidation est estimé à 30 cm au centre de gravité du bassin. En outre ce tassement nécessite un temps de consolidation incompatible avec la durée prévue pour la mise en service du bassin d'aération. Pour ces raisons, il a été décidé de recourir à un renforcement par colonnes flottantes de longueur $H_r = 8m$. Sur cette profondeur, où se produit environ 70% du tassement total prévu, il faudra réduire le tassement du sol renforcé à la valeur admissible $\bar{\delta}_r = 3cm$ de sorte que le tassement total admissible soit de l'ordre de 10 cm.

Le choix $H_r = 8m$ respecte de même la condition requise sur la longueur à ne pas dépasser pour les colonnes lorsqu'elles sont flottantes, Bouassida (2000).

Pour l'argile molle limoneuse on adopte les caractéristiques suivantes :

$$C_s = 30kPa ; \quad \gamma_s = 16,5kN/m^3 ; \quad E_s = 1800kPa ; \\ \nu_s = 0,4.$$

Le matériau constitutif des colonnes qui jouent le rôle de drains est un sable mis en place par vibro-compactage dont les caractéristiques sont :

$$\varphi'_c = 37^\circ ; \quad \gamma_c = 18kN/m^3 ;$$

$$E_c = 10E_s = 18000kPa ; \quad \nu_c = 0,25.$$

Compte tenu de ces données, à partir de (14) on détermine la valeur maximale du facteur de substitution, soit : $\eta_{max} = 0,1358$.

Pour ce projet, la valeur retenue du facteur de substitution est $\eta = 0,0754$. En optant pour un maillage carrée des colonnes de diamètre $d_c = 0,4m$ avec un espacement égal à 0,8 m, le nombre total des colonnes est de 1200. Les valeurs du tassement sur l'épaisseur du sol renforcé sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Estimations du tassement du sol renforcé (en élasticité linéaire) pour $\eta = 0,0754$.

Méthode	Tassement (cm)
Balaam & Booker (1981)	1,8
Chow (1996)	1,7
Règles pressiométriques (1995)	2,4
Méthodes variationnelles (module équivalent)	3,5

Pour ce deuxième cas, on note que le recours au renforcement par colonnes a permis essentiellement une réduction significative du tassement. Alors que l'augmentation de la capacité portante n'est pas très significative devant celle du sol non renforcé.

Les estimations du tassement du sol renforcé par les méthodes indiquées dans les tableaux 1 et 2 montrent que :

- on prévoit le plus faible tassement en faisant l'hypothèse de déplacement latéral nul (en tout point de la cellule élémentaire) par la méthode de Chow (1996), et (sur la surface latérale de la cellule élémentaire) par la méthode de Balaam et col (1981).
- Le tassement le plus élevé (en terme de majorant) est prévu par l'approche variationnelle en élasticité linéaire qui ne fait pas intervenir l'hypothèse de déplacement latéral nul tout en utilisant la modélisation « groupe de colonnes ».
- L'usage des règles pressiométriques conduit à une estimation intermédiaire aux deux précédentes.

5 CONCLUSION

Une nouvelle méthode de dimensionnement d'une fondation sur sol renforcé par colonnes a été présentée. Cette méthode, basée sur le modèle « groupe de colonnes », est applicable à tous les cas pratiques de renforcement. Son intérêt pratique réside dans l'optimisation du choix de la valeur du facteur de substitution en procédant successivement aux vérifications de la capacité portante et du tassement. L'étude du cas des colonnes flottantes, auquel le recours est tout à fait justifiable, constitue un autre

avantage de la méthode proposée. A titre d'illustration, la méthode de dimensionnement proposée a été appliquée pour étudier deux cas pratiques de renforcement par colonnes. Cette méthode devra servir de guide en vue d'élaborer un logiciel de dimensionnement des fondations sur sol renforcé par colonnes.

6 REFERENCES

- Aboshi H., Ichimoto E., Enoki M., Harada K. 1979. The compozer: a method to improve characteristics of soft clay by inclusion of large diameter sand columns. Proc. Int. Conf. on Soil Reinforcements : reinforced earth and other techniques. Paris, vol 1, 211-216.
- Amar S., Clarke B., Gambin M., Orr T. 1994. Utilisation des résultats des essais pressiométriques pour le dimensionnement des fondations en Europe, 1ère partie, 25-47.
- Balaam N.P., Booker J.R. 1981. Analysis of rigid rafts supported by granular piles. Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol 5, No 4, 379-403.
- Barksdale R.D., Bachus R.C. 1983. Design and construction of stone columns, Vol 1. Final report n° FHWA/RD 83-026. US Federal Highway Administration, Washington.
- Bouassida M., de Buhan P., Dormieux L. 1995. Bearing capacity of a foundation resting on a soil reinforced by a group of columns. Géotechnique, Vol 45, n°1, 25-34.
- Bouassida M.; Hadhri T. 1998. Capacité portante d'une fondation posée sur un sol renforcé par un groupe de colonnes. Revue Marocaine de Génie Civil, n° 78, 2-16.
- Bouassida M., Guetif Z. 2000. Etude Comparative « pieux-colonnes » ; Cas du siège des Chèques postaux à Tunis. Actes du Séminaire : « Le Renforcement des Sols : état de l'art et perspectives en Tunisie » 19-20 oct., Hammamet, 65-78.
- Bouassida M. 2000. Bearing Capacity of Soils Reinforced by Floating Columns. Proc. 4th It. Conf. GIGS. Helsinki 7-9 June, 439-448.
- Bouassida M., Guetif Z., Dormieux L., de Buhan P. 2001. Estimation par une approche variationnelle du tassement d'une fondation sur sol renforcé par. Soumis pour publication à la Revue Française de Géotechnique.
- Broms B. B. 2000. Lime and Lime/Cement Columns. Summary and Visions. Proc. Keynote lectures NGM-2000 and 4th GIGS, Helsinki 7-9 June, 43-93.
- Chow Y. K. 1996. Settlement Analysis of Sand Compaction Pile. Soils and Foundations Vol. 36, No 1, 111-113. Japanese Geotech. Society.
- Enoki M., Yagi N., Yatabe R. 1991. Evaluation of Bearing Capacity Analysis Method of Improved Ground. Proc. GEO-COAST'91, 3-6 Sept. Yokohama.
- Poorooshasb H. B., Meyerhof G. G. 1997. Analysis of behavior of stone columns and lime columns. Computers & Geotechnics, Vol 20, No 1, 47-70.
- Priebe, J. 1995. The design of vibro-replacement. Ground Engineering, December.