
Etude expérimentale et modélisation numérique du comportement du sable renforcé par géosynthétiques

NOURI Said.^{1*}, LAMRI Belkacem¹, et NECHNECH Amar²

¹Département de Génie Civil, Université Hassiba Benbouali de Chlef

²Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et Technologie d'Alger

* nouri_said@yahoo.fr

RESUME

Durant ces dernières années, l'utilisation des matériaux géosynthétiques (géotextiles, géogrilles et géomembranes ...) apparaît très importante dans les travaux de génie civil et en particulier en géotechnique. Cet article présente une étude expérimentale et une modélisation numérique du comportement monotonique du matériau composite sable – géosynthétiques. L'étude est basée sur des essais triaxiaux drainés qui ont été réalisés sur des échantillons de sable de Chlef (Algérie) ayant un indice de densité $I_d=60\%$ renforcé par des nappes horizontales de matières plastiques. Une approche théorique par modélisation numérique par éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis a été entamée. Les différents résultats des essais triaxiaux sur un chemin de compression drainé de 100 kPa de confinement sont analysés et confrontés, ce qui permet de dégager une meilleure analyse des phénomènes observés.

Mots clés : Comportement des sables, Charge monotone, Géosynthétiques, Triaxial, Dilatance, Angle caractéristique, Module sécant, Modélisation, Plaxis.

ABSTRACT:

In recent years the use of geosynthetics (geotextiles, geogrids and geomembranes, ..) is very important in civil engineering and geotechnic. This paper presents an experimental study and numerical modeling of monotonic behavior of the composite sand - geosynthetics. The study is based on drained triaxial tests that were performed on sand samples of Chlef (Algeria) with a relative density $I_d = 60\%$ reinforced with horizontal layers of plastic. The theoretical approach by numerical modeling using finite element software Plaxis was initiated. This work deals with quasi-static triaxial tests on a path for drained compression of 100 kPa of confinement are analyzed and compared, allowing reaching a better analysis of the observed phenomena.

Keywords: Behavior of Sands, monotonic loading, geosynthetics, Triaxial, dilatancy, characteristics angle, Secant modulus, Modeling, Plaxis.

1. Introduction

Le renforcement des sols par des nappes géosynthétiques dans le domaine de génie civil et géotechnique n'est pas un événement vraiment nouveau. Cette technique a été développée dans plusieurs constructions géotechniques. Généralement ces produits ont une longue vie et ne subissent pas de déchéances biologiques. Le principe de ces techniques repose sur la mobilisation des efforts de traction induits dans le sol par les chargements extérieurs.

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence des matériaux synthétiques sur le comportement mécanique des sols, et par leurs expériences, ils ont montré que l'apport de ces matériaux a un effet significatif sur la résistance au cisaillement des sols ainsi que sur leurs caractéristiques mécaniques. L'utilisation des géotextiles dans le renforcement est la résolution d'une gamme très variée de problèmes géotechniques, dues d'une part à leur facilité de mise en œuvre et d'autre part à leur faible coût comparativement à des solutions plus conventionnelles (Gray et Ohashi 1983, Gray et Al-Refai 1986, Coulet et al. 1987). A partir des essais monotones réalisés par Billet, Cordary et Richa 1998 sur le sable d'Hostun renforcé par des nappes horizontales de géotextiles, qui concluent que l'inclusion de ces dernières améliore la résistance à la rupture et présente une phase contractante plus importante que celle obtenue par l'échantillon non renforcé.

Bao (2004) et à partir des essais à la boîte de cisaillement et l'appareil triaxial sur un sable de Chine renforcé par des géotextiles, a indiqué que l'inclusion des nappes provoque progressivement le cisaillement à grandes échelles de déformations. Des études théoriques et expérimentales ont été réalisées (Madhavi et al., 2007) pour observer l'effet d'échelle entre laboratoire et in situ. Des essais ont été effectués à l'appareil triaxial sur un sable renforcé par 8 nappes de polymère fabriqué en polyéthylène de haute densité.

Coulet, Rakotondramanitra et al. 1988, Dali et al. 1989, Messas (1999) ont proposé un nouveau procédé de renforcement géotechnique basé sur l'addition de déchets de matières plastiques (films agricoles, sacs d'emballage, etc.), dans les sols qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques de ces derniers. Les études aussi bien théoriques qu'expérimentales menées sur des essais en laboratoire et en vraie grandeur montrent que la résistance augmente en fonction de la quantité de matières plastiques et que la rupture n'est atteinte que dans le domaine des grandes déformations.

La conclusion commune de ces études a montré que l'ajout d'un nombre minimal de ces inclusions en forme de nappes au sable augmente nettement la résistance maximale de ce dernier, et améliore ses caractéristiques mécaniques. De plus, les échantillons renforcés ont présenté un effet de contractance typique en petites déformations axiales, par contre la dilatance est observée en grandes déformations.

2. Etude expérimentale

2.1. Propriétés du sol et matériau de renforcement

Le matériau utilisé dans ce travail est le sable de Chlef (Algérie), qui est un sable uniforme composé de 70% de sable moyen et de 30% de sable fin avec un diamètre moyen des particules $d_{50}=0,55$ mm et un coefficient d'uniformité $C_u=2,15$. Le poids volumique des particules solides est de $\gamma_s=2,65\text{g/cm}^3$. Les indices des vides maximal et minimal obtenus sont $e_{\max}=0,99$, $e_{\min}=0,64$. Les compacités maximales et minimales sont $15,6\text{ kN/m}^3$ et $12,9\text{ kN/m}^3$ respectivement. Le matériau de renforcement utilisé est constitué de nappes plastiques (polyéthylène translucide) commercialement disponible, de faible densité et de couleur blanche, il est très utilisé dans l'agriculture. Les nappes sont des films en disque des serres agricole de 51.8 kN/m de force de traction et 110% d'allongement.

2.2. Préparation de l'échantillon et programme d'essais

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais triaxiaux monotones drainés d'un sable non renforcé et renforcé par des nappes plastiques disposées horizontalement espacées de ΔH . Quatre espacements ΔH ont été choisis pour nos essais : 35mm, 23mm, 17,5mm et 11,5mm.

Les échantillons sont adoptés par compactage en cinq couches comme recommandé par Bishop et Henkel (1969), Ladd (1978), et Head (1986). La densité relative du sable a été maintenue constante autour de 60 % (sable moyennement dense). Les échantillons sont soumis à un chargement triaxial monotone à des contraintes de confinement initiales de 50, 100 et 200 kPa. Le cisaillement s'effectue à déplacement axial contrôlé avec une vitesse rapide (0,17mm/min, 15%/heure). La déformation axiale finale pour l'ensemble des échantillons est de l'ordre de 20%. Tous les échantillons testés présentent un coefficient B autour de 0.85.

2.3. Résultats et discussion

2.3.1. Comportement drainé du sable renforcé

Les courbes typiques reliant les déformations axiales (ϵ_a) au déviateur de contraintes ($\sigma_3-\sigma_1$) sont représentées par les figures 1a et 1b. Nous remarquons que l'espacement des nappes affecte d'une manière significative le comportement du sable. Par ailleurs, nous observons aussi que les contraintes déviatoires du sable renforcé croît avec la diminution de l'espacement des nappes plastiques. Dans les courbes obtenues, le pic est pratiquement inexistant et ceci peut être justifié par la taille de l'échantillon qui est courte ($H/\Phi=1$) ou par la vitesse rapide de cisaillement (de l'ordre de 15%/heure).

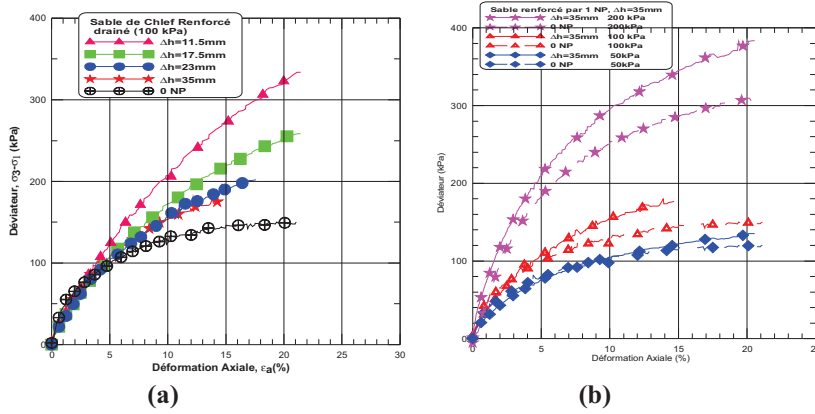


Figure 1. Déviateur de contrainte – Déformation axiale
 (a) *Sable renforcé par des nappes plastiques pour $\sigma_3=100kPa$,*
 (b) *Sable renforcé par 1 nappe pour $\sigma_3=50kPa, 100kPa, 200kPa$,*

La figure 2 présente l'évolution du déviateur maximal à 20% et du déviateur à 10% en fonction de l'espacement des nappes de renforcement. On constate que l'évolution du déviateur est quasi linéaire pour les deux cas, la pente du déviateur maximal à $\epsilon_a=20\%$ est plus accentuée que celle du déviateur déterminé à $\epsilon_a=10\%$. L'augmentation de ces déviateurs est tout à fait significative allant jusqu'à un taux très élevé de 60% à 106% pour q_{max} et $q_{10\%}$ respectivement, dans le cas d'un espacement minimal des nappes égal à 11,5mm.

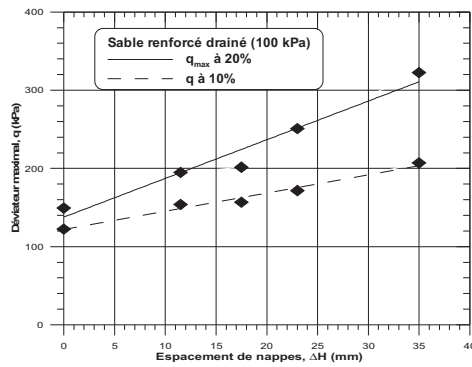


Figure 2. Evolution du déviateur maximal en fonction de l'espacement des nappes

La variation des déformations volumétriques est aussi influencée par la présence des nappes plastiques. Les courbes d'évolution des déformations volumétriques en fonction de la déformation sont représentées sur la figure 3. Cette variation traduit un comportement de contractance suivie d'une phase de dilatance. La comparaison

de l'ensemble de ces courbes montre que, pour le sable non renforcé et renforcé par une nappe, montre un phénomène de dilatance qui apparait rapidement à partir de 5% de déformation, alors que pour des espacements de 23, 17,5 et 11,5mm, la dilatance ne peut commencer qu'après 9%, 11% et 13% respectivement. Pour les quatre échantillons renforcés on observe finalement une stabilisation progressive du volume vers les grandes déformations.

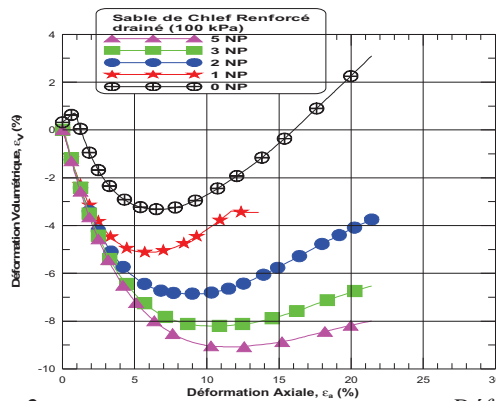


Figure 3. *Déformation volumétrique – déformation axiale*

2.3.2. Influence du renforcement sur les caractéristiques mécaniques du sable

La figure 4a montre l'évolution du module de déformation sécant (q/ϵ_a) avec la déformation axiale (ϵ_a). On observe que ce module croît significativement avec la diminution de l'espacement des nappes jusqu'à une déformation de 0,7%, ensuite le module tend à se stabiliser. La figure 4b montre l'influence du matériau de renforcement sur le module de déformation sécant mesuré à $\epsilon_a = 1\%$. On constate que ce module croît fortement avec la diminution de l'espacement des nappes de façon non linéaire jusqu'à un espacement de 23mm ensuite il tend à se stabiliser.

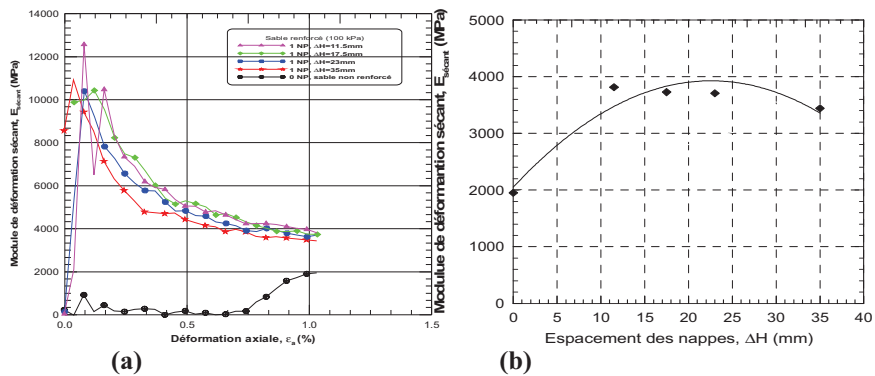


Figure 4. *Influence du matériau de renforcement sur le module sécant*

(a) Variation du module sécant-déformation, (b) module sécant à $\varepsilon_a=0.01$

La figure 5 montre la variation de l'angle caractéristique (correspondant au changement de phase contractance/dilatance) en fonction de l'espacement des nappes (ΔH). On remarque que l'angle caractéristique est très influencé par l'espacement des nappes de renforcement. Cet angle passe de 19° pour le sable non renforcé à 33° pour le sable renforcé par 5 nappes où l'espacement est égal à 11,5mm. On note aussi que cette variation croît selon une relation quasi-linéaire.

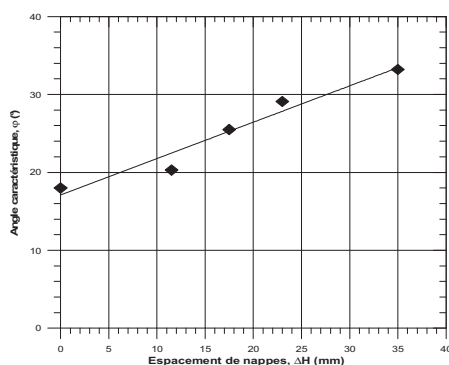


Figure 5. Influence du matériau de renforcement sur l'angle caractéristique

3. Effets d'échelle dans l'expérimentation

Les résultats obtenus à partir des essais expérimentaux sont limités à une échelle réduite et ne peuvent pas, dans ce cas, être appliqués aux ouvrages géotechniques. Toutefois, ils représentent un guide important dans l'analyse complète de l'effet de renforcement des sables par les géosynthétiques et permettent aussi de répondre aux problèmes rencontrés dans la réalisation d'ouvrages de renforcement. Pour déterminer l'écart entre les résultats du modèle réduit et ceux calculés par les équations semi empirique développés pour des échantillons de plus grande taille, la charge axiale maximale sera prise en compte dans la vérification. Pour le cas d'un renforcement par nappe circulaire de géosynthétique, la charge axiale maximale P_{\max} de l'essai triaxial a été développée par Chandrasekaran et al. (1989) selon la relation suivante:

$$P_{\max} = \pi \sigma_3 \frac{K_{av}}{K_a} \frac{RD}{\tan(\alpha \phi_a)} \left[\exp\left(\frac{\tan(\alpha \phi_a) R}{DK_{av}} - 1 \right) \right] \quad [1]$$

Avec σ_3 : la pression de confinement, K_{av} : est le coefficient de pression latérale des terres, cette valeur est prise comme la moyenne du coefficient de Rankine de la

pression active des terres K_a et le coefficient K_b à cause de la rotation des axes principaux de contrainte au sein de la masse du sol entre les nappes de textiles.

$$K_b = \frac{1}{1 + 2 \tan^2 \varphi} \quad [2]$$

Avec φ : est l'angle de frottement interne du sol.

R est le rayon de l'échantillon, D est l'espacement entre les nappes de renforcement et α est le coefficient qui dépend du frottement effectif mobilisé le long de l'interface sol-textile, cependant la valeur de α est égal à 1 pour le film de polyester avec (R/D) supérieur ou égal à 1. La valeur de α est très inférieure pour les géotextiles et les géogrilles à cause de la faible rigidité comparée au film de polyester qui peut être prise égale à 0.65.

Dans la présente étude, le sable non renforcé à une valeur φ_{\max} de 32.7°, 32.4° et 25.8° pour $\sigma_3=50, 100, \text{ et } 200$ kPa respectivement. L'angle de frottement d'interface maximal (φ_{\max}) d'une nappe de renforcement (1 NP) est obtenu égal à 34.8°, 30.2° et 26.4° pour les mêmes valeurs σ_3 respectivement cité précédemment. Pour les échantillons renforcés par 2 nappes, 3 nappes et 5 nappes, φ_{\max} est égal à 30°, 34.1° et 38.5° respectivement pour $\sigma_3=100$ kPa. Le tableau 1 présente une comparaison entre les valeurs de la charge maximale observés lors des essais et ceux obtenues théoriquement. On note que l'écart entre ces valeurs n'est pas important quelque soit le type de renforcement testé, en particulier aux contraintes de confinement inférieur à 200 kPa. Par conséquent, il est très approprié d'utiliser qualitativement les résultats de ces expériences à petite échelle dans les ouvrages renforcés.

Sable renforcé	σ_3 (kPa)	Espacement Δh (mm)	P_{\max} calculée (kN)	P_{\max} expérim. (kN)
Par 1 nappe	50	35	0.75	0.66
	100	35	1.34	0.99
	200	35	2.11	1.56
Par 2 nappes	100	23	1.34	0.99
Par 3 nappes	100	17.5	1.44	1.27
Par 5 nappes	100	11.5	1.62	1.64

Tableau 1. Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées de la charge maximale

4. Modélisation du comportement du sable renforcé

Plaxis est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un

modèle plan ou axisymétrique. Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. La modélisation par élément finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol.

Pour traiter un problème de sol dans un essai triaxial drainé, il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Le modèle demande la détermination de cinq paramètres qui sont : E et ν (paramètres d'élasticité) et c , φ et ψ (paramètres classiques de la géotechnique), certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

Dans cet article, nous donnons un résumé des résultats les plus importants obtenus à partir d'une simulation numérique par éléments finis des essais triaxiaux pour un sable renforcé par des nappes de géosynthétiques (nappes). La charge appliquée est de 100 kPa pour le modèle. L'élément choisi est un élément triangulaire à 15 nœuds. Par conséquent, un maillage de 256 éléments a été adopté. Le renforcement est simulé à une nappe de géogrille de rigidité axiale EA de 51.8 kN/m. Les principaux résultats sont les déplacements et les contraintes pour déplacement prescrit vers le bas de 20%. Quelques résultats typiques de déviateur de contraintes – déformations, de contraintes de cisaillement et de déplacements horizontaux sont présentés dans les figures 6, 7 et 8 respectivement, des échantillons de sol non renforcé et renforcé par des nappes espacées de 1/6 à 1/2 de la hauteur du modèle.

Les résultats obtenus dans la figure 7 montrent que la simulation numérique en utilisant le code éléments finis (Plaxis) donne des résultats concordant de manière satisfaisante avec les résultats d'essais réalisés en laboratoire sur modèles réduits. L'introduction des nappes de géogrilles augmente considérablement le déviateur de contraintes du sable et réduit le déplacement horizontal de l'échantillon.

Dans la figure 7, on remarque que le déplacement horizontal de l'échantillon est beaucoup plus grand dans le cas non renforcé par rapport aux échantillons renforcés par les nappes géosynthétiques. Dans les cas des échantillons renforcés on a des déplacements horizontaux au niveau de la zone proche des nappes de renforcement, et ceci s'explique par le fait que la résistance à la traction de la nappe mobilise le comportement du sol vis – à – vis des glissements. On note aussi que les déplacements des échantillons renforcés diminuent inversement en fonction de l'espacement entre les nappes. Cette diminution est l'ordre de 14 % à 45% concernant les nappes à espacement faible. Ce qui peut être due à l'effet de

confinement de renforcement géosynthétiques.

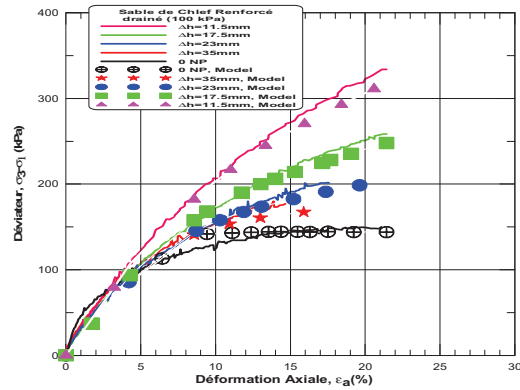


Figure 6. Comparaison des résultats de simulation et données expérimentales du comportement du sable renforcé

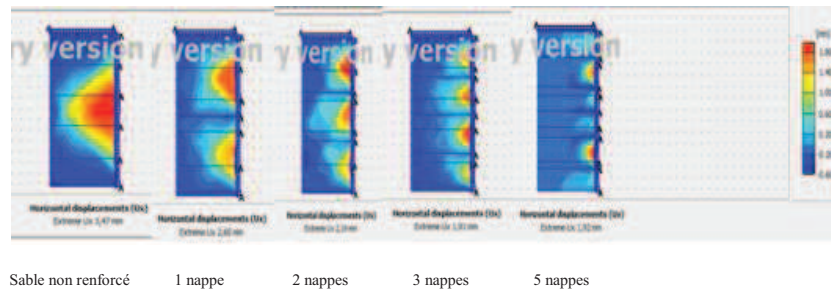


Figure 7. Observation des déplacements horizontaux

La figure 8 illustre les contraintes relatives de cisaillement pour différents échantillons de sable non renforcé et renforcé par des nappes géosynthétiques. D'après les résultats trouvés par simulation numérique en utilisant le logiciel Plaxis, on remarque que l'inclusion des nappes géosynthétiques dans le sol diminue la contrainte de cisaillement. En particulier, pour les espacements de 17.5 et 11.5 mm où la contrainte de cisaillement est presque localisé en dehors de la zone des nappes de renforcement, on peut interpréter aussi par la réduction de résistance de cisaillement due au sol renforcé par des nappes synthétiques par l'influence de la rigidité de la nappe dans le sol. Cette rigidité donne une résistance de traction à la nappe qui reprend les efforts normaux en travaillant comme une membrane.

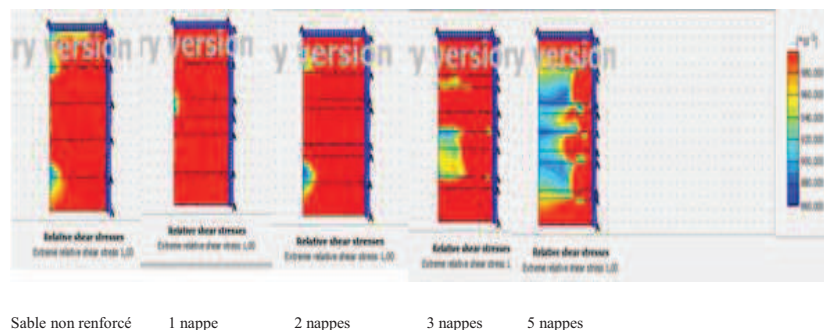


Figure 8. *Observations des Contraintes de cisaillement*

5. Conclusions

Bien que les résultats soient partiels, on note que, le renforcement par inclusion des nappes plastiques apporte un gain de résistance maximale appréciable au sable sous charges monotones. Les essais montrent que les contraintes déviatoires monotones augmentent lorsque les nappes plastiques deviennent faiblement espacées et un accroissement de la phase de contractance de ce matériau. L'inclusion des nappes plastiques réduit la dilatance de l'échantillon (Madhavi et al., 2007). Cette réduction est prononcée pour les petites déformations. La présence des nappes plastiques, avec un faible espacement entre eux, augmente très fortement l'angle caractéristique et le module de déformation sécant, mais qu'elles n'affectent pas son angle de frottement et de dilatance.

Du point de vue, effet d'échelle, l'écart entre les valeurs obtenues expérimentalement et celles calculées par des formules empiriques n'est pas important quelque soit le nombre de renforcements testés, en particulier aux contraintes de confinement inférieur à 200 kPa. Par conséquent, il est très approprié d'utiliser qualitativement les résultats de ces expériences à petite échelle dans les ouvrages renforcés.

Les résultats obtenus montrent que la simulation numérique en utilisant la méthode des éléments finis (Plaxis) donne des résultats concordant de manière satisfaisante avec les résultats d'essais réalisés en laboratoire sur modèles réduits. L'introduction des nappes de géosynthétiques augmente considérablement la résistance maximale du sol et réduit les déplacements de l'échantillon.

6. Bibliographie

- Consoli N. C., Montardo J. P., Prietto P.D.M., Passa G. S., « Engineering behaviour of sand reinforced with plastic waste». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128,n° 6, 2002, p.462-472.
- Haeri S. M., Noorzad R., Oskoorouchi A. M., «Effect of géotextile reinforcement on the mechanical behaviour of sand». *Géotextiles and Géomembranes*, n° 18, 2000, p. 385-402.
- Khedkar M. S., Mandal J. N. «Behaviour of Cellular Reinforced Sand Under Triaxial Loading Conditions». *Geotechnical Geologic Engineering*, n° 27, 2009, p.645-658.
- Madhavi L. and Vidya S. M. «Effects of Reinforcement Form on the Behaviour of Géosynthétic Reinforced Sand». *Geotextiles and Geomembranes*, n° 25, 2007, p. 23-32.
- Messas T., «Caractérisation et renforcement des sols avec inclusion de nappes plastiques souples discontinues». *Revue Française de Géotechnique*, n° 87, 1999, p. 55-62.
- Nouri S., Laradi N., «Renforcement et amélioration des sols par l'utilisation des déchets de matières plastiques». *Colloque International de Géotechnique, Beyrouth*, 19-22 Mai 2004, p. 309-316.
- Rakotondramanitra J. D. «Renforcement des Sols par des Nappes de Déchets de Matières Plastiques». Thèse de doctorat, Université Lyon I, 1988.