

#

Étude expérimentale du renforcement de la vase de Tunis par colonnes de sable – Application pour la validation de la résistance en compression théorique d'une cellule composite confinée

M. BOUASSIDA

Laboratoire de Modélisation
et de Calcul des Structures,
École Nationale d'Ingénieurs
de Tunis
BP 37 Le Belvédère
1002 Tunis, Tunisie

Résumé

On étudie expérimentalement les effets du renforcement par un sable d'une vase molle de Tunis reconstituée en laboratoire. L'étude, pour cette vase renforcée, est entreprise dans le cadre d'un modèle théorique d'une cellule composite confinée. Après quelques essais d'identification, les caractéristiques mécaniques et de compressibilité de la vase reconstituée et de la vase renforcée ont été déterminées à partir d'essais triaxiaux et œdométriques. L'ensemble des résultats obtenus a permis de quantifier l'augmentation de la résistance au cisaillement et la diminution du tassement de la vase renforcée par rapport à celui de la vase reconstituée. En outre, avec les résultats expérimentaux, on a vérifié que le modèle théorique de la cellule composite retrace d'une manière satisfaisante l'augmentation de la résistance en compression de la vase renforcée. A partir du même modèle, une validation des caractéristiques mécaniques équivalentes de la vase renforcée a été faite.

An experimental study for a clay of Tunis reinforced by sand columns – Application to the validation of the theoretical compressive strength of a confined composite cell

Abstract

The reinforcement with a sand of a reconstituted soft clay of Tunis is studied through an experimental laboratory investigation. For the reinforced clay, this study is investigated in the framework of a theoretical model namely: a confined composite cell. The characteristics of the reconstituted clay and the reinforced clay have been determined from identification, triaxial and oedometer tests. The obtained results illustrate clearly the increase in shear strength and the reduction of settlement of the reinforced clay with respect to the reconstituted clay. Besides, by the experimental results, it has been verified that the model of the confined composite cell confirms well the increase in compressive strength of the reinforced clay. From the same model, a validation has been made for the equivalent mechanical characteristics of the reinforced clay.

Introduction

Le renforcement d'un sol mou par des colonnes constituées par un matériau drainant est une opération qui permet d'une part la réduction de son tassement et l'accélération de son temps de consolidation et, d'autre part, l'augmentation de la capacité portante des fondations posées sur un tel sol. Afin de quantifier ces avantages, il est indispensable de procéder à une expérimentation qui peut être menée soit en laboratoire sur un modèle réduit, soit en vraie grandeur (en place). L'étude d'un modèle réduit de sol fin renforcé par une colonne de sable a été conduite par plusieurs auteurs dans différents buts. Enoki (1987) a analysé la réduction du tassement et l'augmentation de la capacité portante, à partir desquelles il a expliqué l'effet de concentration de la contrainte verticale sur la colonne, qui se produit lors du chargement. Juran *et al.* (1988) ont étudié l'évolution du facteur de concentration de la contrainte verticale au cours du chargement, etc. Très récemment, Asaoka *et al.* (1994) ont étudié expérimentalement et numériquement les aspects relatifs à l'augmentation de la résistance au cisaillement et à la consolidation d'une argile reconstituée de Kawasaki renforcée par un pieu de sable. En somme, une étude expérimentale en laboratoire permet toujours de tirer certains enseignements utiles pour mieux aborder l'expérimentation en vraie grandeur (Aboshi *et al.*, 1979).

L'expérimentation en vraie grandeur a connu plusieurs contributions, telle que celle faite par Aboshi *et al.* (1979) qui ont étudié les effets de renforcement d'un sol fin saturé par des matériaux frottants et drainants. Bergado *et al.* (1984) ont étudié le renforcement d'une argile molle par colonnes ballastées et par drains verticaux de sable. Lors de cette étude, il a été vérifié que la charge ultime d'une colonne isolée est de l'ordre de trois à quatre fois la capacité portante du sol non renforcé. Dans une deuxième étude, Bergado *et al.* (1987) ont étudié l'influence de la composition granulométrique du matériau constitutif de la colonne et l'influence de la densité de compactage sur la charge ultime d'une colonne et sur le tassement du sol renforcé. Cette étude a permis de conclure que le meilleur matériau qui réalise les performances citées plus haut est un gravier ayant un angle de frottement élevé et mis en place avec une énergie de compactage modérée. Les mesures obtenues lors d'essais de chargement (Bergado *et al.*, 1984) ont permis de valider d'une manière satisfaisante la borne supérieure de la capacité portante d'une colonne isolée présentée par Bouassida *et al.* (1995b). D'autres études expérimentales en place, relatives au renforcement d'argiles molles par traitement à la chaux, ont été également faites par Broms (1982), Soyez *et al.* (1983), etc.

Dans le présent travail, une étude expérimentale est entreprise sur un modèle réduit d'une cellule composite constituée d'une vase de Tunis reconstituée dont le renforcement est fait par une colonne de sable. En premier lieu, on décrit la reconstitution de la vase et on justifie le choix du sable retenu pour le renforcement. En second lieu, on présente la confection du modèle réduit de la vase renforcée par une colonne de sable. Ensuite, on présente les essais réalisés sur la vase reconstituée et sur la vase renforcée. Les résultats expérimentaux obtenus sur le modèle de la vase renforcée serviront pour quantifier la réduction du tassement et l'augmentation de la résistance de la vase dues au renforcement.

A l'aide des résultats expérimentaux, on procède à la validation de la résistance en compression d'une cellule composite confinée, dont l'étude théorique a été présentée par Bouassida *et al.* (1995a). On présente également une validation des caractéristiques mécaniques équivalentes de la vase renforcée.

Étude expérimentale

Reconstitution de la vase

Le sol mou qui fait l'objet de l'expérimentation est une vase remaniée extraite du lac sud de Tunis à une profondeur de 5 m. Cette vase est de couleur vert grisâtre, elle a une odeur caractéristique et présente des débris de coquillages. Il a été jugé utile de reconstituer la vase naturelle afin d'avoir un matériau homogène. En effet, l'hypothèse d'homogénéité est fondamentale pour procéder à la validation du modèle théorique de la cellule composite confinée. La première phase de la reconstitution consiste à tamiser la vase naturelle sous l'eau à travers le tamis d'ouverture 100 microns. Le tamisat est ensuite séché à l'air libre jusqu'à obtenir une pâte dont la teneur en eau est de l'ordre de 110 % qui correspond environ à 1,5 fois la limite de liquidité de la vase naturelle.

La deuxième phase de reconstitution de la vase de Tunis consiste en une consolidation initiale, suivant un chemin œdométrique, dans des cellules en plexiglas de diamètre 200 mm et de hauteur 250 mm. Au cours de cette consolidation, cinq paliers de chargement successifs ont été appliqués, sous les contraintes 5 kPa, 10 kPa, 20 kPa, 35 kPa et 60 kPa. Chaque palier de chargement est maintenu constant pendant dix jours pour assurer la dissipation totale des surpressions interstitielles créées dans la vase reconstituée. A la fin de la consolidation initiale, un test d'homogénéité a permis de vérifier que la teneur en eau des échantillons de la vase reconstituée est quasiment homogène ($\omega = 51\%$), (Boussetta *et al.*, 1994).

Les essais réalisés sur la vase reconstituée

Une analyse granulométrique par sédimentométrie de la vase reconstituée a fourni la composition suivante : 100 % des particules < 80 microns, 87 % des particules < 20 microns, 55 % des particules < 2 microns. L'identification de la vase reconstituée a permis la détermination des paramètres suivants :

- poids volumique humide : $\gamma = 16,6 \text{ kN/m}^3$
- poids volumique des grains solides : $\gamma_s = 26 \text{ kN/m}^3$
- limite de liquidité : $W_L = 73\%$
- indice de plasticité : $IP = 47$

Ces paramètres indiquent que la vase reconstituée est une argile très plastique.

Un essai œdométrique avec mesure de la perméabilité verticale, a permis d'obtenir les valeurs des caractéristiques de consolidation de la vase reconstituée qui sont :

- un coefficient de consolidation verticale : $c_v = 0,2 \times 10^{-8}$ à $0,7 \times 10^{-8}$ m²/s ;

- la perméabilité verticale : $k_v = 10^{-7}$ à 10^{-8} m/s.

A partir de la courbe œdométrique représentée sur la figure 1 (1 bar = 100 kPa), on constate bien que la vase reconstituée est un sol vierge ayant les caractéristiques suivantes :

- une contrainte de préconsolidation égale à 50 kPa ; elle est voisine de la contrainte verticale effective appliquée lors de la consolidation initiale, soit 60 kPa ;

- un indice de compressibilité $C_c = 0,48$ qui montre qu'il s'agit d'un sol très compressible.

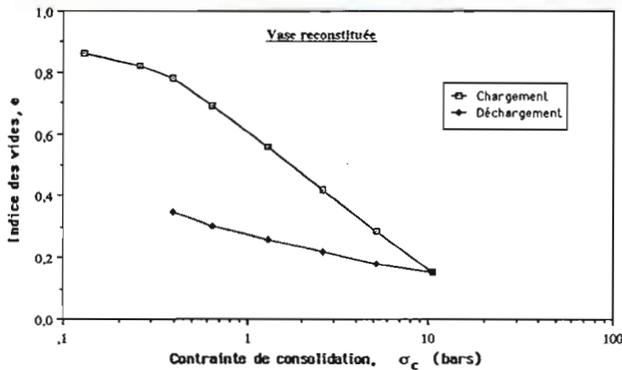


FIG. 1 Courbe œdométrique de la vase reconstituée.
Oedometric curve of the reconstituted clay.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de la vase reconstituée, des essais triaxiaux non consolidés non drainés (UU) et des essais triaxiaux consolidés non drainés (CU) avec mesure de la pression interstitielle à la rupture ont été réalisés sur des échantillons de hauteur égale à 76 mm et de diamètre égal à 38 mm. Ces essais ont été effectués avec les contraintes de confinement $p = 100$ kPa, 150 kPa, et 200 kPa.

Lors des essais triaxiaux UU, le cisaillement a été fait avec une vitesse du déplacement vertical égale à 1,14 mm/mn. Sur la figure 2, on présente la courbe enveloppe des cercles de Mohr relatifs aux essais triaxiaux UU, à partir de laquelle on détermine les caractéristiques suivantes pour la vase reconstituée :

$$C_u = 8 \text{ kPa} ; \varphi_u = 3^\circ$$

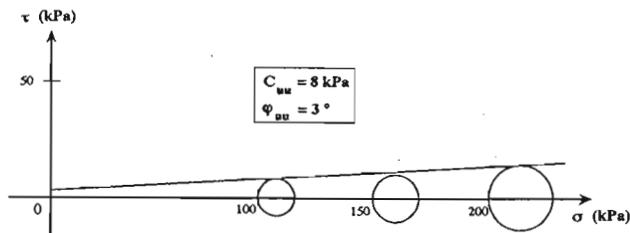


FIG. 2 Courbe enveloppe de la vase reconstituée obtenue à partir d'essais triaxiaux non consolidés non drainés (UU).
Shear strength line of the reconstituted clay from unconsolidated undrained (UU) triaxial tests.

Afin de vérifier la valeur de la cohésion non drainée C_u de la vase reconstituée, trouvée à partir des essais triaxiaux UU, on a procédé à une détermination de C_u avec le scissomètre de laboratoire. Ce dernier a permis d'obtenir une valeur moyenne de la cohésion non drainée qui est égale à 13 kPa. Sachant, d'une part, que la

valeur de la cohésion non drainée déduite à partir de l'essai scissométrique est surestimée (Costet *et al.*, 1983), et que, d'autre part, pour une argile molle très plastique l'angle de frottement interne est généralement nul, pour procéder à la validation du modèle théorique de la cellule composite confinée, on retiendra, pour la vase reconstituée, les caractéristiques non consolidées non drainées suivantes :

$$C_u = 10 \text{ kPa} ; \varphi_u = 0 \quad (1)$$

Les essais triaxiaux CU, ont été précédés par l'application d'une contrepression égale à 200 kPa dans les échantillons, afin d'assurer une saturation meilleure de la vase reconstituée. Lors de ces essais, le cisaillement a été fait avec une vitesse du déplacement vertical égale à 0,045 mm/mn. Les valeurs de la pression interstitielle sont mesurées dans les échantillons à la rupture. Sur la figure 3, sont présentés les résultats des essais triaxiaux consolidés non drainés (CU), à partir desquels on détermine :

- la courbe enveloppe correspondant au comportement à court terme, définie par les caractéristiques :

$$C_{cu} = 6 \text{ kPa} ; \varphi_{cu} = 15^\circ \quad (2)$$

- la courbe intrinsèque correspondant au comportement à long terme, définie par les caractéristiques :

$$C' = 3 \text{ kPa} ; \varphi' = 28^\circ \quad (3)$$

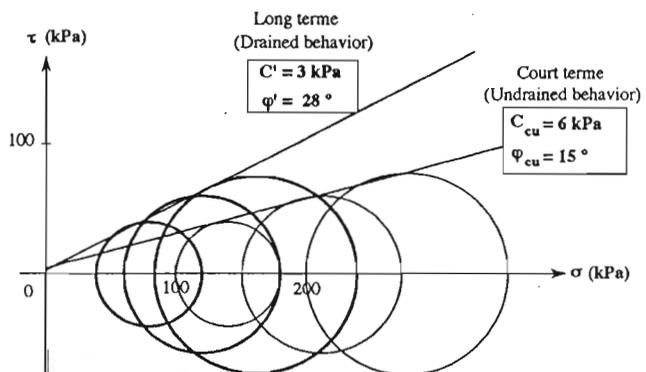


FIG. 3 Courbes enveloppe et intrinsèque de la vase reconstituée déterminées à partir d'essais triaxiaux consolidés non drainés (CU) avec mesure de la pression interstitielle.

Shear strength lines of the reconstituted clay from consolidated undrained (CU) triaxial tests with the measure of pore water pressure.

A partir de la figure 4, il est intéressant de noter que les résultats expérimentaux relatifs au comportement à court terme confirment très bien la relation donnant l'évolution théorique de la cohésion non drainée C_u en fonction de la contrainte de consolidation p_c . A partir de l'essai triaxial CU, cette relation est donnée par :

$$C_u(p_c) = C_{cu} \frac{\cos \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}} + p_c \frac{\sin \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}} \quad (4)$$

où φ_{cu} et C_{cu} sont les caractéristiques mécaniques obtenues à partir d'essais triaxiaux consolidés non drainés CU, et dont les valeurs sont données par (2).

Une régression linéaire de la relation (4) avec les valeurs expérimentales mesurées pour C_u et pour p_c a été faite, elle a permis d'obtenir un coefficient de corrélation $r = 0,99$. Ce résultat confirme bien l'hypothèse d'homogénéité de la vase reconstituée.

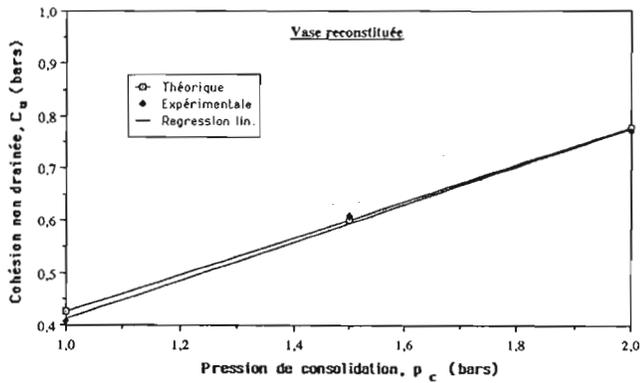


FIG. 4 Validation expérimentale de la variation de la cohésion non drainée C_u en fonction de la pression de consolidation p_c . Comparison between experimental and theoretical values of the undrained cohesion C_u .

2.3

Choix du sable constitutif de la colonne et procédé de mise en place

2.3.1

Le sable retenu

Le sable convenable pour le renforcement doit présenter :

- des caractéristiques de drainage adéquates pour accélérer la consolidation de la vase reconstituée, Magnan (1983);
- un angle de frottement interne élevé ($\phi \geq 38^\circ$) pour augmenter la résistance au cisaillement.

Des essais granulométriques et de cisaillement direct ont été effectués sur trois types de sable (Boussetta *et al.*, 1994). Le choix final a porté sur le sable de la carrière de Khelédia qui constitue un matériau pulvérulent dont la granulométrie s'inscrit dans le fuseau des matériaux filtrants, Magnan (1983). Ce sable qui est bien approprié pour renforcer la vase reconstituée présente les caractéristiques suivantes (Boussetta *et al.*, 1994):

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3; \phi = 40^\circ \quad (5)$$

2.3.2

Confection des échantillons des vases reconstituée et renforcée

A partir de chaque cellule de consolidation initiale, on extrait à l'aide d'un cylindre métallique, de diamètre intérieur égal à 70 mm et de hauteur égale à 150 mm, trois échantillons de vase reconstituée (Fig. 5). Ces dimensions du moule permettent de respecter l'effet d'échelle entre la taille des grains de sable et les particules de la vase. Pour la mise en place de la colonne de sable dans un échantillon de vase reconstituée, on simule les phases essentielles du procédé d'exécution par vibroflottation (Soyez, 1985). Dans un cylindre métallique rempli de vase reconstituée, on enfonce un tube métallique de diamètre intérieur égal à celui de la colonne et terminé par un obturateur de forme conique. Par conséquent, la vase molle est refoulée latéralement vers la paroi du cylindre métallique. Ensuite,

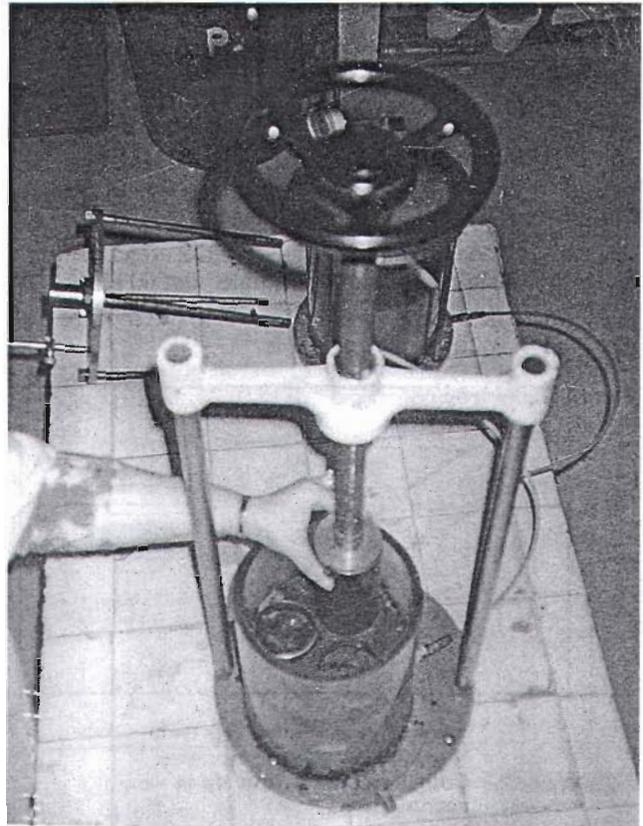


FIG. 5 Extraction des échantillons de la vase reconstituée à partir d'une cellule de consolidation initiale. Extraction of reconstituted clay samples from initial consolidation cell.

le sable est versé sous forme humidifiée dans le tube métallique, en arrachant ce dernier par de légères secousses verticales, l'obturateur conique s'ouvre sous l'effet du poids de sable. Ainsi, la colonne de sable prend forme lorsque le tube métallique est entièrement récupéré (Fig. 6). Enfin, l'échantillon cylindrique de la vase reconstituée est extrait à partir du cylindre métallique par un piston en y appliquant très lentement une faible pression d'air comprimé pour éviter au maximum le remaniement. Le renforcement est caractérisé par le facteur de substitution, noté η , qui est défini par :

$$\eta = \frac{S_c}{S}$$

où :

S_c désigne la section de la colonne de sable ;

S désigne la section totale du cylindre de la vase renforcée.

2.4

Les essais réalisés sur le modèle de la vase renforcée

Le modèle de la vase renforcée réalisé au laboratoire s'inscrit dans le cadre du modèle de la cellule composite confinée présenté par Bouassida *et al.* (1995a), et pour lequel un bref aperçu est consacré plus loin. Pour le diamètre de la colonne, deux valeurs ont été considérées, elles correspondent respectivement

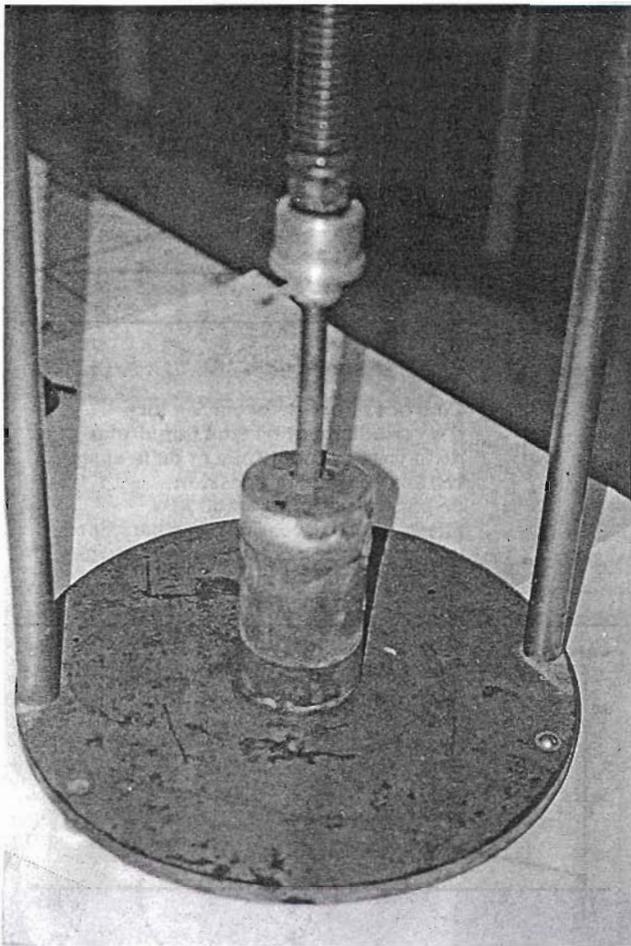


FIG. 6 Mise en place de la colonne de sable dans un échantillon de vase reconstituée. Execution of sand column in a reconstituted clay sample.

aux valeurs du facteur de substitution η qui ont été adoptées par d'autres auteurs (Enoki, 1987; Juran *et al.*, 1988): $\eta = 1/25$ et $\eta = 4/25$. Il convient de noter que ces valeurs encadrent celles du facteur η utilisées couramment dans la pratique.

La réalisation d'un essai œdométrique à colonne centrale (Boussetta *et al.*, 1994), sur le modèle de la vase renforcée, a permis de déterminer le coefficient de consolidation radiale c_r qui est de l'ordre de $4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. La présence de la colonne de sable favorise le drainage de l'eau suivant les directions radiales dans la vase. En effet, la perméabilité horizontale de la vase, qui est un sol fin, est très élevée par rapport à sa perméabilité verticale (Philipponat, 1987). Cette propriété est confirmée par les essais œdométriques effectués, qui ont permis d'obtenir un rapport égal à 10 entre les coefficients de consolidation radiale c_r et verticale c_v . L'évolution de la déformation verticale, au cours de l'essai œdométrique, en fonction de la contrainte de consolidation est donnée sur la figure 7 (1 bar = 100 kPa).

Le calcul de β , défini par Soyez *et al.* (1983) comme étant le rapport entre le tassement du sol non renforcé au tassement du sol renforcé sous la même contrainte (c'est une moyenne obtenue pour tous les paliers de chargement), a fourni les valeurs suivantes :

- pour $\eta = 1/25$: $\beta = 1,5$;
- pour $\eta = 4/25$: $\beta = 2$;

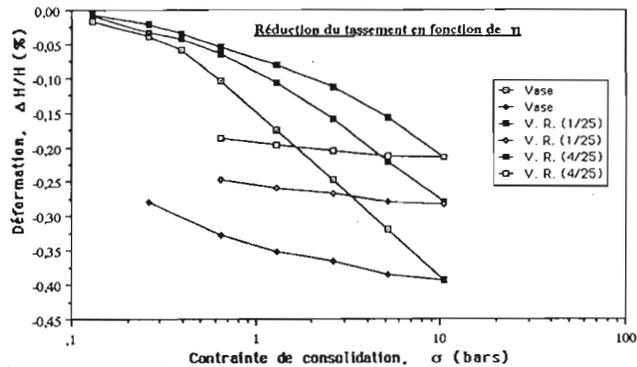


FIG. 7 Courbes œdométriques de la vase reconstituée et de la vase renforcée (VR). Oedometric curves of the reconstituted clay (vase) and the reinforced clay (VR).

Ces valeurs de β indiquent que le renforcement par le sable conduit à une réduction du tassement respectivement égale à 50 % et à 100 %. On constate que, lorsque le renforcement de la vase reconstituée par le sable augmente, la réduction du tassement est davantage importante. Ces résultats illustrent bien le rôle joué par la colonne de sable dans la réduction du tassement de la vase reconstituée.

Des essais triaxiaux non consolidés non drainés (UU) ont été réalisés sur la vase renforcée pour les valeurs du facteur de substitution $\eta = 1/25$ et $\eta = 4/25$. Pour chaque cas, les essais ont été faits avec les valeurs suivantes de la contrainte de confinement p : 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa et 200 kPa. Les essais triaxiaux UU effectués sur la vase renforcée n'ont pas été précédés par l'application d'une contrepression dans les échantillons tel qu'il a été fait pour les essais CU réalisés sur la vase reconstituée. Ce qui revient à faire des essais sur des échantillons dont l'état de saturation n'a pas été vérifié au préalable notamment pour le sable constitutif de la colonne. Les essais triaxiaux UU sont non drainés extérieurement, lors des phases de confinement et du cisaillement un drainage d'eau pourrait avoir lieu à partir de la vase reconstituée vers la colonne de sable. Ce drainage s'accompagnerait logiquement d'une variation du volume de la vase reconstituée et d'une augmentation du degré de saturation du sable. Or, la perméabilité de la vase est très faible, la quantité d'eau drainée vers la colonne serait de même très faible pour qu'elle puisse saturer le sable dont la mise en place a été faite à l'état humidifié. En effet, à la fin des essais, un examen visuel de coupes longitudinales des échantillons a permis de constater que le sable se trouvait notamment au milieu de la colonne dans un état relativement sec. Ce qui confirme que la saturation totale du sable n'est pas homogène, et qu'une pression interstitielle non négligeable est loin d'y être créée. Pour ces raisons, la mesure de la pression interstitielle au cours des essais triaxiaux UU faits sur la vase renforcée ne conduirait pas à des valeurs significatives.

Deux exemples de courbes effort-déformation sont donnés sur les figures 8a et 8b. Les résultats des essais triaxiaux sont représentés sur les figures 9 et 10.

Les courbes enveloppes (ou intrinsèques) obtenues pour le sable, pour la vase reconstituée, et pour la vase renforcée sont regroupées sur la figure 11. A partir de cette figure, on note que, lorsque le facteur de substitution η augmente, le renforcement par le sable améliore

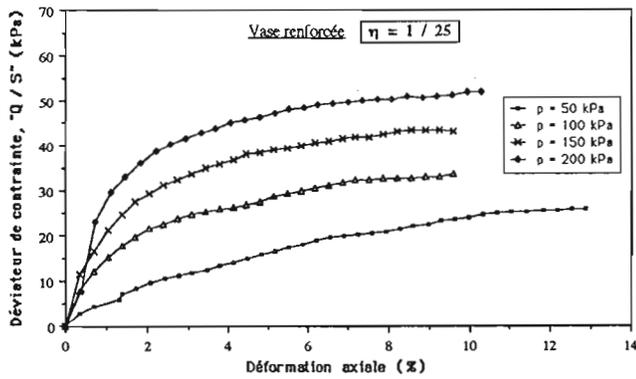


FIG. 8a Courbes effort-déformation lors d'un cisaillement triaxial non drainé, cas de la vase renforcée pour $\eta = 1/25$. Stress-strain curves during an undrained triaxial shear test, case of the reinforced clay for $\eta = 1/25$.

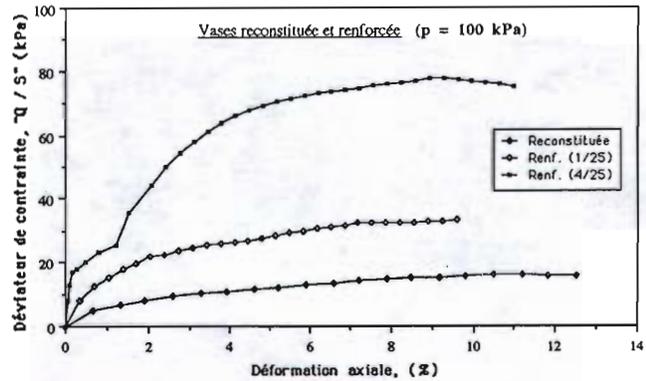


FIG. 8b Courbes effort-déformation lors d'un cisaillement triaxial non drainé, de la vase reconstituée et de la vase renforcée pour la pression de consolidation $p = 100$ kPa. Stress-strain curves during an undrained triaxial shear test of the reconstituted clay and the reinforced clay for the consolidation pressure $p = 100$ kPa.

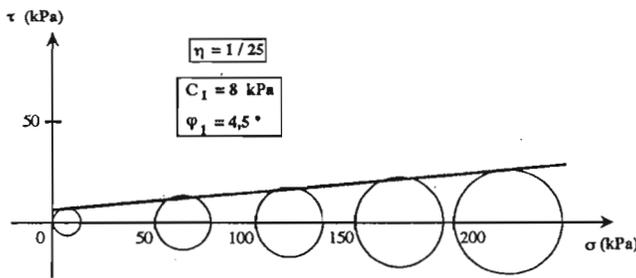


FIG. 9 Courbe enveloppe de la vase renforcée à partir d'essais triaxiaux non consolidés non drainés pour $\eta = 1/25$. Shear strength line of the reinforced clay from unconsolidated undrained (UU) triaxial tests for $\eta = 1/25$.

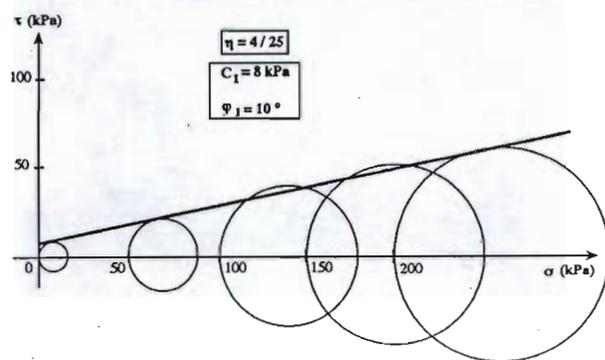


FIG. 10 Courbe enveloppe de la vase renforcée à partir d'essais triaxiaux non consolidés non drainés pour $\eta = 4/25$. Shear strength line of the reinforced clay from unconsolidated undrained (UU) triaxial tests for $\eta = 4/25$.

nettement la valeur de l'angle de frottement de la vase renforcée, et permet de conserver pratiquement la même valeur de la cohésion de la vase reconstituée. Ce résultat est évident, le sable étant purement frottant lorsqu'il renforce davantage la vase (étant purement cohérente), l'angle de frottement interne de la vase renforcée augmente.

Compte tenu des résultats expérimentaux présentés ci-dessus, on se propose de les valider à partir du modèle théorique de la cellule composite confinée.

3

Validation expérimentale du modèle de la cellule composite confinée

3.1

Le modèle de la cellule composite confinée

Ce modèle, représenté sur les figures 12a et 12 b, est constitué :

- d'une colonne de rayon r_c constituée par un matériau cohérent et frottant de cohésion C et dont l'angle de frottement interne est φ ;

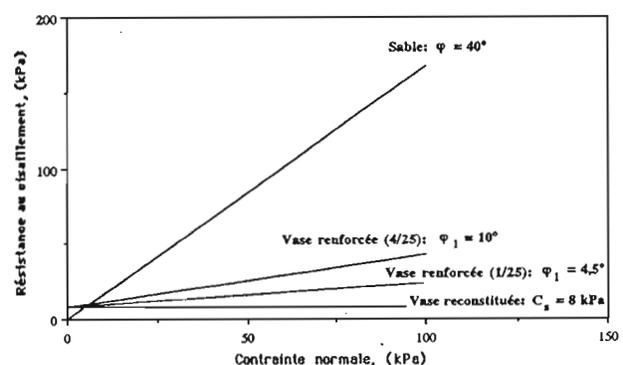


FIG. 11 Courbes enveloppes de la vase reconstituée, de la vase renforcée et du sable de renforcement. Shear strength lines of the reconstituted clay, the reinforced clay and the reinforcing sand.

- un volume de sol mou assimilé à un matériau purement cohérent de cohésion C_s , où R désigne le rayon du plus grand cercle inscrit dans la section transversale, notée S , de la cellule de hauteur égale à H .

Le sol et le matériau constitutif de la colonne sont supposés non pesants.

A l'aide des approches statique et cinématique de la théorie du calcul à la rupture (Salençon, 1983), la résistance en compression d'une cellule composite confinée (Fig. 12a), a été établie par Bouassida *et al.* (1995a) comme suit :

$$\left(\frac{Q(p)}{S}\right) = p[1 + \eta(K_p - 1)] + 2\eta C_s \sqrt{K_p} + C_s [2(1 - \eta) + \eta g(\varphi)] \quad (6)$$

où :

$$g(\varphi) = (K_p - 1) \text{Ln}(K_p - 1) - (K_p - 2) \quad (7)$$

et :

$$K_p = \text{tg}^2\left(\frac{\pi + \varphi}{4}\right)$$

sous la condition :

$$2 < K_p \leq 1 + \left(\frac{R}{r_c}\right)^2 \quad (8)$$

$K_p > 2$ (ou $\varphi \geq 19,5^\circ$) correspond à un renforcement réalisé par un matériau ayant un angle de frottement interne élevé (sable, gravier, ballast, etc.).

Dans l'équation (6), Q désigne la force résultante de compression, et p désigne la contrainte de confinement. L'équation (6) est donnée en termes de contraintes totales, ce qui correspond au comportement à court terme du sol renforcé.

Il convient de noter que l'expression (6) correspond à une résistance en compression maximale de la cellule à condition que le rayon r_1 de la zone intermédiaire de sol entourant la colonne de rayon r_c vérifie, la relation (Fig. 12b) :

$$r_1 = r_c \sqrt{K_p - 1} \leq R \quad (9)$$

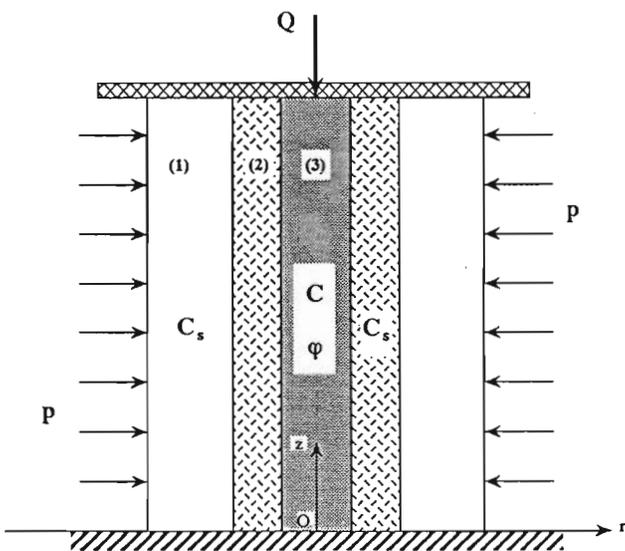


FIG. 12a Coupe, par un plan vertical, du modèle de la cellule composite confinée.
Vertical section of the model of the confined composite cell.

A partir de l'expression (6), on remarque que si $1 \leq K_p \leq 2$ ($0 < \varphi \leq 19,5^\circ$), on a alors $g(\varphi) = 0$. Pour cette situation, qui peut correspondre à un traitement du sol mou par un liant (de la chaux ou du ciment), il n'y a aucune restriction sur la valeur du rayon r_1 de la zone intermédiaire entourant la colonne (Fig. 12b).

Pour une cellule de section circulaire S considérée dans les conditions de l'essai triaxial classique la pression de confinement p est appliquée sur toute sa surface latérale (surface latérale $r = R$ et la plan $z = H$). On montre facilement que la résistance en compression dans les conditions de l'essai triaxial classique, notée $\left(\frac{Q^*(p)}{S}\right)$, s'écrit :

$$\left(\frac{Q^*(p)}{S}\right) = \left(\frac{Q(p)}{S}\right) - p \quad (10)$$

où $\left(\frac{Q(p)}{S}\right)$ est donnée par (6).

Lors de l'étude théorique du modèle de la cellule composite exposée par Bouassida *et al.* (1995a), la notion du matériau homogène équivalent a été introduite. Cette notion consiste à assimiler le sol renforcé par la colonne à un matériau homogène ayant les caractéristiques suivantes :

$$* 2 \leq K_p \leq 1 + \left(\frac{R}{r_c}\right)^2$$

$$** K_p^{éq} = \text{tg}^2\left(\frac{\pi + \varphi^{éq}}{4}\right) = 1 - \eta + \eta K_p \quad (11)$$

$$** C^{éq} = \frac{1}{\sqrt{K_p^{éq}}} [C_s \eta \sqrt{K_p} + C_s] \left[(1 - \eta) + \frac{1}{2} \eta g(\varphi) \right] \quad (12)$$

Les expressions (11) et (12) ne sont valables que lorsque les sollicitations du sol renforcé sont du type « triaxial de révolution ».

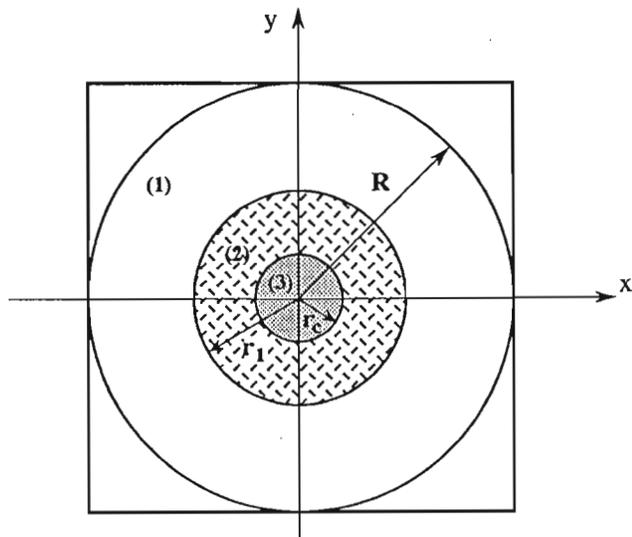


FIG. 12b Coupe transversale du modèle de la cellule composite confinée ; (1) sol mou, (2) zone intermédiaire dans le sol mou, (3) colonne.
Cross section of the model of the confined composite cell ; (1) soft clay, (2) intermediate zone (soft clay), (3) column.

Validation de la résistance en compression de la cellule composite

La validation du modèle de la cellule composite confinée pour le cas des échantillons de la vase renforcée est faite dans le cas $K_p > 2$, car le sable constituant la colonne a un angle de frottement $\varphi = 40^\circ$. Cette validation est faite sur la base de l'hypothèse postulant que, lors des essais triaxiaux UU réalisés sur les échantillons de la vase renforcée (voir § 2.4), la pression interstitielle est nulle au sein de la colonne de sable. Par conséquent, la valeur de l'angle de frottement interne $\varphi = 40^\circ$ du sable reste représentative même en termes de contraintes totales (comportement à court terme), cadre dans lequel la résistance théorique du modèle de la cellule composite a été déterminée.

La validation du résultat théorique, présenté par Bouassida *et al.* (1995a), relatif à la résistance en compression d'une cellule composite confinée est représentée sur les figures 13 et 14. On remarque une concordance parfaite entre les valeurs prédites par le modèle théorique et les valeurs expérimentales. Pour ces dernières, on a tracé les droites d'ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés. Pour les deux valeurs du facteur de substitution η , les équations de la droite d'ajustement linéaire et de la résistance théorique de la cellule composite s'écrivent respectivement :

* $\eta = 1/25$

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_{\text{exp}}^{1/25} = 1,195 p + 0,1406 \quad (13a)$$

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_{\text{th}}^{1/25} = 1,144 p + 0,208 \quad (13b)$$

où Q désigne la force résultante de compression appliquée, pendant l'essai triaxial, sur la cellule composite de section S .

Le coefficient de corrélation de la droite d'ajustement linéaire est $r_{1/25} = 0,998$.

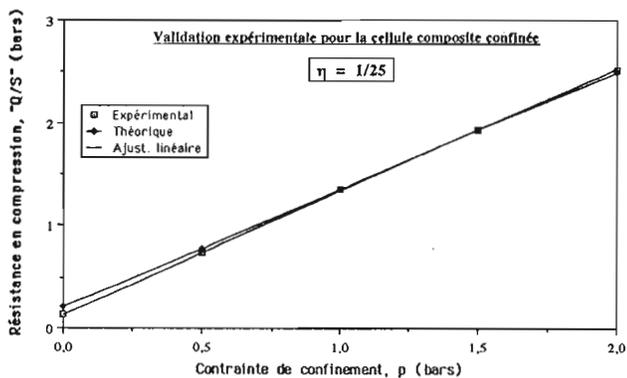


FIG. 13 Comparaison entre les valeurs théoriques et mesurées de la résistance en compression pour la vase renforcée dans le cas $\eta = 1/25$.

Comparison between theoretical and measured values of the compressive strength of the reinforced clay in the case $\eta = 1/25$.

* $\eta = 4/25$

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_{\text{exp}}^{4/25} = 1,554 p + 0,154 \quad (14a)$$

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_{\text{th}}^{4/25} = 1,576 p + 0,232 \quad (14b)$$

Le coefficient de corrélation de la droite d'ajustement linéaire est $r_{4/25} = 0,998$.

Dans les relations (13a), (13b), (14a) et (14b), la contrainte de confinement p est exprimée en bars (1 bar = 100 kPa).

Les différences entre les valeurs théoriques et expérimentales de la résistance de la cellule composite (en vase renforcée) ne sont sensibles que pour $p = 0$ (qui correspond au cas de la compression simple). En effet, pour ce cas particulier, la différence relative est de 50 % pour $\eta = 4/25$, et elle est de 47 % pour $\eta = 1/25$. Ces différences sont dues essentiellement au remaniement de l'échantillon de vase qui ne peut être évité lors de sa confection ; alors la résistance mesurée pourrait être inférieure à celle calculée théoriquement. La deuxième raison plausible permettant de mieux expliquer la diminution de la résistance en compression obtenue expérimentalement est le frottement entre les plateaux de chargement et l'échantillon. En effet, lors des essais triaxiaux réalisés, aucune disposition particulière n'a été prise en compte pour réduire ce frottement, par conséquent sa présence contribue certainement à une diminution de la résistance en compression théorique qui est calculée en supposant que ce frottement est nul.

Cependant, pour les pressions de confinement $50 \text{ kPa} \leq p \leq 200 \text{ kPa}$, la différence relative D_{rel} (en valeurs absolues) prend les valeurs suivantes :

– pour $\eta = 1/25$

p (kPa)	50	100	150	200
D_{rel} (%)	5,4	0,08	0,57	0,96

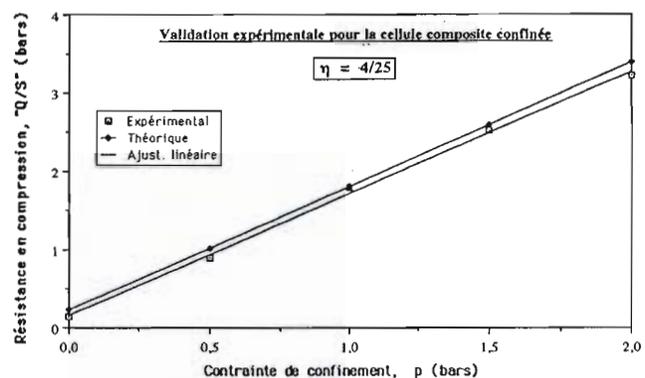


FIG. 14 Comparaison entre les valeurs théoriques et mesurées de la résistance en compression pour la vase renforcée dans le cas $\eta = 4/25$.

Comparison between theoretical and measured values of the compressive strength of the reinforced clay in the case $\eta = 4/25$.

– pour $\eta = 4/25$

p(kPa)	50	100	150	200
D_{rel} (%)	13,3	1,63	3,4	5,29

D'après les valeurs de D_{rel} données ci-dessus, on peut affirmer que la concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux est très satisfaisante. Ceci est dû à l'hypothèse d'homogénéité de la vase reconstituée, comme il l'a été vérifié par le biais de la corrélation obtenue pour la variation de la cohésion non drainée C_u en fonction de la pression de consolidation p_c à partir des essais triaxiaux consolidés non drainés effectués sur la vase reconstituée.

3.3

Validation des caractéristiques mécaniques équivalentes

D'après les caractéristiques de la vase reconstituée et du sable, données respectivement par (1) et (5), on détermine, à partir de (11) et (12), les valeurs théoriques des caractéristiques mécaniques équivalentes de la vase renforcée pour laquelle les valeurs expérimentales de ces caractéristiques (C_1, ϕ_1) sont données sur la figure 11. La comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales est faite à partir du tableau présenté ci-dessous.

TABEAU Valeurs théoriques et expérimentales des caractéristiques mécaniques de la vase renforcée.

Facteur de substitution	$\eta = 1/25$	$\eta = 4/25$
Valeurs théoriques	$C^{éq} = 10 \text{ kPa}$ $\phi^{éq} = 4,37^\circ$	$C^{éq} = 7,8 \text{ kPa}$ $\phi^{éq} = 14,38^\circ$
Valeurs expérimentales	$C_1 = 10 \text{ kPa}$ $\phi_1 = 4,5^\circ$	$C_1 = 8 \text{ kPa}$ $\phi_1 = 10^\circ$

A partir du tableau ci-dessus, on note une bonne concordance entre les caractéristiques théoriques et expérimentales pour les deux valeurs du facteur de substitution. Concernant l'angle de frottement, cette concordance est moins satisfaisante dans le cas $\eta = 4/25$.

4

Conclusion

Après avoir précisé les conditions de réalisation d'une cellule composite constituée d'une vase reconstituée renforcée par une colonne de sable, on a procédé à la détermination de ses caractéristiques mécaniques à partir d'essais triaxiaux non consolidés non drainés. Ces essais ont été réalisés pour deux cas de renforcement correspondant aux valeurs du facteur de substitution : $\eta = 1/25$ et $\eta = 4/25$. Avec les résultats expérimentaux obtenus, on a pu quantifier l'augmentation de la résistance au cisaillement et la réduction du tassement dues au renforcement de la vase reconstituée par le sable. Ensuite, on a procédé à la validation de la résistance en compression théorique d'une cellule composite confinée. Cette ébauche a permis de conclure que le modèle théorique en question retrace bien l'amélioration de la résistance en compression due au renforcement de la vase reconstituée. On en retient que :

- l'évolution de la résistance de la cellule composite, en fonction de la pression de confinement, est linéaire ;
- l'augmentation de la capacité portante est due principalement à la valeur de l'angle de frottement de la colonne et du facteur de substitution.

Il a été vérifié également que les valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques de la vase renforcée sont en bonne concordance avec les valeurs théoriques proposées, à partir du modèle de la cellule composite confinée, par la notion du matériau homogène équivalent.

La validation de la résistance théorique de la cellule composite, n'ayant été faite dans ce travail que pour un matériau de renforcement possédant un angle de frottement supérieur à $19,5^\circ$ (un sable), il est recommandé de procéder à une validation du modèle théorique lorsque le renforcement est fait par un matériau possédant un angle de frottement inférieur à $19,5^\circ$. Ce cas correspond, par exemple, au renforcement d'un sol mou par traitement à la chaux.

La validation expérimentale du modèle de la cellule composite confirme le résultat théorique obtenu pour le calcul de la résistance en compression. Ce qui permettra d'aborder la détermination de la capacité portante d'une fondation posée sur un sol renforcé par un groupe de colonnes, tel qu'il l'a été annoncé par Bouassida *et al.*, (1995a).

Remerciements

L'auteur présente ses vifs remerciements à Mme S. Boussetta pour sa contribution dans la réalisation de la partie expérimentale de cette étude, et aux responsables du Centre d'Essais et de la Technique de Construction (CETEC) du ministère de l'Équipement et de l'Habitat à Tunis pour lui avoir autorisé la réalisation des essais triaxiaux à la section « Fondations ».

Bibliographie

- Aboshi H., Ichimoto E., Enoki M., Harada K. – The « Compozer », a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. *CR Colloque Int. sur le Renforcement des sols : Terre armée et autres méthodes*, Paris, 1979, vol. 1, p. 211-216.
- Asaoka A., Kodaka T., Nozu M. – Undrained shear strength of clay improved with sand compaction piles. *Soils and Foundations*, 1994, vol. 34, n° 4, p. 23-32.
- Bergado D.T., Rantucci G., Widodo S. – Full scale load tests of granular piles and sand drains in the soft Bangkok clay. *Int. Conf. on in situ soil Rock Reinforcements*, 9-11 oct, Paris, 1984.
- Bergado D.T., Lam F.L. – Full scale load tests of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay. *Soils and Foundations*, Tokyo, 1987, vol. 27, n° 1, p. 86-93.
- Bouassida M., de Buhan P., Dormieux L. – Bearing capacity of a foundation resting on a soil reinforced by a group of columns. *Geotechnique*, vol. 45, n° 1, 1995a, p. 25-34.
- Bouassida M., Hadhri T. – Bearing capacity of soils reinforced by columns. *11th Afr. Reg. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Cairo, 11th-15 th December 1995b, vol. 2, p. 254-273.
- Boussetta S., Makhlouf S. – Étude expérimentale du renforcement de la vase de Tunis. PFE, dép. Génie civil, ENIT, Tunisie, 1994.
- Broms B.G. – Lime columns in theory and practice. *Proc. Inter. Conf. of Soil Mech.*, Mexico, 1982, p. 149-165.
- Costet J., Sanglerat G. – Cours pratique de mécanique des sols, Tome 2, « Calcul des ouvrages », Paris, Dunod, 1983.
- Enoki M. – Consolidation characteristics of composite ground. *Proc. 8th Asian Reg. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Japan, 1987, vol. 1, p. 361-364.
- Juran I., Guerhazi A. – Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns. *Journal of Geotech. Eng.*, 1988, vol. 114, n° 8, ASCE.
- Magnan J.-P. – Théorie et pratique des drains verticaux. *Technique et Documentation*, Paris, Lavoisier, 1983.
- Philipponat G. – Fondations et ouvrages en terre. Paris, Eyrolles, 2^e éd., 1987.
- Salençon J. – Calcul à la rupture et analyse limite. Paris, Presses des Ponts et Chaussées, 1983.
- Soyez B., Magnan J.-P., Delfaut A. – Loading tests on a clayey hydraulic fill stabilized by limetreated columns. *Proc. 8th Europ. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Helsinki, 1983, vol. 2, p. 951-954.
- Soyez B. – Méthodes de dimensionnement des colonnes ballastées. *Bull. liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, 1985, n° 135, p. 35-51.